



ACTES DU COLLOQUE



Table des matières

Valorisation des ingrédients de microalgues en santé humaine : chaire d'application " Bone Health ", Goncalves Olivier [et al.]	1
Décomposition automatique d'un enregistrement de 12 heures sur une marche "Roanne - Thiers" de 57 km en différentes portions, Bonnardot Frédéric	5
Mange-t-on des Microplastiques ? Pas si simple à détecter dans le jambon, Finel Angèle [et al.]	8
Valorisation de composés phénoliques d'un effluent de brasserie : influence des matériaux membranaires et du pH sur les performances d'une chaîne de récupération par procédés membranaires, Pasquet Paul-Loup [et al.]	11
Etude de l'extraction de la lignine de biomasses lignocellulosiques par des solvants eutectiques profonds, Provost Virgile [et al.]	14
L'agir communicationnel au service de la construction de connaissances autour d'une thématique, le bien-être, mis en œuvre dans le cadre d'une démarche participative en Sumène Artense dans le Cantal., Agbessi Eric	17
Optimisation de la synthèse enzymatique du monolaurylsuccinate, précurseur du lauryl succinate propane de glucose, Spalletta Alexis [et al.]	20
Développement d'un nouvel outil de concentration et de quantification de SARS-CoV-2 dans les eaux usées, El Soufi Ghina [et al.]	23
Développement de revêtements antifouling écoresponsables, Azemar Fabrice	26

La " Permeability glycoprotein " (P-gp) : un biomarqueur de la résistance cellulaire applicable en Santé & Environnement, Maxime Dubois [et al.]	29
Optimisation d'une production industrielle de bactériophages en système Cell-stat, Caffin Céleste [et al.]	32
Alternative à l'urée synthétique utilisée en production de spiruline : Essais de culture sur engrais azoté à base d'urine humaine concentrée, Denis Eva [et al.]	35
La Waide (<i>Isatis tinctoria</i> L.), plante historique des Hauts-de-France, source de métabolites secondaires pour des applications colorantes et biologiques Extraction, caractérisation, formulation, modulation des propriétés, Vauquelin Romain	38
<i>Caenorhabditis elegans</i> , un modèle utilisé pour le criblage de microbiotes fromagers à effet santé, Bornes Stéphanie [et al.]	41
Extraction, caractérisation et purification de bactériocines provenant du complexe d'espèces bactérien <i>Ralstonia solanacearum</i> : vers une stratégie innovante dans la lutte contre le flétrissement bactérien, Ramin Mangata Stéphane [et al.]	45
Composition des communautés de coccinelles psylliphages en milieu insulaire tropical à la Réunion, Baujeu Marine [et al.]	48
Outils de modélisation de la chimie de l'atmosphère : Etude de l'accident de Fukushima Daiichi, Fevre-Nollet Valérie [et al.]	52
Estimation de mouvement de civelles par méthodes différentielles, Luthon Franck [et al.]	55
La biomécanique cellulaire au service de la santé : Application à la Dystrophie Musculaire de Duchenne, Féréol Sophie [et al.]	58
Nanoparticules métalliques fonctionnalisées pour l'éradication de biofilm à la surface de condenseurs d'eau de rosée, Hemadi Miryana [et al.]	61
Elaboration de films biosourcés à base de cellulose et de protéines extraites	

des plumes de canards., Alvarez Sandra [et al.]	64
Génération en temps-réel d'un rythme cardiaque biomimétique pour stimulation in vitro, Faure Pierre-Marie [et al.]	67
Création d'une musique neuronale, Levi Timothée	70
Screening de communautés bactériennes issues de granules aérobies épuratifs, Dossat-Letisse Valérie [et al.]	73
Effets de bactéries PGPR du genre <i>Pseudomonas</i> sur la tolérance au stress hydrique chez le peuplier dans un contexte de réchauffement climatique., Hitmi Adnane [et al.]	76
Eradication du VIH : mythe ou réalité ?, Loustau Thomas	79
La mémoire de l'eau usée, ou l'importance d'une aquathèque dans le suivi épidémique via les eaux usées., Wallet Clémentine [et al.]	82
Prévalence contrastée des souches de l'agent causal du flétrissement bactérien (le complexe d'espèces <i>Ralstonia solanacearum</i>) dans les îles du sud-ouest de l'océan Indien, Nomenjanahary Marie Veronique [et al.]	85
Criblage de la biodiversité des plantes tinctoriales de l'île de la Réunion pour des applications en coloration industrielle, Pithon Shamsia [et al.]	88
Etude des propriétés techniques et biologiques de deux sources naturelles de pigments issues de la biodiversité végétale endémique de Madagascar : <i>Acridocarpus excelsus</i> et <i>Harungana madagascariensis</i> , Andriamanantena Mahery [et al.]	91
Sélection par mutagenèse UV et caractérisation physiologique de souches mutantes de la levure <i>Saprochaete suaveolens</i> (anciennement <i>Geotrichum fragrans</i>) hyperproductrices de composés organiques volatils., Tan Melissa [et al.]	94
Criblage de la biodiversité microalgale de La Réunion à la recherche de sources potentielles d'astaxanthine, Jannel Samuel [et al.]	97

Caractérisations chimique et biologique en vue d'une valorisation d'espèces du genre <i>Weinmannia</i> endémiques : travaux préliminaires sur le tan rouge (<i>W. tinctoria</i>) de La Réunion, Pithon Shamsia [et al.]	100
Des mesures dans le bâtiment de l'IUT : un exemple de SAé pour la recherche, Boufkhad Yacine [et al.]	103
Récupération d'énergie électromagnétique avec une rectenna réalisée en impression 3D par dépôt de fil fondu, Fougeroux Tristan [et al.]	106
La restauration des écosystèmes : de l'amélioration des services écosystémiques à la restauration écologique, Rocher Léo [et al.]	109
<i>Biscutella rotgessii</i> Foucaud : une espèce végétale corse serpentinicole, Pereira Rodrigues Elisabeth [et al.]	112
Etude de chaîne de distribution optimale d'hydrogène dans les territoires insulaires : Exemple de la Corse, Moustapha Mai Tchougoune [et al.]	115
Stratégie de conception d'une micro-STEP (Station de Transfert Energétique par Pompage) solaire en Zone Non-Interconnectée (ZNI) en Colombie, Guignard Nathan	118
Collecter l'eau de rosée : un défi scientifique et sociétal, Royon Laurent [et al.]	121
Traitement des sédiments de dragage : Evolution d'un dépôt à terre et valorisation, Benamar Ahmed [et al.]	124
Fluxmètre thermique à faible résistance thermique et Applications, Ziouche Katir	127
Etude du déploiement du vecteur hydrogène en Corse, Chin Choi Maude [et al.]	130
Valorisation de déchets de fibres-ciment non amiantes en substitution du ciment dans des mortiers, Leklou Nordine	133

Etude et Conception de turbines d'éolienne recyclées pour accroître le taux d'électrification rural à Madagascar : Puissance et efficacité énergétique, Rajoharisoa L. A. [et al.]	136
La plateforme GREEN un laboratoire scientifique à forts potentiels pour la recherche, formation et R&D, Ramenah Harry	139
Démarche QHSSE en microbrasseries et perception de la qualité de la bière, Marcato-Romain Claire-Emmanuelle [et al.]	142
Installation d'un nanoréseau CC (Courant Continu) pour l'étude des gains énergétiques dans le secteur tertiaire à La Réunion, Bory Devisme Olivia [et al.]	145
Modélisation de l'évaporation et de la condensation à micro-échelle, Graur Irina [et al.]	148
Caractérisation et performances thermiques des fibres de Furcraea Foetida en tant que matériau isolant en vrac, Caillet Hélène [et al.]	151
Supervision et contrôle intelligent des climatiseurs individuels pour maîtriser l'énergie dans un bâtiment en zone tropicale, Murad Nour [et al.]	154
ISEE : Un système pour l'explication d'événements dans les environnements hybrides, Laborie Sebastien [et al.]	157
Vers la neutralité énergétique des objets connectés, Chetto Maryline [et al.]	160
Modèle d'apprentissage des habitudes pour la détection d'évènements à risques : Cas d'une expérimentation technologique en maisons partagées, Maligne Laura [et al.]	163
Estimation automatique du ressenti conducteur dans les ADAS, Yang Fan	166
Workshop Interdisciplinaire en Master sur la mise en oeuvre d'un procédé robotisé d'impression 3D pour la construction en Outre-mer, Subrin Kévin [et al.]	169

Étude et développement d'un convertisseur réversible adapté aux applications HEMS, Aouichak Ismail [et al.]	172
Planification de trajectoire d'un chariot autonome à fourche, Pascal Julien [et al.]	175
La perception multi-capteur : Un transfert recherche - enseignement pour les nouveaux métiers des véhicules à conduite automatisée, Rodriguez Florez Sergio Alberto [et al.]	178
Optimisation du Covoiturage entre Particuliers : étude du problème de covoiturage dynamique à sauts multiples, Fevre Corwin [et al.]	181
La compression des signaux, résultat d'une approche par objectif, dans un contexte de ressources limitées – Scilab, LAME, WAV, MP3, Maréchal Pierre [et al.]	184
Proposition d'un agenda de recherche interdisciplinaire sur les innovations dans les véhicules autonomes en logistique, Duché David	187
PyScada : Logiciel de supervision libre et générique, Larroque Benoit [et al.]	190
Gouvernance des données basée sur le web sémantique, Laamech Nouha [et al.]	193
Le Cartable Distant : une plateforme dédiée aux enseignements pratiques à distance, un outil pour l'hybridation des formations technologiques, Darracq Bruno [et al.]	196
Plate-forme nano-robotique radar à 60 GHz, Haddadi Kamel [et al.]	199
Plate-forme médicale intégrée à un simulateur immersif de conduite, Haddadi Kamel [et al.]	202
Assistance d'un robot collaboratif pour le versement du thé à la menthe, Nouaille Laurence [et al.]	205
Synthèse de films de diamant par CVD: développement et optimisation du	

procédé pour des applications dans le domaine des technologies quantiques, Achard Jocelyn [et al.]	208
Adjuvantation Biosourcée pour Ecomatériaux Isolants, Aguiabi Kawther	211
Etude et développement d'une résine biosourcée à base de colophane de pin maritime (Pinus pinaster), Gouty Quentin [et al.]	214
Suivi de la cuisson d'un composite fibres de carbone / matrice polymère à l'aide d'une méthode d'impédancemétrie spécifique, Olivier Philippe [et al.]	217
Propriétés élastiques effectives d'éprouvettes issues d'une impression 3D, dans un contexte d'optimisation des propriétés – FreeCAD, PrusaSlicer, Scilab, Maréchal Pierre [et al.]	220
Détermination rapide des propriétés de fatigue des structures en composites stratifiés multidirectionnels basée sur la thermographie infrarouge, Gong Xiaojing	223
Caractérisation mécanique par indentation instrumentée des matériaux métalliques, Mauvoisin Gérard	226
Caractérisation mécanique des matériaux des mécanismes de siège automobile, Bartier Olivier [et al.]	229
Valorisation des cendres volantes de biomasse dans des blocs bétons : Projet ADEME BIMGC, Djelal Chafika [et al.]	232
RILEM TC 266-MRP : Essais rhéologiques interlaboratoires à l'IUT de Béthune, Vanhove Yannick [et al.]	235
Apports de calculs atomistiques pour identifier les corrélations entre propriétés structurales et élastiques d'alliages de couches minces de verres métalliques Zn(Zr,Mg), Djemia Philippe	238
Transition énergétique : les matériaux métalliques pour la filière hydrogène. Genèse d'un projet de club étudiants / chercheurs du programme ORION, Grosdidier Thierry [et al.]	241

"Mener l'enquête" : Les Saé comme espace d'accueil des méthodologies de recherche en SHS : Cas particulier de l'étude des pratiques de lecture des jeunes sur plateformes numériques., Rio Florence [et al.]	244
Raccrocher les futurs décrocheurs : Appropriation, compréhension et mise en œuvre des dispositifs " oui-si ", Lefeuvre Sonia	248
Les candidats et les conseillers municipaux européens aux élections municipales françaises, Gouard David	251
Comportement d'achat et durabilité : les nouveaux enjeux liés aux usages des applications et des services mobiles, Ledjou Jean-Michel	254
"Approche par compétences ou approche expérientielle : comment penser l'alternance au sein du Bachelor Universitaire de Technologie ?", Tralongo Stéphanie	257
Le sport dans la presse écrite jeunesse : ce que Le Petit Quotidien fait au genre, Guérandel Carine	260
Migrations environnementales et déplacés climatiques : quelle prise en charge par les médias d'information en continu ? L'exemple de BFM TV., Vimbert Raphaëlle	263
Les liaisons dangereuses de l'écologie avec l'économie, Rolland Thierry	266
Pourquoi écrit-on des fanfictions ? Entre réception et inscription de soi en discours, Bigey Magali	269
La digitalisation de la Supply Chain comme aide à la création d'un Business Model Durable, Bédé Didier [et al.]	272
Pratiques de recrutements en formation et critères de sélection : représentations des équipes pédagogiques en IUT, Ferrari Anne-Laurence [et al.]	275
Compétences communicationnelles, formation pour les métiers du commerce, Specogna Antonietta [et al.]	278

Analyse communicationnelle d'un projet de développement orienté vers les jeunes et adolescents camerounais : la participation en question, Kamtchueng Dolorès	281
Des formations qualifiantes pour l'emploi : quel avenir pour les licences professionnelles et le BUT ?, Mouline Aziz	284
Etre ou souffrir ? Le rôle du sacré et des émotions dans le déverrouillage d'investissements agricoles plus respectueux de l'environnement., Akimowicz Mikaël	287
Genre et travail Propos juridique et économique, Julien Mathilde [et al.]	290
L'impact du goût sur la valeur de l'expérience : le cas des produits locaux élaborés par des micro-producteurs, Guguen-Gicquel InÈs [et al.]	293
Analyse juridique du phénomène du présentéisme du personnel soignant, Dedessus-Le-Moustier Nathalie	296
Innovation pédagogique au croisement de la sociocratie et de la communication nonviolente : apports croisés de la recherche et de la formation, Carbonnel Anne	299
Le bien-être au travail (BET) des collaborateurs japonais, Szymkowiak Sophie [et al.]	302
L'influence de l'engagement virtuel incarné : une analyse orientée vers le comportement d'achat du joueur de MMORPG en 3D., Reiter Alan [et al.]	305
Simulation des effets systémiques de deux mesures climatiques inédites et contraignantes sur l'aire urbaine de Bordeaux : La suppression des logements énergivores à la location et la mise en œuvre des ZFE-M Zones Faibles Emissions – Mobilité, Zerguini Seghir [et al.]	308
Contribution à la modélisation de la Supply Chain pour le pilotage, l'évaluation de la performance et l'intégration des technologies de l'industrie 4.0 : Application au cas automobile de PSA Maroc, El Kihel Yousra [et al.]	311
La perception des femmes sur les motivations de choix de carrières en logis-	

tique et supply chain, Zouari Dorsaf [et al.]	314
Liste des participants	318
Liste des auteurs	321

Valorisation des ingrédients de microalgues en santé humaine : chaire d'application

« Bone Health »

Olivier Gonçalves¹, Anthony Massé¹ Arnaud Dulom², Valérie Trichet², Pierre Weiss² Imma Gifuni³, Olivier Lépine³ Tuan Huy NGUYEN⁴

olivier.goncalves@univ-nantes.fr anthony.masse@univ-nantes.fr arnaud.dulom@univ-nantes.fr
valerie.trichet@univ-nantes.fr pierre.weiss@univ-nantes.fr imma.gifuni@algosource.com
olivier.lepine@algosource.com tuan.nguyen@golivertx.com

¹ IUT, Nantes Université

GEPEA UMR CNRS 6144, 37 Bd de l'Université, 44600 Saint-Nazaire

² Nantes Université

RMeS UMR CNRS 1229, Faculté d'Odontologie 1 place Alexis Ricordeau
44000 NANTES

³ Algosource, 7 Rue Eugène Cornet, 44600 Saint-Nazaire

⁴ Goliver Therapeutics, BP70721, 8 Quai Moncoussu, 44007 Nantes

Thèmes – Chimie - Biologie - Santé

Résumé – *La chaire industrielle régionale « Bone Health » se propose d'initier un programme de recherche collaboratif interdisciplinaire entre chercheurs et acteurs industriels de l'ingénierie et de la santé. Le consortium du projet souhaite développer de nouveaux ingrédients issus de microalgues pour des applications futures en médecine régénérative ciblant les pathologies de l'os et du cartilage, et les cellules souches pluripotentes (CSPs) pour produire des biomédicaments. La démarche proposée repose sur une recherche scientifiquement et technologiquement mature focalisée sur l'extrapolation des cultures de microalgues à l'échelle industrielle et la recherche élargie d'activités ciblant les fonctions biologiques des cellules du tissu squelettique. A cette démarche d'innovation sera associée une approche plus exploratoire (dite de ressourcement) qui permettra d'estimer le potentiel des fractions issues de microalgues pour des applications futures en ingénierie ostéoarticulaire. Les efforts seront principalement menés sur la caractérisation et la purification des exopolysaccharides en tant que source d'ingrédients entrant dans la composition d'hydrogels.*

Mots-Clés – Microalgues, Exopolysaccharides, Médecine régénérative, Nanomédecine, Biomatériaux.

1 Introduction et contexte

Les défauts des tissus squelettiques (os ou cartilage) lorsque non traités, sont des facteurs de risques importants du développement de handicaps (défaut osseux) ou d'arthrose (défaut cartilagineux). La communauté scientifique et médicale cherche depuis plus de 20 ans des solutions thérapeutiques pouvant conduire à la réparation de ces défauts du tissu squelettique [1]. Les stratégies classiquement développées pour la régénération des tissus squelettiques s'orientent vers l'emploi de substituts (osseux ou cartilagineux), mais aussi vers des procédures d'ingénierie tissulaire utilisant des biomatériaux et des cellules souches [2,3]. L'une des orientations empruntées par la recherche en ingénierie des tissus squelettiques consiste à fabriquer des tissus *in vitro* ou *in vivo*, en employant des cellules souches, des facteurs de croissance et des biomatériaux [4–6]. Cela suppose notamment (1) de maîtriser le cycle de vie des cellules et (2) de choisir le biomatériau idéal qui intégrerait les contraintes mécaniques auxquelles doit se plier le nouveau tissu et la compatibilité biologique et biochimique vis-à-vis des objets enchâssés dans sa matrice.

2 Antériorité et présentation du consortium

La société Algosource a démontré qu'il était possible d'employer des extraits de microalgues pour des applications en santé humaine, validant cliniquement les effets antioxydants de ces molécules sur des cohortes de sujets en syndrome métabolique. Une étude (Algosource+CHU Nantes) est actuellement en cours sur des patients suivant une chimiothérapie (dépôt de brevet en cours : R35739WO). Plus récemment, des extraits provenant d'une autre cyanobactérie (A.f.a.) ont été employés pour des tests de bioactivité *in vitro* et sur cohorte de patients pour la stimulation de la prolifération des cellules souches circulantes. Les résultats obtenus ont laissé entrevoir tout un panel d'interactions biologiques des extraits d'A.f.a. utilisés en tant qu'additif et ce sans les effets secondaires classiquement observés avec les molécules de référence (anti-inflammatoire, antioxydant, biostimulant, différenciation des cellules souches, ...) [7–9]. Cette piste des molécules marines se montre donc très prometteuse pour leur capacité à protéger les cellules des agressions extérieures ou bien encore pour leur capacité à agir sur la différenciation cellulaire et leur croissance. Ainsi, leur utilisation comme additif voire même comme substituts biosourcés des facteurs de croissance ou de différenciation cellulaire, constituerait dans le cadre des thérapies de régénération des tissus squelettiques, une véritable rupture puisque issu d'une ressource renouvelable et présentant peu ou pas d'effet secondaire. Une solution potentiellement très innovante à court terme pourrait ainsi émerger pour ces cibles cliniques.

En parallèle, RMES a développé ces 5 dernières années, plusieurs stratégies de réparation des tissus squelettiques impliquant l'utilisation de biomatériaux qui répondraient à toutes les exigences d'une application clinique. La piste des exo-polysaccharides marins (EPS) s'est montrée particulièrement prometteuse, car capables d'interagir avec les facteurs de croissance [10], de stimuler la différenciation des cellules souches ou d'être formulés en tant qu'hydrogels polysaccharidiques (réparation du cartilage) [11]. Ces EPS pourraient également être exploités avec les derniers développements de RMES sur les ciments au phosphate de calcium combiné avec de la moelle osseuse totale pour des utilisations futures en technologie d'impression 3D (réparation des os) (brevet : [12]) [13]. Ainsi parmi les nouveaux biomatériaux disponibles, les polysaccharides (et plus particulièrement les EPS marins) constitueraient une famille de composés, à très fort potentiel aussi bien pour leurs propriétés rhéologiques que biologiques.

De son côté, la société GoLiver Therapeutics, spin-off de l'Inserm et de Nantes Université, spécialisée dans le développement de Médicaments de Thérapie Innovante (MTI), de thérapie cellulaire pour réparer le foie sans greffe a développé iMillenium™, une plateforme de bioproduction industrielle à grande échelle (milliards de cellules), fiable, sûre et très économe, basée sur la technologie des cellules souches pluripotentes. Elle a pu mettre en avant son premier candidat médicament GLTX-001, une suspension injectable de cellules du foie, allogéniques, congelées et prêtes à l'emploi pour traiter l'insuffisance hépatique aiguë chez des patients en attente d'une greffe. En évitant ainsi la greffe de foie, GLTX-001 change le paradigme de soins de toutes les maladies hépatiques. Si GoLiver Therapeutics s'est d'abord focalisée sur le foie, sa thérapie cellulaire est capable d'offrir des solutions pour soigner d'autres organes, comme le cœur et les poumons, grâce aux propriétés pro-régénératives, anti-inflammatoires et anti-oxydantes de sa substance active. La société envisage donc d'élargir ses applicatifs vers d'autres domaines de la santé, impliquant par conséquent la recherche de nouveaux sourcing bioactifs. Les actifs provenant des extraits de microalgues constituent dans ce cadre une piste très originale et prometteuse, comme l'a notamment démontré Algosource pour les activités antioxydantes. GoLiver Therapeutics étant de plus lauréate du plan de relance pour l'industrie-Secteur stratégique (2021), du Sceau d'excellence de la Commission européenne (2020), du France French Transfer Invest (2019), du French Tech Seed (2019) et du Grand Prix i-LAB (2016), cela constitue un écosystème très favorable à ce type d'investigation.

Dans ce contexte et fort de ces données prometteuses, la production et la caractérisation des petites molécules et des EPS d'origine marine présentant des propriétés rhéologiques et biologiques originales est aujourd'hui considéré comme un axe de recherche à fort potentiel de valorisation, notamment dans le domaine de la thérapie des tissus squelettiques. Cependant avant que ces approches ne soient portées jusqu'au stade des essais cliniques et donc employables sur l'homme, il reste encore quelques efforts d'innovation (cas des petites molécules marines) et de recherche (cas des EPS marins) pour confirmer ces activités et propriétés. De tels composés se doivent en effet d'être biocompatibles, stérilisables, peu fragiles, non immunogènes, etc.

3 Objectifs de la chaire d'application

Deux axes seront traités conjointement dans ce projet car stratégiquement prioritaires en ingénierie tissulaire (Figure 1). On se focalisera sur (1) l'amélioration de la maîtrise du cycle de vie des cellules souches employées pour la régénération osseuse et cartilagineuse (prolifération, différenciation et fonctionnalisation) et sur (2) le développement d'un biomatériau idéal qui intégrerait les contraintes mécaniques et biologiques auxquelles doit se plier le nouveau tissu. Un premier axe, mature scientifiquement parlant, se concentrera sur l'évaluation des métabolites secondaires de microalgue pour la recherche d'un panel élargi d'activités ciblant les fonctions biologiques des cellules des tissus squelettiques et des cellules souches pluripotentes. Un deuxième axe, plus exploratoire quant à lui, consistera à évaluer le potentiel de nouveaux biomatériaux intégrant dans leur formulation des macromolécules de microalgues (EPS - pour la formulation d'hydrogel entrant dans la composition d'encres pour la bioimpression). Les conditions de production de ces fractions seront investiguées sur deux modèles biologiques chez les partenaires du projet.

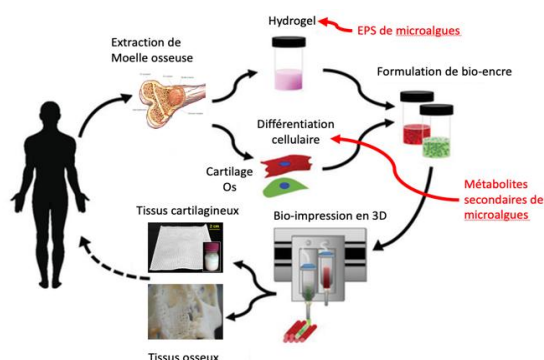


Figure 1 : principe de la reconstruction tissulaire personnalisée (inspiré de [14])

La production artificielle de tissus squelettiques utilisant la fabrication additive nécessite le développement de bio-

encre formulés en molécules support pour le maintien et la préservation des cellules souches employées pour la reconstruction (macromolécules structurantes comme les polysaccharides) et en additifs améliorant la viabilité et la différenciation de ces cellules (petits métabolites). Les EPS et métabolites secondaires de microalgues pourraient proposer de nouveaux candidats très innovants entrant dans la formulation de ces bio-encres.

4 Remerciements

Les auteurs expriment toute leur gratitude au principal financeur, la Région des Pays de la Loire (dispositifs Chaire d'application et Thèse Tandem).

Références

- [1] C. Vinatier and J. Guicheux, *Ann. Phys. Rehabil. Med.* **59**, 139 (2016).
- [2] P. Corre, C. Merceron, J. Longis, R.H. Khonsari, P. Pilet, T.N. thi, S. Battaglia, S. Sourice, M. Masson, J. Sohier, F. Espitalier, J. Guicheux, and P. Weiss, *Acta Biomater.* **26**, 306 (2015).
- [3] P. Corre, C. Merceron, C. Vignes, S. Sourice, M. Masson, N. Durand, F. Espitalier, P. Pilet, T. Cordonnier, J. Mercier, S. Remy, I. Anegon, P. Weiss, and J. Guicheux, *PLoS ONE* **8**, e81599 (2013).
- [4] H. Hibi, Y. Yamada, M. Ueda, and Y. Endo, *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* **35**, 551 (2006).
- [5] H.-H. Horch, R. Sader, C. Pautke, A. Neff, H. Deppe, and A. Kolk, *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* **35**, 708 (2006).
- [6] M. Gimbel, R.K. Ashley, M. Sisodia, J.S. Gabbay, K.L. Wasson, J. Heller, L. Wilson, H.K. Kawamoto, and J.P. Bradley, *J. Craniofac. Surg.* **18**, 895 (2007).
- [7] J.J. Merino, M.E. Cabaña-Muñoz, and M.J. Pelaz, *J. Pers. Med.* **10**, 49 (2020).
- [8] G.S. Jensen, A.N. Hart, L.A.M. Zasko, C. Drapeau, N. Gupta, D.J. Schaeffer, and J.A. Cruickshank, *Cardiovasc. Revascularization Med. Mol. Interv.* **8**, 189 (2007).
- [9] D.R. Shytle, J. Tan, J. Ehrhart, A.J. Smith, C.D. Sanberg, P.R. Sanberg, J. Anderson, and P.C. Bickford, *Med. Sci. Monit. Int. Med. J. Exp. Clin. Res.* **16**, BR1 (2010).
- [10] C. Merceron, S. Portron, C. Vignes-Colombeix, E. Rederstorff, M. Masson, J. Lesoeur, S. Sourice, C. Sinquin, S. Collic-Jouault, P. Weiss, C. Vinatier, and J. Guicheux, *Stem Cells Dayt. Ohio* **30**, 471 (2012).
- [11] E. Rederstorff, G. Rethore, P. Weiss, S. Sourice, S. Beck-Cormier, E. Mathieu, M. Maillason, Y. Jacques, S. Collic-Jouault, B.H. Fellah, J. Guicheux, and C. Vinatier, *J. Tissue Eng. Regen. Med.* **11**, 1152 (2017).
- [12] Weiss P., P. Layrolle, Clergeau, L. P. L. P., Enckel, B., Pilet, P., Amouriq, Y., and Giumelli, B., • WO 2008023254 A1 (2008).
- [13] J. Zhang, W. Liu, O. Gauthier, S. Sourice, P. Pilet, G. Rethore, K. Khairoun, J.-M. Boulter, F. Tancret, and P. Weiss, *Acta Biomater.* **31**, 326 (2016).
- [14] N. Noor, A. Shapira, R. Edri, I. Gal, L. Wertheim, and T. Dvir, *Adv. Sci.* **6**, 1900344 (2019).

Décomposition automatique d'un enregistrement de 12 heures sur une marche "Roanne - Thiers" de 57 km en différentes portions

Frédéric Bonnardot¹ Sylvie Bigouraux Nabih Nejjar¹

frederic.bonnardot@univ-st-etienne.fr

¹ Univ Lyon, UJM Saint Etienne, LASPI, EA 3059
F-42334, IUT de Roanne, France

THÈMES – *Santé - Informatique*

RÉSUMÉ – *L'objectif de cet article est de décomposer un signal de marche de 12 h en différentes portions (ayant une forme similaire) et de reconnaître les différentes formes de foulées dans le signal. Une première partie présente le signal de marche : son acquisition et un prétraitement visant à compenser les fluctuations de vitesse. Une seconde partie explique comment former des groupes de foulées consécutives identiques. Une troisième partie montre comment identifier parmi tous ces groupes différentes foulées ayant une forme similaire et les étiqueter. Enfin, une interprétation des résultats montre qu'il existe un lien entre deux formes identifiées et le profil altimétrique.*

MOTS-CLÉS – *Analyse de la marche, Cyclostationnarité, Partitionnement*

1 Introduction

Les signaux de marche sont cycliques. Il est possible d'exploiter cette propriété en utilisant les outils cyclostationnaires pour détecter des informations telle que la fatigue [1]. Généralement l'analyse est faite sur des signaux courts (quelques minutes). Notre article s'intéresse aux signaux de marche de très longue durée enregistrés en continu (11h48 dans notre cas). Ce type de signal est cyclique, mais, les conditions de marche (pente, vitesse, ...) ne peuvent plus être considérées comme constantes. Ainsi, il est proposé de considérer que chacune de ces conditions engendre un processus cyclostationnaire particulier pour chaque foulée, le signal associé à une foulée est alors une réalisation d'un de ces processus. Cette soumission propose une solution pour trouver le motif associé à chacun des processus et de le localiser dans le signal.

2 Le signal de marche

Le signal a été enregistré à l'aide d'une application développée pour les téléphones de type Android présentée dans [2]. Cette application enregistre toutes les 4 ms les vibrations perçues par le capteur accélérométrique du téléphone.

La figure 1 montre le signal découpé en tranches superposées. On peut voir sur cette figure l'apparition d'un motif associé à la pose du pied au sol (5 motifs par tranche). Les motifs ne sont pas alignés d'une tranche à l'autre à cause de la fluctuation de la vitesse de marche.

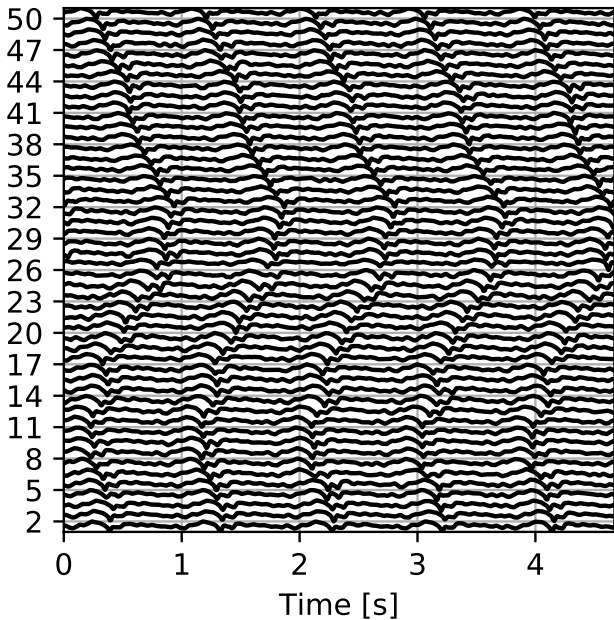


FIGURE 1 – Superposition de tranches du signal.

Afin de tirer partie du caractère répétitif de ce signal,

nous l'avons ré-échantillonné en détectant la position des motifs associés à chaque pas et en venant dilater ce signal (interpolation) afin d'aligner ces motifs (plus de détails dans [3]). La figure 2 montre le résultat (les lignes sont espacées de 160 foulées pour montrer la qualité du ré-échantillonnage). L'axe des abscisses n'est plus un temps mais un "cycle" (2π par foulée).

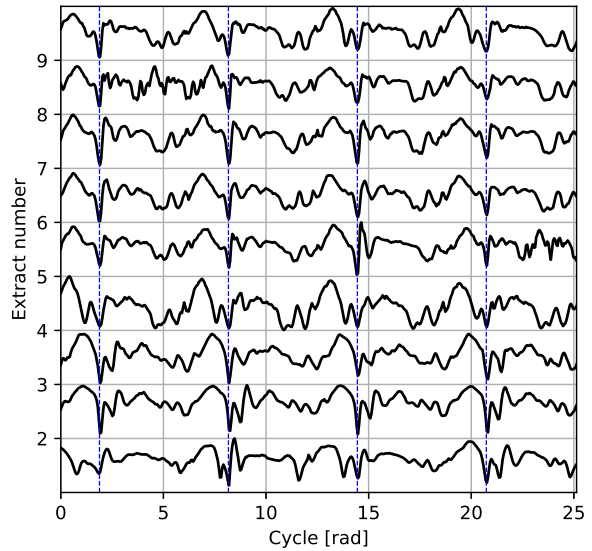


FIGURE 2 – Après ré-échantillonnage (chaque ligne est espacée de 160 foulées).

3 Regroupement de foulées

Au vu de la durée de la marche, de l'évolution du profil, des différences sont susceptible d'apparaître sur la forme du signal $y_k(\theta_n)$ associé à une k^{ieme} foulée.

Sur la figure précédente, nous pouvons voir des motifs qui se ressemblent. Il apparait alors intéressant d'identifier des groupes de motifs similaires durant cette marche. Pour cela,

- la ressemblance entre la k^{ieme} foulée et sa voisine est évaluée par la quantité $d_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (y_k(\theta_n) - y_{k+1}(\theta_n))^2$ qui caractérise l'écart entre les deux foulées,
- des groupes sont formés en cherchant les foulées successives qui sont proches les unes des autres ($d_k < \text{seuil}$),
- les groupes ne contenant pas un nombre significatif de foulées sont éliminés.

On obtient alors une série de groupes contenant chacun un ensemble de foulées successives proches.

Afin de caractériser chaque groupe, nous calculons le motif moyen obtenu en superposant chaque foulée du

groupe à la manière de la figure 2 et en réalisant une moyenne verticale appelée moyenne synchrone [4].

4 Recherche des groupes similaires

Afin de pouvoir identifier les groupes similaires, nous allons rechercher à trouver les groupes dont les motifs moyens sont similaires. Il s'agit d'un problème de partitionnement de donnée (clustering).

Cette identification des groupes similaires a été réalisée par des outils en classiques suivant deux étapes.

La première étape est une Analyse En Composante Principale qui permet de résumer chaque motif moyen en quelques valeurs synthétiques. La transformation utilisée est identique pour tous les motifs.

Si l'on réduit ainsi chaque motif moyen en trois caractéristiques, il est possible de représenter chaque motif par un point comme illustré sur la figure 3.

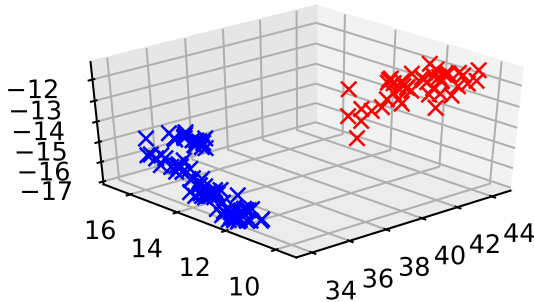


FIGURE 3 – Résultat de la PCA et DBSCAN.

On peut alors clairement distinguer deux groupes correspondant à deux "portions" ou type de motifs différents. Cette séparation visuelle peut être faite automatiquement par l'algorithme de partitionnement DBSCAN qui a identifié un groupe bleu et un groupe rouge.

A ce stade le signal a été découpé en groupes de plusieurs foulées similaires, chacun de ces groupes a été étiqueté comme appartenant à l'un des deux types de forme de foulée identifié.

5 Interprétation

Le profil altimétrique est montré sur la figure 4. Tous les 250 cycles, le nombre de cycles proche du motif rouge et du motif bleu sont calculés et représentés sur la figure avec un rectangle rouge et bleu. L'épaisseur de ces rectangles représente le nombre de cycles.

Une étude du profil altimétrique montre que la plupart du temps, lorsque l'on fait une ascension, le 2ème motif prédomine. Une descente est plutôt associée au premier motif. Il y a une exception lors du premier des deux kilomètres où le premier motif est plutôt utilisé. Il s'agit du départ parmi

les 1557 participants où il était difficile de marcher rapidement.

Ces observations montrent qu'il est possible de séparer le signal en 2 processus liés la plupart du temps à la pente.

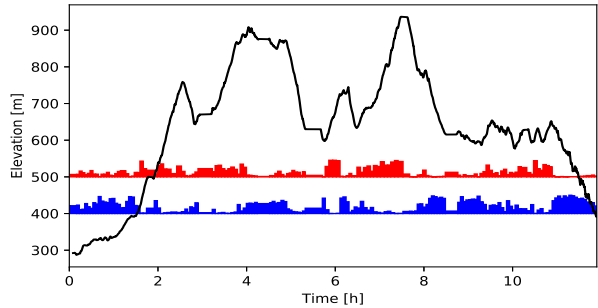


FIGURE 4 – Profil altimétrique et répartition des motifs.

6 Conclusions

Cet article c'est intéressé au découpage d'un signal cyclique d'une longue marche en plusieurs portions associées à une forme (motif) similaire. En analysant ces portions, il a été possible de distinguer deux types de formes caractéristiques dans ce signal et d'étiqueter les portions associées.

Il s'agit d'une première étude. L'intérêt d'un tel système est de trier des données acquises par le capteur accélérométrique d'un téléphone afin de localiser les différentes zones d'intérêt dans le signal et de les regrouper par similitude.

7 Remerciements

L'auteur remercie Sylvie Bigouraux qui a marché sur la "Roanne Thiers" avec lui et lui a fourni les signaux.

Références

- [1] K. Sabri, M. El Badaoui, F. Guillet, A. Belli, G. Millet, J.B. Morin, "Cyclostationary modelling of ground reaction force signals," *Signal Processing*, vol. 90, pp. 1146–1152, April 2010.
- [2] Frédéric Bonnardot, Benoit Jullien, Sandrine Bayet, Nicolas Doctobre, *Analyse vibratoire avec un téléphone portable pour découvrir la recherche en classe de CM1 - CM2*, CNRIUT'2022 Roanne, Jun 9-10, 2022
- [3] Frédéric Bonnardot, *Technique de synchronisation de signaux de marche*, CNRIUT'2019 Toulon, Jun 6-7, 2019
- [4] Frédéric Bonnardot, Mohamed El Badaoui, François Guillet, *Analyse vibratoire : approche cyclostationnaire et déterministe*, CNRIUT'2002 Le Creusot, 2002

Mange-t-on des Microplastiques ?

Pas si simple à détecter dans le jambon

Angèle Finel¹, Elise Sauvage¹, Camille Hernault¹,
Florence Viudes¹, Iseline Chaïb^{2,3}, Périne Doyen^{1,3}
perine.doyen@univ-littoral.fr

¹ IUT du Littoral Côte d'Opale, Département Génie Biologique,
Université du Littoral Côte d'Opale, 62200 Boulogne-sur-Mer

² ANSES – LSAI, Boulevard du Bassin Napoléon, 62200 Boulogne-sur-Mer, France

³ Université du Littoral Côte d'Opale, UMR 1158 BioEcoAgro,
EA 7394, Institut Charles Viollette, USC ANSES, INRAe, Univ. Lille, Univ. Artois,
Univ. Picardie Jules Verne, Univ. Liège, F-62200 Boulogne-sur-Mer, France

Thèmes – Chimie (Alimentaire)

Résumé – *Cette année universitaire, trois étudiantes de BUT2 option SAB ont choisi de travailler sur la thématique des microplastiques (MPs) dans le jambon lors des sujets de SAE liés à la Recherche. En effet, peu de travaux portent sur la contamination des aliments par les MPs. Pendant ce premier semestre, les objectifs étaient de choisir quel type de jambon représente le mieux la consommation et de définir une méthode permettant de détecter les MPs dans celui-ci. Le choix de la matrice jambon s'est porté sur un paquet de 4 tranches sans couenne en lien avec sa fréquence en rayon d'hypermarché. Différents tests ont été réalisés et les résultats ont montré que placer une tranche de jambon dans 800 mL de KOH 10% pendant 48H à 40°C permettait de filtrer le digestat et d'obtenir des filtres exploitables. Les objectifs de ce second semestre seront d'analyser 3 paquets entiers de jambon et de déterminer si des MPs sont présents. Pour cela, les particules observées sur les filtres ainsi que les emballages seront respectivement analysées au μ -FTIR et au macroRaman. L'ensemble des résultats fourniront des premières données sur cet aliment.*

Mots-Clés – *Microplastiques, jambon, détection, concentration*

1 Introduction

Il n'est plus à démontrer que les plastiques sont présents dans tous les environnements. Les microplastiques (MPs) (<5 mm) représentent un problème majeur de cette pollution plastique. De différentes formes, couleurs, tailles et types, de nombreuses études en milieu marin ont montré leur ingestion par des organismes de toutes tailles, mais très peu de travaux portent sur leur présence dans l'alimentation humaine. Les premières études réalisées sur des matrices alimentaires ont été faites sur la bière [1] ou encore le miel [2]. Concernant les produits protéinés, des MPs ont par exemple été mis en évidence dans des boîtes de thon [3] ou dans l'œuf [4]. Étudier la contamination de ce type de produits exige la mise en place d'un protocole de digestion de l'aliment sans dégradation des MPs (polymères) et le digestat obtenu est ensuite filtré pour observer la potentielle présence de MPs.

L'objectif de cette SAE est donc de développer une méthode permettant de détecter la présence de MPs dans une matrice protéinée : le jambon blanc. En effet, c'est l'une des charcuteries les plus consommées [5], principalement emballée sous atmosphère modifiée.

Plusieurs points se succéderont au cours de cette étude :

i) déterminer le produit le plus consommé ; ii) définir une méthode de digestion sur une quantité de jambon représentative de la consommation humaine; iii) obtenir une digestion efficace sur une courte durée et une filtration rapide avec le moins de filtre possible par digestat ; iiiii) appliquer la méthode sur un triplicat de produits afin de fournir des premières données sur cette matrice alimentaire.

2 Matériel et Méthodes

2.1 Choix de la matrice jambon

Une étude d'observation a été menée dans trois hypermarchés afin de déterminer le type de jambon le plus présent en rayon, supposé le plus consommé. Différents critères ont été pris en considération pour classer 225 types de paquets de jambon blanc en vente : le nombre de tranches, la présence ou non de couenne, la quantité réduite en sel et en nitrite, ainsi que la marque du produit.

2.2 Paramètres de la digestion

Pour effectuer une digestion efficace, quatre paramètres sont pris en compte : le réactif, la température, la quantité de jambon ainsi que le temps de digestion. Les deux premiers paramètres ont été choisis selon la littérature : le réactif défini est le KOH 10%, de par son efficacité et sa non-destruction des polymères, utilisé à une température de 40°C, un risque de dégradation des polymères étant connu à une température supérieure. Afin de définir les deux autres paramètres, 800mL de KOH 10% ont été

introduits dans des erlenmeyers. Ensuite, différentes quantités de jambon y ont été placées afin de tester plusieurs ratios entre sa masse (en g) et le volume de KOH (en mL). Divers temps de digestion ont été effectués sur plaque chauffante sous agitation à 200 rpm.

2.3 Filtration et observation

Les filtrations des digestats ont été réalisées sur filtre Whatman GF/A (1,6µm) en fibre de verre. Le filtre est ensuite placé dans une boîte de Pétri en verre et séché en étuve à 25°C. Les filtres secs sont observés à la loupe binoculaire afin de déterminer s'ils sont exploitables ou non, c'est-à-dire si la couche de matière organique est assez fine pour observer correctement les particules en surface. Chaque particule sera mesurée.

2.4 Efficacité de la digestion

L'efficacité de la digestion est liée au résidu restant sur le filtre sec, correspondant à la matrice non digérée dont la masse est obtenue par pesée des filtres avant et après filtration. Le calcul de l'efficacité est le suivant :

$$\text{Efficacité (\%)} = \frac{\text{masse de jambon} - \text{masse du résidu}_*}{\text{masse de jambon}} \times 100$$

2.5 Assurance et contrôle de la qualité (AS/CQ)

Des précautions seront prises lors de l'étude des échantillons pour éviter toute contamination externe comme le travail sous PSM, le port de blouse 100% coton, de gants en nitrile et la filtration de toutes les solutions utilisées. Le matériel en verre et les filtres seront préalablement passés au four à moufle (6H à 500°C) pour éliminer toutes particules.

Plusieurs témoins seront réalisés en parallèle du traitement des échantillons : des contrôles atmosphériques pendant la préparation du jambon et la filtration, des témoins négatifs (KOH 10% sans matrice) et positifs.

2.6 Identification des particules au µ-FTIR

Le FTIR (InfraRouge à Transformée de Fourier) est une méthode de spectroscopie utilisée pour déterminer la nature des particules observées sur les filtres. L'identification de ces particules se fait par un processus de 25 acquisitions de 4000 à 600 cm⁻¹ permettant d'obtenir un spectre par particule. Ce dernier sera comparé à des bases de données et l'identification est considérée comme valide si la similitude est >70%.

2.7 Identification des emballages au macroRaman

La nature des polymères composants les emballages sera déterminée grâce à la technique Raman reposant sur l'interaction d'un rayonnement laser avec la matière. Complémentaire de l'identification en InfraRouge, la gamme spectrale varie de 100 à 3400 cm⁻¹ et le spectre obtenu sera comparé à une base de données où une corrélation supérieure à 75% permettra de déterminer la nature du polymère.

3 Résultats et Interprétations

3.1 Matrice d'étude définie

Les différentes caractéristiques étudiées parmi les 225 paquets de jambon blanc en rayon, ont mis en évidence que la majorité des produits dans chaque hypermarché étaient du jambon sans couenne, emballé sous paquet de 4 tranches (Figure 1). De plus, la marque distributeur est majoritaire. Les échantillons étudiés seront donc des paquets de 4 tranches de jambon blanc sans couenne d'une marque distributeur.

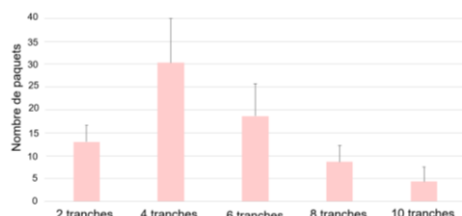


Figure 1 - Nombre de tranches par paquet de jambon

3.2 Digestion de la matrice jambon

Une efficacité de digestion importante (>97.7%) a été observée pour tous les tests effectués (Table 1) malgré les variations visuelles des digestats obtenus (Figure 2).

Table 1 – Digestion de la matrice jambon: facteurs testés, efficacité et filtration effectuée

Temps	Nombre de tranches	Ratio (g jambon: mL KOH)	Nombre de filtres	Efficacité (%)	Durée de filtration (min)
24 H	0,5	1 : 40	1	98	2 à 18
48 H	0,5	1 : 40	1	98,9	2
	1	1 : 20	1	98,4	60
	1	1 : 20	2	97,9	20
	1,5	1 : 13	2	98	40
72 H	1	1 : 20	1	98,8	18 à 40
	2	1 : 10	3	97,7	120

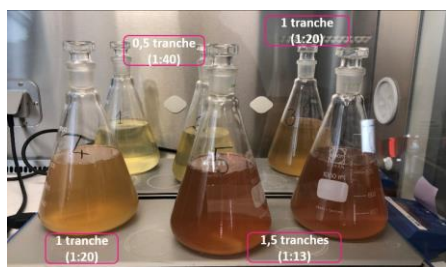


Figure 2 – Exemples de digestats obtenus avec différentes quantités de jambon incubées 48H à 40°C

Dans certains cas, le temps de filtration est trop important (Table 1) et les filtres ne sont pas exploitables dû à une couche superficielle trop épaisse ne permettant pas l'observation correcte des particules (Figure 3).

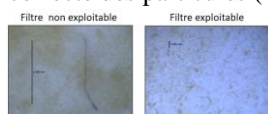


Figure 3 –Filtres obtenus selon les digestats

Pour répondre à tous nos objectifs, la quantité de matrice la plus adaptée correspond à une tranche de jambon à incuber 48H, et dont le digestat devra être filtré sur deux filtres. En effet, cela est plus représentatif de la consommation humaine.

3.3 Future application sur un triplicat de produit

Une application de la méthode définie sera réalisée du 30 janvier au 10 février 2023 sur trois paquets de jambon afin au final d'en dénombrer une éventuelle présence de microplastiques. Le planning défini conduira à l'obtention de 34 filtres, 24 correspondants aux échantillons de jambon et 10 aux différents témoins effectués en parallèle pour assurer le contrôle qualité.

3.4 Dénombrement et identifications de particules

Ces filtres seront observés à la loupe binoculaire afin de dénombrer les particules présentes. Elles seront comptées, classées selon leur forme (fragments ou fibres) et mesurées. L'identification des particules sera ensuite réalisée au μ -FTIR, ce qui permettra de définir si des polymères sont présents. Le dénombrement des particules sur les filtres échantillons prendra en compte ce qui est observé sur les filtres témoins. En effet, toute particule observée sur les filtres des échantillons qui présentera les mêmes caractéristiques (forme, couleur, taille, nature) que celles présentes sur les témoins correspondants sera systématiquement déduite du dénombrement. Cette méthode permet d'éviter toute surestimation de la concentration présente dans les échantillons, et le taux de MPs présent par gramme de jambon pourra alors être calculé. L'identification plastique des emballages sera également réalisée. Les natures des polymères potentiellement présents dans le jambon pourraient alors être hypothétiquement liées à certaines sources.

4 Conclusion

La présence de MPs dans notre alimentation est encore très peu étudiée. Le travail des étudiantes de BUT2 lors du premier semestre de SAE a déjà permis de mettre en place une méthode pour pouvoir définir cela dans le jambon blanc. L'application de cette méthode sur un triplicat d'échantillons du commerce permettra de fournir des premières données pour cette matrice très consommée. Ces résultats seront intégrés dans les travaux de thèse de Mme Iseline Chaïb portant sur la thématique.

Références

- [1] Liebezeit G et al., *Synthetic particles as contaminants in German beers*. Food Additives & Contaminants, 2014, 1574-1578.
- [2] Liebezeit G et al., *Non-pollen particulates in honey and sugar*. Food Additives & Contaminants, 2013, 2136-2140.
- [3] Hussien N.A et al., *Investigating microplastics and potentially toxic elements contamination in canned Tuna, Salmon, and Sardine fishes from Taif markets, KSA*. Open Life Sciences, 2021, 16:827-837.
- [4] Liu Q. et al., *Microplastics contamination in eggs: detection, occurrence and status*. Food Chemistry, 2022, 397, 133771.
- [5] Avelin C., *La consommation des produits carnés en 2021*, franceagrimer.fr.

Valorisation de composés phénoliques d'un effluent de brasserie : influence des matériaux membranaires et du pH sur les performances d'une chaîne de récupération par procédés membranaires

Paul-Loup Pasquet

Maud Villain-Gambier

Dominique Trébouet

ppasquet@unistra.fr maud.villain@unistra.fr dominique.trebouet@unistra.fr

IUT Louis Pasteur, Université de Strasbourg
Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, UMR 7178

Thèmes – Chimie - Environnement

Résumé – *L'industrie brassicole est responsable d'externalités environnementales et doit transiter vers un modèle de production circulaire. Un effluent de l'industrie brassicole a été identifié comme source de composés phénoliques qui pourrait remplacer des additifs antioxydants des industries agro-alimentaires, cosmétiques, etc. La récupération de ces composés biosourcés par procédés de filtration membranaire a été étudiée par : (1) la sélection de membrane pour la clarification de l'effluent en vue de la concentration des composés phénoliques, (2) l'étude de l'influence du pH sur la chaîne de clarification – concentration. Après comparaison des performances des membranes lors de la clarification de l'effluent, la membrane céramique UC15 a été retenue. Divers avantages et inconvénients ont été observés à pH acide et basique lors de la clarification de l'effluent à l'échelle semi-industrielle. La concentration des composés phénoliques pose deux limites majeures : une baisse de productivité lors de la filtration et la présence de sucres dans l'extrait concentré. Ces limites pourraient être dépassées par des procédés complémentaires comme l'électrodialyse et l'adsorption sur résine.*

Mots-Clés – Filtration membranaire, composés phénoliques, effluent brassicole, pH.

1 Introduction

Avec plus de 22 millions d'hectolitres de bières produites en France en 2021 [1], le secteur brassicole représente un secteur important de l'industrie agro-alimentaire. Comme d'autres filières de ce secteur, l'industrie brassicole est affectée par des problèmes environnementaux tels que l'émission de gaz à effet de serre, l'utilisation d'eau douce et d'énergie ou la production d'eaux usées [2], menaçant la sécurité alimentaire et la croissance économique. Une transition environnementale nécessite un changement de paradigme impératif vers une économie circulaire. Les eaux usées de brasseries contiennent diverses biomolécules issues de la bière, dont les composés phénoliques. Ces composés ont des propriétés antioxydantes et pourraient après extraction se substituer à d'autres molécules synthétiques dans d'autres industries : agro-alimentaires, cosmétiques, etc.

Parmi les différents procédés de récupération, les procédés membranaires permettent une séparation moléculaire sans modifier les structures chimiques, avec une consommation énergétique modérée et avec une facilité d'extrapolation à l'échelle industrielle. Cependant, la mise en œuvre de ces procédés représente souvent un défi dû à la complexité de l'eau usée à valoriser [4], ce qui induit à la fois colmatage des membranes et difficultés de fractionnement. La pertinence d'un procédé membranaire est liée à ses performances en termes de productivité (stabilité du flux de perméation, qui correspond au débit de perméat divisé par la surface membranaire), de sélectivité (rétention ou non des molécules d'intérêt) et de robustesse (inclinaison au colmatage, facilité de lavage).

La rentabilité des projets de récupération de composés phénoliques dépend donc de la capacité à maîtriser les procédés de séparation. De précédents travaux ont montrés que les performances des procédés membranaires, varient significativement en fonction du pH de l'eau usée agro-alimentaire étudiée [4].

Une eau usée brassicole, peu étudiée dans la littérature, a été identifiée comme une source riche en composés phénoliques ($C = 1 \text{ à } 2 \text{ g.L}^{-1}$). Une chaîne de séparation membranaire adaptée à l'effluent a été élaborée. Celle-ci consiste en une étape d'ultrafiltration (UF) et d'une étape de nanofiltration (NF) ayant respectivement pour but la clarification de l'effluent et la concentration des composés phénoliques. Premièrement, une sélection de membrane d'UF adaptée a été réalisée à l'échelle laboratoire. Puis, l'ensemble du procédé de séparation a été mis en œuvre à différents pH afin de sélectionner les conditions optimales d'opération et pour étudier les phénomènes de colmatage. Cette étape a été réalisée à l'échelle semi-industrielle pour se rapprocher au mieux des conditions réelles.

2 Sélection d'une membrane d'UF

7 membranes commerciales avec différents matériaux et tailles de pore ont été évaluées à des fins de sélection. Après une optimisation des paramètres opératoires, des filtrations de 6 L d'une eau usée envoyée par un industriel brassicole ont été effectuées avec un pilote à l'échelle laboratoire à deux pH différents (4 et 10). Pour évaluer la performance de clarification des membranes, un suivi de 6 critères a été réalisé : productivité (rapport entre volume produit et temps de filtration), sélectivité (préservation des composés phénoliques, rétention des sucres et élimination de la turbidité), un paramètre représentant les matières en suspension susceptibles de colmater les membranes) et robustesse (inclinaison au colmatage, facilité de nettoyage). Les membranes avec des pores d'une taille supérieure ou égale à $0,1 \mu\text{m}$ ont fait preuve d'un colmatage irréversible dès les premières minutes de filtration et ont donc été écartées du processus de sélection. Les critères de performances mesurés pour les 4 autres membranes sont présentés sur la Figure 1.

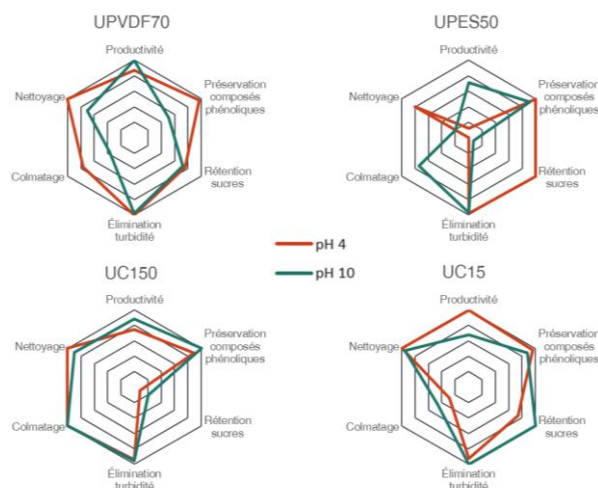


Figure 1 – Sélection de membranes pour la clarification des eaux usées de brasserie en fonction des critères retenus

Pour l'ensemble des critères retenus, les membranes céramiques UC15 et UC150 ont montré les meilleures performances globales. Les membrane UPES50 et UPVDF70, en matériau polymérique, sont moins adaptées au milieu industriel. La membrane UC150 retient peu les sucres. La récupération des composés phénoliques a plus de chances d'être réussie avec une chaîne de séparation avec un nombre limité d'étapes. La membrane UC15, plus avantageuse à cause de son préfractionnement des sucres, a donc été sélectionnée.

3 Étude de l'influence du pH

Une succession d'UF (clarification) puis de NF

(concentration) a été réalisée avec un effluent stabilisé à pH 4, 6,5 et 10. L'UF a été réalisée avec la membrane UC15 précédemment sélectionnée avec 100 L d'effluent en mode continu. La NF a été réalisée avec une membrane conçue pour retenir les composés de plus de 200 g.mol⁻¹ et donc adaptée pour retenir les composés phénoliques ayant une taille moléculaire d'environ 250 à 350 g.mol⁻¹. Cette deuxième filtration a été réalisée en mode concentration, c'est-à-dire en réduisant le volume dans la cuve, concentrant ainsi les composés phénoliques retenus.

3.1 Clarification de l'effluent – UF

L'évolution du flux de perméation relatif est tracée sur la Figure 2 pour les 3 pH étudiés.

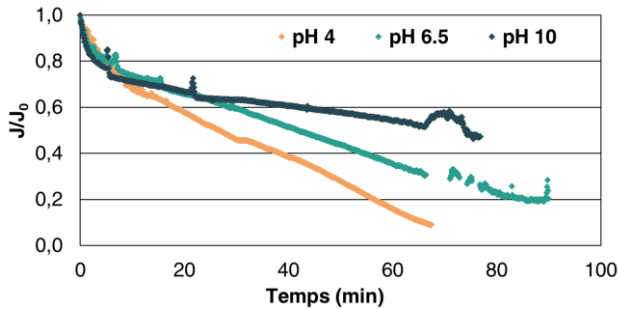


Figure 2 – Évolution du flux de perméation (J/J_0) relatif en fonction du temps pour les 3 valeurs de pH étudiées.

D'après les résultats obtenus, plus le pH est acide, plus le flux de perméation diminue lors de la filtration. D'après les analyses réalisées, il a été mis en évidence que le pH acide favorisait les interactions molécules-molécules et molécules-membranes. Malgré un flux plus stable à pH 10, une dégradation des composés phénoliques a eu lieu à cause d'un phénomène d'oxydation, dû aux conditions basiques. Pour le pH de 6,5, la rétention des composés phénoliques et de la turbidité ont respectivement été de moins de 8 % et de plus de 80 %. Ce pH représente un compromis sélectivité/productivité pertinent.

3.2 Concentration des composés phénoliques - NF

À l'issu de l'UF, le perméat clarifié a été récupéré pour alimenter la NF de 70 L. La stabilité du flux pour les 3 pH étudiés est représentée par la Figure 3. L'évolution de la productivité est inversement proportionnelle à l'évolution de la conductivité du retentât. Ce paramètre est une mesure des espèces ioniques présentes dans l'effluent. Ces ions exercent une force de "contre-pression osmotique" s'opposant à la force motrice de pression du système de filtration. Lors de la NF, une partie des ions est retenue et leur concentration, et donc le phénomène de contre-pression osmotique, augmentent. Ceci explique la rapide baisse de productivité quel que soit le pH de filtration.

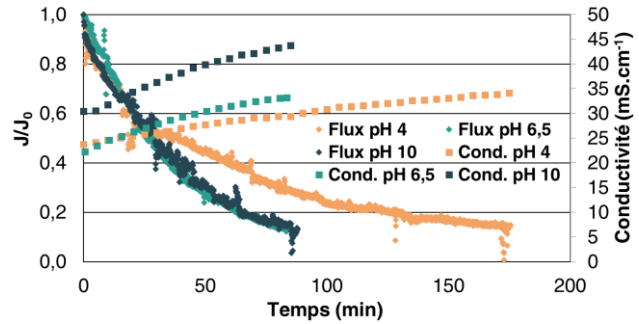


Figure 3 – Évolution du flux de perméation (J/J_0) relatif et de la conductivité en fonction du temps à pH 4, 6,5 et 10.

Pour l'ensemble des pH, les composés phénoliques sont retenus à plus de 80 %, et sont alors concentrés. Les sucres sont également retenus à plus de 95 %, ce qui pose une problématique de fractionnement entre les molécules d'intérêt (composés phénoliques) et indésirables (sucres). La présence de ces sucres pourrait limiter les voies de valorisation des extraits produits par filière membranaire.

4 Conclusions et perspectives

La récupération des composés phénoliques de l'effluent brassicole a été étudiée par la mise en œuvre de filtrations de clarification et concentration à différents pH : 4, 6,5 et 10. L'étape de clarification est maîtrisée et le pH le plus pertinent est 6,5. L'étape de concentration des composés phénoliques présente deux contraintes : un flux limité par la concentration en ions et un fractionnement pauvre entre sucres et composés phénoliques.

Afin d'améliorer la performance de la récupération, d'autres procédés ont été mis en œuvre. L'électrodialyse a également été étudiée pour déminéraliser l'effluent et limiter la contre-pression osmotique, ainsi que les résines adsorbantes pour séparer sucres et composés phénoliques et améliorer leur fractionnement.

Références

- [1] Barth Haas Group, *Hops 2021/2022 Report*, Jul. 2022.
- [2] Abass Abiola Olajire, *The brewing industry and environmental challenges*, Journal of Cleaner Production, vol. 256, p. 102817, May 2020.
- [3] Alfredo Cassano, Carmela Conidi, René Ruby-Figueroa, et Rorberto Castro-Muñoz, *Nanofiltration and Tight Ultrafiltration Membranes for the Recovery of Polyphenols from Agro-Food By-Products*, IJMS, vol. 19, no. 2, p. 351, Jan. 2018
- [4] Matthieu Courbalay, Maud Villain-Gambier, Armand Klem, Isabelle Ziegler-Devin, Stéphane Dumarcay, et Dominique Trébouet, *Influence of pH and fouling characterization during membrane process for lignin recovery from the process water of thermomechanical pulping*, Separation and Purification Technology, vol. 275, p. 119162, Nov. 2021

Etude de l'extraction de la lignine de biomasses lignocellulosiques par des solvants eutectiques profonds

Virgile Provost^{1,2} Stéphane Dumarçay³ Isabelle Ziegler-Devin³
Maria Boltoeva² Dominique Trebouet^{2,4} Maud Villain-Gambier^{2,4}

virgileprovost11@gmail.com stephane.dumarçay@univ-lorraine.fr isabelle.ziegler@univ-lorraine.fr
maria.boltoeva@iphc.cnrs.fr dominique.trebouet@unistra.fr maud.villain@unistra.fr

¹ Université de Corse

² IPHC – CNRS – UMR 7178, Université de Strasbourg

³ LERMAB – INRAE – EA 4370, Université de Lorraine

⁴ IUT Louis Pasteur, Université de Strasbourg

Thèmes – Chimie - Environnement

Résumé – *Dans le cadre du développement des bioraffineries, la valorisation optimisée de l'ensemble des composés de coproduits agricoles, forestiers et agroalimentaires est primordiale. L'extraction de lignine de tels coproduits lignocellulosiques avec un contenu important en liaisons labiles β -O-4 représente un intérêt majeur. En effet cette lignine est facilement dépolymérisable et permet l'obtention de composés phénoliques à bas poids moléculaire pouvant se substituer aux dérivés pétrochimiques. Le présent article démontre la possibilité d'extraire cette lignine de manière durable avec des solvants verts : les solvants eutectiques profonds. Afin de déterminer les conditions les plus appropriées, des solvants à base de chlorure de choline ont été testés avec deux donneurs de liaisons hydrogène différents : l'acide lactique et le glycérol dans des conditions douces de température (60 et 80°C) pour deux biomasses distinctes : des copeaux de scierie et des drêches brassicoles. Le solvant avec l'acide lactique à 80°C a donné les résultats les plus prometteurs avec les copeaux de scierie car 78% de la lignine a été extraite avec 61 % de liaisons labiles.*

Mots-Clés – *Caractéristiques structurales, donneur de liaisons hydrogène, lignine, solvant vert.*

1 Introduction

Depuis l'ère industrielle, les ressources de notre planète sont puisées de façon inconsciente et abusive. Cependant, aujourd'hui la population mondiale est en constante croissance et donc ses besoins augmentent que ce soit dans le domaine alimentaire, énergétique ou industrielle. L'Union Européenne soutient depuis 2018 une nouvelle stratégie en matière de bioéconomie basée sur l'amélioration et l'utilisation durable des ressources renouvelables pour relever les défis locaux et mondiaux tel que le développement durable. Selon une étude de 2018 de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) [1], la France est couverte à 90% de biomasse lignocellulosique sous forme de forêts et de cultures agricoles, ce qui en fait une des premières puissances bioéconomiques européennes.

Cette biomasse lignocellulosique est composée majoritairement de lignine, d'hémicelluloses et de cellulose. Cependant dans les industries actuelles, c'est la cellulose qui trouve le plus large spectre d'applications dans des domaines tels que les celluloses de spécialité ou le bioéthanol. La lignine, elle, est souvent considérée comme coproduit et brûlée pour faire de l'énergie. Elle est donc encore à ce jour très peu valorisée. La lignine est un polymère jouant un rôle de ciment dans les parois végétales. Aujourd'hui, la valorisation de la lignine fait partie des nouveaux concepts industriels de bioraffinerie car elle est le seul biopolymère aromatique composant la biomasse lignocellulosique, ainsi que le deuxième composé le plus abondant sur Terre puisqu'elle représente 30% du carbone organique mondial [2]. Grâce à son aromaticité, la lignine semble être une alternative aux dérivés du pétrole et un précurseur pour la formation de biomolécules actives et de biomatériaux. Pour extraire la lignine, plusieurs procédés sont utilisés, surtout dans l'industrie papetière. Néanmoins, ces procédés détériorent la structure native de la lignine, utilisent des solvants polluants et demandent un apport en énergie important [3]. Afin d'extraire une lignine native avec des procédés durables, des solvants dits « verts » appelés solvants eutectiques profonds ou en anglais, deep eutectic solvents (DES) sont actuellement étudiés. Ils sont formés d'un mélange d'au moins deux composés (un accepteur et un donneur de liaison hydrogène (ALH et DLH)) à un ratio molaire précis et dont le point de fusion est très abaissé par rapport à la température de fusion de chacune de leurs composantes. Cette propriété propre à ces solvants permet de travailler dans des conditions moins drastiques pour extraire la lignine dont la structure est sensible aux attaques chimiques et physiques. Dans cette étude, l'objectif est de maximiser le rendement d'extraction en

lignine riche en liaisons β -O-4 à partir de copeaux de bois tendre (CBT) et de drêches brassicoles (D). Ces liaisons sont labiles et le fait de les conserver induit l'obtention d'une lignine facilement dépolymérisable en composés phénoliques de bas poids moléculaires, lui permettant d'avoir des applications à haute valeur ajoutée [4]. Des essais ont été réalisés à différentes températures (60 et 80°C) et avec différents types de DES composés d'un donneur de liaison hydrogène de type acides ou polyols.

2 Matériels et méthodes

2.1 Biomasses

Les copeaux de bois tendre proviennent de la papeterie Norske Skog (Golbey), ils sont issus d'épicéas et de sapins. Ils ont été broyés et tamisés à 0,2 mm. Les drêches (résidu solide issu de l'orge malté après brassage) proviennent d'une microbrasserie strasbourgeoise et ont été préalablement lavées à l'eau, séchées à 45 °C puis broyées et tamisées à 0,2 mm également.

2.2 Préparation des DES

Deux DES ont été utilisés. Ils ont été formulés avec le même ALH : le chlorure de choline (ChCl). L'acide lactique (LA) ou le glycerol (Gly) ont été testés en tant que DLH dans la synthèse du DES. Chaque DES a été synthétisé à un ratio molaire spécifique (ChCl :LA 1 :10 ; ChCl : Gly 1 : 2). Chaque DES a été mélangé à 80°C pendant 2h.

2.3 Extraction de la lignine

Les deux biomasses ont été mélangées au ratio massique biomasse/DES de 1 :20 à 60 ou 80°C dans un bain d'huile pendant 24h. L'extraction de la lignine (réalisée en triplicat) a ensuite été mise en œuvre en utilisant le protocole décrit sur la figure 1.

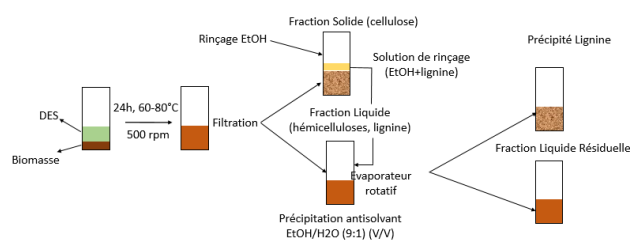


Figure 1 – protocole d'extraction de la lignine

Après le prétraitement avec le DES, les fractions solide et liquide ont été filtrées. Le solide est rincé à l'éthanol à 95%. La solution de rinçage est mélangée avec la fraction liquide et cette solution est traitée avec une mixture éthanol/eau à un ratio volumique de 9:1 comme

antisolvant. La lignine contenue dans ce liquide est précipitée à l'évaporateur rotatif. Le précipité de lignine est lavé à l'eau ultrapure et séché à 45°C pendant 24h.

2.4 Caractérisation structurale de la lignine extraite

Les spectres ¹H acquis en RMN 2D-HSQC ont permis d'obtenir les ratios des principales liaisons inter-unités de la lignine extraite dans les différentes conditions. Les liaisons β-O-4, β-5 et β-β ont ainsi pu être quantifiées. Elles sont représentées sur la figure 2 ci-après.

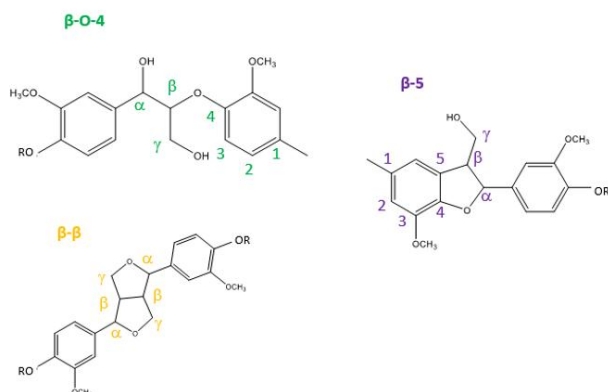


Figure 2 – Principales liaisons inter-unités de la lignine observées par RMN 2D-HSQC

3 Résultats

Pour le prétraitement avec le DES à base d'acide lactique, le taux d'extraction en lignine (calculé comme le ratio de la lignine extraite sur la lignine initialement présente dans la biomasse multiplié par 100) augmentait pour les deux biomasses avec une élévation de la température de 60 à 80°C. Des taux d'extraction en lignine de 57 ± 5 et 35 ± 2 % ont été obtenus à 60°C pour les biomasses CBT et D respectivement et ces valeurs augmentaient à 78 ± 3 et 39 ± 6 % à 80°C. Cette évolution du taux d'extraction peut être expliquée par la baisse de la viscosité du DES avec une augmentation de la température permettant une amélioration des transferts de chaleur et matière et donc d'accroître les performances d'extraction du DES. Les taux d'extractions obtenus pour la biomasse D étaient toujours plus faibles que ceux de la biomasse CBT. La lignine des céréales telle que l'orge possède une structure plus complexe que celle issue de bois tendre. Dans la littérature, il a été mentionné que la composition chimique ainsi que les propriétés de la lignine ont un impact sur la capacité des DES à extraire la lignine [5].

L'analyse des spectres RMN a permis de quantifier les principales liaisons inter-unités présentes dans les lignines extraites. Les résultats sont rassemblés dans la table 1. La

lignine extraite à 80°C de bois tendre par le DES ChCl :LA (CBT-LA-80) présentait le plus haut pourcentage de liaisons labiles β-O-4 à 61 % ainsi que 15 % de liaisons β-5 et 3 % de β-β. Ainsi cette étude prouve la possibilité d'extraire une lignine à haute valeur ajoutée à partir de coproduits lignocellulosiques.

Table 1 – Quantification des liaisons inter-unités de la lignine des deux biomasses

échantillon	β-O-4 (%)	β-5 (%)	β-β (%)..
CBT-LA-60	41	6	2
CBT-LA-80	61	15	3
CBT-Gly-80	12	3	1
D-LA-60	45	6	5
D-LA-80	53	3	3
D-Gly-80	16	3	11

4 Conclusions

Des DES à base de ChCl et avec de l'acide lactique ou du glycérol comme donneur de liaisons hydrogène ont été étudiés pour extraire de la lignine riche en liaisons labiles de coproduits provenant de bois tendre ou d'orge dans des conditions douces de température (60 ou 80°C). Le DES réalisé à partir d'acide lactique à 80°C avec la biomasse issue de bois a donné des résultats prometteurs car 78% de lignine a été extrait avec 61% de liaisons β-O-4. Dans les mêmes conditions seulement 40% de lignine des drèches brassicoles ont été extraites probablement à cause de la complexité (composition chimique, propriétés de la lignine) de cette ressource.

Références

- [1] *Stratégie de l'ADEME pour une bioéconomie durable, 2017-2022* [En Ligne consulté en décembre 2022] Disponible sur : <https://bibliothèque.ademe.fr/produire-autrement/1154-strategie-de-l-ademe-pour-une-bioeconomie-durable-2017-2022.html>
- [2] Yee Tan *et al.* *Effect of Functional Groups in Acid Constituent of Deep Eutectic Solvent for Extraction of Reactive Lignin*. *Bioresource Technology* 281, 2019, p. 359 - 66
- [3] Julien Wertz *et al.* *Molécules issues de la valorisation de la lignine*. *ValBiom*, mars 2015, p. 1 - 37
- [4] Douwe Zijlstra, *et al.* *Extraction of Lignin with High βO-4 Content by Mild Ethanol Extraction and Its Effect on the Depolymerization Yield*. *Journal of Visualized Experiments* 143, 2019, p. 58575
- [5] R. Lou *et al.* *Facile extraction of wheat straw by deep eutectic solvents (DES) to produce lignin nanoparticles*. *ACS Sustainable Chemistry* 7, 2019, p. 10248-10256

L'agir communicationnel au service de la construction de connaissances autour d'une thématique, le bien-être, mis en œuvre dans le cadre d'une démarche participative en Sumène Artense dans le Cantal.

Eric AGBESSI¹

eric.agbessi@uca.fr

Christine SAEZ²

christine.saez@uca.fr

Sophie RODIER³

sophie.rodier@uca.fr

Sébastien SALVA⁴

sebastien.salva@uca.fr

Evelyne BERNARD⁵

evelyne.bernard@uca.fr

Paul LEVERBE⁶

pleverbe@sumene-artense.com

Stéphanie BORNES⁷

stephanie.bornes@uca.fr

Mahchid BAMBAD⁸

mahchid.bambad@uca.fr

^{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8} IUT Clermont-Auvergne

¹ComSocs, EA4647 / ³CleRMa 3849/⁴LIMOS UMR 6158 /⁷UMRF 0545 UCA/INRAe / ⁸UMR INSERM IMoST

⁶ Communauté de communes Sumène Artense

Thèmes : *Biologie - Santé - Économie – Gestion - Informatique - Communication*

Résumé – *Cet article présente le concept d'Université Foraine (UF) proposé par l'IUT Clermont Auvergne qui est établie d'un lieu à l'autre, au fil des années, par la volonté des collectivités de s'inscrire dans ce type de projet et permet de créer les conditions d'un dialogue favorisant l'ancrage de l'université au cœur de sa région tout en s'efforçant de participer au développement local. Nous montrons comment, pour sa première édition, celle-ci a été déclinée dans une double stratégie de recherche ; une recherche-action en communication, transversale à l'ensemble du travail scientifique initié, permettant d'étudier la façon dont, dans l'espace public pluriel défini ci-dessous, les acteurs adoptent une stratégie commune pour faire avancer leurs idées. La recherche fondamentale est déclinée en trois axes complémentaires sur la thématique « bien vivre en Sumène-Artense », 1^{er} site de déploiement de l'UF, qui vise à mieux nourrir les enfants en prenant soin de proposer une nourriture de qualité pour leurs aînés, à entreprendre une démarche scientifique pour améliorer la qualité de l'eau et à travailler à l'épanouissement des populations par une réflexion partagée sur l'aménagement de l'espace public.*

Mots-Clés – *Développement territorial, Recherche pluridisciplinaire*

Introduction

L'Université Foraine, expression empruntée au monde de l'architecture, correspond ici à la volonté de sortir des murs de l'université et de travailler sur un territoire émergent aux yeux de l'établissement, c'est à dire avec lequel il n'a pas de liens officiels, mais compte en établir. L'Université Foraine consiste alors à mobiliser les forces vives de l'Université et de la collectivité, d'associer, dans le même temps, celles du territoire et de l'ensemble de l'Éducation Nationale par l'intermédiaire des lycées et collèges, en proposant de répondre à des attentes partagées tout en analysant les potentialités du bassin de vie étudié dans une perspective atemporelle.

Pierre angulaire des travaux présentés ici elle est à l'origine d'une démarche participative qui s'inscrit dans le cadre de l'agir communicationnel, une théorie qui consiste à privilégier une compréhension mutuelle des interlocuteurs pour arriver à un consensus par le débat argumenté.

Organisée sous forme de recherche-action appuyée sur 3 thématiques territorialisées, les travaux présentés ici proposent donc une réflexion partagée autour des thèmes de l'eau, de la santé et de l'alimentation.

1 Contexte et problématique

Les dérèglements environnementaux entraînent la raréfaction des ressources hydriques, l'inconfort des individus au cours des épisodes caniculaires, la perte de biodiversité, etc. À ceci, il convient d'ajouter les dérèglements socio-économiques en cours liés à notre forte dépendance aux énergies fossiles, nos modèles de vie en partie obsolètes et nos tissus productifs et de service en difficulté. Tout cela produit un ensemble de facteurs qui rendent nos territoires vulnérables aux menaces systémiques. Nous ne pouvons plus séparer les éléments qui constituent nos vies au risque d'être totalement dépassés demain comme nous l'avons été hier par la catastrophe épidémiologique que nous avons récemment traversée et dont nous ne sommes, malheureusement, pas encore complètement sortis.

Il nous faut sortir d'un système de pensée mutilant pour nous engager, avec humilité, sur les chemins de la pensée systémique en recherchant les liens entre les éléments qui composent ce système. Il faut également se projeter et anticiper la déstabilisation de nos systèmes complexes en affirmant l'importance d'une véritable vision politique, s'appuyant sur les connaissances universitaires et ce, à l'échelle des territoires. C'est dans ce contexte et pour répondre à cette problématique qu'a été initiée et mise en place la première Université Foraine.

2 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs fixés, une méthodologie a été

réfléchi avec l'ensemble des partenaires du projet.

2.1 Pré-diagnostic

Élaboration d'une instance de co-construction des enjeux et de la problématique. L'Université Foraine a été utilisée afin de délocaliser la recherche universitaire in situ, au plus près des acteurs du territoire. C'est ici le premier jalon de la démarche participative qui a permis d'identifier les axes de travail et de recherche à approfondir sur le territoire étudié.

2.2 Pilote

Création d'un idéal type, en produisant une boussole d'indicateurs élaborée sur la base d'une recherche documentaire exhaustive permettant d'avoir une batterie théorique solide d'une dizaine d'indicateurs à évaluer. L'évaluation portera sur la façon dont la démarche participative aura été productive.

2.3 Diagnostic

Analyse de l'écart entre l'existant et l'idéal. Dans cette seconde étape, notre but sera de faire un diagnostic précis des pratiques des acteurs à l'heure actuelle. Ce travail vise à mesurer la distance qui existe entre les pratiques quotidiennes et l'idéal à atteindre pour faciliter le changement de pratiques des acteurs. Ce travail se fait au sein d'ateliers de co-construction et doit permettre de traduire au mieux le dialogue chercheurs/acteurs dans un ensemble de livrables (facilitations graphiques, design de recherche, diagramme de GANTT, etc.).

2.4 Déploiement

Comblement de l'écart par l'apprentissage. Dans cette phase, il sera proposé aux acteurs un ensemble d'outils favorisant les apprentissages communs avec les acteurs de la recherche. Ce développement s'effectuera en suivant les lignes directrices proposées par les différents indicateurs élaborés en phase « Pilote ». Il s'agit alors de s'appuyer sur les outils de la praxis sociale permettant de faire des expérimentations sociales le socle d'actions communes transformatrices entre chercheurs et acteurs.

2.5 Évaluation d'impact

Analyse de l'impact de l'apprentissage collectif. Il s'agit de terminer cette démarche d'évaluation en permettant la visualisation des différentes évolutions produites par la démarche. Pour le dire autrement, il s'agira de montrer comment chaque axe étudié se trouve amélioré par la démarche des chercheurs et comment la population en a pris conscience.

2.6 Médiatisation de la démarche participative

Notre volonté consiste aussi à impliquer les élèves des écoles, collèges et lycées ; implication qui aura inmanquablement un impact auprès des familles. L'implication de la cellule académique d'éducation aux médias et à l'information permettra par son réseau de web radio de faire connaître les démarches entreprises et surtout d'apprendre aux élèves la façon dont se construit et se concrétise une démarche de recherche.

3 Résultats

La première Université Foraine a été organisée sur le territoire de Sumène-Artense (Cantal) les 11,12 et 13 juillet 2022. Lors de ces rencontres, l'épine dorsale des réflexions menées a été l'importance à donner à la résilience des systèmes territoriaux. Or, selon nous, le territoire de la résilience est un « territoire vécu », c'est-à-dire un espace combinant des réalités géographiques, des réalités socio-économiques, des réseaux d'acteurs sociaux et enfin des représentations socioculturelles. Autrement dit, un « bassin de vie » vu comme un territoire présentant une cohérence géographique, sociale, culturelle et économique, exprimant des besoins homogènes en matière d'activités et de services. Dès lors, la résilience serait avant tout celle des bassins de vie, et en cela nous rejoignons la proposition de Julien Rebotier qui définit la résilience territoriale comme « *la capacité d'un système sociospatial à récupérer d'une perturbation et à diminuer les impacts attendus lors d'une perturbation ultérieure, notamment grâce à l'apprentissage et à l'intégration du retour d'expérience dans les caractéristiques du système* » [1]. Encore plus précisément, la pandémie de la Covid-19 a mis en lumière la fragilité de nos modes de vie et elle a interrogé notre capacité à décrire et identifier quels sont « les territoires de subsistance ». La notion de « territoire de subsistance » a été popularisée par le philosophe Bruno Latour. Elle élargit notre compréhension des territoires en passant d'une définition cartographique et administrative - « *fait territoire tout ce qu'on peut localiser sur une carte en l'entourant d'un trait* » - à une définition « *éthologique : dites-moi de quoi vous vivez, et je vous dirai jusqu'où s'étend votre terrain de vie* » [2]. Le but est de dresser la « *liste des interactions avec ceux dont on dépend* », quels qu'ils soient et où qu'ils soient.

La phase de pré-diagnostic nous permis de commencer ce travail et de faire ressortir le Bien-vivre, l'Alimentation et l'Eau comme axes prioritaires et complémentaires du système territorial résilient étudié.

3.1 Axe « Système alimentaire résilient, local et durable »

Il s'agira ici de permettre l'accès à une alimentation de qualité et abordable pour toutes et tous en mettant en place une relation bénéficiaire entre le bien-être des habitants et le développement d'une sécurité alimentaire de qualité à l'échelle du territoire. Cet axe proposera notamment de concevoir et distribuer, à partir de producteurs et distributeurs locaux, de petites bouchées gourmandes et pratiques (finger foods) qui apparaissent comme des solutions adaptées permettant de redonner l'appétit aux aînés et d'augmenter la quantité journalière d'apports nutritionnels. Ce travail rassemblera les compétences de deux laboratoires de recherche de l'Université et d'une unité de recherches cliniques du CH de Mauriac.

3.2 Axe autour de « l'Eau et de sa qualité »,

La qualité de l'eau impactera directement la capacité du territoire à développer une résilience alimentaire et un bien-être physique, car sans eaux de qualité il est impossible d'imaginer une alimentation de qualité et une qualité de vie. Cet axe vise le développement d'une méthodologie multidisciplinaire rassemblant les compétences de trois laboratoires de recherche de l'Université Clermont Auvergne avec des expertises sur la mise au point (i) de biomarqueurs de résistance utilisant une analyse de sang de truite (ii) de bioessais utilisant un modèle original de toxicité, le ver translucide *C. elegans* et (iii) la science des données permettant l'analyse et la modélisation de l'ensemble des données issues des deux autres approches. L'ensemble de ces travaux sera réalisé avec la participation des pêcheurs de différentes communes de Sumène-Artense.

3.3 Axe « Santé-Bien être »

Le travail entrepris visera le développement de démarches de sensibilisation, de pédagogie et de co-construction des politiques publiques en matière d'aménagements. Cet axe concourt aussi à l'activité physique et récréative favorisant le bien-être des habitants et en s'appuyant sur le travail réalisé par les acteurs locaux et le service de Santé Publique du CHU de Clermont-Ferrand.

4 Conclusion

A travers la première Université Foraine qui a réuni plus d'une centaine de chercheurs et acteurs du territoire pendant trois jours, l'IUT Clermont Auvergne a mis en place un processus de recherche interdisciplinaire au service de ses territoires. La recherche-action en communication s'est concentrée sur la dimension participative et a servi d'interface à la construction de la recherche fondamentale qui, pour sa part, se décline par la conjugaison de compétences pluridisciplinaires. L'axe sur l'eau rassemble des biologistes et des informaticiens. Celui sur la nutrition associe informaticiens et médecins qui sont aussi impliqués dans le troisième axe aux côtés d'ergonomistes et de gestionnaires. Les travaux autour de ces axes se poursuivront jusqu'au printemps 2025, moment de clôture de cette première édition au cours duquel sera fait un bilan de l'ensemble des actions menées.

Références

- [1] Julien Rebotier, *Quel rôle pour les institutions dans la résilience ? : Une interprétation à travers le cas de Caracas*. Construire la résilience des territoires (IRD - UCV) Valparaiso, Chili, Oct 2007.
- [2] Bruno Latour, *Où suis-je ? : Leçons du confinement à l'usage des terrestres*, 2021.

Optimisation de la synthèse enzymatique du monolaurylsuccinate, précurseur du lauryl succinate propane de glucose

Alexis Spalletta

Nicolas Joly

Patrick Martin

alexis.spalletta@univ-artois.fr nicolas.joly@univ-artois.fr patrick.martin@univ-artois.fr

IUT, Béthune

Univ. Artois, UniLasalle, ULR7519 - Unité Transformations & Agro-Ressources, F-62408 Béthune, France

Thèmes – Chimie - Environnement

Résumé – *La chimie classique et conventionnelle nécessite aujourd'hui des changements profonds pour être en phase avec les problèmes d'aujourd'hui et de demain. L'un des enjeux est la décarbonation des procédés. La biocatalyse, c'est-à-dire le recours aux catalyseurs d'origine naturelle, tels que les enzymes, apparaît comme une solution concrète pour synthétiser des molécules biosourcées avec des procédés industriels plus durables et respectant les principes de la chimie verte. Ces derniers sont notamment l'économie d'énergie, la sélectivité du produit ou encore la monodispersité. Parallèlement à cette volonté, de nouveaux composés de type tensioactif sont nécessaires afin d'améliorer leurs propriétés dans différents champs d'application : détergeant, industrie alimentaire, agriculture. Le recours aux enzymes permet d'envisager l'obtention de ces molécules plus complexes. Cette étude porte sur l'optimisation de la synthèse du monolaurylsuccinate, à partir du diethylsuccinate et du dodécan-1-ol, dans le 2-méthylbutan-2-ol – 56°C – 240 rpm – 1% (w/v) Lipase *Aspergillus Niger* fixée. La synthèse de ce composé permet l'obtention du monolaurylsuccinate et du dilaurylsuccinate, avec des rendements molaires de 49% et 25% respectivement. Une seconde étape sans traitement intermédiaire, principe fondamental de la chimie verte, vise l'addition du propan-1,3-diol sur le monolaurylsuccinate. La cinétique de la réaction montre la décroissance plus importante du monolaurylsuccinate par rapport au dilaurylsuccinate. Ce composé pourra alors être greffé sur le D-glucose afin d'obtenir un tensioactif complexe, respectant les principes de la chimie verte.*

Mots-Clés – Biocatalyse, Optimisation, enzymatique

Introduction

L'industrie chimique est responsable d'une part de la production de gaz à effet de serre ainsi que de polluants. De ce fait, la chimie verte a vu le jour. Cette chimie, en phase avec les enjeux environnementaux, réchauffement climatique et crise énergétique notamment, engage les industriels à produire en réduisant l'impact environnemental des procédés [1]. Il est ainsi nécessaire de réduire la dépendance au pétrole (chimie pétrosourcée). Le travail mené au sein de notre unité (IUT de Béthune) vise à concevoir des tensioactifs par une chimie verte. Les tensioactifs, nommés souvent détergents, représentent une part importante de la production de l'industrie. Leur présence est largement répandue dans les produits du quotidien comme les shampoings, les savons, ou encore les peintures. Ils ont pour effet de réduire les effets aux interfaces de deux milieux (air/eau, huile/eau, ...) [2]. Une manière d'illustrer les tensioactifs étudiés est d'imaginer un sucre (fraction hydrophile), lié à une chaîne grasse (fraction lipophile). Leurs usages sont multiples dans l'industrie pour leurs propriétés lubrifiantes et émulsifiantes. Les tensioactifs sont également présents dans les préparations pharmaceutiques, ainsi que dans les produits phytosanitaires [3].

Enjeux & Objectifs

Etant donné leur omniprésence, les tensioactifs représentent un enjeu majeur. Il est donc nécessaire de trouver de nouvelles voies de conception de manière écoresponsable et à partir de ressources renouvelables [4]. L'utilisation des enzymes comme moteur de ces transformations est une approche intéressante pour concevoir ces tensioactifs et constitue donc une des clés face aux problématiques environnementales. Les enzymes vont ici jouer le rôle de biocatalyseur. Elles sont généralement décrites comme dégradant nos aliments. Ici, leur activité est de lier un sucre et une chaîne grasse. Les voies enzymatiques présentent de nombreux avantages par rapport aux synthèses chimiques classiques comme l'économie d'énergie et la sélectivité des produits. Elles permettent ainsi d'éviter les co-produits et les déchets indésirables. Ce projet de recherche a donc pour objectif de produire des tensioactifs par voie enzymatique tout en optimisant certains paramètres.

Au-delà de l'aspect de production des tensioactifs, le travail mené vise également, dans un second temps, à obtenir des molécules avec des propriétés supplémentaires, additionnelles à celles des tensioactifs classiques. Ainsi, l'objectif est d'établir une stratégie permettant de réaliser des synthèses multi-étapes, tout en limitant leur nombre. Nos travaux de recherche visent l'obtention d'un tensioactif avec un espaceur entre la tête polaire (sucre) et la queue apolaire (chaîne grasse) afin d'apporter une

propriété ajoutée (Figure 1). En effet, la présence d'un espaceur permettrait de moduler les propriétés, et d'obtenir des composés à propriétés antimicrobiennes. L'enjeu est donc à la fois chimique et biologique.

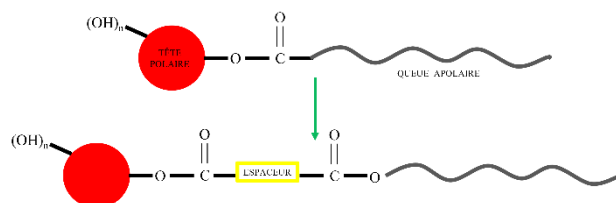


Figure 1- Représentation schématique du tensioactif modifié par insertion d'un bras espaceur

Les travaux présentés ici consistent en la synthèse d'un tensioactif composé de D-glucose (partie hydrophile – sucre), de diéthylsuccinate (espaceur) et de dodécane-1-ol (partie lipophile - grasse ; queue apolaire) (Figure 2). Par ce travail, nous proposons la synthèse d'un dérivé laurylsuccinate propane-1-ol en 2 phases, sans étapes de traitements intermédiaires.

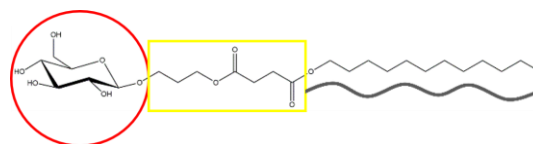


Figure 2- Molécule cible ; laurylsuccinatepropane D-glucose

Résultats

Synthèse du monolaurylsuccinate

La synthèse du monolaurylsuccinate (Figure 3), à partir de diéthylsuccinate et de dodécane-1-ol, est réalisée dans le 2-méthylbutan-2-ol, selon les conditions suivantes : 56°C, 240 rpm (rotation par minute), 1% (w/v) Lipase *Aspergillus Niger* fixée commercialement sur résine.

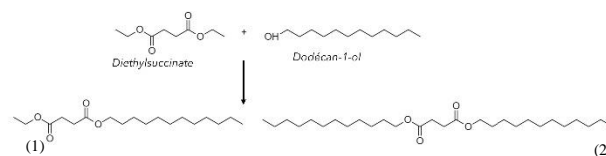


Figure 3- Synthèse du laurylsuccinate

Cette synthèse permet ainsi l'obtention du monolaurylsuccinate (1) et du dilaurylsuccinate (2). Il est possible de suivre la formation de ces 2 composés par une technique chromatographique et ainsi de quantifier les composés. Par ailleurs, il nous a été possible de réaliser des suivis cinétiques de cette synthèse. Ainsi il apparaît que le maximum de rendement obtenu pour le monolaurylsuccinate, plus intéressant pour la suite de

l'étude, est obtenu après 2 heures. Il a été possible de former le monolaurylsuccinate avec un rendement de 49%. Le rendement en dilaurylsuccinate étant de 25%, la synthèse a donc un rendement global de 74% (Figure 4).

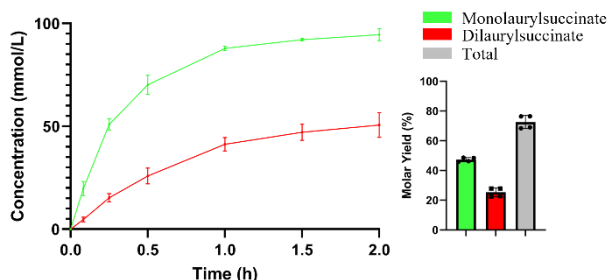


Figure 4- Résultats pour la synthèse des dérivés laurylsuccinate

D'autres paramètres non détaillés ici, ont été optimisés. L'optimisation et donc le contrôle de ces différents paramètres permet de moduler la quantité de monolaurylsuccinate obtenue par rapport à la quantité de dilaurylsuccinate.

Addition du propan-1,3-diol sur le monolaurylsuccinate

La seconde étape de cette synthèse est l'addition d'un diol (molécule avec deux groupements alcool). Ce dernier permet la fixation de la chaîne grasse sur le sucre. Le propane-1,3-diol (1) a donc été ajouté sur le monolaurylsuccinate (2) (Figure 5) afin d'obtenir le composé (3). La conversion du monolaurylsuccinate et du dilaurylsuccinate a été suivie par chromatographie et est présentée Figure 6.

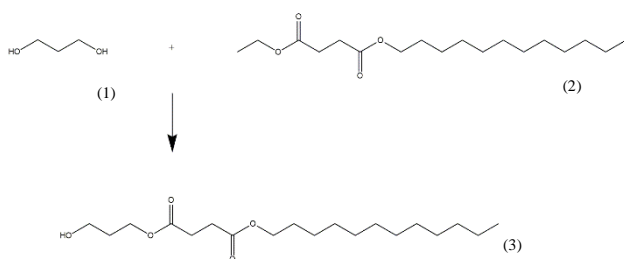


Figure 5- Synthèse du laurylsuccinate propane-1-ol

La conversion du monolaurylsuccinate et du dilaurylsuccinate est suivie et quantifiée (mmol/L). Le produit désiré, le laurylsuccinate propane-1-ol et le disubstitué, dipropanolsuccinate, sont également suivis et quantifiés. Il est possible de noter la décroissance plus rapide du monolaurylsuccinate comparé au dilaurylsuccinate. Il convient donc par l'optimisation des paramètres de synthèse de moduler la quantité de monolaurylsuccinate produit lors des deux premières heures de réaction.

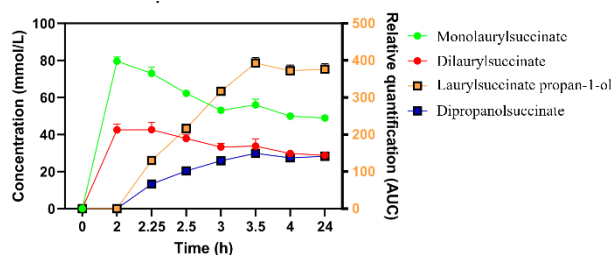


Figure 6- Suivi de conversion du monolaurylsuccinate et du dilaurylsuccinate en laurylsuccinate propane-1-ol

Conclusions

Ce travail a permis de montrer la possibilité d'une synthèse en 2 étapes d'un dérivé laurylsuccinate propane-1-ol par la lipase d'*Aspergillus Niger*. Une optimisation de cette synthèse a été réalisée. Dans la continuité de ce travail, l'objectif est désormais de greffer le laurylsuccinate propane-1-ol sur le D-glucose afin d'obtenir un tensioactif. Les perspectives sur ces travaux sont multiples, à commencer par l'extrapolation des paramètres de synthèses à d'autres molécules, afin de moduler l'activité biologique et donc l'application de ces tensioactifs. Enfin, des tests biologiques permettront de caractériser plus finement les champs d'applications de ces composés.

Remerciements

Ce travail, réalisé au sein de l'Unité Transformations & Agroressources (ULR7519) hébergée au sein de l'IUT de Béthune, a été financé par l'Université d'Artois et par mutualisation des équipements recherche et pédagogique.

Références

- [1] M. Santi *et al.*, « Flow Biocatalysis: A Challenging Alternative for the Synthesis of APIs and Natural Compounds », *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 22, n° 3, Art. n° 3, janv. 2021, doi: 10.3390/ijms22030990.
- [2] D. P. Sachdev et S. S. Cameotra, « Biosurfactants in agriculture », *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 97, n° 3, p. 1005-1016, 2013, doi: 10.1007/s00253-012-4641-8.
- [3] L. Chaveriat, I. Gosselin, C. Machut, et P. Martin, « Synthesis, surface tension properties and antibacterial activities of amphiphilic D-galactopyranose derivatives », *Eur J Med Chem*, vol. 62, p. 177-186, avr. 2013, doi: 10.1016/j.ejmech.2012.12.032.
- [4] M. Deleu et M. Paquot, « From renewable vegetables resources to microorganisms: new trends in surfactants », *Comptes Rendus Chimie*, vol. 7, n° 6-7, p. 641-646, juin 2004, doi: 10.1016/j.crci.2004.04.002.

Développement d'un nouvel outil de concentration et de quantification de SARS-CoV-2 dans les eaux usées

Ghina El Soufi^{1,2,3} Jeanne Van Assche^{1,2} Thomas Loustau^{1,2}
Christian Schwartz^{1,2} Dominique Trebouet^{1,3} Olivier Rohr^{1,2}
Maud Villain-Gambier^{1,3} Clémentine Wallet^{1,2}

ghina.elsoufi@unistra.fr jvanassche@unistra.fr thomas.loustau@unistra.fr
christian.schwartz@unistra.fr dominique.trebouet@unistra.fr olivier.rohr@unistra.fr
maud.villain@unistra.fr clementine.wallet@unistra.fr

¹ IUT Louis Pasteur, Université de Strasbourg

² Laboratoire DHPI, UR 7292, Université de Strasbourg

³ IPHC – CNRS – UMR 7178, Université de Strasbourg

Thèmes – *Biologie - Santé – Environnement - Bioprocédés*

Résumé – *La surveillance de la circulation du SARS-CoV-2 dans les eaux usées a démarré dès le début de la pandémie d'une façon exploratrice en France et dans de nombreux pays du monde. Cette surveillance permet de détecter et de suivre la propagation du virus au sein d'une population indépendamment des stratégies de dépistages. Cependant, les protocoles utilisés ne permettent pas de quantifier le contenu viral des eaux lorsque celui-ci va décroître. Le laboratoire DHPI en collaboration avec l'équipe RePSeM de l'IPHC ont élaboré une nouvelle méthode de concentration et de quantification de SARS-CoV-2 dans les eaux usées. Cette méthode peu coûteuse permet déjà de concentrer 40 fois le virus (de $9,3 \cdot 10^2$ à $3,8 \cdot 10^4$ d'ARN extrait en moyenne en fonction des échantillons) par rapport à la technique d'extraction classique. L'optimisation de ce protocole est encore en évolution dans le but d'obtenir un meilleur rendement (concentration de 100 fois). Les rendements varient beaucoup en fonction des stations d'épuration et des prélèvements. Une analyse plus approfondie de la composition des eaux est prévue afin de mieux comprendre les différences de taux de récupération de virus potentiellement impactés par la composition des eaux usées.*

Mots-Clés – *SARS-CoV-2, eaux usées, ultrafiltration, membranes*

1 Introduction

Au cours des dernières décennies, le nombre de nouveaux virus pathogènes humains a fortement augmenté[1]. En décembre 2019, une épidémie liée à un nouveau coronavirus (SARS-CoV-2) a été signalée en Chine, et s'est rapidement propagée dans le monde entier.

Les tests de dépistage réalisés par les patients permettent d'avoir une image limitée et sous-estimée de l'épidémie. En effet, cette stratégie ne permet pas de prendre en compte les personnes asymptomatiques et pré-symptomatiques dont la contagiosité est établie et qui contribueraient à près de la moitié des contaminations[2].

La quantification du SARS-CoV-2 dans les eaux usées représente un outil alternatif permettant une évaluation plus globale, moins cher et fiable de la circulation du virus au sein d'une population. La plupart des protocoles utilisés pour la surveillance de SARS-CoV-2 dans les eaux usées se basent sur des extractions virales à partir des petits volumes d'échantillons. Ces protocoles ne permettent pas de quantifier le virus lorsque celui-ci est présent en faible quantité (ralentissement épidémique, dilution des eaux usées à cause de la pluviométrie etc.). De plus, l'identification par séquençage de différents variants génétiques viraux demande une certaine quantité et qualité de matériel génétique. Ainsi, il y a besoin de mettre en place un protocole de quantification du virus plus sensible, qui sera également utilisé pour suivre l'émergence de variants, et quantifier le SARS-CoV-2 dans les eaux d'entrée de station d'épuration, mais aussi à la sortie, ainsi que dans les eaux destinées à la consommation humaine.

Il existe plusieurs méthodes de concentration virale décrites dans la littérature : ultrafiltration, précipitation au polyéthylène glycol, floculation, utilisation des membranes électro-négatives etc. Ces méthodes varient considérablement en termes de coût et d'accessibilité aux réactifs[3]. De plus, il a été démontré que certaines méthodes standards sont inefficaces pour récupérer les virus enveloppés à partir d'échantillons d'eaux environnementales[4].

Dans le cas du SARS-CoV-2, il n'existe pas de méthodologie standard mise au point pour sa quantification et sa détection. Les protocoles varient selon le volume ou le type d'échantillon, les conditions de stockage, la méthode de concentration, ou la méthode d'extraction d'ARN.

Dans cette étude, nous avons mis en œuvre un nouveau protocole de concentration et de quantification du SARS-CoV-2 à partir des volumes des 500 mL d'eaux usées.

2 Matériels et méthodes

2.1 Échantillons d'eaux usées

Les échantillons d'eaux usées sont prélevés sur 24 heures en entrée des stations d'épuration et conservés à 4°C. Notre laboratoire reçoit des échantillons de 11 stations différentes chaque semaine.

2.2 Concentration de SARS-CoV-2

Une étape de concentration par ultrafiltration frontale est effectuée avant de quantifier le virus dans les échantillons (figure 1). L'eau usée est concentrée grâce à un système Amicon® et une membrane de cellulose dont le seuil de coupure est de 10 kDa. Ce système permet de concentrer les particules virales présentes dans 500 mL d'eau usée brute en 5 mL. Le rétentat contenant les virus concentrés est récupéré et soumis ensuite à l'extraction virale.

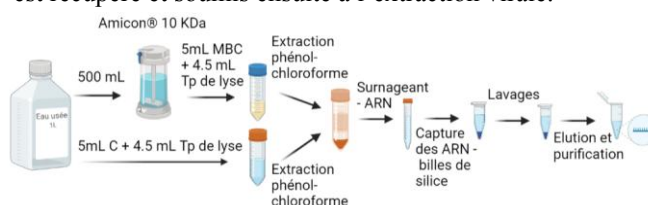


Figure 1 - Schéma du protocole expérimental

2.3 Extraction et purification de l'ARN viral

Ce protocole (figure 1) permet d'extraire l'ARN viral : le génome du SARS-CoV-2 à partir d'un échantillon de 5 mL d'eau usée brute (C) et/ou concentré par ultrafiltration (MBC). Ce volume de 5 mL est lysé avec un tampon composé de thiocyanate de guanidium. Une première étape de purification au phénol/chloroforme permet de se débarrasser des matières en suspension, ainsi que de la plupart des protéines et membranes cellulaires. Une deuxième étape de purification par capture des ARN sur billes de silice est ensuite réalisée. Les ARN sont enfin élués puis purifiés sur colonnes spécifiques afin d'éliminer les molécules pouvant inhiber et gêner la méthode de quantification par RT-qPCR. On passe ainsi d'un volume de 500 mL d'eau usée, à un volume de 100 µL d'ARN purifiés.

2.4 RT-qPCR

La RT-qPCR est une technique qui permet de faire une PCR (réaction en chaîne par polymérase) quantitative à partir d'un échantillon d'ARN. L'ARN est tout d'abord rétro-transcrit grâce à une enzyme appelée la transcriptase inverse, qui permet la synthèse de l'ADN complémentaire (ADNc). Cette retro-transcription est suivie ensuite par une étape d'amplification d'ADN en présence des amorces et une sonde spécifique. L'amplification se déroule en présence des molécules fluorescentes dont la fluorescence augmente proportionnellement au nombre de molécules d'ADN.

3 Résultats

Nous avons effectué des concentrations d'eaux usées de la semaine 5 à la semaine 40 de 2022 sur 4 stations différentes. La figure 2 représente les quantités des ARN du SARS-CoV-2 extraits et quantifiés par RT-qPCR pour des échantillons d'eaux usées brutes (symbole carré bleu) et les échantillons correspondants concentrés par ultrafiltration (symbole circulaire orange). Nous avons obtenu en moyenne 41 fois plus d'ARN viral dans nos échantillons concentrés que dans les échantillons bruts ($9,3.10^2 \pm 1,8.10^2$ d'ARN extrait en moyenne pour les échantillons C, et $3,8.10^4 \pm 8,2.10^3$ pour les échantillons MBC).

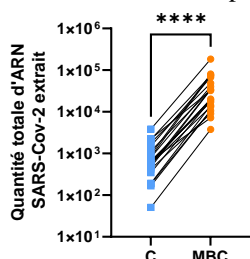


Figure 2 - La quantité totale d'ARN SARS-CoV-2 extrait augmente en moyenne 41 fois entre la fraction d'eau usée brute (C) et la fraction concentrée par ultrafiltration (MBC).

Ce qui signifie que nous avons réussi à enrichir les échantillons en ARN viral grâce à l'étape de concentration par ultrafiltration (Amicon® 10 kDa), toutefois sans atteindre l'enrichissement théorique optimal qui correspond à 100 fois. De plus nous observons une très forte disparité dans notre rendement de concentration. Les eaux usées ont des compositions très variables en fonction des zones et des infrastructures auxquelles elles sont connectées. Le rendement de récupération peut être impacté par la nature des eaux usées. La figure 3 montre le taux de récupération du SARS-CoV-2 pour différents échantillons prélevés de 4 stations d'épuration pendant différentes semaines.

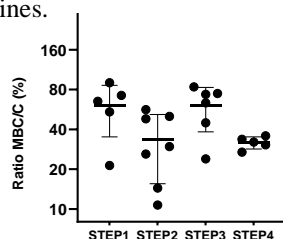


Figure 3 - Le taux de récupération du virus exprimé en ratio MBC/C (%) est variable d'une semaine à l'autre. Représentation pour des eaux prélevées de 4 stations d'épuration différentes.

Les taux sont variables selon les stations (61% en moyenne pour la STEP1, 34% pour STEP2, 61% pour STEP3 et 32% pour STEP4). Ces taux sont également variables en fonction des semaines pour une même STEP (écart-type de 26% pour STEP1, 18% pour STEP2, 22%

pour STEP3 et 3% pour STEP4). Nous avons effectué des tests de répétabilité de la méthode sur une même eau provenant de la même station. Nos résultats montrent une bonne répétabilité de notre système : concentration / purification / quantification (résultats non montrés ici). Nous pouvons supposer que d'autres facteurs influencent le taux de récupération du virus (pluviométrie, température extérieure, rejet saisonnier industriel ou agricole etc.), même si des tendances se dessinent pour certaines stations (notamment la STEP4). Pour arriver à normaliser notre technique et à la rendre quantitative, une étude est en cours pour déterminer quels paramètres physico-chimiques de l'eau usée peuvent influencer ce rendement.

4 Conclusions

En conclusion, nous avons mis en place un protocole permettant la détection et la quantification du SARS-CoV-2 dans les eaux usées. Ce protocole comprend trois étapes principales : Concentration par ultrafiltration (Amicon® 10 kDa), extraction de l'ARN du SARS-CoV-2 et enfin quantification de l'ARN extrait par RT-qPCR.

Concernant l'extraction de l'ARN, nous utilisons un protocole « home-made » spécifique à notre laboratoire, qui pourra être utilisé par la suite par d'autres laboratoires. Notre protocole a l'avantage d'être moins cher par comparaison aux kits commerciaux déjà existants sur le marché.

L'optimisation du protocole de la concentration et des conditions opératoires est encore en évolution dans le but d'obtenir le rendement optimal. Une analyse plus approfondie de la composition des eaux, telle que l'analyse de la composition ionique est prévue afin de mieux comprendre les différences de taux de récupération de virus potentiellement impactés par le contenu en espèces ioniques des échantillons.

Références

- [1] K. Farkas, L. S. Hillary, S. K. Malham, J. E. McDonald, and D. L. Jones, "Wastewater and public health: the potential of wastewater surveillance for monitoring COVID-19," *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, vol. 17, pp. 14–20, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.coesh.2020.06.001.
- [2] X. He *et al.*, "Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19," *Nat. Med.*, vol. 26, no. 5, Art. no. 5, May 2020, doi: 10.1038/s41591-020-0869-5.
- [3] P. A. Barril *et al.*, "Evaluation of viral concentration methods for SARS-CoV-2 recovery from wastewaters," *Sci. Total Environ.*, vol. 756, p. 144105, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144105.
- [4] M. Kitajima *et al.*, "SARS-CoV-2 in wastewater: State of the knowledge and research needs," *Sci. Total Environ.*, vol. 739, p. 139076, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139076.

Développement de revêtements antifouling écoresponsables

Fabrice Azemar¹ Isabelle Linossier¹

fabrice.azemar@univ-ubs.fr isabelle.linossier@univ-ubs.fr

¹ IUT, Lorient-Pontivy

Laboratoire de Biotechnologie et Chimie Marines, EMR 7373

Thèmes – *Chimie - Environnement*

Résumé – *Les peintures antifouling sont aujourd'hui le mode de protection le plus utilisé pour lutter contre la colonisation par des organismes (bactéries, algues, mollusques) sur des surfaces immergées en milieu marin. Leur utilisation représente surtout un enjeu économique et environnemental. De nombreuses recherches ont été effectuées pour augmenter leur durée de vie et leur efficacité contre le biofouling. Malheureusement, la plupart du temps ces évolutions ont été faites au détriment de l'environnement. Jusqu'à ce jour, l'impact de ces revêtements sur la qualité de l'eau et les organismes marins est catastrophique. Ces dernières années, les différents projets développés au sein du LBCM visent à mesurer l'impact environnemental et à développer des peintures et des revêtements avec un impact sur le milieu marin le plus faible possible.*

Mots-Clés – *Antifouling, revêtements, polymères, environnement marin.*

1 Introduction

Les peintures antifouling sont aujourd'hui le mode de protection le plus utilisé pour lutter contre le biofouling sur des surfaces immergées en milieu marin. Ce phénomène est une colonisation et une accumulation d'organismes tels que des bactéries, des algues ou des mollusques. Cette colonisation n'est pas anodine : perte d'hydrodynamisme, alourdissement des structures, microenvironnements favorisant la corrosion ou réduction des flux hydrauliques sont autant d'éléments sur la liste (non exhaustive) des conséquences du fouling. Le processus de colonisation engendre des préjudices dans tous les secteurs d'activité en contact avec le milieu aqueux (plates-formes off-shore, aquaculture, transport maritime,...). Le surcoût mondial généré par les conséquences du biofouling est estimé à plus de 5 milliards de dollars par an. La mise en œuvre et développement plus simples des peintures antifouling, ainsi que leur prix plus faible que les autres techniques de protection actuelles expliquent cette hégémonie.

De nombreuses recherches ont été effectuées pour augmenter leur durée de vie et leur efficacité contre le biofouling. Malheureusement, la plupart du temps ces évolutions ont été faites au détriment de l'environnement. De nos jours, deux stratégies sont utilisées : un système libérant des molécules actives naturelles ou synthétiques appelées biocides. L'utilisation de ces molécules souvent toxiques pour l'environnement est réglementée par l'Union Européenne. L'autre système ne libère en théorie aucune substance, il est basé sur des propriétés physico-chimiques pour limiter l'adhésion du biofouling aux revêtements et nécessite une action mécanique pour être efficace. Ces deux systèmes montrent donc des limites.

Afin de comprendre et de mesurer l'importance du développement de nouveaux revêtements antifouling des études ont été faites dans un premier temps sur l'impact des systèmes actuels. Les résultats ont montré que la mise sur le marché de revêtements écoresponsables est un des objectifs du futur. Pour cela, les projets développés au LBCM se sont focaliser autour de polymères biosourcés et biodégradables..

2 Toxicologie des revêtements antifouling

L'utilisation de biocides dans la majorité des revêtements antifouling présents sur le marché a généré de nombreuses problématiques sur les espèces marines. L'exemple le plus connu est dû à l'introduction sur le marché des composés à base de tributyle étain (TBT). Ces peintures avec une grande efficacité et la bioaccumulation du TBT ont causé des anomalies sur les coquilles d'huîtres [1] et d'autres malformations jusqu'à leur interdiction. Actuellement, les biocides utilisés sont des composés métalliques à base de cuivre ou de zinc [2].

Leur toxicité a largement été étudiée. Mochida et al. ont montré que le cuivre est nocif pour les algues et les mollusques [3]. Néanmoins, chaque année de grandes quantités de biocides sont libérés dans l'océan et leurs bioaccumulations engendrent des problèmes environnementaux et des modifications génétiques [4].

Les revêtements à base de biocides ne semblent pas être les seuls responsables de toxicité en milieu marin. Les revêtements à effet de surface utilisent le silicone comme matrice. Pour augmenter leur efficacité, des additifs sont introduits comme des huiles silicones ou des composés hydrophiles. Ces revêtements sont vendus comme bons pour l'environnement. Cependant, les huiles silicones peuvent avoir un impact sur les espèces marines [5]. Lors du projet Nautisme en Finistère en collaboration avec Finistère 360°, nous avons montré que la toxicité de ces revêtements sur le microalgues (Figure 1) et sur des larves de poisson est comparable à la toxicité des peintures contenant des biocides.

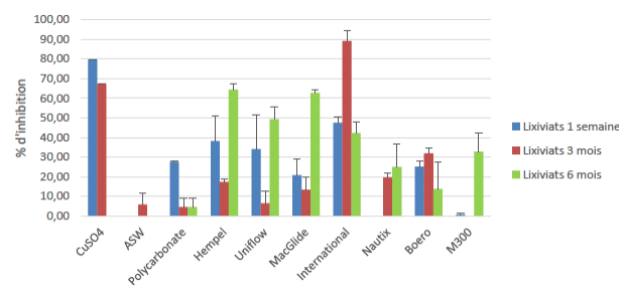


Figure 1 – Inhibition de la croissance de *P. tricornutum* en présence des lixiviats des différents revêtements antifouling

3 Impact des revêtements antifouling sur la qualité de l'eau

La grande majorité des revêtements antifouling libère des substances dans l'environnement marin. La qualité de l'eau est un enjeu majeur de nos jours. De nombreuses activités qu'elles soient professionnelles ou récréatives dépendent d'une bonne qualité de l'eau. De nombreuses études ont montré une bioaccumulation des substances utilisées comme biocide. En 2011, dans le parc marin d'Iroise, des valeurs de 2 à 18 fois supérieures au seuil d'écotoxicité ont été trouvées pour certains biocides. Les biocides les plus fréquemment identifiés lors de cette étude étaient des substances interdites. Une autre étude réalisée dans la baie de Toulon et publiée par Tessier *et al.* montre des quantités importantes en métaux lourds provenant de revêtements antifouling (Figure 2).

Avec le développement croissant des revêtements sans biocides à base de silicone, une nouvelle problématique apparaît tout aussi préoccupante que celle des biocides. La libération et la bioaccumulation de particules de silicones qui peuvent être considérés comme des microplastiques. Le silicone étant un polymère pétrosourcé non dégradable dans le milieu marin.

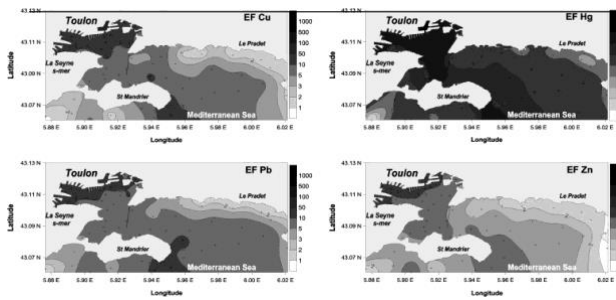


Figure 2 – Distributions spatiales des facteurs d'enrichissement normalisés (Cu, Hg, Pb, Zn) dans la baie de Toulon [6]

4 Développement de nouveaux revêtements

Ces dernières années, les différents projets développés au sein du LBCM visent à développer des peintures et des revêtements avec l'impact environnemental le plus faible possible. Dans un premier temps, l'objectif a été de réduire la quantité de biocides dans les peintures antifouling en développant des peintures hybrides. Ces revêtements à base de PDMS et polyesters ont montré une efficacité comparable aux peintures industrielles tout en utilisant trois fois moins de biocides [7]. Par la suite, les fortes restrictions européennes entourant les substances biocides ont mené le LBCM à les supprimer et à se concentrer sur les systèmes fouling release à base de PDMS et la compréhension de leur mode de fonctionnement [8]. L'efficacité de ces revêtements passe par l'ajout d'additifs comme des huiles silicones ou des composés hydrophiles tel que le PEG. Le premier ayant une toxicité vis à vis des organismes marins, les études se sont concentrées sur le second type d'additifs. L'homogénéité du revêtement est importante afin d'obtenir les propriétés physico-chimiques et mécaniques nécessaires aux revêtements fouling release. Les résultats ont montré que l'architecture de l'additif est le paramètre le plus important pour obtenir un revêtement avec les propriétés désirées et une efficacité sur l'adhésion des organismes marins. De plus, l'architecture permet de limiter la libération de l'additif, ce qui a une importance sur le temps de vie du revêtement mais qui permet surtout d'éviter leur libération et leur bioaccumulation dans le milieu marin. Enfin, pour limiter encore plus l'impact environnemental de nos revêtements, plusieurs études ont été menées dans le but de remplacer le PDMS et l'additif hydrophile par des polymères moins impactants pouvant être biodégradables et/ou biosourcés. Ces études ont montré que des polymères comme le PHA [9] ou le polytriméthylène carbonate pouvaient avoir des propriétés physico-chimiques intéressantes et une efficacité anti-adhésive comparable. Mais aussi que des polymères hydrophiles comme la polyoxazoline [10] ou des polyesters pouvaient être utilisés comme additifs pour améliorer l'efficacité des revêtements amphiphiles.

5 Conclusions

Le développement de revêtements antifouling sans libération de biocides avec un impact environnemental quasi nul est une nécessité et un objectif majeur pour la communauté scientifique et la société. Les résultats obtenus lors des différents projets ont montré que l'utilisation de polymères biodégradables et biosourcés s'inscrivait dans cette recherche prospective.

6 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à Finistère 360° pour la mise en place de l'étude sur les antifouling. La majeure partie des travaux a été financée dans le cadre de l'ANR SAFER 15-LCV4-0006.

Références

- [1] C. L. Alzieu, J. Sanjuan, J. P. Deltreil, et M. Borel, « Tin contamination in Arcachon Bay: Effects on oyster shell anomalies », *Marine Pollution Bulletin*, vol. 17, n° 11, p. 494-498, 1986.
- [2] I. Amara, W. Miled, R. B. Slama, et N. Ladhari, « Antifouling processes and toxicity effects of antifouling paints on marine environment. A review », *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 57, p. 115-130, 2018.
- [3] K. Mochida, K. Ito, H. Harino, A. Kakuno, et K. Fujii, « Acute toxicity of pyrithione antifouling biocides and joint toxicity with copper to red sea bream (*Pagrus major*) and toy shrimp (*Heptacarpus futilirostris*) », *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 25, n° 11, p. 3058-3064, 2006.
- [4] A. J. McBain, A. H. Rickard, et P. Gilbert, « Possible implications of biocide accumulation in the environment on the prevalence of bacterial antibiotic resistance », *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 29, n° 6, p. 326-330, 2002.
- [5] M. Nendza, « Hazard assessment of silicone oils (polydimethylsiloxanes, PDMS) used in antifouling-/foul-release-products in the marine environment », *Marine Pollution Bulletin*, vol. 54, n° 8, p. 1190-1196, 2007.
- [6] E. Tessier *et al.*, « Study of the spatial and historical distribution of sediment inorganic contamination in the Toulon bay (France) », *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, n° 10, p. 2075-2086, 2011.
- [7] F. Azemar, F. Faÿ, K. Réhel, et I. Linossier, « Ecofriendly silicon-poly(lactic acid) hybrid antifouling coatings », *Progress in Organic Coatings*, vol. 148, p. 105841, 2020.
- [8] G. Gillet, F. Azemar, F. Faÿ, K. Réhel, et I. Linossier, « Non-Leachable Hydrophilic Additives for Amphiphilic Coatings », *Polymers*, vol. 10, n° 4, Art. n° 4, 2018.
- [9] A. Guennec *et al.*, « Antifouling properties of amphiphilic poly(3-hydroxyalkanoate): an environmentally-friendly coating », *Biofouling*, vol. 37, n° 8, p. 894-910, 2021.
- [10] É. Portier *et al.*, « Poly(oxazoline) for the design of amphiphilic silicone coatings », *Progress in Organic Coatings*, vol. 153, p. 106116, 2021.

La « Permeability glycoprotein » (P-gp) : un biomarqueur de la résistance cellulaire applicable en Santé & Environnement

Maxime DUBOIS¹, Antoine GOISNARD¹, Pierre DAUMAR¹, Clémence DUBOIS⁴, Elodie GAY¹, Marie DEPRESLE⁴, Manon ROUX⁴, Alexandra MASSÉ⁵, Frédérique PENAULT-LLORCA^{2,3}, Emmanuelle MOUNETOU¹ & Mahchid BAMDAD^{1*}

maxime.dubois@uca.fr antoine.goisnard@uca.fr pierre.daumar@uca.fr clemence.dubois@uca.fr
elodie.gay@uca.fr marie.depresle@uca.fr manon.roux@uca.fr alexandra.masse@uca.fr
Frederique.PENAULT-LLORCA@clermont.unicancer.fr emmanuelle.mounetou@uca.fr mahchid.bamdad@uca.fr

¹ IUT Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne
Laboratoire Imagerie Moléculaire et Stratégies Théranostiques, UMR INSERM UCA 1240

² UFR Médecine et professions paramédicales, Université Clermont Auvergne
Laboratoire Imagerie Moléculaire et Stratégies Théranostiques, UMR INSERM UCA 1240

³ Centre de Lutte contre le Cancer Jean Perrin, Clermont-Fd

⁴ BIOMARQUEURS SAS, IUT Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne

⁵ BIOPASS SAS, IUT Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne

* Corresponding auteur

Thèmes –Biologie - Santé

Résumé – La « Permeability glycoprotein » (P-gp) est un transporteur membranaire de phénotype « Multidrug Resistance ». Très ubiquitaire et extrêmement conservée au cours de l'évolution, cette protéine est exprimée à l'état naturel dans pratiquement tous les organismes vivants, de procaryotes aux mammifères. La P-gp est une pompe d'efflux membranaire à rôle détoxificateur qui reconnaît, cible et expulse une multitude de xénobiotiques tels que les polluants et les médicaments de structures et de propriété très variées, de l'intérieur vers l'extérieur des cellules. Il s'agit d'un mécanisme de défense naturelle à l'échelle cellulaire qui est induite par une augmentation de l'expression de la P-gp au niveau des cellules agressées. Ce changement d'expression de la P-gp, signe d'agression cellulaire est détectable et quantifiable par le nouveau traceur fluorescent et innovant, LightSpot FL1. De par cette propriété, la P-gp peut représenter un excellent biomarqueur de la résistance cellulaire, exploitable dans les domaines de la Santé (cancérologie, virologie) et Environnement.

Mots-Clés : P-gp, Biomarqueur, Résistance cellulaire, Santé/Environnement.

1 Introduction

Les travaux de R&D exposés sont réalisés au sein du consortium BIORCELL3D® <https://biorcell-3d.com/>. Il s'agit d'un partenariat public/privé, initié en 2016, entre le groupe « Résistance » de l'équipe RoBUST de l'UMR 1240 INSERM-UCA Imagerie Moléculaire et Stratégies Théranostiques (IMoST) de l'Université Clermont Auvergne et les deux sociétés BIOPASS SAS et BIOMARQUEURS SAS (RIOM, 63). Le consortium BIORCELL 3D est localisé actuellement dans le laboratoire de Recherche du groupe « Résistance » de l'équipe IMoST, situé au département Génie Biologique de l'IUT Clermont Auvergne (63). De la Recherche fondamentale à la Recherche finalisée, avec valorisation et transfert, nous développons des outils de biotechnologie innovants appliqués à la Santé. En effet, par des approches d'ingénierie cellulaire, de pharmacomodulation et de synthèse chimique, le consortium a développé (i) des modèles de tumeurs artificielles® en microplaques [1] (sein, ovaire, prostate, poumon ...) et des organoïdes (poumon, épithélium...) dans (ii) un milieu de culture synthétique et contrôlé intitulé OptiPASS® [1-2], (iii) des concepts originaux de conservation de cultures à long-terme [2], (iv) des traceurs fluorescents LightSpot® indicateurs de la résistance tumorale et biomarqueurs environnementaux [3-4] (v) des anticancéreux ciblés fluorescents PARPI®, marqueurs de l'efficacité des traitements (<https://biorcell-3d.com/>). L'objectif étant la conception et le développement d'outils précliniques appliqués à la Santé sous un format de produits finis tels que des Kits de diagnostic in-vitro et des prestations de service, permettant la valorisation par brevets et un transfert à nos partenaires industriels, pour une production à grande échelle. Actuellement une partie de nos produits finis est mise sur le marché et distribuée par la firme « DUTSCHER » (<https://www.dutscher.com/>).

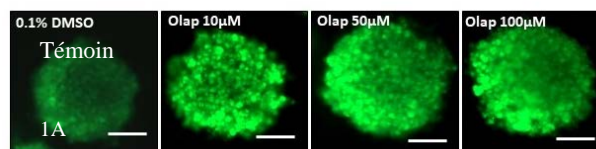
2 La P-gp un biomarqueur ubiquitaire de la résistance cellulaire

La « Permeability glycoprotein » ou la P-gp, codée par le gène *mdr1/abcb1* représente la protéine « Multidrug Resistance » (MDR) de référence. Très ubiquitaire, elle est exprimée naturellement au niveau de la membrane cellulaire de quasiment tous les organismes vivants (de bactérie à l'homme) [4, 5]. La P-gp est une pompe d'efflux membranaire à rôle détoxicateur qui reconnaît, cible et expulse de l'intérieur vers l'extérieur des cellules, une multitude de xénobiotiques de structures et de propriété très variées (médicaments et polluants, entre autres). Il s'agit d'un mécanisme de défense naturelle à l'échelle cellulaire. Son action est induite par une

augmentation de son expression au niveau des cellules agressées, engendrant ainsi la préservation des cellules à l'encontre de l'action cytotoxique des xénobiotiques. Ce changement d'expression de la P-gp, témoin d'agression cellulaire est détectable et quantifiable. De par cette propriété, la P-gp peut représenter un excellent biomarqueur de la résistance cellulaire, exploitable dans les domaines de la Santé (cancérologie, virologie) et Environnement.

2.1 La P-gp un biomarqueur de la résistance des cellules tumorales contre les anticancéreux

L'un des axes majeurs de développement du consortium BIORCELL3D® est le développement des **modèles de cultures cellulaires en trois dimensions (3D)** intitulés **tumeurs artificielles®** à partir des lignées cellulaires issues de différents types de cancer, comme le cancer du sein. Ces modèles de tumeurs avasculaires miment fidèlement les conditions du *vivo* et permettent d'étudier l'efficacité de différentes conditions de traitement [1-2]. Par ailleurs, nous avons également développé de **nouvelles classes de traceurs fluorescents innovants**, intitulés **LightSpot® qui ciblent sensiblement spécifiquement la P-gp** [3-4]. Ces derniers, produits au sein de notre groupe de R&D par des voies de synthèse organique multi-étapes, sont de **faible poids moléculaire** et sont capables de **pénétrer dans une masse cellulaire**. La preuve de concept de la détection et de la quantification spécifique de la P-gp par l'un de ces traceurs intitulé « LightSpot® FL1 » a déjà été démontrée sur plusieurs lignées cellulaires du cancer du sein triple négatif, notamment sur la lignée SUM1315 en culture cellulaire en monocouche (2D) et en trois dimensions (3D) [3].



1B

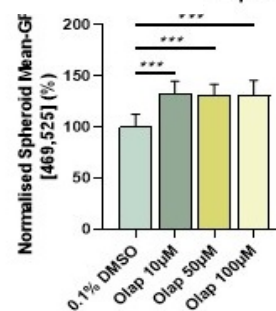


Figure 1 : Taux d'expression de la P-gp dans des modèles de cultures cellulaires 3D de la lignée SUM1315 de cancer du sein triple négatif, en présence de doses croissantes de l'olaparib (Olap) un anticancéreux ciblé. 1A : marquage de la P-gp par LightSpot FL1 (couleur verte).

La preuve de concept du potentiel de traceur LightSpot® FL1 de quantifier l'augmentation de l'expression de la P-gp, sur des modèles de culture cellulaire du cancer du sein en 2D et 3D, après l'exposition à des concentrations croissantes d'un anticancéreux ciblé l'Olaparib® a également été confirmée (Figure 1A, B) [3].

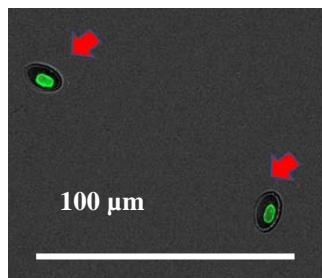


Figure 2 : Marquage de la P-gp des globules rouges de truite *fario* avec LightSpot FL1 (marquage vert).

2.1 La P-gp un biomarqueur potentiel de la pollution de l'eau

Le potentiel du développement d'un « biomarqueur sentinelle » à partir du taux d'expression de la P-gp en réponse à la pollution de l'eau a déjà été exploré par notre groupe, sur le modèle de globules rouges nucléés de la truite *fario* [8-9]. En effet, le sang est le point d'intersection et de passage de nombreuses molécules physiologiques, mais également de différents xénobiotiques, tels que les médicaments et les polluants. De par cette propriété, les modifications du taux d'expression la P-gp des globules rouges nucléés de poisson peuvent être exploitées pour développer un biomarqueur de type « résistance/stress », en réponse à la pollution d'eau. C'est notamment sur ce principe que le « Biomarqueur Sentinelle » a été développé à partir du sang de truite *fario* et la preuve de concept a été démontrée au laboratoire et sur le terrain dans différentes rivières de la Région AURA [8-9]. Cependant la méthodologie utilisée jusqu'à maintenant pour l'exploitation du Biomarqueur Sentinelle était lourde et relativement coûteuse. C'est pourquoi suite à l'émergence des traceurs LightSpot®, notre groupe a entamé des travaux de R&D pour développer une nouvelle génération de Biomarqueur Sentinelle à l'aide des traceurs LightSpot®. A l'heure actuelle la preuve de concept est en cours de développement à l'aide du traceur LightSpot FL1 sur le sang de truite *fario* (Figure 2).

3 Conclusions

Le caractère très ubiquitaire de la P-gp, exprimée chez tous les organismes vivants, ainsi que sa détection et sa quantification *via* les traceurs innovants LightSpot® rend très pertinent et élargie considérablement son champ

d'exploitation, en tant que Biomarqueur Résistance/Stress. Ce potentiel est actuellement utilisé au sein de notre groupe afin de développer des tests de diagnostic *in-vitro* appliqués dans le domaine de la Santé notamment en ciblant trois axes majeurs en Cancérologie, en Environnement et en Virologie. Sur ce dernier point, des tests de résistance aux antiviraux sont en cours de développement sur des modèles de micro-tissus.

4 Références

- [1] Dubois C; Daumar P, Aubel C, Gauthier J, Vidalinc B, Mounetou E, Penault-Llorca F, Bamdad, M. The New Synthetic Serum-Free Medium OptiPASS Promotes High Proliferation and Drug Efficacy Prediction on Spheroids from MDA-MB-231 and SUM1315 Triple-Negative Breast Cancer Cell Lines. *Journal of Clinical Medicine Research* 2019, 8, 397, doi:10.3390/jcm8030397.
- [2] Goisnard A, Dubois C, Daumar P, Aubel C, Depresle M, Gauthier J, Vidalinc B, Penault-Llorca F, Mounetou E, Bamdad M. The New Serum-Free OptiPASS® Medium in Cold and Oxygen-Free Conditions: An Innovative Conservation Method for the Preservation of MDA-MB-231 Triple Negative Breast Cancer Spheroids. *Cancers (Basel)*. 2021 Apr 18;13(8):1945. doi: 10.3390/cancers13081945
- [3] Goisnard A, Daumar P, Dubois C, Aubel C, Roux M, Depresle M, Gauthier J, Vidalinc B, Penault-Llorca F, Mounetou E, Bamdad M. LightSpot®-FL-1 Fluorescent Probe: An Innovative Tool for Cancer Drug Resistance Analysis by Direct Detection and Quantification of the P-Glycoprotein (P-gp) on Monolayer Culture and Spheroid Triple Negative Breast Cancer Models. *Cancers*. 2021 Aug 11;13(16):4050. doi: 10.3390/cancers13164050.
- [4] Bamdad, M.; Daumar, P.; Gauthier, J.; Goisnard, A.; Dubois, C.; Mounetou, E.; Penault-Llorca, F.; Vidalinc, B. LightSpot Patent - (04 Octobre 2019) Université Clermont Auvergne/INSERM/BIOMARQUEURS/BIOPASS - N° FR1911035 -PCT/EP2020/077694 Du 02/10/2020.
- [5] Robey RW, Pluchino KM, Hall MD, Fojo AT, Bates S.E, Gottesman MM. Revisiting the Role of ABC Transporters in Multidrug-Resistant Cancer. *Nat Rev Cancer* 2018, 18, 452–464, doi:10.1038/s41568-018-0005-8.
- [6] Vache C, Camares O, Cardoso-Ferreira MC, Dastugue B, Creveaux I, Vauray C, Bamdad M. A Potential Genomic Biomarker for the Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Pollutants: Multidrug Resistance Gene 49 in *Drosophila Melanogaster*. *Environ. Toxicol. Chem.* 2007, 26, 1418–1424.
- [7] Bamdad M, Brousseau P, Denizeau F. Identification of a Multidrug Resistance-like System in *Tetrahymena Pyriformis*: Evidence for a New Detoxication Mechanism in Freshwater Ciliates. *FEBS Lett.* 1999, 456, 389–393.
- [8] Valton E, Wawrzyniak I, Amblard C, Combourieu B, Bayle ML, Desmolles F, Kwiatkowski F, Penault-Llorca F, Bamdad M. P-gp Expression Levels in the Erythrocytes of Brown Trout: A New Tool for Aquatic Sentinel Biomarker Development. *Biomarkers* 2017, 22, 566–574, doi:10.1080/1354750X.2017.1338314.
- [9] Bamdad M, Valton E & Amblard C (09 décembre 2011) Biomarqueurs moléculaires sentinelles. Brevet Sentinelle UCA n° FR2983871.

Optimisation d'une production industrielle de bactériophages en système Cellstat

Céleste Caffin¹, Lhéa Milhamont², Eva Duriez³, Agathe Hembert⁴,
Marie Deblieck⁵, Denis Watier⁶
denis.watier@univ-littoral.fr

^{1,2,3,4,5,6} IUT du Littoral Côte d'Opale, Département Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale, 62200,
Boulogne-sur-Mer

⁶ BPA, Université du Littoral Côte d'Opale, Unité sous Contrat (USC) ULCO - Anses, EA 7394 – ICV Institut
Charles Viollette, 62200, Boulogne-sur-Mer

Thèmes - Chimie - Biologie - Santé

Résumé - *L'objectif de cette étude était de proposer un protocole facilement transférable à l'industrie utilisant un milieu de culture commercial, peu onéreux, simple à préparer, n'induisant pas de répression catabolique et facilitant la purification des phages. Nous avons utilisé un système de production Cellstat en raison de critères de productivité volumétrique, de sécurité (limitation de la co-évolution) et de flexibilité (choix du taux de croissance). Le dimensionnement du montage utilisé permet d'extrapoler les résultats à une production industrielle. Il a été conçu dans un souci de simplicité avec des coûts maîtrisés.*

Mots-Clés - bactériophages T7, Escherichia coli, Cellstat, phagothérapie

1 Introduction

La multiplication des antibiorésistances implique de développer des stratégies de substitution dans la lutte contre les bactéries pathogènes telle que la phagothérapie. Celle-ci implique la production quantitative et qualitative de bactériophages. Des productions en Cellstat (production en continu) permettent de maintenir les bactéries dans un état physiologique constant et optimal pour la multiplication des phages [1]. Le système est composé de deux bioréacteurs connectés en série où le débit à travers le système est constant (figure 1). Les bactéries sont cultivées dans un état physiologique constant dans le premier réacteur R1 qui alimente le second bioréacteur R2. Les phages vont pouvoir s'y multiplier au dépend des bactéries. La dissociation de la croissance des bactéries de celle des phages minimise les risques de pression de sélection. Dans ces conditions, l'optimisation des titres de phages est directement liée à l'optimisation de la production de bactéries hôte. Le milieu de culture utilisé est également une problématique dont il faut tenir compte.

Nous proposons un protocole d'obtention d'une population qualitative et quantitative d'*Escherichia coli* stable permettant la production de bactériophages à des titres élevés et facilement transférable à l'industrie. Le milieu de culture commercial utilisé est peu onéreux, simple à préparer, il n'induit pas de répression catabolique et facilite la purification des phages. Le dimensionnement du montage utilisé permet d'extrapoler les résultats à une production industrielle. Il a été conçu dans un souci de simplicité avec des coûts maîtrisés.

2 Matériels et méthodes

La souche hôte est *Escherichia coli* ATCC 11303. Le bactériophage T7 (RPS T7) a été fourni par l'entreprise Clean Cells (Material Transfer Agreement du 16/12/20). Le milieu de culture EPT (Eau Peptonée Tamponnée 20L à pH 6,3) a été autoclavé 3h à 121°C. Les inocula sont incubés une nuit à l'étuve à 37°C et non aérés. La population bactérienne a été estimée à l'aide d'un turbidimètre HANNA HIB3614 (Équivalence 1 NTU = $1,71 \cdot 10^6$ UFC.mL⁻¹). La concentration en oxygène a été contrôlée avec une sonde optique (METTLER Toledo). Un analyseur élémentaire carbone/azote (Flash EA 1112 Thermo Fisher) permet de suivre la consommation de peptones (substrat). Le montage de culture en Cellstat est présenté sur la figure 1. Le milieu EPT a été introduit dans le premier fermenteur R1 où *E. coli* se développe (New Brunswick Bioflo 3000, volume utile 1,2 L, 37°C 650 rpm, aération 2 L.min⁻¹). Une pompe péristaltique

permet d'introduire en continu les bactéries dans le bioréacteur de production de phages R2. L'homogénéisation est assurée à l'aide d'un agitateur magnétique. La température est régulée à 37°C. Le volume est maintenu constant par un système de trop plein. Le titrage de la population phagique a été réalisé par la méthode des microgouttes.

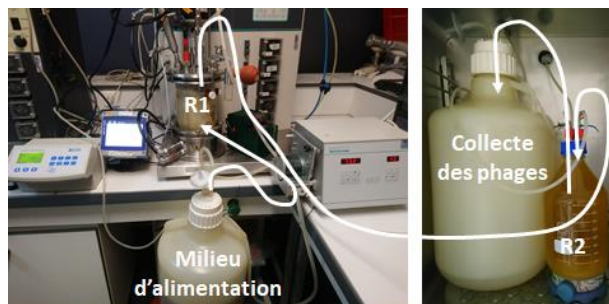


Figure 1 : Montage expérimental.

3 Résultats et discussion

Les conditions de production en Cellstat sont directement dépendantes du taux de dilution (vitesse de renouvellement du milieu dans R1) et de la concentration en substrat du milieu d'alimentation de R1. Dans ces différentes conditions expérimentales, quatre paramètres (figure 2) sont à prendre en considération dans l'optimisation de la production industrielle de phages :

- La population bactérienne. Le nombre de phages est directement proportionnel au nombre de bactéries infectées. De plus l'obtention de phages plus concentrés facilite leur purification.
- le rendement de production (Rx'''). Un rendement élevé permet de minimiser les coûts de fonctionnement et l'investissement (temps et matériel).
- le taux de croissance bactérien. La vitesse de croissance des phages augmente avec la vitesse de développement des bactéries [2].
- les peptones restantes. Les composés organiques restants en fin de production peuvent complexifier la purification des phages [3].

Le graphique a de la figure 2 représente la population bactérienne atteinte à l'équilibre en Cellstat en fonction de la concentration en substrat du milieu d'alimentation et du taux de dilution. Les résultats montrent que le taux de dilution impacte fortement la population bactérienne à l'équilibre. Un taux de dilution de 0,625 h⁻¹ associé à une concentration en EPT de 11 g.L⁻¹ donnent les populations en bactéries les plus élevées.

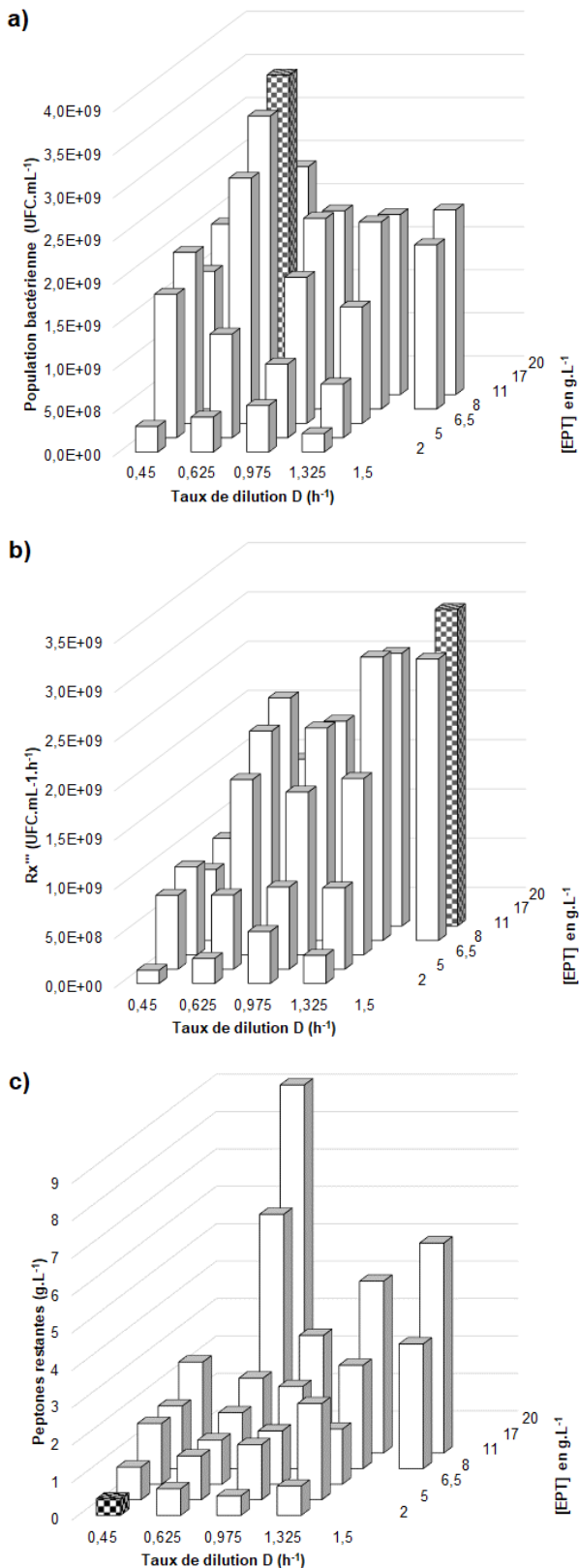


Figure 2 : Les graphiques représentent les populations d'*Escherichia coli* (a), la productivité volumique (b) et la concentration restante de peptones après croissance des bactéries (c) obtenues à l'équilibre pour une production en Cellstat en fonction de la concentration du

Pour faciliter la séparation et la purification des bactériophages, il est préférable que la suspension finale de bactériophages à purifier contienne le moins possible de molécules organiques ce qui correspond à une concentration de 2 g.L⁻¹ et un taux de dilution de 0,45 h⁻¹. Les conditions optimales divergent pour chaque paramètre et impliquent donc des compromis.

4 Conclusion

Des études antérieures ont démontré que le système Cellstat était le procédé le plus adapté à la production de bactériophages [1]. La composition et les concentrations optimales du milieu de culture restent des points encore débattus. Nos résultats montrent que dans un but de production industrielle de bactériophages, les conditions les plus adaptées pour la culture de bactéries, correspondent au milieu EPT (pH 6,3) à 8 g.L⁻¹ pour un taux de dilution de 0,625 h⁻¹. Ces conditions nous semblent être le meilleur compromis à même de répondre aux exigences de simplicité (technologie du procédé), de rendement quantitatif (économique) et qualitatif (spécificité du bactériophage et facilité de purification) demandées par l'industrie.

Bibliographie

- [1] Mancuso F., Shi J. et Malik D.J., 2018. High Throughput Manufacturing of Bacteriophages Using Continuous Stirred Tank Bioreactors Connected in Series to Ensure Optimum Host Bacteria Physiology for Phage Production. *Virus*. 10, 537.
- [2] Nabergoj, D., Modic, P. et Podgornik, A., 2018. Effect of bacterial growth rate on bacteriophage population growth rate. *MicrobiologyOpen*. 7
- [3] Sochocka M., Tomczyk T., Sobczyński M., Szermer-Olearnik B. et Boratyński J. 2015. The kinetics of *Escherichia coli* B growth and bacteriophage T4 multiplication in SM-1 novel minimal culture medium. *J. Gen. Appl. Microbiol.* 61, 75.

Alternative à l'urée synthétique utilisée en production de spiruline : Essais de culture sur engrais azoté à base d'urine humaine concentrée

Eva Denis¹, Caroline Tassart¹, Assa Savane¹, Léa Thévenon¹, Marie Deblieck¹, Denis Watier^{1,2}
marie.deblieck@univ-littoral.fr denis.watier@univ-littoral.fr

¹ IUT du Littoral Côte d'Opale, Département Génie Biologique,
Université du Littoral Côte d'Opale, 62200 Boulogne sur mer, France

² Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 1158 BioEcoAgro, Institut Charles Violette, USC ANSES, INRAe, Univ. Artois,
Univ. Lille, Univ. Picardie Jules Verne, Univ ; Liège, Yncréa, F-62200 Boulogne sur mer, France.

Thèmes – *Biologie - Santé - Environnement*

Résumé – *Cette étude porte sur la recherche d'une source d'azote alternative à l'urée de synthèse actuellement utilisée pour la production de spiruline en France. L'urine humaine comme source naturelle d'azote peut être envisagée. Son utilisation en agriculture se développe dans certains pays d'Afrique ou même en Europe comme en Suède. Cependant, l'urine humaine n'est pas encore autorisée comme engrais dans le règlement de l'Union Européenne. C'est pourquoi nous réalisons des essais de culture sur un engrais homologué : l'Aurin, produit à base d'urine humaine dix fois concentré. Ce produit commercialisé en Suisse, est stabilisé par nitrification, concentré par distillation, désodorisé par électrolyse et hygiénisé par passage sur charbon actif.*

Les cultures ont été menées dans le milieu Zarrouk, milieu standard pour la culture de spiruline, où la source d'azote a été remplacée par l'Aurin à 0,1% et 0,2%. Les conditions de température, d'éclairage (intensité lumineuse, photopériode, rotation pour une exposition identique de tous les flacons) et d'aération (bullage d'une pompe à air) ont été optimisées dans une enceinte de culture.

Les résultats sur l'Aurin comparés aux témoins permettent d'affirmer que la spiruline cultivée sur un milieu à base d'Aurin à un taux de croissance comparable voire supérieur à une culture sur un milieu de référence comme le milieu Zarrouk.

Ce travail a été réalisé grâce à l'investissement de quatre étudiantes en deuxième année de BUT Génie Biologique et de leurs professeurs référents à l'IUT du Littoral Côte d'Opale.

Mots-Clés – *Arthrospira platensis, urine humaine, Aurin, agriculture biologique*

1 Introduction

La spiruline (*Arthrospira platensis*) est une cyanobactérie de la famille des Cyanophycées. Sa consommation est répandue de manière ancestrale dans plusieurs pays d'Afrique, d'Amérique du Sud et d'Asie. Son marché est en plein développement de manière plus récente en Europe, et plus particulièrement en France. L'intérêt pour ce « super-aliment » est lié à sa richesse en protéines, acides aminés, vitamines et pigments, tels que la chlorophylle, le β carotène et plus particulièrement, la phycocyanine, seul colorant bleu naturel autorisé en Europe en industries agro-alimentaires.

La France, principal pays producteur en Europe, produit 50 à 70 tonnes de spiruline par an, qui ne représentent que 10% de la consommation française [1].

La source d'azote utilisée en France est principalement l'urée synthétique, ce qui ne permet pas actuellement d'envisager un label « agriculture biologique » sur ce produit.

Une alternative à l'urée synthétique serait l'utilisation d'urine humaine comme source d'azote, comme cela est déjà envisagé en agriculture en Afrique ou en Suède sous forme d'urinofertilisants répandus sur les champs.

L'urine est riche en azote (6g/l), en phosphore (1g/l) et en potassium (2g/l). Lors de l'excrétion, le pH de l'urine est faiblement acide mais évolue rapidement jusqu'à des valeurs autour de 9 en raison de l'hydrolyse de l'urée en ammoniacque. Cette teneur en ammonium peut être inhibitrice à fortes doses pour la spiruline [2].

Pour une première approche, nous avons choisi de mener les essais sur un produit plus facile d'utilisation, l'Aurin, homologué en Europe et commercialisé par Vuna GmbH comme solution d'engrais azoté pour culture de fleurs et légumes [4]. L'Aurin est composé exclusivement d'urine humaine stabilisée par nitrification, concentré par évaporation, désodorisé par électrolyse et hygiénisé sur charbon actif. Au cours du traitement, la moitié de l'azote sous forme ammoniacale est transformée et stabilisée en nitrate, forme d'azote moins inhibitrice que l'ammonium pour la spiruline [2].

Le milieu de culture qui sert de base à notre étude est le milieu Zarrouk, milieu minéral classiquement utilisé comme milieu de référence pour la spiruline [5]. La source d'azote sous forme de nitrate de sodium est remplacée par l'Aurin pour les essais.

L'objectif de notre étude est de vérifier la capacité de la spiruline à utiliser l'Aurin comme seule source d'azote.

2 Matériels et méthodes

2.1 Origine de la souche et milieu de culture

La souche *Arthrospira platensis* utilisée est une souche de type Lonar, obtenue chez le producteur « Spiruline de la Fresnaie » (59 Frasnoy).

La préculture est cultivée dans le milieu Zarrouk dont la composition est la suivante (en g/l) : NaHCO_3 : 16,8; NaCl : 5; NaNO_3 : 2; K_2SO_4 : 1; MgSO_4 : 0,2; NH_4PO_4 : 0,2; CaCl_2 : 0,1; FeSO_4 : 0,001 [5].

Le témoin positif (+) est le milieu Zarrouk complet.

Le témoin négatif (-) est le milieu Zarrouk sans nitrate.

Pour les essais sur l'Aurin, le nitrate de sodium est remplacé par différentes dilutions du produit Aurin. Une étude préliminaire a permis de préciser les dilutions les plus pertinentes à tester ; il a été choisi les dilutions au 1/500 (0,2%) et au 1/1000 (0,1%).

Dans tous les milieux, le pH est ajusté à 10 avec NaOH et les milieux sont autoclavés 20 min à 121 °C.

Le dosage de l'Aurin à l'analyseur élémentaire CHN (Flash EA 1112, Thermofisher scientific) a permis de mesurer un taux d'azote de 6,5% dans le produit commercial. Les dilutions à 0,2% et 0,1% correspondent donc à des concentrations de 9,28 et 4,64 mmol/l en équivalent azote.

2.2 Conditions de culture

Les cultures sont incubées dans un incubateur thermostaté (Panasonic MLR 352) réglé à 30°C et équipé d'un éclairage proche de la lumière du jour (OSRAM Luminix Daylight 6500K).

Les paramètres de photopériode (14h lumière/ 10h obscurité) et d'intensité lumineuse (10000 Lux) ont été fixés selon les conditions optimales établies au cours d'une étude antérieure [3].

L'enceinte est équipée d'un plateau tournant permettant la rotation du support portant les flacons. Chaque flacon a été positionné précisément pour recevoir une moyenne de 10000 Lux après un tour complet de rotation.

Les cultures sont homogénéisées par bullage à l'aide d'une pompe à air sur batterie pour permettre la rotation (fig.1).



Fig.1 : Montage expérimental

2.3 Suivi de croissance

Les flacons sont ensemencés à partir d'une préculture à environ 100 NTU dans des flacons de culture (cell flask Corning 175 cm²) contenant 200 ml de milieu de culture et placés verticalement face à l'éclairage.

Deux fois par jour, après agitation manuelle des flacons, 10 ml sont prélevés pour mesure de la biomasse au turbidimètre (Hanna Instruments HI 88703).

La corrélation entre biomasse (poids sec en g/l) et turbidité (en NTU) a été établie ($Biomasse = 4,6 \cdot 10^{-4} NTU$) et permet d'établir la cinétique de croissance de la biomasse (en g/l) en fonction du temps (en heure).

3 Résultats et discussion

Les cultures mises en place ont été suivies pendant près de 10 jours pour les meilleures croissances (Fig.2).

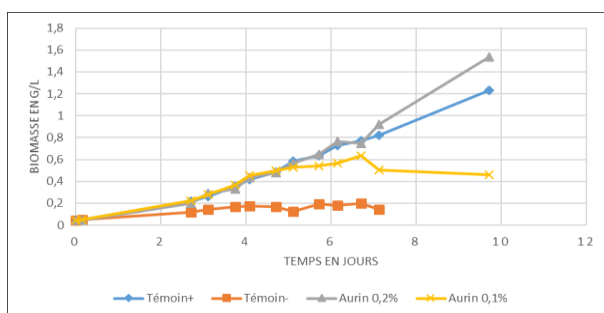


Fig2 : Cinétique de croissance de la spiruline sur différentes sources d'azote (Témoin+ = nitrate de sodium, Témoin - = absence d'azote, Aurin à 0,1%, Aurin à 0,2%)

Tout d'abord, la courbe de croissance du témoin négatif (-) nous montre une légère croissance jusqu'à une population multipliée par 4. Cela signifie que les cellules ont poursuivi leur métabolisme en utilisant les traces d'azote apportées par la préculture ainsi que l'azote de réserve contenu dans les cellules. On constate cependant dès le 4^{ème} jour un arrêt de la croissance.

Les 3 autres cultures présentent des croissances supérieures au témoin (-) et relativement similaires jusqu'au 5^{ème} jour.

A partir du 5^{ème} jour, on constate un ralentissement sur la culture Aurin 0,1%, inhibition sans doute liée à une carence en azote dans le milieu.

Les cultures témoin (+) et Aurin 0,2% poursuivent des croissances identiques jusqu'au 7^{ème} jour. La culture Aurin 0,2% dépasse le témoin (+) au-delà du 7^{ème} jour.

L'allure non exponentielle des courbes en fin de culture montre un ralentissement de la croissance dû en partie à l'augmentation de turbidité de la culture qui rend la lumière moins accessible aux cellules ralentissant ainsi la photosynthèse. Le taux de croissance calculé dans les meilleures conditions (Aurin 0,2%) sur les 4 premiers

jours de culture est de $0,567 J^{-1}$.

4 Conclusions et perspectives

Cet essai préliminaire permet d'affirmer que la spiruline peut être cultivée dans un milieu contenant de l'Aurin de 0,1 à 0,2% et laisse envisager un taux de croissance supérieur à celui attendu dans le milieu Zarrouk. Des concentrations plus élevées d'Aurin ont été antérieurement testées mais un dégagement d'ammoniac après ajustement du pH s'est produit, atteignant sans doute des teneurs inhibitrices pour la spiruline.

Il est donc prévu de poursuivre cette étude par la réalisation d'un plan d'expérience centré réduit pour déterminer plus précisément la concentration optimale en Aurin, en prenant soin avant ensemencement de dégazer l'ammoniac produit lors de l'ajustement du pH à 10.

Cet essai concluant permet d'ores et déjà d'envisager l'utilisation de l'Aurin comme source d'azote à l'échelle d'une production en bassin-pilote. A terme, le passage à l'échelle industrielle nécessitera de lever des verrous tant psychologiques sur l'utilisation de l'urine humaine en production de spiruline, que financiers sur le coût actuel de traitement de l'urine pour en extraire l'Aurin.

5 Remerciements

Les auteurs remercient M. Géry Meausoone de la « Spiruline de la Fresnaie » pour la fourniture de la souche.

Références

- [1] Etude de la Fédération des Spiruliniers de France et Darwin nutrition, La France : championne européenne de la production de spiruline paysanne, 2020.
- [2] Deschoenemaeker F., Bayon-Vicente G., Sachdeva N., Depraetere O., Cabrera Pino J.C., Leroy B., Muylaert K., Wattiez R., 2017, Impact of different nitrogen sources on the growth of *Arthrospira ss PCC 8005* under batch and continuous cultivation – A biochemical, transcriptomic and proteomic profile, *Bioresource Technology* 237, 78-88.
- [3] Junique L., Watier L., Lejeune H., Viudes F., Deblicq M., Watier D., 2021, Determination by response surface methodology of optimal protein and phycocyanin productivity conditions in *Arthrospira (Spirulina) platensis* under different combinations of photoperiod variation and lighting intensity, *Bioresource Technology reports* 15, 100763.
- [4] Vuna GmbH (copyright in 2020) engrais de recyclage Aurin
- [5] Zarrouk C., 1966, Contribution à l'étude d'une cyanophycée influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima* (Setch. Et Gardner) Geitler. University of Paris, Paris, (France) PhD Thesis.

La Waide (*Isatis tinctoria* L.), plante historique des Hauts-de-France, source de métabolites secondaires pour des applications colorantes et biologiques

Extraction, caractérisation, formulation, modulation des propriétés

Romain Vauquelin^{1,2} Nicolas Joly¹ Elodie Choque²
romain.vauquelin@gmail.com nicolas.joly@univ-artois.fr elodie.choque@u-picardie.fr
Nathalie Jullian² Patrick Martin¹
nathalie.jullian@u-picardie.fr patrick.martin@univ-artois.fr

¹ Unité Transformations & Agroressources, Université d'Artois - UniLaSalle, ULR7519, 62408 Béthune, France

² BioEcoAgro-Biologie des Plantes et Innovation, UMRT INRAe 1158 BioEcoAgro, Université de Picardie Jules Verne, 80039 Amiens, France

Thèmes – Chimie - Biologie - Environnement

Résumé – *Dans une dynamique de retour à la naturalité des produits, des réponses sont données par l'intermédiaire de l'extraction de métabolites spécialisés issus de plantes. Dans cette approche, la « Waide » ou pastel des teinturiers (*Isatis tinctoria* L.), par son attrait historique et local au sein des Hauts-de-France, permet de répondre à cette problématique. Longtemps cultivée pour le pigment bleu indigo issu de ses feuilles, cette plante a toutes les qualités requises pour être valorisée à la fois pour ses atouts tinctoriaux, environnementaux et médicinaux. L'objectif principal de cette thèse pluridisciplinaire est de proposer des méthodes optimisées d'extraction de métabolites spécialisés chez la waide. Elle s'inscrit dans un projet plus global visant à réintroduire cette culture dans les Hauts-de-France en la valorisant dans sa globalité par une approche zéro-déchet. Les molécules extraites pourront répondre à différents domaines d'applications allant de la coloration en passant par l'industrie pharmaceutique jusqu'au domaine du biocontrôle, par l'intermédiaire des glucosinolates et leurs propriétés répulsives contre des insectes ravageurs. Différentes méthodes d'extraction sont à mettre en place selon la nature des molécules à extraire et des organes de la plante que l'on étudie. Elles seront établies, dans un premier temps, sur des plantes cultivées hors-sol en cultures hydroponiques par apport de nutriments en solution dans des conditions contrôlées. Ces méthodes seront, dans un second temps, transposées sur du matériel végétal issu de cultures en champs afin d'être dans les conditions réelles de valorisation en passant d'une échelle laboratoire à une échelle semi-pilote. Cela permettra d'évaluer l'influence environnementale en champs par rapport à la culture hors-sol. L'objectif serait à terme de réimplanter cette culture oubliée et de proposer sa valorisation zéro-déchet dans son entièreté au sein de la région des Hauts-de-France.*

Mots-Clés – Waide, valorisation, zéro déchet, indigo, glucosinolate

Introduction

Dans une démarche de développement durable, l'objectif primordial est la préservation des ressources naturelles. L'extraction de pétrole, nécessaire à la production de produits dans divers domaines, ne constitue pas une proposition viable dans le temps. Face à cette problématique, remplacer ces produits par une valorisation de bio-ressources, notamment l'extraction de métabolites spécialisés issus de végétaux, est une des réponses. La valorisation de la "Waide"¹ (*Isatis tinctoria* L. ou pastel des teinturiers) plante historique oubliée des Hauts-de-France, s'inscrit dans cette proposition par les propriétés tinctoriales et médicinales que propose cette brassicacée.

Ce sujet pluridisciplinaire regroupe deux domaines scientifiques bien distincts mais complémentaires, que sont la chimie et la physiologie végétale. La thèse est sous la direction de deux laboratoires de recherche rattachés à deux IUT spécialistes de ces deux domaines. La première équipe, rattachée à l'IUT de Béthune, est spécialiste dans la valorisation des agroressources, destinée à la production de molécules et matériaux biosourcés. La seconde, rattachée à l'IUT d'Amiens, est spécialisée dans la physiologie végétale, plus précisément dans la compréhension du métabolisme racinaire en vue de la production de biomolécules.

Contexte et objectifs

Isatis tinctoria était autrefois cultivée et utilisée pour la récupération de l'indigo. Ce pigment issu des feuilles, était destiné à la production de teinture végétale de luxe, avait permis de financer la construction de la cathédrale d'Amiens. Sa culture a ensuite été remplacée par celle de l'indigotier (*Indigofera tinctoria*) proposant un rendement d'extraction cinq fois meilleur² (0.2% contre 1%). Elles ont ensuite été remplacées par la production de molécules synthétiques (Baeyer-Drewsen, 1882), davantage rentable. Bien qu'oubliée et remplacée, cette plante n'a pas livré tous ses secrets et outre la production d'indigo, elle propose également des avantages en tant qu'actif de santé, particulièrement dans les pays asiatiques, avec l'infusion de feuilles (« Dà Qīng Yè ») et de racines (« Ban Lan Gen »), mais également en cataplasme pour le traitement des ulcères, des plaies et des hémorroïdes³ (Hamburger, 2002 ; Hurry, 1930). De même, une décoction aqueuse de pastel a présenté des effets positifs dans un modèle d'infection pulmonaire chronique chez le rat et a été jugée prometteuse pour les études humaines (Song *et al.*, 1996)⁴. Notre objectif aujourd'hui est de participer à la réintroduction de cette plante bisannuelle sur le territoire Hauts-de-France en proposant une valorisation zéro-déchet dans sa globalité par l'extraction de métabolites spécialisés destinées aux domaines de la coloration, de la santé et du biocontrôle (Figure 1).

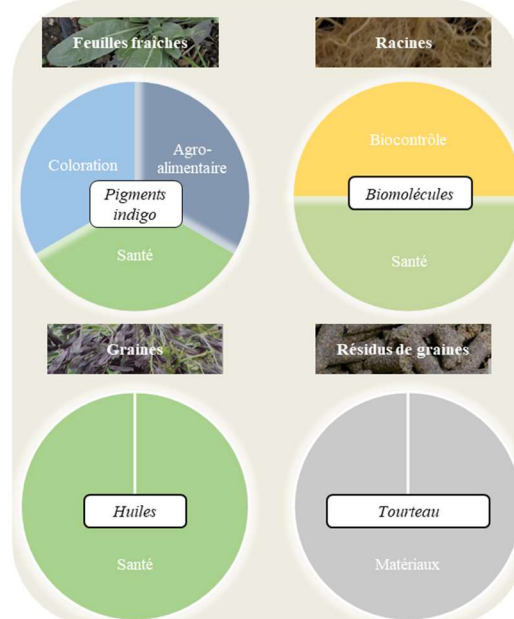


Figure 1 – Domaines d'applications des extraits issus des différents organes d'*I.tinctoria*.

Dans ce cadre, la valorisation passe dans un premier temps par la détermination de conditions optimales de récupération du pigment indigo (aspect coloration). Dans un deuxième temps, par l'évaluation de l'activité antioxydante d'extraits aqueux et hydroalcooliques de feuilles et de racines (aspect santé). Dans un troisième temps, une étude portera sur l'extraction, l'analyse et la détermination du mécanisme d'action des glucosinolates pour du biocontrôle contre les insectes.

Résultats et discussion

Lors de la première année de thèse, la production de matériel végétal, ainsi que la mise en place en conditions contrôlées par des cultures hydroponiques, a permis de réaliser des séries d'extractions sur du matériel frais. Ainsi, des essais d'optimisation par élaboration de plans d'expériences factoriels a permis de mettre en évidence certains paramètres discriminants sur l'extraction du pigment indigo. Les résultats montrent que la quantité d'eau utilisée pour l'extraction est divisible par deux et que l'augmentation de la température et l'utilisation d'eau déminéralisée influence positivement l'obtention d'indigo (Figure 2). D'autres analyses sont en cours, en affinant les niveaux de certains paramètres : diminuer à 1/3 le ratio biomasse-solvant et augmenter la température jusqu'à 60 °C. D'autres facteurs sont à l'étude comme le temps d'extraction et l'intérêt de se placer dans des conditions anaérobies. Ces résultats permettront ensuite de réaliser le scale-up en passant d'une échelle de 2,5-4 g de feuilles à 2,5-4 kg sur du matériel issu de champs permettant déterminer l'influence de l'environnement extérieur sur la

production de nos métabolites spécialisés d'intérêt.

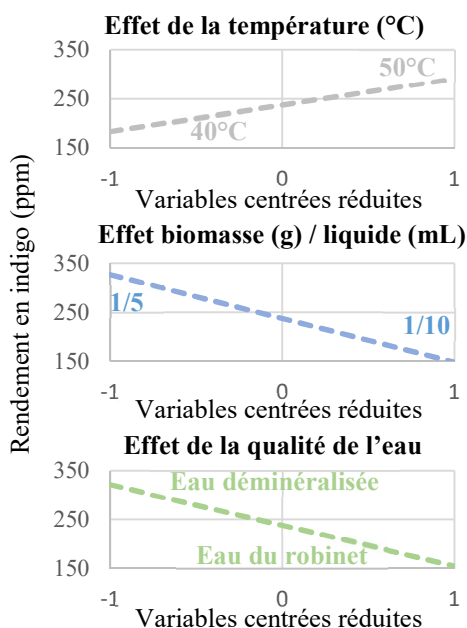


Figure 2 - Différents graphiques des effets sur le rendement en indigo par un plan factoriel 2^{3-1}

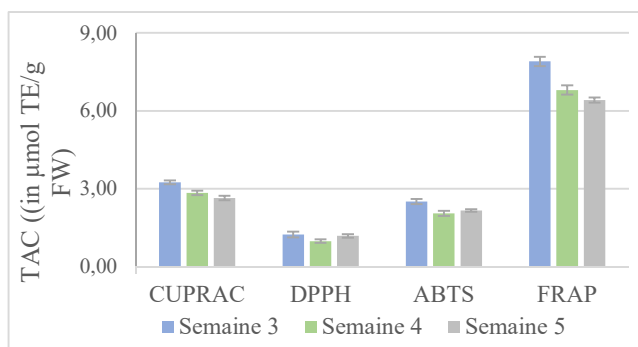


Figure 3 - Évolution du TAC d'extraits aqueux sur différents temps de développement par quatre tests antioxydants

Des séries de tests antioxydants que sont l'ABTS^a, le DPPH^b, le FRAP^c et le CUPRAC^d ont été réalisées sur différents types d'extraits selon différents temps de culture des plantes. Les extraits aqueux obtenus après 3 semaines de culture présentent de meilleurs TAC^e que ceux issus de cultures plus âgées (4 et 5 semaines). Ces tests montrent aussi qu'il y a un plus fort TAC pour le test FRAP par rapport aux trois autres tests (Figure 3). Ils concordent avec les résultats présentés par Wakeel et al. (2019) concluant que les extraits d'*I. tinctoria* ont un fort pouvoir réducteur⁵. Cette tendance indique que les extraits répondent davantage pour des applications pharmaceutiques. Il est primordial de déterminer par la suite ce qui induit cette tendance en caractérisant d'une part, les extraits par des méthodes chromatographiques, et d'autre part, en

^a Acide 2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulphonique

^b Diphénylpicrylhydrazyle

^c Ferric ion reducing antioxidant power

identifiant de potentielles synergies entre des molécules d'une même famille ou de familles différentes.

Conclusions

Cette thèse pluridisciplinaire a pour but de proposer une valorisation globale des feuilles et des racines du pastel des teinturiers (*Isatis tinctoria* L.) par la récupération de métabolites spécialisés. Cette proposition de valorisation passe par l'optimisation dans un premier temps du procédé d'extraction du pigment indigo à l'échelle laboratoire sur des plants cultivés en conditions contrôlées. Dans un second temps, le scale-up sera réalisé, en transposant la méthode d'extraction sur des plants cultivés en champs afin d'observer l'influence du milieu extérieur sur la récupération des métabolites spécialisés d'intérêt. Mais elle passe également par la récupération d'extraits avec des molécules ayant des propriétés antioxydantes pouvant répondre à divers domaines d'applications (santé, alimentaire, cosmétique). Enfin, les glucosinolates ayant une forte valeur ajoutée par leurs actions en tant qu'insecticides, actifs de biofumigation seront également étudiés.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la Région Hauts-de-France pour le co-financement de cette thèse, ainsi qu'à la Savonnerie des Hauts-de-France et à l'entreprise Bleu d'Amiens pour nous fournir des graines et des plantes cultivées en champs.

Références

- (1) Mocquard, J.; Le Lamer, A.-C.; Fabre, P.-L.; Mathieu, C.; Chastrette, C.; Vitrai, A.; Vandebossche, V. Indigo Dyeing from *Isatis Tinctoria* L.: From Medieval to Modern Use. *Dyes and Pigments* **2022**, *207*, 110675.
- (2) Pattanaik, L.; Padhi, S. K.; Hariprasad, P.; Naik, S. N. Life Cycle Cost Analysis of Natural Indigo Dye Production from *Indigofera Tinctoria* L. Plant Biomass: A Case Study of India. *Clean Techn Environ Policy* **2020**, *22* (8), 1639–1654.
- (3) Hamburger, M. *Isatis Tinctoria* – From the Rediscovery of an Ancient Medicinal Plant towards a Novel Anti-Inflammatory Phytopharmaceutical. *Phytochemistry Reviews* **2002**, *1* (3), 333–344.
- (4) Song, Z.; Johansen, H. K.; Moser, C.; Høiby, N. Effects of Chinese Medicinal Herbs on a Rat Model of Chronic *Pseudomonas Aeruginosa* Lung Infection. *APMIS* **1996**, *104* (5), 350–354.
- (5) Wakeel, A.; Jan, S. A.; Ullah, I.; Shinwari, Z. K.; Xu, M. Solvent Polarity Mediates Phytochemical Yield and Antioxidant Capacity of *Isatis Tinctoria*. *PeerJ* **2019**, *7*, e7857.

^d CUPric Reducing Antioxydant Capacity

^e Total Antioxidant Capacity : indice d'évaluation du potentiel antioxydant

***Caenorhabditis elegans*, un modèle utilisé pour le criblage de microbiotes fromagers à effet santé**

Muriel Bonnet^{1,2} Philippe Veisseire^{1,2} Olivier Camares^{1,2}

muriel.bonnet@uca.fr philippe.veisseire@uca.fr olivier.camares@uca.fr

Marylise Gachinat^{1,2} Céline Delbès² Christophe Chassard²

marylise.gachinat@uca.fr celine.delbes@inrae.fr christophe.chassard@inrae.fr

Stéphanie Bornes^{1,2}

stephanie.bornes@uca.fr

¹IUT Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne

²Unité Mixte de Recherche sur le Fromage, UMRF 0545

Thèmes – Biologie - Santé

Résumé – *Les fromages sont des aliments fermentés et une source de micro-organismes lorsque nous les consommons. En effet, les fromages, et en particulier ceux au lait cru, sont connus pour leur grande biodiversité microbienne au sein de laquelle des micro-organismes bénéfiques pour la santé humaine sont présents. Après consommation, ils peuvent s'installer dans notre organisme et avoir un effet.*

*Nous utilisons le modèle in vivo *Caenorhabditis elegans* pour rechercher les effets santé liés à la consommation de micro-organismes fromagers. *C. elegans* est un eucaryote invertébré rond à peau lisse et mesure environ 1 mm à l'âge adulte. Il vit dans le sol et principalement dans la végétation en décomposition où il se nourrit de micro-organismes (bactéries, levures). En laboratoire, il se nourrit exclusivement de la bactérie *Escherichia coli* OP50 et sa culture se fait en boîtes de Petri. Son anatomie très simple et facilement observable du fait de son corps transparent, en fait un modèle de choix pour l'étude de microorganismes ayant de potentiels effets sur la santé.*

Mots-Clés – *C. elegans*, interaction microbienne, alimentation et santé

1 Introduction

Les questions de santé apparaissent au cœur des relations entre agriculture, alimentation et environnement. Dans ce contexte, l'UMRF a pour objectif de développer des travaux visant à mieux comprendre les divers facteurs et mécanismes qui, de la production agricole jusqu'à la consommation alimentaire, régissent la qualité des aliments et affectent la santé humaine.

Une des thématiques développées à l'UMRF est centrée sur l'évaluation de l'impact intestinal et le bénéfice santé de microorganismes présents dans les fromages. Les fromages sont des aliments fermentés et une source de micro-organismes lorsque nous les consommons. C'est pourquoi des chercheurs ont orienté leurs travaux sur ces « bioréacteurs alimentaires ». En effet, les fromages, et en particulier ceux au lait cru, sont connus pour leur grande biodiversité et il est facile d'imaginer que des micro-organismes bénéfiques pour la santé humaine sont présents dans ces microbiotes. Après consommation, ils peuvent s'installer dans notre organisme et avoir un effet. Nous nous intéressons plus particulièrement au devenir des bactéries lactiques, mais aussi aux molécules qu'elles synthétisent et qui pourraient jouer un rôle bénéfique pour l'hôte (anti-pathogène, anti-inflammatoire, anti-oxydant, ...).

2 Le modèle *Caenorhabditis elegans*

Le nématode *Caenorhabditis elegans* (Figure 1) est un modèle *in vivo* très utilisé depuis une dizaine d'années pour étudier les interactions entre des microorganismes et leur hôte. Cet animal est un compromis pertinent entre les approches *in vitro* et les approches *in vivo* très lourdes et coûteuses réalisées chez les mammifères (rat, souris puis homme). *C. elegans* est un eucaryote invertébré rond à peau lisse qui possède un long corps effilé aux extrémités et mesure environ 1 mm à l'âge adulte. Il vit dans le sol et principalement dans la végétation en décomposition où il se nourrit de micro-organismes (bactéries, levures). En laboratoire, il se nourrit exclusivement de la bactérie *Escherichia coli* OP50 et sa culture se fait en boîtes de Petri, ce qui demande peu d'entretien, d'espace et de matériel. Il a une durée de vie de 3 semaines environ. C'est un organisme hermaphrodite autofécondant, chaque ver peut générer jusqu'à 300 oeufs. Son cycle de reproduction est donc rapide et efficace. Le génome de ce nématode est entièrement séquencé et annoté et la fonction de chacun de ses gènes est connue. Il possède de plus d'importantes homologies génétiques et protéiques avec l'Homme, les voies de signalisation sont extrêmement bien conservées entre les espèces. *C. elegans* est facilement manipulable génétiquement ce qui a permis la création d'une banque de mutants très importante qui est mise à disposition de la communauté scientifique utilisant ce modèle, le *C. elegans* Genetics Center, localisé à l'Université du Minnesota (<https://cgc.umn.edu/>). Cette caractéristique en fait un

modèle performant pour des études de mécanique moléculaire. Enfin, ce nématode est transparent ce qui permet de suivre le devenir d'un microorganisme ou d'une molécule marquée avec un marqueur fluorescent, à l'intérieur du ver après ingestion (Figure 2). D'un point de vue technique, ce ver est facile à maintenir, à multiplier et à utiliser en laboratoire puisque son utilisation ne nécessite pas d'infrastructure lourde ni de consommable particulier. L'utilisation de *C. elegans* permet de progresser vers une expérimentation en biologie moins coûteuse, et surtout plus éthique en limitant le nombre d'animaux (mammifères) sacrifiés à des fins de recherche [1].

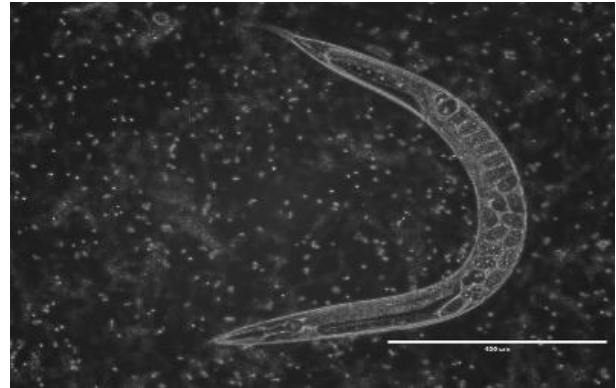


Figure 1 : *Caenorhabditis elegans*

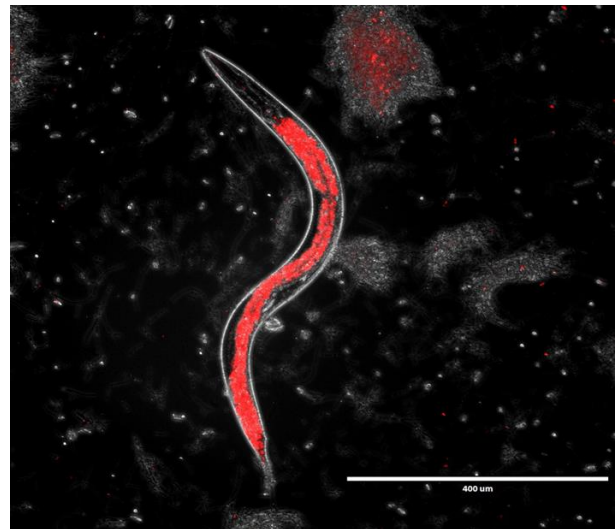


Figure 2 : Visualisation de l'intestin de *C. elegans* grâce à l'ingestion de levures rendues fluorescentes.

3 Le criblage de microorganismes à effet santé

À l'UMRF, nous avons développé le modèle *Caenorhabditis elegans* pour cribler et étudier des microorganismes à effet santé et pour caractériser l'effet d'extraits de fromage (effet anti-pathogènes, réponse aux mécanismes inflammatoires ou résistance au stress oxydatif). Les approches que nous développons nous permettent d'améliorer notre compréhension des interactions entre des microorganismes fromagers, des bactéries pathogènes et l'hôte [2,3,4].

Nous utilisons le modèle *in vivo* *Caenorhabditis elegans* pour rechercher les effets santé liés à la consommation de micro-organismes fromagers. Ce nématode est capable de choisir les micro-organismes qui composent sa nourriture et de se diriger vers la nourriture qui lui convient le mieux, grâce à la détection des odeurs diffusées [5]. Ces odeurs sont dues à la présence de molécules telles que le diacétyl, synthétisées par certains micro-organismes [6]. Nous avons donc mis au point un test de préférence alimentaire pour déterminer quels fromages proposés attireraient préférentiellement le nématode (Figure 3).

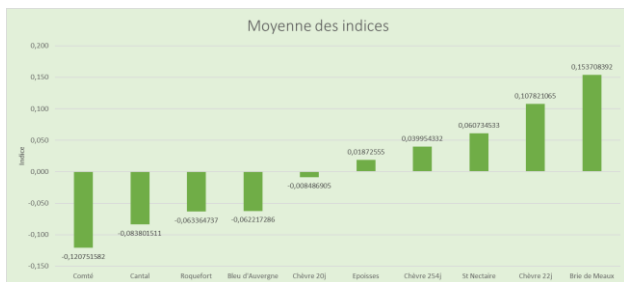


Figure 3 : Indices de préférence alimentaire.

De plus, nous cherchons à connaître le bénéfice santé des matrices fromagères sur une population de nématodes en évaluant leur durée de vie après avoir ingéré les fromages. Les expérimentations préliminaires menées sur 10 fromages ont permis de dégager une hiérarchie parmi ceux-ci. Huit fromages sur 10 ont allongé la durée de vie de *C. elegans* parmi lesquels le Brie de Meaux a doublé la durée de vie du nématode par rapport au témoin nourri avec *E. coli* OP50 (Figure 4).

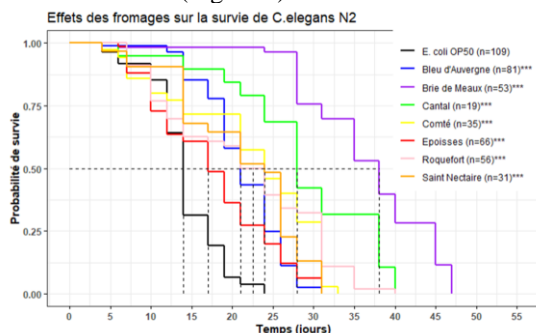


Figure 4 : Taux de survie des vers suite à l'ingestion de fromages (n=3).

Suite à ces expérimentations, nous tenterons d'établir une corrélation entre la composition du microbiote du fromage, la préférence alimentaire du nématode et le bénéfice santé. L'objectif est de développer une stratégie utilisant le nématode permettant de réaliser un criblage de micro-organismes isolés à partir de matrices fromagères pour leurs effets santé.

4 Conclusion

Le modèle *C. elegans* offre de nombreuses potentialités pour le criblage et la caractérisation au niveau moléculaire

de microorganismes d'origine fromagère, et alimentaire en général, pouvant présenter des capacités bénéfiques pour la santé humaine et animale.

Les questions de santé, en lien avec l'émergence de maladies infectieuses, apparaissent au cœur des relations entre agriculture, alimentation et environnement. Dans ce contexte, l'UMRF a pour objectif de développer des travaux visant à mieux comprendre les divers facteurs et mécanismes qui, de la production agricole jusqu'à la consommation alimentaire, régissent la qualité des aliments et affectent la santé humaine. Les travaux de recherche que nous menons en utilisant le modèle *C. elegans* contribueront à évaluer l'impact santé (microbiote, durée de vie, nutrition) des microbiotes des fromages et aussi, en s'intégrant dans des projets d'ambition nationale, de dégager des hypothèses sur l'effet du système d'exploitation agricole (environnement et nourriture des animaux) sur l'appréciation et la valeur santé des fromages.

5 Remerciements

Les auteurs expriment leurs remerciements à Cyril Poupet, Guillaume Cardin pour leurs travaux de thèse qui ont permis de développer le modèle au sein de l'UMRF [1,2,3,4]. Les auteurs remercient également Guy Febvre (guy.febvre@uca.fr) et Paul-Marie Grollemund (paul_marie.grollemund@uca.fr) pour le développement d'outils informatiques et statistiques qui facilitent et améliorent le traitement des données générées par les expérimentations utilisant le modèle *C. elegans*.

6 Références

- [1] Poupet C, Chassard C, Niveliez A, Bornes S. *Caenorhabditis elegans*, a Host to Investigate the Probiotic Properties of Beneficial Microorganisms. *Front Nutr.* 2020 Aug 21;7:135. doi: 10.3389/fnut.2020.00135. PMID: 33425969; PMCID: PMC7786404.
- [2] Cardin G, Poupet C, Bonnet M, Veisseire P, Ripoché I, Chalard P, Chauder A, Saunier E, Priam J, Bornes S, Rios L. A Mechanistic Study of the Antiaging Effect of Raw-Milk Cheese Extracts. *Nutrients.* 2021 Mar 10;13(3):897. doi: 10.3390/nu13030897. PMID: 33802038; PMCID:PMC8000626.
- [3] Cardin G, Ripoché I, Poupet C, Bonnet M, Veisseire P, Chalard P, Chauder A, Saunier E, Priam J, Bornes S, Rios L. Development of an innovative methodology combining chemical fractionation and *in vivo* analysis to investigate the biological properties of cheese. *PLoS One.* 2020 Nov 19;15(11):e0242370. doi:10.1371/journal.pone.0242370. PMID: 33211771; PMCID: PMC7676648.
- [4] Veisseire P, Bonnet M, Saraoui T, Poupet C, Camarès O, Gachinat M, Callon C, Febvre G, Chassard C, Bornes S. Investigation into *In Vitro* and *In Vivo* *Caenorhabditis elegans* Models to Select Cheese Yeasts as Probiotic Candidates for their Preventive Effects against *Salmonella* Typhimurium. *Microorganisms.* 2020 Jun 18;8(6):922. doi: 10.3390/microorganisms8060922. PMID: 32570901; PMCID: PMC7356738.
- [5] C. Milani *et al.* "Colonization of the human gut by bovine bacteria present in Parmesan cheese", *Nature Communications*, 2019. doi:10.1038/s41467-019-09303-w.
- [6] M. I. Rincon-Delgado, A. Lopez-Hernandez, I. Wijaya and S.A. Rankin. « Diacetyl levels and volatile profiles of commercial starter distillates and selected dairy foods » *J. Dairy Sci* 2012. doi: 10.3168/jds.2011-4834.

Extraction, caractérisation et purification de bactériocines provenant du complexe d'espèces bactérien *Ralstonia solanacearum* : vers une stratégie innovante dans la lutte contre le flétrissement bactérien

Stéphane RAMIN-MANGATA¹, Eva CALY SIMBOU¹, Hasina RASOAMANANA¹, Stéphanie JAVEGNY², Yann PECRIX², Stéphane POUSSIER¹

stephane.ramin-mangata@univ-reunion.fr / eva.caly_simbou@cirad.fr /
hasina.rasoamanana@univ-reunion.fr / stephanie.javegny@cirad.fr / yann.pecrix@cirad.fr /
stephane.poussier@univ-reunion.fr

¹ IUT, Université de La Réunion

Laboratoires des Peuplements Végétaux et Bioagresseurs en Milieux Tropical, CIRAD UMR C53 PVBMT

² CIRAD, UMR PVBMT, F-97455 Saint-Pierre, La Réunion, France

Thèmes – *Biologie - Environnement*

Résumé – Les bactéries du complexe d'espèces *Ralstonia solanacearum* (ceRs) causent le flétrissement bactérien. Cette maladie cause de graves dégâts dans les cultures maraîchères. Les bactéries du ceRs sont regroupées en fonction de leur phylotype et de leur sequevar. Dans la zone du Sud-Ouest de l'Océan Indien, les souches du phylotype I sequevar 31 sont majoritaires dans les petites îles alors que celles du phylotype I-18 le sont à Madagascar. Cette différence de distribution pourrait être expliquée par la production de bactériocines, molécules antibactériennes à spectre d'action étroit. Ainsi, nous montrons, *in vitro*, qu'une souche I-18 sécrète des bactériocines actives dans une gamme de pH située entre 3 et 11. L'activité antibactérienne du filtrat de culture de la souche I-18 est spécifique vis-à-vis d'une souche I-31 et n'inhibe pas la croissance d'autres bactéries présentes au niveau du sol. *In planta*, le filtrat de culture I-18 inhibe le flétrissement bactérien induit par la souche I-31. Ces résultats sont encourageants pour la mise en place d'un traitement innovant contre le flétrissement bactérien. En effet, aucun traitement n'est disponible actuellement.

Mots-Clés – *Bactériocine, Ralstonia solanacearum, Lutte biologique, Flétrissement bactérien*

1 Introduction

Le flétrissement bactérien est actuellement considéré comme la 2^e phytobactériose au niveau mondial. Cette pathologie est causée par les bactéries du complexe d'espèces *Ralstonia solanacearum* (ceRs). Le ceRs est ainsi capable d'induire un flétrissement bactérien sur plus de 200 espèces végétales dans 54 familles botaniques différentes (1).

Le ceRs est constitué de trois espèces de bacilles à coloration de Gram négative : *R. pseudosolanacearum*, *R. solanacearum* et *R. syzygii*. Ces trois espèces sont réparties en 5 phylotypes (groupes de souches phylogénétiquement proches). Les espèces de *R. pseudosolanacearum* comprennent les souches du phylotype I et III originaires d'Asie et d'Afrique, respectivement. Les espèces de *R. solanacearum* regroupent les souches du phylotype IIA et IIB originaires d'Amérique. L'espèce *R. syzygii* contient les souches du phylotype IV originaires d'Indonésie, du Japon et d'Australie. Au sein de chaque phylotype, une classification plus fine peut être établie. Cette classification permet de faire la distinction entre des sequevars. Ainsi, les souches présentant au minimum 99% de similitude dans la séquence du gène de l'endoglucanase (*egl*) sont rassemblées dans un même sequevar (2).

Dans la zone du sud-ouest de l'océan Indien (SOOI), des études épidémiologiques menées ces dernières années ont révélé la présence de 4/5 phylotypes du ceRs. Ces travaux ont également mis en évidence de fortes différences de prévalence entre souches. Au niveau des petites îles comme La Réunion, Rodrigue, Mayotte, Les Comores et Les Seychelles le flétrissement bactérien est majoritairement dû aux souches appartenant au phylotype I sequevar 31 (I-31). En revanche, à Madagascar, la phytopathologie est principalement causée par des souches du phylotype I sequevar 18 (I-18) (3). Cette situation épidémique contrastée semble indiquer l'existence de mécanismes de compétitions sous-jacents entre ces différentes souches. En effet, de nombreuses bactéries sont capables de sécréter une grande variété de substances toxiques afin de tuer leurs compétitrices au sein de la même niche écologique. Il peut s'agir soit de molécules à large spectre, capables de tuer un grand nombre d'autres espèces de bactéries, soit de molécules aux actions plus spécifiques appelées bactériocines et qui ne ciblent de façon spécifique que des souches phylogénétiquement proches de la bactérie tueuse (4).

Chez les bactéries à Gram négatif, les bactériocines sont classées en fonction de leur taille. Ainsi, on distingue les microcines (<10kDa), les colicines (25-80kDa) et les tailocines (type queue de phage, 1 000-10 000kDa) (4).

Chez le ceRs, aucune bactériocine n'a encore été

caractérisée au niveau moléculaire. Récemment, nous avons montré que les souches I-18 et I-31 majoritaires dans le SOOI, présentaient des activités de type bactériocines ciblant des souches d'autres sequevars tels que I-33, I-46 ou encore I-15 peu prévalentes dans cette région. De plus, nous avons montré que les activités de type bactériocines de certaines souches I-18 ciblaient les souches I-31 des petites îles du SOOI (Rasoamanana *et al*, 2022, article accepté). Ces résultats suggèrent d'une part que la divergence de distribution du ceRs dans les îles du SOOI pourrait être en partie expliquée par les activités de type bactériocines des lignées I-31 et I-18 et d'autre part que les molécules antimicrobiennes produites par les souches I-18 et ciblant les souches I-31 pourraient être utilisées contre ces dernières souches épidémiques dans les petites îles du SOOI comme agent de biocontrôle.

Ainsi, l'objectif de cette étude est i) de tester l'activité des bactériocines produites par ces 2 types d'espèces, ii) d'extraire, de purifier et de caractériser ces bactériocines et iii) d'évaluer le potentiel des bactériocines produites par les souches I-18 comme agent de biocontrôle du flétrissement bactérien induit par les souches I-31.

2 Matériels et méthodes

2.1 Souches bactériennes et conditions de culture

Les souches utilisées pour cette étude proviennent des différentes îles de la zone SOOI et sont issues de la collection RUN de souches internationales du ceRs conservées en cryotubes au laboratoire PVBMT. Nous avons utilisé la souche RUN3012 (I-31) majoritaire à La Réunion, et la souche RUN6499 (I-18) isolée à Madagascar. Les bactéries ont été cultivées sur milieux Kelman gélosé supplémenté en TTC pendant 24-48h à 28°C. Pour l'extraction des protéines, 1000 mL de culture bactérienne sont ensemencés à une concentration de 10⁵ UFC/ml en bouillon nutritif pendant 24h à 28°C sous agitation à 150 rpm.

2.2 Extraction des protéines sécrétées

L'ensemble des protéines sécrétées est récolté après centrifugation de la culture bactérienne liquide. Le surnageant est filtré (porosité 0,22 µm). Une étape de fractionnement en fonction de la masse moléculaire est également réalisée. Après une précipitation au sulfate d'ammonium, les protéines sécrétées subissent une succession de filtration sur membrane Amicon avec des tailles de séparation différentes (50kDa, 100kDa).

2.3 Test d'activité des bactériocines *in vitro*

Des tests de compétitions sont réalisés en déposant des spots de 10µL de filtrat de culture de souches potentiellement productrices sur des boîtes de Petri contenant du milieu Kelman fraîchement ensemencé en

masse avec la souche cible (Rasoamanana *et al.*, 2022). Les boîtes de Petri sont ensuite incubées 48h à 28°C et l'activité antibactérienne du filtrat est évaluée macroscopiquement en observant le halo d'inhibition formé autour du spot suivant un score compris entre 0 et 4 (0 = pas d'halo donc pas d'activité antibactérienne, 4 = halo franc et large donc forte activité antibactérienne). Des tests similaires ont été réalisés sur 19 souches proches ou non des souches du ceRs.

2.4 Test d'activité des bactériocines, *in planta*

Les essais, *in planta*, ont été réalisés sur des plants de tomates de 3 semaines cultivés sous serre puis transférés le jour de l'inoculation en chambre de culture (28°C, 80% d'hygrométrie relative et 12h de photopériode). L'inoculation est réalisée en repotant les plantes dans de la terre contaminée par la souche RUN3012 (I-31, La Réunion) à 10^6 UFC.g⁻¹ de terre. Les plants ainsi infectés ont été arrosés une fois ou 2 fois avec une dilution (1:4) du filtrat de culture de RUN6499 (I-18, Madagascar). Des témoins sans arrosage ou dont la terre n'a pas été contaminée ont été inclus.

3 Résultats

3.1 L'activité bactériocine du filtrat de la souche I-18 vis-à-vis de la souche I-31 est optimale entre pH3 et pH11, *in vitro*.

Dans une série de tests de compétition, l'activité des filtrats bactériens de la souche RUN6499 (I-18) a été évaluée à différents pH sur la souche RUN3012 (I-31). Dans nos conditions expérimentales, le filtrat de la souche RUN6499 a présenté une activité antibactérienne dans une gamme de pH comprise entre 3 et 11. Par ailleurs, un chauffage du filtrat à 100°C et un traitement à la protéinase K ont entraîné la perte d'activité antibactérienne confortant ainsi l'hypothèse d'une activité bactériocine.

3.2 Les bactériocines de la souche I-18 ciblent spécifiquement les souches du ceRs.

Pour confirmer la spécificité d'action des bactériocines, nous avons testé leur potentiel d'inhibition de croissance sur 19 souches proches ou non des souches du ceRs. Les scores d'inhibition vis-à-vis de ces souches ont été quasi nuls et ont conforté notre hypothèse sur les bactériocines.

3.3 L'activité antibactérienne du filtrat RUN6499 semble liée aux protéines de poids moléculaire supérieur à 100kDa.

Il existe plusieurs types de bactériocines. Lors d'une stratification plus fine en fonction du poids moléculaire, nous avons pu constater que seul le filtrat protéique à haut poids moléculaire (>100kDa) présentait une activité

antibactérienne similaire à celle du filtrat protéique pur. Ainsi, l'activité bactériocine serait conférée par une ou plusieurs protéines de haut poids moléculaire.

3.4 Le filtrat protéique de la souche I-18 empêche le flétrissement bactérien induit par la souche I-31, *in planta*.

En conditions contrôlées, le filtrat protéique de la souche RUN6499 (I-18) a été capable d'empêcher la phytobactériose induite par la souche RUN3012 (I-31) que ce soit en arrosage unique ou en arrosage multiple (Figure 1). En perspectives nous envisageons de faire soit des traitements avant l'inoculation pour évaluer le potentiel préventif soit des traitements après inoculation pour évaluer le potentiel curatif des bactériocines des souches de I-18.



Figure 1 : Photographie des plants de tomates T4 en terre contaminée avec I-31 après traitement avec un filtrat I-18.

4 Conclusions

La distribution des souches du ceRs est inégale dans la zone du SOOI. Cette divergence pourrait s'expliquer par la sécrétion de bactériocines des souches prévalentes dans l'environnement pour lutter contre les autres souches compétitrices. Ainsi, nous avons pu montrer que la forte prévalence du phylotype I-18 à Madagascar et du phylotype I-31 à La Réunion pourrait en partie s'expliquer par la sécrétion d'une ou plusieurs bactériocines. Ces résultats sont encourageants dans la mise en place de nouveaux traitements biologiques innovants. En effet, il n'existe pas à l'heure actuelle de moyen de lutte efficace contre le flétrissement bactérien. Après isolement et caractérisation, la production des bactériocines et leur utilisation comme agent de biocontrôle pourrait constituer une nouvelle stratégie de lutte innovante contre le flétrissement bactérien.

Références

1. T. Denny, "Plant pathogenic *Ralstonia* species" in *Plant-Associated Bacteria*, S. S. Gnanamanickam, Ed. (Springer Netherlands, 2006), pp. 573–644.
2. M. Fegan, P. Prior, *How complex is the *Ralstonia solanacearum* species complex* (APS Press, 2005).
3. H. Rasoamanana, *et al.*, Contrasting genetic diversity and structure among Malagasy *Ralstonia pseudosolanacearum* phylotype I populations inferred from an optimized Multilocus Variable Number of Tandem Repeat Analysis scheme. *PLOS ONE* **15**, e0242846 (2020).
4. J. Zou, H. Jiang, H. Cheng, J. Fang, G. Huang, Strategies for screening, purification and characterization of bacteriocins. *Int J Biol Macromol* **117**, 781–789 (2018).

Composition des communautés de coccinelles psylliphages en milieu insulaire tropical à La Réunion

Marine Baujeu¹ Laura Moquet² Bernard Reynaud³
marine.baujeu@cirad.fr laura.moquet@cirad.fr bernard.reynaud@univ-reunion.fr

^{1,3} Université de La Réunion, IUT et
UMR PVBMT, F-97410 Saint Pierre, Réunion

² CIRAD, UMR PVBMT, F-97410 Saint Pierre, Réunion

Thèmes – *Biologie - Ecologie – Environnement*

Résumé – *Les coccinelles prédatrices sont depuis longtemps employées en lutte biologique contre les insectes envahissants. Ces espèces partagent souvent les mêmes proies et sont donc organisées en communautés. A La Réunion, île située dans le sud-ouest de l'océan Indien, on dénombre 26 espèces de coccinelles dont les trois quarts ont été introduites pour la lutte biologique. Cette île connaît depuis 2006 une invasion par un psylle originaire d'Australie : *Acizzia uncatoides* qui pullule et impacte un arbre endémique : *Acacia heterophylla*. Dans ce cadre la présente étude s'intéresse aux communautés de coccinelles psylliphages de La Réunion. Par un échantillonnage dans onze sites réalisé entre 2020 et 2022, quinze espèces de coccinelles ont été identifiées au stade adulte et cinq au stade larvaire. Seules les larves de trois espèces se nourrissent de psylles : *Exochomus laeviusculus*, la plus abondante, *Olla v-nigrum* introduite volontairement à La Réunion en 1990 et *Coccinella septempunctata* signalée pour la première fois sur l'île en mars 2020.*

Mots-Clés – *Ecologie des communautés, Lutte biologique, Coccinelles, Psylles*

1 Introduction

Les Coccinellidae (Coleoptera) représentent environ 6000 espèces décrites [1]. Certaines sont mycophages, phytophages mais la majorité de ces espèces sont des prédateurs d'arthropodes. Les adultes sont généralistes [2] et ne sélectionnent leurs proies que pour la reproduction, notamment les femelles. En effet les larves de coccinelles prédatrices ont un régime alimentaire spécialiste, c.à.d. qu'elles ne peuvent accomplir leurs cycles biologiques uniquement sur certains types de proies [3, 4]. Parmi leurs proies, les aleurodes, les pucerons, les cochenilles, les acariens et les psylles font des coccinelles des auxiliaires potentiels pour les activités agricoles elles constituent une grande part de la diversité des bioagresseurs des cultures. C'est pourquoi les coccinelles sont largement employées pour la lutte biologique [2].

La qualité de prédateur des espèces de coccinelles engendre le partage d'une même ressource alimentaire donc d'une même niche écologique. L'ensemble des espèces de coccinelles d'une même niche est appelé communauté [5]. A La Réunion, île située au sud-ouest de l'océan Indien, 26 espèces de coccinelles sont identifiées dont 7 sont considérées comme indigènes et une endémique, les autres ayant fait l'objet d'introductions volontaires ou accidentelles [6].

Cette île connaît depuis 2006 l'invasion d'un psylle australien : *Acizzia uncatoides* (Ferris & Klyver, 1932) (Hemiptera : Psyllidae) qui infeste et impacte allant jusqu'à tuer un arbre endémique et patrimonial : *Acacia heterophylla* Wild., 1806 (Fabales : Fabaceae) [7].

Cette étude vise à étudier les communautés de coccinelles psylliphages présentes sur l'île afin d'évaluer un programme de lutte biologique.

2 Matériel & Méthode

2.1 Choix des sites

Les sites d'échantillonnages de Coccinellidae ont été choisis en fonction de la présence de plantes hôtes régulièrement infestées par des espèces de psylles. Deux plantes hôtes ont été retenues : *Leucaena leucocephala* Wit, 1961 (Fabales : Fabaceae) infesté par *Heteropsylla cubana* Crawford, 1914 (Hemiptera : Psyllidae) et *A. heterophylla* infesté par *A. uncatoides*.

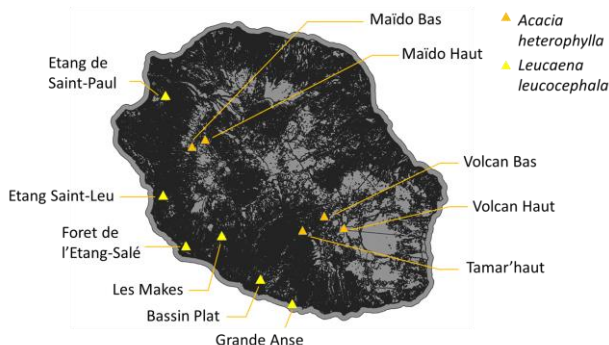


Figure 1 – Carte des sites échantillonnés

Onze sites ont été échantillonnés : six à basse altitude correspondants à l'aire de répartition de *L. leucocephala* et cinq à haute altitude correspondant à l'aire de

répartition de *A. heterophylla* (Figure 1).

2.2 Echantillonnage

Chaque site a été échantillonné à plusieurs reprises (Tableau 1) entre octobre 2020 et avril 2022.

Un prélèvement d'une minute à l'aspirateur thermique (Garden Vaccum GVAC) dans une bonnette en tissu à maille fine a été réalisé sur 10 arbres hôtes de psylles et de coccinelles pour chaque échantillonnage. Chaque prélèvement a été complété avec une collecte « à vue » des coccinelles (larves et adultes).

Tableau 1 – Caractéristiques des sites d'échantillonnages

Stations	Identifiants sites	Altitude	Température moyenne annuelle	Nombre de passages	Nombre d'arbres échantillonnés
Grande Anse	GA	35	25,88	8	85
Etang Saint-Paul	ESP	65	25,97	7	56
Forêt de l'Etang Salé	FES	65	25,08	9	80
Bassin Plat	BP	120	24,67	9	79
Etang Saint-Leu	ESL	380	22,83	6	57
Les Makes	MAK	400	22,98	6	50
Tamar'haut	TH	1400	15,04	10	84
Maïdo Bas	MAIB	1500	24,04	7	76
Volcan Bas	VOLB	1900	10,87	6	65
Maïdo Haut	MAIH	2000	11,28	5	70
Volcan Haut	VOLH	2400	11,89	7	83
totaux :				80	785

3 Résultats

Au total, 16 espèces de coccinelles adultes ont été collectées sur l'ensemble des sites. Dix ont été collectées sur *L. leucocephala* et onze sur *A. heterophylla*. Parmi elles trois espèces sont considérées psylliphages : *Olla v-nigrum*, *Exochomus laeviusculus* et *Dysis bisquatuorguttata*.

Cinq espèces ont été collectées au stade larvaire : *Coccinella septempunctata* uniquement sur *A. heterophylla*, *Psyllobora variegata* (1 individu) et *Rodolia fumida* (2 individus) uniquement sur *L. leucocephala* (Tableau 2).

Tableau 2 – Présence des espèces de coccinelles par station (Ad : Adultes, L : Larves)

	<i>Leucaena leucocephala</i>					<i>Acacia heterophylla</i>					
	BP	ESL	ESP	FES	GA	MAK	MAIB	MAIH	TH	VOLB	VOLH
<i>Cheilomenes sulphurea</i>											
<i>Chilocorus infernalis</i>								Ad		Ad	Ad
<i>Chilocorus nigritus</i>			Ad	Ad	Ad			Ad		Ad	
<i>Coccinella septempunctata</i>								Ad	Ad		Ad, L, Ad, L
<i>Dysis bisquatuorguttata</i>											Ad
<i>Exochomus laeviusculus</i>	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad	Ad	Ad	Ad, L, Ad, L
<i>Nephus oblongsignatus</i>			Ad	Ad							
<i>Nephus voeltzkowi</i>			Ad								
<i>Olla v-nigrum</i>	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L	Ad, L		Ad, L	Ad, L
<i>Parastethorus incompletus</i>								Ad			
<i>Platynaspis capicola</i>			Ad					Ad			
<i>Pseudoscymnus pallidicollis</i>	Ad	Ad				Ad					
<i>Psyllobora variegata</i>	Ad					Ad, L			Ad		
<i>Rhyzobius lophantae</i>						Ad					
<i>Rodolia fumida</i>						L					
<i>Scymnus constrictus</i>	Ad	Ad	Ad	Ad		Ad	Ad		Ad	Ad	Ad

559 individus de *O. v-nigrum* ont été collectés sur *L. leucocephala* et 51 sur *A. heterophylla*. 2823 individus de *E. laeviusculus* ont été collectés sur *L. leucocephala*, 95 sur *A. heterophylla*.

Trois des espèces (adultes et larves) dépassent les 35 individus collectés : *C. septempunctata*, *O. v-nigrum* et *E. laeviusculus*.

4 Discussion

Les coccinelles prédatrices partagent parfois la même niche écologique, elles sont alors regroupées en communautés. A La Réunion les communautés de coccinelles potentiellement psylliphages sont représentées par 15 espèces dont trois sont considérées réellement comme psylliphages. Les adultes opportunistes et généralistes sont présents pour exploiter une ressource alternative. Les collectes de deux larves de *R. fumida* et d'une de *P. variegata* font exception car ces espèces sont respectivement coccidiphage et mycophage strictes [6]. Les *L. leucocephala* sont parfois mêlés à des lianes infestées de cochenilles et le miellat produit par les larves de psylles favorise aussi le développement de fumagine, deux sources alimentaires pour les larves de ces espèces.

Exochomus laeviusculus, la plus abondante (près de 3000 individus collectés) est une espèce généraliste qui réalise son cycle sur pucerons, cochenilles ou sur psylles [6]. Originaire d'Afrique, cette espèce tropicale est considérée comme indigène à La Réunion. Sa petite taille fait d'*E. laeviusculus* une espèce peu vorace [8]. Son abondance à basse altitude est intéressante pour la lutte biologique par amplification mais sa faible adaptation aux climats plus froids réduit son abondance dans les hautes altitudes de l'île.

Olla v-nigrum est décrite dans la littérature comme aphidiphage/psylliphage [6]. Cette coccinelle tropicale originaire de Polynésie française a été introduite volontairement en 1990 à La Réunion pour un programme de lutte biologique contre le psylle *H. cubana* [9]. Son acclimatation est maintenant avérée mais les pullulations de l'espèce cible perdure car son abondance reste faible. L'efficacité de *Olla v-nigrum* a par la suite été étudiée sur *A. heterophylla* par la FDGDON et aucune preuve de contrôle des populations de psylles n'a pu être démontrée.

Coccinella septempunctata est une espèce aphidiphage de climat tempéré [10]. Originaire d'Eurasie sa présence à la Réunion a été signalée en mars 2020 et l'origine de son introduction reste inconnue. La présence de cette coccinelle aux stades adulte et larvaire sur les populations de *A. uncatoides* est inattendue. Elle pourrait être expliquée par le manque ou l'absence de pucerons à haute altitude qui inciterait les adultes à pondre sur une ressource inadaptée [11]. Les larves se développent jusqu'au stade adulte mais donnent des individus stériles (mise en élevages des larves collectés sur les stations VOLH et MAIB). Ce phénomène de stérilité de *C. septempunctata* en lien avec son développement sur psylles a d'ailleurs déjà été observé [12].

5 Conclusions

Cette étude a mis en évidence la présence de trois espèces de coccinelles prédatrices de psylles communes sur l'île de La Réunion. Une seule : *Exochomus laeviusculus* est abondante dans les basses altitudes aussi aucune des trois espèces ne présente des caractéristiques intéressantes pour une lutte biologique efficace contre le psylle invasif *Acizzia uncatoides* qui pullulent aux hautes altitudes. C'est pourquoi les introductions potentielles

d'une microguêpe parasitoïde et d'une coccinelle psylliphages originaires d'Australie sont à l'étude dans le cadre du projet CREME (<https://twitter.com/projetcreme>) porté par l'Université de la Réunion.

6 Remerciements

Marine Baujeu bénéficie d'une allocation doctorale de la Région Réunion cofinancée par l'Union Européenne (Fond Européen de Développement Régional, FEDER).

Laura Moquet bénéficie d'un cofinancement de la Région Réunion et de l'Union Européenne (fonds FEDER, Recherche agronomique).

Le fonctionnement de cette étude a bénéficié du projet CREME cofinancé par l'Union Européenne (Fond Européen de Développement Régional, FEDER, projet numéro RE0022961).

Les auteurs remercient le Pôle de Protection des Plantes (3P, IBiSA) pour l'accueil sur la plateforme de Recherche.

Nous remercions Frédéric Chiroleu et Pierre-Louis Stenger pour leur appui analytique. Nous remercions les étudiants de l'IUT (Dept Génie Biologique) : Pauline de Viviés, Théo Sechet, Evan Techer, David Idmont, Manon Dijoux, Thomas Nacaouelle, Saïna el-Had, Luna Kim-Foo ainsi que Coline Dubois (INAPG) pour leur implication durant leur stage sur le terrain et en laboratoire.

Références

- [1] Robertson, J.A., et al., Phylogeny and classification of Cucujoidea and the recognition of a new superfamily Coccinelloidea (Coleoptera : Cucujiformia). *Systematic Entomology*, 2015, p. 745–778.
- [2] Sarwar M., Food habits or preferences and protecting or encouraging of native ladybugs (Coleoptera: Coccinellidae), *Mar*, 2016, p. 18–18.
- [3] Evans E.W., et al., Essential versus alternative foods of insect predators: benefits of a mixed diet, 1999, p. 107–112.
- [4] Hodek, I., Essential and alternative food in insects. *Proc. 11th Int. Congr. Entomol.* 1962, p. 696–697.
- [5] Polis, G. A., and Holt. R. D., Intraguild predation: the dynamics of complex trophic interactions. *Trends Ecol. Evol.* 1992, p. 151–154.
- [6] Poussereau, J. et al., *Les coccinelles de La Réunion*, Ed. Orphie, 2018.
- [7] Ouvrard, D., et al., *Acizzia uncatoides* (Psyllidae) et *Furcaspis biformis* (Diaspididae) nouveaux pour l'île de la Réunion (Hemiptera). *Bull. la Société Entomol. Fr.* 2016, p. 283–284.
- [8] Khan A.A. and Mir R. A., Functional response of four predaceous coccinellids *Adalia tetraspilota* (Hope), *Coccinella septempunctata* (L.), *Calvia punctata* (Mulsant) and *ippodamiavariegata* (Goeze) feeding on the green apple aphid, *Aphis pomi* De Geer (Homoptera: aphididae). *Journal of Biological Control.* 2008, p. 291–298.
- [9] Zulici, S. et al, Successful establishment on Reunion Island of an exotic ladybird, *Olla v-nigrum* the biocontrol of leucaena psyllid, *Heteropsylla cubana*, Workshop

proceedings Leucaena psyllid, 1995, p. 147-154.

[10] Hodek I., Food relationships. In Hodek I. & Hončák A. (eds): Ecology of Coccinellidae. Kluwer Academic, Dordrecht, 1996, p. 143–238.

[11] Mills, N. J., Essential and alternative foods for some British Coccinellidae (Coleoptera). Entomol. Gaz. 1981, p. 197-202.

[12] Jalali, M.A., et al., Food Utilization, Development, and Reproductive Performance of *Coccinella septempunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) Feeding on an Aphid or Psylla Prey Species, Journal of economic entomology, 2019, 571-576.

Outils de modélisation de la chimie de l'atmosphère :

Etude de l'accident de Fukushima Daiichi

Valérie Fèvre-Nollet¹ Patrick Lebègue¹

valerie.fevre-nollet@univ-lille.fr patrick.lebegue@univ-lille.fr

¹ IUT, Université de Lille

Physicochimie des processus de combustion et de l'atmosphère, UMR 8522

Florent Louis² Sonia Taamalli²

² Université de Lille

Physicochimie des processus de combustion et de l'atmosphère, UMR 8522

Thèmes – *Chimie - Environnement - Informatique*

Résumé – *La chimie de l'atmosphère est un champ de recherche pluridisciplinaire qui comprend, entre autres, des spécialistes en chimie, physique, modélisation informatique, météorologie et sciences environnementales. Afin de synthétiser l'ensemble de leurs connaissances, des modèles sont développés et appliqués à l'étude de phénomènes d'actualité tels que le changement climatique, la pollution atmosphérique ou les incidents et accidents industriels. Nous allons présenter dans ce papier un exemple d'utilisation de 3 types de modèles, rarement mis en relation : un modèle de chimie théorique, un modèle de réactivité chimique 0D et un modèle de chimie-transport 3D. Ils sont conjointement appliqués à l'étude de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.*

Mots-Clés – *Chimie, atmosphère, modélisation*

1 Introduction

Quand on aborde le sujet des phénomènes atmosphériques, on pense d'abord au dérèglement climatique et aux perturbations météorologiques associées. Mais il existe à plus petite échelle des modifications de l'atmosphère qui ont un impact direct sur la santé humaine. Ainsi, il est démontré que la pollution atmosphérique, provenant principalement des émissions industrielles et des transports, augmente la mortalité due aux maladies cardiovasculaires. L'exposition aux épandages de produits phytosanitaires induit aussi des risques sur la santé (cancer, infertilité, déficit immunitaire...) et l'environnement. On peut citer également les accidents industriels, phénomènes ponctuels et assez rares, ayant de très fortes retombées sur les populations avoisinantes (AZF-2001, Fukushima-2011). Depuis 1950, de nombreux groupes de recherche ont développé des modèles physico-chimiques permettant de simuler, prédire et élaborer des stratégies pour limiter l'évolution de ces phénomènes à petite et grande échelles. C'est dans ce cadre que se déroulent nos recherches.

2 Présentation des modèles

En tant que chimistes, nous nous intéressons principalement à la réactivité des polluants dans l'atmosphère. Nous utilisons pour ce faire 3 types de modélisation bien distinctes, rarement mises en relation comme c'est le cas dans nos travaux (Figure1).

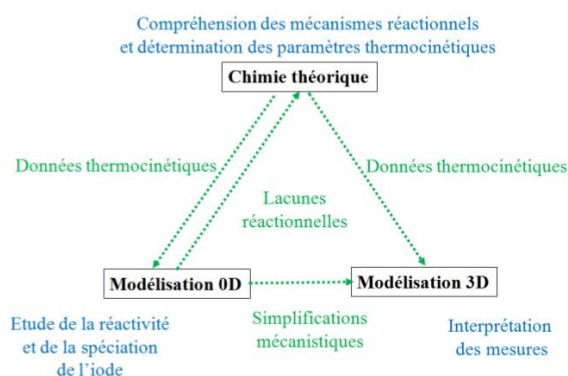


Figure 1 – Complémentarité des modélisations

La chimie théorique, basée sur une étude fondamentale, a pour objectif de modéliser le comportement des électrons dans une molécule et de déterminer les paramètres structuraux et énergétiques des espèces chimiques intervenant dans une réaction. Les logiciels utilisés sont Molden, Gaussian, Molpro, GPOP et Polyrate.

Le deuxième modèle, 0D, est unidimensionnel : il décrit la réactivité d'un ensemble d'espèces chimiques inscrites

dans un mécanisme par la résolution du système d'équations différentielles par rapport à la seule variable temps, sans variation dans l'espace. Il est rapide d'exécution et permet de déterminer les réactions et spéciations prépondérantes en s'affranchissant de la dispersion atmosphérique. Le modèle utilisé ici est le modèle ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code) de l'IRSN.

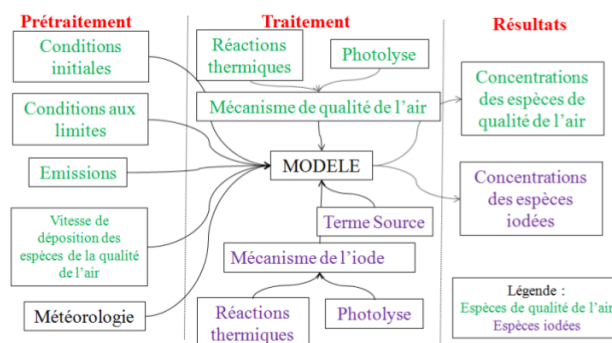


Figure 2 – Etapes d'un modèle 3D

Notre troisième modèle, Polair3D, est un modèle de chimie-transport déterministe eulérien. Il calcule l'évolution spatio-temporelle de plusieurs centaines d'espèces chimiques sur un domaine choisi et constitué de mailles fixes. Ce type de modèle est le plus représentatif de la réalité car il prend en compte la météorologie, les processus de dispersion, les dépôts secs ou humides, les conditions aux limites et un mécanisme chimique très complet (Figure 2). Tout comme les modèles de chimie théorique, il nécessite des moyens de calcul performants (clusters) et un espace de stockage conséquent. Il demande également un soutien informatique important, notamment pour le développement de modèles d'émission et le traitement des bases de données.

3 Modélisation de l'accident de Fukushima

Lors d'un accident sur une centrale nucléaire, il est nécessaire d'évaluer très tôt la quantité de produits de fission rejetés et leur dispersion. L'utilisation de modèles permet ainsi de prendre des mesures rapides de mise en sécurité des populations exposées. Lors de la catastrophe de Fukushima Daiichi, le 11 mars 2011, les concentrations des principaux radionucléides déposés (Césium 137 et Iode 131) ont été comparées aux résultats simulés avec le modèle 3D du centre technique de crise de l'IRSN. Pour l'iode 131, isotope de l'iode naturel et l'un des produits de fission les plus cancérigène (cancer de la thyroïde), les résultats de simulations expriment des quantités inférieures aux mesures réalisées sur Tokyo. Nous supposons que cela provient du fait que le modèle ne tient pas compte de la réactivité chimique de l'iode avec son environnement.

Afin de simuler au plus proche l'accident de

Fukushima, nous développons donc dans un premier temps un mécanisme chimique complet de l'iode gazeux : il intègre toutes les connaissances thermocinétiques et réactions déterminées par chimie théorique publiées à ce jour. Ce mécanisme est ensuite analysé par modélisation 0D et 3D afin de déterminer l'impact de divers paramètres de la qualité de l'air sur l'iode.

4 Résultats

Dans ce type de mécanisme, compte tenu du manque de données dans les publications, il est courant de faire des analogies entre éléments d'une même famille. Nous avons démontré par calcul de chimie théorique que cela ne peut pas être appliqué à l'iode par la détermination des paramètres thermo cinétique de la réaction $X + H_2O_2 =$ produits, avec $X = Br$ ou I , Fortin C. [1]

La mise en œuvre du mécanisme 0D a permis de mettre au jour une forte réactivité de l'iode dans l'atmosphère. Il fait clairement apparaître un cycle jour/nuit (Figure 3, Table1) et l'influence des polluants atmosphériques (NO_2 et composés organiques) sur la formation d'iode organique suffisamment stable pour être transporté à plus longue distance et d'oxydes d'iode qui se déposeront rapidement au sol, Fortin C. [2]

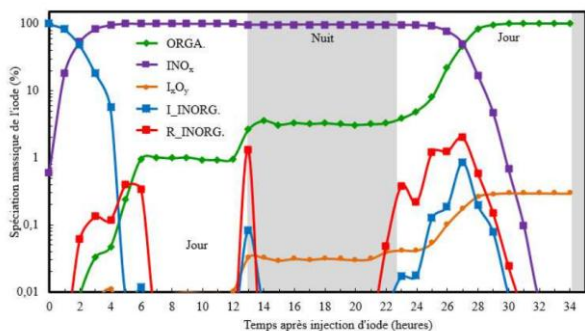


Figure 3 – Evolution de la spéciation massique de l'iode en fonction du temps (injection de I_2 à 6h le 12/03/2011)

Table 1 – famille chimique des espèces iodées

Nom de la famille	Notation	Espèces chimiques
Nitroxydes d'iode	INO_x	$INO, INO_2, IONO_2$
Oxydes d'iode	I_xO_y	$I_2O, I_2O_2, I_2O_3, I_2O_4, I_2O_5, I_2O_6, I_3O_6, I_3O_7, I_4O_6, I_4O_7, I_4O_8, I_4O_9, I_4O_{10}, HOIO_2$
Espèces iodées inorganiques	I_INORG	I_2, HOI, HI
Radicaux inorganiques	R_INORG	I, IO, OIO
Espèces iodées organiques	$ORGA$	Espèces iodées comportant au moins un carbone

La simulation 3D a enfin confirmé les tendances observées en 0D, nous donnant des profils de concentration d'espèces assez similaires tout au long de la trajectoire 3D (Figure 4).



Figure 4 – Déplacement de la bouffée (injection de I_2 à 6h le 12/03/2011)

5 Conclusions

Les résultats obtenus dans le cadre de l'étude de l'accident de Fukushima démontrent l'intérêt de l'utilisation conjointe de modèles de chimie théorique, 0D et 3D. Cette complémentarité est étendue à de nouveaux travaux afin d'étudier l'impact du chlore sur le changement climatique (coopération avec Météo France, modèle 3D Mocage). Une étude en chimie théorique est également en cours sur la réactivité des produits phytosanitaires avec les polluants de l'atmosphère.

6 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude au LABEX CaPPA (Chemical and Physical Properties of the Atmosphere) "ANR-11-LABX-0005-01" pour son soutien financier ainsi que le conseil régional "Hauts de France" et "the European Funds for Regional Economic Development"

Références

[1] Camille Fortin, Sarah Khanniche, Dora Khiri, Valérie Fèvre-Nollet, Patrick Lebègue, Frédérique Cousin, Ivan Černusak, Florent Louis, *Reactivity of Hydrogen Peroxide with Br and I Atoms*. J. of Phys. Chem. A, 122(4):1053-1063, 2018.

[2] Camille Fortin, Valérie Fèvre-Nollet, Frédérique Cousin, Patrick Lebègue, Florent Louis, *Box modelling of gas-phase atmospheric iodine chemical reactivity in case of a nuclear accident*, Atmos. Env., 214, 116838, 2019

Estimation de mouvement de civelles par méthodes différentielles

Franck Luthon¹

Nawal Eldrogi²

Benoît Larroque³

franck.luthon@univ-pau.fr

nawaleldrogi@gmail.com

benoit.larroque@univ-pau.fr

^{1,3} IUT de Bayonne Pays Basque, Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA

^{1,2} Laboratoire Informatique LIUPPA, Anglet, EA 3000

³ Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur SIAME, Anglet, EA 4581

THÈMES – *Biologie - Informatique - Imagerie*

RÉSUMÉ – *En biologie, le suivi du déplacement d'animaux pose parfois des problèmes techniques liés aux caractéristiques des espèces et des stades de développement, ou au milieu de vie. Pour étudier la migration de civelles d'anguille, les biologistes reproduisent les inversions de courant de marées en laboratoire et font un marquage individuel à l'aide d'élastomère coloré. En travaillant manuellement sur des enregistrements vidéo, ils identifient chaque individu et s'intéressent à leur sens et vitesse de déplacement. Les techniques du traitement d'images et d'estimation de mouvement peuvent les aider dans cette tâche. Dans ce travail exploratoire, le mouvement des civelles est estimé par des méthodes différentielles de calcul du flux optique. L'algorithme de Lucas et Kanade permet de déterminer le sens et la vitesse de déplacement, tandis que celui de Horn et Schunck précise le mouvement ondulatoire des civelles. Ces informations pourraient aider les biologistes à estimer la dépense énergétique liée à la nage, l'objectif à terme étant d'automatiser les mesures.*

MOTS-CLÉS – *Estimation de vitesse, Suivi, Comportement de poisson, Flux optique.*

1 Introduction

L'anguille européenne présente un cycle de vie complexe, avec une reproduction en mer des Sargasses, une phase larvaire qui traverse l'océan atlantique et un stade juvénile, la civelle, qui remonte les estuaires pour effectuer sa croissance en rivière. Les civelles nagent en suivant les courants de marée montante, et s'enfoncent vers le substrat à marée descendante. Il a néanmoins été démontré que cette migration estuarienne est facultative, certains individus renonçant à rejoindre les rivières et restant en estuaire. Une meilleure compréhension du déterminisme de la migration estuarienne des civelles est d'un intérêt crucial pour cette espèce menacée. Pour l'étudier, on reproduit en laboratoire les courants de marée et on observe le comportement de nage des individus. Une difficulté concerne l'animal lui-même, qui est transparent et se déplace principalement de nuit. Pour suivre les civelles, on marque chaque individu avec un marquage élastomère coloré, implanté sous la peau et visible sous UV quelles que soient les conditions lumineuses [1]. Le suivi se fait sur enregistrements vidéo¹ mais c'est un travail fastidieux, actuellement non automatisé. Les paramètres qui intéressent les biologistes sont le sens de déplacement des civelles (avec ou contre le courant) et leur vitesse. Toute mesure permettant d'évaluer la dépense énergétique est également recherchée, car les civelles jeûnent durant la migration, et leur statut énergétique influe sur leur potentiel migratoire. Or, en vision par ordinateur, l'estimation de mouvement a de nombreuses applications : poursuite d'objets, vidéo-surveillance, robotique, analyse gestuelle, météorologie, imagerie médicale. Elle consiste à calculer le déplacement de chaque pixel d'une image ou région en mouvement pour obtenir des vecteurs représentant la vitesse. Le mouvement apparent obtenu à partir des changements de la distribution spatiale d'intensité est appelé flux optique, pour lequel il existe diverses méthodes d'estimation. L'objectif de ce travail exploratoire est d'appliquer les méthodes différentielles pour estimer le mouvement des civelles d'anguille : déterminer leur sens de nage, mesurer leur vitesse, caractériser leurs ondulations.

2 Contexte expérimental

On utilise un aquarium en forme d'anneau ovale, de longueur 150 cm et de largeur 50 cm, partagé en son milieu par une paroi verticale rigide. Deux pompes, situées aux 2 extrémités opposées de l'aquarium, permettent d'alterner les courants d'eau toutes les 6,2 heures, reproduisant le rythme des marées. La vitesse du courant d'eau est d'environ 11 cm/sec. La température de l'eau est maintenue constante à $11 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Une couche de gravier couvre le fond de l'aquarium. Un groupe d'une trentaine de civelles est marqué avec des combinaisons d'élastomères couleurs (rouge, orange, vert, bleu). La taille moyenne d'une civelle est de

7 cm. La zone filmée concerne toute la colonne d'eau, sur une largeur de 60 cm. Des enregistrements vidéo de 15 sec sont réalisés toutes les 40 min sur 8 jours. La cadence vidéo est de 15 images/s. La taille d'image est 1280×960 pixels.

3 Méthode d'estimation de mouvement

Les techniques d'estimation de mouvement consistent à mesurer le flux optique représentant les variations de la luminance entre 2 images successives. Le principe repose sur l'hypothèse de conservation de la luminosité d'un point-objet le long de la trajectoire du mouvement. Dans une vidéo, un pixel est représenté par sa fonction de luminance $I(x,y,t)$ où l'intensité I est supposée varier suite au mouvement entre deux instants t et $t + dt$. On note : $(I_x = \frac{\partial I}{\partial x}, I_y = \frac{\partial I}{\partial y})$ les 2 composantes du gradient spatial ∇I ; $I_t = \frac{\partial I}{\partial t}$ la dérivée temporelle de l'intensité; et $(u = \frac{dx}{dt}, v = \frac{dy}{dt})$ les 2 composantes du vecteur-vitesse V selon les directions (x,y) . L'équation du flux optique (dite équation de contrainte du mouvement) s'exprime alors :

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (1)$$

Afin de trouver une solution unique pour les 2 composantes (u,v) du vecteur-vitesse V , on a besoin de deux équations indépendantes, d'où la nécessité d'ajouter une contrainte supplémentaire pour résoudre ce problème mal posé. Le choix de la contrainte conduit à différents algorithmes.

Les méthodes différentielles ont l'avantage d'être précises et faciles à mettre en œuvre : l'équation du flux optique fournit une estimation sous-pixellique du mouvement, et ne nécessite qu'un calcul local des dérivées spatio-temporelles de la séquence. Leur principale limitation résulte des 2 hypothèses : d'invariance de luminosité pendant le mouvement, et de petit déplacement. Pour des déplacements plus importants, il est néanmoins possible de résoudre le problème par des approches multirésolution.

3.1 Algorithme de Horn & Schunck

Cette méthode initiale de calcul du flux optique [2] combine l'équation de contrainte du mouvement avec une régularisation globale, grâce à un terme de lissage portant sur la somme des carrés des modules des gradients des composantes de vitesse en minimisant l'équation suivante :

$$\int \int_D (\nabla I \cdot V + I_t)^2 + \alpha^2 (\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2) dx dy \quad (2)$$

α est un paramètre de pondération (typ. $\alpha = 1$) qui règle l'influence du lissage (régularisation). Un algorithme itératif (typ. 10 itérations) permet de minimiser l'intégrale sur un petit domaine D ; les équations itératives donnent u et v .

3.2 Algorithme de Lucas & Kanade

Cette méthode repose sur une régularisation locale du champ de vitesses [3]. On suppose un mouvement local

1. Merci à Valérie Bolliet de l'INRAE, qui a fourni les données vidéo.

constant (translation) dans de petites régions Ω de l'image (typ. de taille 40×40). Ceci s'exprime par :

$$\min_{u,v} \sum_{p \in \Omega} W^2(p) [I_x(p)u + I_y(p)v + I_t(p)]^2 \quad (3)$$

$W(p)$ est une fonction de fenêtrage (pondération) permettant de donner plus d'influence aux pixels p au centre de la région plutôt qu'à la périphérie. En appliquant la méthode d'estimation des moindres carrés pondérés, on trouve u et v . Cette méthode différentielle locale est intéressante car chaque calcul sur une petite région est indépendant des autres. Les résultats sont par ailleurs peu sensibles au bruit.

4 Résultat du traitement d'image

Les algorithmes s'appliquent sur 2 images successives. L'exemple en Fig. 1 comporte 4 civelles marquées : les 2 premières se trouvent en bas à gauche dans l'image, l'une avec un marquage double orange-orange court (rapproché) codé OOC, et l'autre, juste au dessus, avec un marquage orange-rouge long (espacé) codé ORL ; la 3ième se situe au milieu de l'image avec un code vert-vert long (VVL) ; la 4ième est à droite avec un code bleu-vert court (BVC). Le sens du courant de marée va de la droite vers la gauche de l'image (\leftarrow). Les civelles OOC et ORL nagent avec le courant, tandis que VVL et BVC nagent à contre-courant.

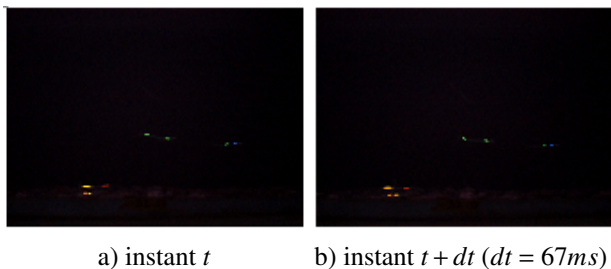


FIGURE 1 – Deux images successives typiques en nocturne.

4.1 Résultat avec Lucas & Kanade

Chaque zone encadrée en Fig.2a exhibe des flèches dont l'orientation globale correspond bien au sens de déplacement des civelles. La Fig.2b montre un zoom du champ de vecteurs de la zone centrale (c) : les flèches ont une taille identique, avec 2 orientations distinctes, traduisant la présence d'une seule civelle (tête et queue) qui se déplace vers le côté inférieur droit de l'image. Cette méthode peut donc fournir la direction et la vitesse de civelles (ici ≈ 8 cm/s).

4.2 Résultat avec Horn & Schunck

La Fig.3a montre un résultat typique de flux optique : le champ de vecteurs est quasi nul dans les zones du fond sans civelle mobile. La Fig.3b est un zoom de la partie centrale 160×70 (tête et queue de la civelle VVL). Le champ

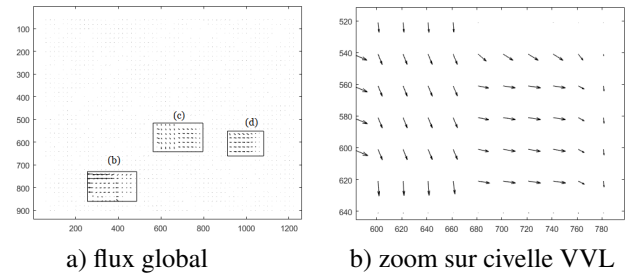


FIGURE 2 – Champ de vecteurs-vitesse de Lucas & Kanade.

de vecteurs exhibe 4 zones avec 2 orientations différentes des flèches : l'une vers l'intérieur de l'objet (convergence) ; l'autre vers l'extérieur (divergence). La divergence et la convergence reflètent la nage par ondulation d'une civelle. Le sens de nage peut s'en déduire : ici, la civelle nage vers la droite. L'algorithme fournit donc le sens de déplacement ainsi que l'allure du mouvement ondulatoire des civelles.

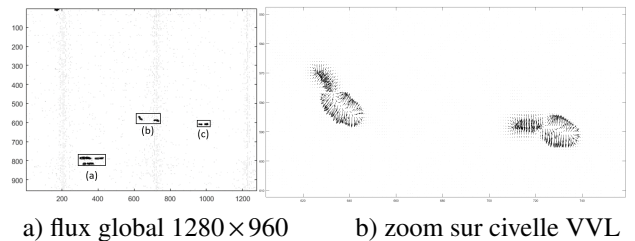


FIGURE 3 – Champ de vecteurs-vitesse de Horn & Schunck.

5 Conclusion et perspective

L'algorithme de Lucas & Kanade permet de déterminer le sens de nage des civelles et d'obtenir une estimation de leur vitesse. Celui de Horn & Schunck permet de préciser leur mouvement ondulatoire, ce qui pourrait être utilisé comme indicateur de dépense énergétique liée à la nage. Enfin, l'automatisation des mesures permettra de réduire le temps de travail de l'observateur biologiste [4].

Références

- [1] J. Delcourt *et al.*, Video tracking in the extreme : a new possibility for tracking nocturnal underwater transparent animals with fluorescent elastomer tags, *Behavior Research Methods*, 43(2), pp.590-600, 2011.
- [2] B.K.P. Horn and B.G Schunck, Determining optical flow, *Artificial Intelligence*, vol.17, pp.185-203, 1981.
- [3] A. Bruhn *et al.*, Lucas/Kanade meets Horn/Schunck : combining local and global optic flow methods, *Int. J. of Computer Vision*, 61(3), pp.211-231, 2005.
- [4] N. Eldrogi, Vision par ordinateur pour suivi automatique et caractérisation de comportement de civelles, *Thèse de doctorat de l'université UPPA*, Juin 2021.

La biomécanique cellulaire au service de la santé :

Application à la Dystrophie Musculaire de Duchenne

Nassim Anis Ahmine¹ Valentina Taglietti¹ Frédéric Relaix¹
Sophie Féréol^{1,2} Redouane Fodil¹

nassim-anis.ahmine@u-pec.fr, valentina.taglietti@inserm.fr, frederic.relaix@inserm.fr, ,
sophie.fereol@u-pec.fr, redouane.fodil@u-pec.fr

¹ Faculté de Santé, Université Paris-Est Créteil
Institut Mondor de Recherche Biomédicale, UMR U955
8 rue du Général Sarrail, 94010 Créteil

² IUT, Créteil-Vitry, Université Paris-Est Créteil
61 Av. du Général de Gaulle, 94010 Créteil

Thèmes – *Biomécanique cellulaire - Mécanique - Santé*

Résumé – *La Dystrophie Musculaire de Duchenne (DMD) est une maladie génétique neuromusculaire grave, progressive et incurable qui induit chez les patients DMD une perte de mobilité et des complications cardio-respiratoires conduisant à leur décès prématuré. Dans cette présente étude, nous proposons de caractériser l'atteinte de cette maladie en évaluant les propriétés mécanique et structurelle des cellules et fibres musculaires ainsi que du muscle squelettique dans un modèle préclinique de rat DMD développé spécifiquement au laboratoire. Pour cela nous utilisons la microscopie à force atomique (AFM), l'élastographie ultrasonore (UE) et la microscopie à fluorescence (FM) afin de caractériser et comparer les propriétés mécaniques (AFM, UE), topographiques (AFM) et structurelles (FM) à différentes échelles en conditions in-vitro et in-vivo à partir des modèles de rats de type sauvage (WT) et DMD. Nos résultats montrent une différence significative des valeurs des propriétés mécaniques à toutes les échelles entre les cohortes de rats WT et DMD. Nos données démontrent que les propriétés mécaniques sont des biomarqueurs robustes et pertinents pour caractériser l'état de santé des cellules et des tissus.*

Mots-Clés – *Myopathie Musculaire de Duchenne, Modèle de rat, Module d'élasticité, Microscopie à Force Atomique.*

1 Introduction

Pour comprendre la démarche scientifique dans laquelle s'inscrit notre projet de recherche, commençons par rappeler ce qu'est la Biomécanique cellulaire.

La cellule, plus petite entité structurale qui constitue tout organisme vivant est considérée comme un matériau actif capable de générer et de supporter des forces provenant de son microenvironnement. Tout comme les propriétés biochimiques (facteurs solubles, matrice extracellulaire), les propriétés biophysiques (topographique, élasticité, structure, charge mécanique) du microenvironnement influent sur le comportement et le devenir des cellules. Grâce à leurs capteurs moléculaires, les cellules détectent ces différents stimuli et y répondent en modifiant notamment la dynamique et la structure de leur cytosquelette ainsi que leur système d'adhésion [1]. L'ensemble des processus de détection des signaux mécaniques et de leur conversion en une réponse biochimique et/ou changements dans l'expression des gènes, est appelé mécano-transduction. Ce phénomène est intimement lié aux propriétés mécaniques de la cellule et de ses composants. Les propriétés mécaniques, considérées comme un reflet des changements du cytosquelette, représentent aujourd'hui un biomarqueur de l'état de santé des cellules [2]. Ainsi, faire le lien entre la mécano-sensibilité des cellules, les forces générées par les cellules, leurs propriétés structurelle et mécanique, ainsi que les mécanismes moléculaires sous-jacent (adhésion, etc.) est un des enjeux majeurs de la mécanique cellulaire [3]. Concrètement, la mécanique cellulaire, considérée comme un sous-ensemble de la mécanique consiste à évaluer ces paramètres et à les modéliser en appliquant les lois de la mécanique pour caractériser le comportement des structures biologiques à l'échelle cellulaire voire subcellulaire [4]. Pour ce faire, différentes techniques de micromanipulation illustrées sur la Figure 1 (Microscopie à force atomique (AFM), l'étirement uniaxial, etc.) ont été développées et sont classiquement utilisées en mécanique cellulaire. Le choix de la technique de micromanipulation dépend de l'échelle de temps du processus étudié et de l'échelle des longueurs de l'échantillon étudié. Associés à ces techniques de micromanipulation, un grand nombre de modèles mécaniques ont été proposés pour décrire le comportement mécanique des cellules (Figure 1).

Le terme mécanobiologie, introduit pour la première fois dans la littérature scientifique en 1998, désigne un sous-domaine de la biologie situé à l'interface de la biologie, de la physique et des bio-ingénieries, qui s'attache à étudier de façon quantitative l'influence des propriétés biophysiques du microenvironnement sur la réponse biologique cellulaire [5].

Le présent projet s'inscrit dans cette démarche et consiste à caractériser par la biomécanique cellulaire et à

différentes échelles un modèle de rat modèle pour la Dystrophie Musculaire de Duchenne (DMD).

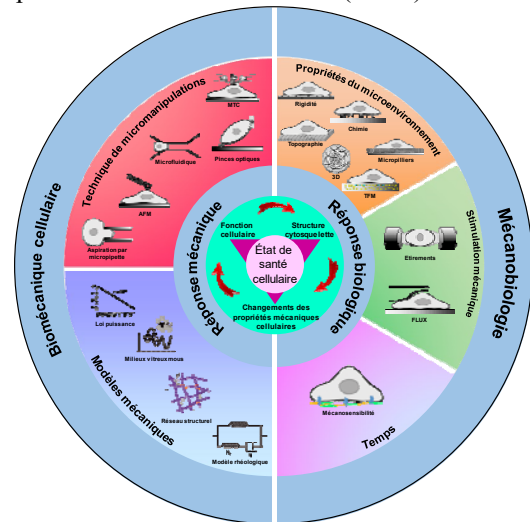


Figure 1 – Illustration de la définition de la biomécanique cellulaire (inspiré de [2]).

La DMD est une maladie génétique neuromusculaire grave, progressive et incurable qui touche environ 1/5000 garçon nouveau-nés. Les patients atteints de DMD présentent une perte progressive de leur masse musculaire et une atteinte cardio-respiratoires progressives conduisant à leur décès prématuré (entre 20 et 40 ans). Cette maladie est due à des mutations du plus grand gène du génome, DMD, qui est localisé sur le chromosome X et qui code pour la protéine DYSTROPHIN. Ces altérations génétiques, localisées principalement entre les exons 45 et 55, empêchent la production de la DYSTROPHIN fonctionnelle dans le muscle ce qui induit une dégénérescence progressive de l'ensemble des muscles de l'organisme remplacés progressivement par des tissus fibreux ou adipeux.

Pour développer des approches thérapeutiques de la DMD, l'équipe dirigée par F. Relaix (INSERM IMRB U955 UPEC) a généré un modèle de rat préclinique noté « R-DMDdel52 » qui porte une délétion au niveau de l'exon 52 conduisant à une absence totale d'expression de la dystrophine [7]. Ce modèle présente un ensemble de phénotypes sévère semblable à ceux observé chez les patients DMD.

Dans cette étude, nous proposons d'utiliser les propriétés mécaniques, notamment le module d'élasticité, comme biomarqueurs pour caractériser l'atteinte de la DMD.

Ainsi, nous proposons d'utiliser l'AFM, l'élastographie ultrasonore (UE) et la microscopie à fluorescence (FM) pour caractériser et comparer les propriétés mécaniques (AFM, UE), topographiques (AFM) et structurelles (FM) au niveau du myoblaste (cellule musculaire isolée), du myotube (fusion de plusieurs myoblastes), de la fibre musculaire en conditions *in vitro* et du muscle en

conditions *in vivo* à partir des modèles de rats de type sauvage (WT) et DMD.

2 Méthodes

Les cellules satellites, cellules souches du muscle qui après une lésion du muscle, s'activent soit pour suivre le programme d'auto-renouvellement et reformer le stock des cellules satellites soit pour s'engager dans le programme de différenciation myogénique et former de nouvelles myofibres, ont été extraites des muscles des pattes arrière de rats âgés de six mois (WT et DMD) et triées par cytométrie en flux. Les myoblastes qui dérivent de l'activation des cellules satellite du muscle et les myotubes (cellules musculaires différenciées et obtenues par fusion des myoblastes) ont été obtenus respectivement après 1 jour et 4 jours de culture. Les fibres musculaires ont été isolées mécaniquement du muscle lors de la dissection et placées dans du milieu de culture (DMEM).

Les mesures de spectroscopie AFM, courbes force-distance (Figure 2.A), ont été réalisées sur des myoblastes (n=3 rats), des myotubes (n=3 rats) et des fibres isolées (n=2 rats) avec respectivement 225, 504 et 4096 points de mesure par acquisition. Les modules d'élasticité ont été calculés à l'aide de la loi de Hertz donnée pour une sonde pyramidale régulière à 4 côtés (Figure 2.B et D) [8]. La topographie a été déterminée à partir des coordonnées des points de contact avec la sonde AFM (encadré sur la Figure 2.C) et la structure biologique a été caractérisée sur les myoblastes et les myotubes par FM.

Les mesures en UE ont été réalisées pour trois positions différentes de la patte arrière du rat sur une fenêtre d'acquisition de 12x6 cm.

3 Résultats

Les résultats en AFM montrent que les modules d'élasticité des myoblastes, des myotubes et des fibres isolées sont respectivement de $6.8 \text{ kPa} \pm 3,2 \text{ kPa}$, $12.5 \text{ kPa} \pm 5,1 \text{ kPa}$, $200 \text{ kPa} \pm 5 \text{ kPa}$ dans le cas des rats WT, soit significativement différents comparés au cas des rats DMD qui sont respectivement de $4.4 \text{ kPa} \pm 1,8 \text{ kPa}$, $6.4 \text{ kPa} \pm 4,2 \text{ kPa}$, $19 \text{ kPa} \pm 11 \text{ kPa}$. (Pour chacun des résultats $p < 0,05$). Au niveau du muscle entier, les résultats en UE montrent que le module d'élasticité moyen est plus élevé ($140 \text{ kPa} \pm 35 \text{ kPa}$) dans le cas du rat DMD que dans le cas du rat WT ($230 \text{ kPa} \pm 60 \text{ kPa}$).

4 Conclusions

La différence significative des valeurs des propriétés mécaniques au niveau des myoblastes, des myotubes, des fibres et des muscles entre le rat de type sauvage et DMD, montre que les altérations fonctionnelles du muscle dues à une mutation génétique (suppression de l'exon 52) et donc un défaut d'expression de DYSTOPHIN, sont présentes à toutes les échelles. Par ailleurs, cette étude

illustre bien que les propriétés mécaniques sont des biomarqueurs robustes pour caractériser l'état de santé des cellules et des tissus. Nos données indiquent que l'utilisation des paramètres biophysiques pourrait également être utile pour évaluer la restauration thérapeutique dans le cadre de la mise au point de thérapies innovantes au laboratoire.

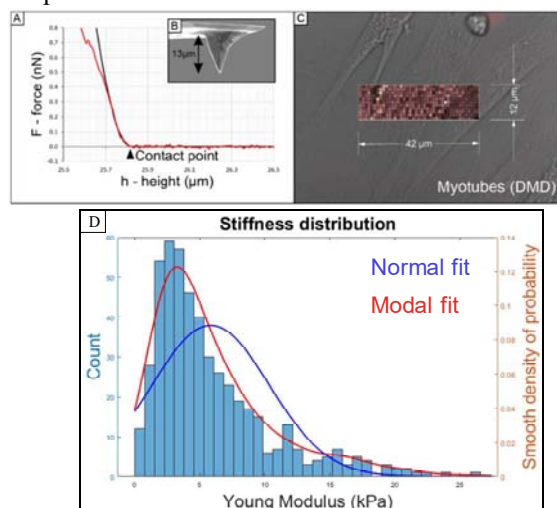


Figure 2 – (A) Exemple de courbe de force-distance AFM ; (B) Photographie d'une pointe AFM ; (C) Superposition de la topographie AFM avec une image d'un myotube (DMD) prise en microscopie à transmission ; (D) Distribution des modules d'élasticité évalué par AFM du même myotube montré en C.

5 Remerciements

Nous remercions l'Université Paris-Est Créteil pour le financement de l'AFM Brucker-JPK NanoWizard sence ainsi que la plateforme de microscopie de l'IMRB pour la mise à disposition de cet appareil.

Références

- [1] B. Ladoux et al., *Physically based principles of cell adhesion mechanosensitivity in tissues*, Rep Prog Phys. 2012, Nov;75(11):116601
- [2] D. Di Carlo, *A mechanical biomarker of cell state in medicine*, J Lab Autom 17(1), 2012, 32-42.
- [3] E. Moeendarbary, et al., *Medicine, Cell mechanics: principles, practices, and prospects*, Wiley Interdiscip Rev Syst Biol Med. 2014 Sep-Oct;6(5):371-88.
- [4] Y. Sun, et al., *Integrative Mechanobiology: Micro-and Nano-Techniques in Cell Mechanobiology*, Cambridge University Press 2015.
- [6] J.D. Humphrey, et al., *Mechanotransduction and extracellular matrix homeostasis*, Nat Rev Mol Cell Biol . 2014 Dec;15(12):802-12
- [7] Taglietti V., *Duchenne muscular dystrophy trajectory in R-DMDdel52 preclinical rat model identifies COMP as biomarker of fibrosis*, Acta Neuropathol Commun, 10, 2022, 60-79
- [8] Bilodeau G.G., *Regular Pyramid Punch Problem*, Journal of Applied Mechanics, 59, 1992, 519-523

Nanoparticules métalliques fonctionnalisées pour l'éradication de biofilm à la surface de condenseurs d'eau de rosée

Miryana Hemadi¹, Romain Briandet³, Christine Gravier-Pelletier⁴,
John Lomas¹, Laurent Royon²

Hemadi@u-paris.fr

Laurent.royon@u-paris.fr

¹ UFR de Chimie, Université Paris Cité
ITODYS, CNRS, UMR 7086

² IUT Paris Pajol, Université Paris Cité
LIED, UMR 8436

³INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay
Micalis Institute, Jouy-en-Josas, France

⁴UFR Biomédicale, Université Paris Cité,
LCBPT, CNRS, UMR 8601.

Thèmes – Chimie - Énergie - Matériaux - Physique

Résumé – Disposés à l'extérieur pour exploiter l'échange radiatif, les condenseurs d'eau de rosée sont sujets à une pollution de leur surface par le développement de biofilm bactérien. Une stratégie pour la prévention et le traitement de biofilms bactériens est proposé qui repose sur l'utilisation de nanoparticules magnétiques d'oxyde de fer (NPs) fonctionnalisés par des molécules actives. L'objectif étant d'élaborer un actionneur à base de nouveaux nanomatériaux multifonctionnels hybrides pour l'éradication des biofilms bactériens. Ces matériaux seront conçus pour avoir des propriétés physiques stimulables et activables à distance de par leurs propriétés magnétiques et optiques. Ils seront également élaborés de telle sorte que leurs propriétés chimiques et physico-chimiques leur confèrent une bonne stabilité et biocompatibilité. Grâce aux propriétés magnétiques des NPs, placés sous champ magnétique, le déplacement des NPs induit un cisaillement qui déstructure la matrice polymérique d'exopolysaccharides, composant principal des biofilms bactériens. Une dernière étape de traitement par photothermie qui permet d'induire un échauffement local important grâce à une irradiation laser qui interagira avec les NPs, provoquera une augmentation locale de la température pour libérer les molécules et tuera ainsi les bactéries les plus résistantes.

Mots-Clés – eau de rosée, nanoparticule, photothermie, biofilm.

1. Introduction

Dans le contexte du réchauffement climatique et de la diminution des ressources en eau douce, la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, très peu exploitée à ce jour, peut apporter des solutions avantageuses et durables. C'est d'autant plus vrai si l'on fait appel au refroidissement passif radiatif, qui est à l'origine de la formation naturelle d'eau de rosée. Une voie prometteuse pour améliorer les rendements des condenseurs est le développement de métamatériaux présentant des spécificités dans le refroidissement radiatif ($>60\text{W/m}^2$) et dans la collecte d'eau condensée grâce à des structurations à plusieurs échelles (micro et nano) comme l'illustre la figure 1.

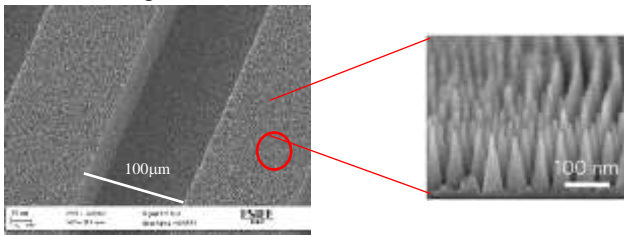


Figure 1 – Image d'une méta-surface présentant des canaux de largeur 100µm. Une nanostructuration en surface est présente sous forme d'aiguilles distantes 50nm

L'installation en extérieur de ces condenseurs est cependant sujette à divers problèmes de pollution. La présence de gouttes de rosée stagnante sur la surface du condenseur peut induire le développement de biofilms abritant des microorganismes pathogènes. Ces structures bactériennes s'avèrent fortement adhésives sur la surface du condenseur et leur présence devient alors une source de contamination de l'eau.

Pour nettoyer le condenseur de ce polluant, le recours aux antibiotiques ainsi qu'aux biocides s'avère très peu efficace en raison d'une sub-population de bactéries, capables de développer des défenses et de résister à de fortes concentrations d'antibiotiques [2].

Nous proposons de développer une autre méthode pour éradiquer ces biofilms, sans pour autant abimer la structure de la méta-surface. Elle repose sur l'utilisation de nanoparticules métalliques, qui misent en mouvement par un champ magnétique permet de déstructurer par cisaillement la matrice extra-cellulaire du biofilm. Après une brève présentation d'un biofilm, nous présenterons cet outil spécifique pouvant exacerber la destruction du biofilm.

2. Formation du biofilm bactérien

La formation du biofilm été largement étudiée. Elle s'effectue en cinq grandes étapes comme le présente la Figure 2.

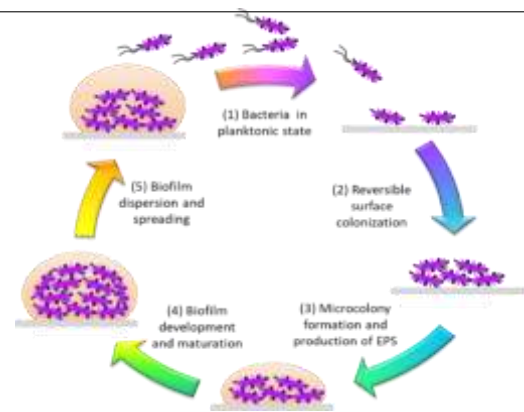


Figure 2 – représentation schématique de la formation d'un biofilm bactérien

De l'étape 1 à 2, les bactéries évoluent librement dans un milieu aqueux et se fixent sur la surface pour s'organiser en amas ; à l'étape 3, les bactéries s'ancrent de façon irréversible sur la surface par des appendices cellulaires et d'exopolysaccharides auto-produits ; le biofilm à l'étape 4 arrive à maturation ; à l'étape 5, correspondant à la fin de maturation, certaines de cellules retournent à l'état planctonique et peuvent créer plus loin un nouveau biofilm [3].

3. Nanoparticules métalliques fonctionnalisées

Des nanoparticules (NP) d'oxyde de fer de 15 nm de diamètre sont synthétisées au laboratoire selon le procédé polyol. Ces nanoparticules sont par la suite fonctionnalisées par 3-Aminopropyltriéthoxysilane (APTES) afin d'obtenir une fonction amine à leur surface. Des molécules actives contre la formation des biofilms bactériens sont alors greffés via une liaison peptidique sur les NP-APTES [4]. Ce couplage peptidique se fait entre les fonctions amines du NP-APTES et les groupements carboxyliques de la molécule active. Le nanomatériau hybride obtenu est caractérisé par différentes techniques (XPS, FTIR, DLS, ATG, etc.).

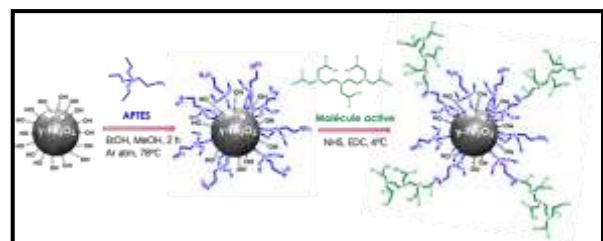


Figure 3 - Représentation schématique de l'élaboration du nanomatériau hybride

Les propriétés magnétiques (VSM) et optiques (photothermie : échauffement suite à une irradiation laser) de ce nanomatériau [5] sont également étudiées pour pouvoir l'utiliser dans l'application envisagée.

4. Stratégie d'éradication du biofilm bactérien

Le procédé consiste à déposer en surface du biofilm des gouttes de suspension de NP. La mise en action d'un champ magnétique sous le condenseur va développer une force magnétique provoquant le déplacement des NP au sein de la matrice polymérique. Le cisaillement induit par leur déplacement permet d'une part de briser le réseau polymérique tri-dimensionnel fragilisant ainsi la structure et d'autre part de libérer des produits toxiques sur les bactéries les plus ancrées sur la surface. La figure 4 illustre de façon schématique le procédé.

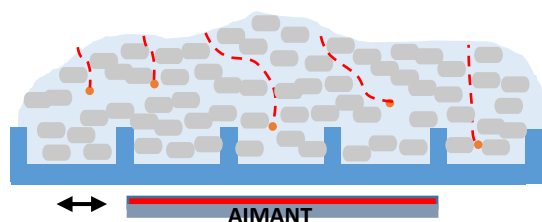


Figure 4 – déplacement des NP (point rouge) dans la matrice polymère du biofilm sous l'action d'un champ magnétique.

La dernière étape consiste à utiliser la technique de photothermie. Grâce à leurs propriétés optiques (absorbance des nanoparticules d'oxyde de fer dans le proche infrarouge notamment à 808 nm et 1064 nm), les nanoparticules métalliques peuvent absorber beaucoup d'énergie (à la longueur d'onde qui correspond à leur absorbance maximale) et la convertir en chaleur. Par conséquent, une fois les nanoparticules introduite en profondeur dans le biofilm, il suffit d'éclairer avec un laser ou une nappe laser (correspondant à leur maximum d'absorption) et un fort dégagement de chaleur sera alors créé. L'élévation en température entraînera la mort des bactéries [6]. Cette technique est déjà utilisée dans d'autres domaines d'application comme le traitement de cancer.

La figure 5 présente un exemple de résultats issus d'une expérience de photothermie obtenue sur un échantillon de 100µl de solution avec un faisceau laser respectivement de longueur d'onde égal à 690nm et 800nm et pour 3 valeurs de puissances (0,3W, 1W et 1,9W). Un échauffement plus important est observé avec la longueur d'onde 680nm à puissance équivalente.

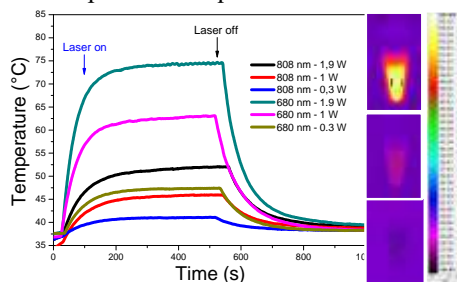


Figure 5 – Echauffement d'une suspension de NP sous illumination d'un laser à 680 nm et à 808 nm

Pour évaluer les effets de la méthode, étape par étape sur un échantillon de biofilm, la microscopie par fluorescence est utilisée. La figure 6 présente les images après l'étape de cisaillement (B) puis après l'impact du faisceau laser (C). La forte diminution de la fluorescence observée en fin de procédé montre que les bactéries ont été gravement endommagées, confirmant ainsi l'efficacité de la méthode.

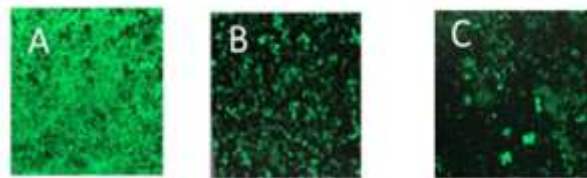


Figure 6 - image par microscopie en fluorescence sur un biofilm contenant les NP fonctionnalisés A) dans l'état initial, B) après cisaillement sous champs magnétique, C) après le traitement photothermique

5. Conclusions

Pour éliminer la formation de biofilm en surface de condenseur d'eau de rosée, une stratégie basée sur l'utilisation de nanoparticules métalliques fonctionnalisés est proposée. Les résultats encourageants ont permis de montrer la faisabilité de la méthode, que l'on doit confirmer sur des échelles plus grandes.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'AAP Emergence de l'Université Paris Cité pour le soutien financier.

Références

- [1] Daniel Beysens, Dew Water, River Publishers, 2018.
- [2] K. Lewis, Persisters cells and the riddle of biofilm survival. *Biochemistry (Mosc)*, **70**, 2005, p. 267-274,
- [3] C. Sahli, S. Moya, J.S. Lomas, C. Gravier-Pelletier, R. Briandet, M. Hémadi. *Theranostics*, **12**, 2022, p. 2383-2405.
- [4] J. Hai, H. Piraux, E. Mazario, J. Volatron, N.T. Ha-Duong, P. Decorse, J.S. Lomas, P. Verbeke, S. Ammar, C. Wilhelm, J.M. El Hage Chahine, M. Hémadi. *J Mater Chem B*, **5**: 2017, p 3154-3162
- [5] H. Belkahla, E. Mazarío, A. Plan Sangnier, J.S. Lomas, T. Gharbi, S. Ammar, O. Micheau, C. Wilhelm, M. Hémadi. *Theranostics*, **9**, 2019, p. 5924-5936
- [6] H. Belkahla, R. Boudjema, V. Caorsi, D. Pineau, A. Curcio, J.S. Lomas, P. Decorse, A. Chevillot-Biraud, T. Azais, C. Wilhelm, H. Randriamahazaka, M. Hémadi. *Nanoscale Advances*, **7**, 2019, p. 2571-2579.

Elaboration de films biosourcés à base de cellulose et de protéines extraites des plumes de canards.

Sandra Alvarez¹ Eduardo Robles²

Sandra.alvarez@univ-pau.fr eduardo.robles@univ-pau.fr

^{1,2} Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS,
Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux (IPREM-UMR 5254)

Thèmes – Chimie - Environnement - Matériaux

Résumé – *Ce travail consiste à consolider et à participer à l'économie circulaire locale de la région Nouvelle Aquitaine et plus précisément le département des Landes. Ce département est connu comme un des plus grands producteurs de canards en Europe. Cette production de canards induit indirectement la création de co-produits tels que les plumes, très peu valorisées et causant des problèmes environnementaux. Le but est alors de valoriser ces plumes en respectant au plus près l'environnement et en créant ainsi un nouveau matériau biosourcé à partir de ressources locales. Ce nouveau matériau est un film plastique biosourcé fabriqué à base de cellulose, molécule présente dans les végétaux, et de kératine, protéine présente dans les plumes. Différents mélanges sont effectués afin de procurer des propriétés diverses à ces films qui pourront être utilisés dans le secteur de l'emballage alimentaire. L'avantage de ces films, est que leur fabrication est non toxique et leur fin de vie biodégradable. L'utilisation de ces films pourra, dans le futur, palier à la surconsommation des plastiques actuels, issus de l'industrie pétrochimique et extrêmement polluants.*

Mots-Clés – Cellulose, kératine, films plastiques, biosourcé

1 Introduction

De nos jours les problèmes environnementaux ne peuvent plus être ignorés. La surproduction de déchets et la surconsommation de plastiques, issus de l'industrie pétrochimique, participent à une pollution de l'environnement et peuvent être également toxiques pour l'Homme. Depuis quelques années, le développement de matériaux biosourcés augmente visant à diminuer drastiquement l'utilisation des plastiques actuels. L'idée est de pouvoir créer des matériaux à l'aide de matières premières naturelles, renouvelables et non toxiques afin de diminuer l'impact environnemental que peut avoir la création d'un matériau.

La France, et particulièrement la région du sud-ouest, est connue pour sa forte production en canards gras. Cependant cette production destinée à l'alimentation produit de nombreux co-produits tels que : la peau, le sang, les viscères, les plumes etc. Le co-produit qui nous intéresse lors de ce sujet est la plume. En effet, les plumes sont encore aujourd'hui peu valorisées et provoquent des problèmes environnementaux et bactériens dus à leur entreposage ou incinération en déchetterie. Or, les plumes sont composées à 90% [1] d'une protéine appelée : kératine, aux propriétés intéressantes. Le but de ce travail est donc de valoriser ces plumes de canards de part l'extraction d'une protéine de celles-ci et la création d'un film plastique biosourcé à base de cette protéine permettant ainsi de valoriser un déchet local et de proposer une solution au problème de pollution des plastiques synthétiques.

2 Traitement des plumes de canards

2.1 Préparation des plumes

Les plumes de canards, visibles sur la figure 1, sont récupérées et nettoyées afin d'éliminer les bactéries qu'elles comportent. Le nettoyage s'effectue à l'aide d'un savon naturel et d'une étape de désinfection à l'éthanol. Par la suite, les plumes sont broyées en morceaux de quelques millimètres (~5mm) pour pouvoir être utilisées plus facilement et faciliter l'étape suivante d'extraction de protéines.



Figure 1 – Plumes de canards

2.2 Extraction de la kératine

Ce qui fait de la plume un matériau intéressant est sa composition majoritaire en kératine. La kératine est une protéine très résistante, hydrophobe et insoluble dans la majorité des solvants [2]. On la retrouve chez les Hommes et animaux notamment dans les ongles, la peau, les cheveux, les becs, les cornes etc. Sa structure chimique complexe et sa riche composition en soufre fait de la kératine une protéine difficile à dissoudre. La plupart des extractions de kératine se font à base de solvants chimiques très agressifs et toxiques comme des acides forts, des bases fortes ou des oxydants forts [3]. Lors de ce travail le but est de mettre au point un procédé d'extraction mettant en place des solvants « verts ». Un solvant vert est un solvant non toxique, biodégradable et à faible impact environnemental.

Le procédé d'extraction repose alors sur différentes étapes : la préparation des plumes avec broyage, puis la dissolution des plumes dans un solvant vert, la filtration de la solution obtenue afin d'éliminer les restes de plumes non dissoutes, puis la précipitation de la kératine (agrégation en fond de récipient de la kératine solide avec ajout d'acide), une deuxième filtration pour récupérer la kératine, puis une purification et enfin un séchage afin d'obtenir une poudre de kératine, visible dans la figure 2.

3 Formulations de films biosourcés

Le but d'un matériau biosourcé est d'être composé en grande majorité, voire en totalité, de produits naturels, non toxiques, biocompatibles et biodégradables afin d'avoir un impact le plus faible possible lors de sa conception, de son utilisation et de sa fin de vie. Ici, l'objectif est d'utiliser la kératine, matériau naturel et renouvelable. Or la fabrication de films exclusivement composés de kératine est peu envisageable aux vues de sa fragilité. Il est donc nécessaire de mélanger la kératine à une matrice plus flexible afin d'augmenter la résistance de la kératine. En ce sens, un matériau est connu pour l'utilisation de films à usage d'emballage alimentaire : la cellulose, représenté en Figure 2. La cellulose est une matière naturelle contenue dans les végétaux et connue de tous car utilisée dans la fabrication du papier et du carton. Le désavantage de ce matériau est sa faible résistance à l'eau, ce qui limite donc son utilisation.

C'est pourquoi, lors de ce travail différents mélanges de cellulose et kératine ont été effectués. Les pourcentages des deux composés ont été modifiés et l'ajout d'additif ou plastifiant a également été modifié et étudié. En plus des différents mélanges entre composés le processus de fabrication des films a également été étudié afin de connaître son influence sur les propriétés des films obtenus. Les différents processus de fabrication sont : une simple évaporation du solvant dans un récipient, un pressage à froid ou à chaud (en variant la pression, le

temps et la température de pressage).

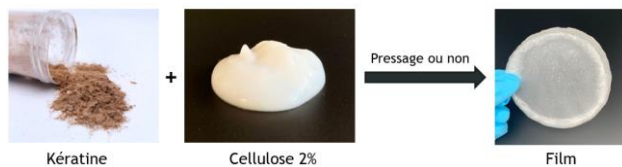


Figure 2 – Procédé de fabrication des films à base de kératine et cellulose.

4 Analyse des propriétés des films

Les différentes formulations de films et les différents procédés de fabrication sont comparés en fonction du visuel et de l'aspect du film mais surtout en fonction de ses diverses propriétés. Lorsqu'un film plastique a pour but d'être utilisé en emballage alimentaire certaines propriétés spécifiques sont alors visées comme : la résistance à l'humidité et à l'eau, la barrière grasseuse, la résistance aux champignons, la flexibilité et résistance mécanique du film etc.

Dans cette optique, plusieurs analyses seront effectuées prochainement sur les films obtenus lors d'un séjour international en Espagne dans un laboratoire spécialiste du papier et des emballages. Ces analyses seront effectuées avant la date de la conférence prévue et pourront être présentés.

Les analyses prévues sont : la résistance à l'humidité, la barrière grasseuse, la résistance aux champignons, la transparence, la flexibilité, la résistance à la traction et à la déchirure et enfin la recyclabilité/biodégradabilité.

Les résultats attendus sont une augmentation et amélioration des propriétés des films de cellulose de part l'ajout de la kératine et une modulation des propriétés en fonction des pourcentages d'ajout.

5 Conclusions

De part ce travail, la valorisation d'un déchet issu de l'industrie agroalimentaire locale est rendue possible. La plume de canard est une matière première très intéressante du point de vue chimique de par sa composition en kératine et sa grande résistance aux solvants. Cependant, l'extraction de kératine a pu être effectuée avec succès en récupérant de la kératine en poudre, après traitement, pouvant être incorporée dans des films à base de cellulose pour en améliorer les propriétés. Notamment du point de vue de la résistance à l'eau. Les résultats d'analyses des films étant en attente nous supposons une amélioration des propriétés des films en fonction de l'ajout de kératine. Nous supposons également une validation des films, à terme, pour un usage alimentaire.

6 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à la COST Action : CA19124 « Rethinking packaging for circular and sustainable food supply chains of the future » pour le financement d'une partie du stage international à venir[1] à Gérone, en Espagne, au Laboratoire LEPAMAP (Le Laboratoire Ingénierie du Papier et des Matériaux Polymères).

Références

- [1] N. Reddy and Y. Yang, "Structure and properties of chicken feather barbs as natural protein fibers," *J. Polym. Environ.*, 2007, doi: 10.1007/s10924-007-0054-7.
- [2] K. M. Arai, R. Takahashi, Y. Yokote, and K. Akahane, "The primary structure of feather keratins from duck (*Anas platyrhynchos*) and pigeon (*Columba livia*)," *Biochim. Biophys. Acta (BBA)/Protein Struct. Mol.*, 1986, doi: 10.1016/0167-4838(86)90182-2.
- [3] A. U. Muhammad A Khosa, "A Sustainable Role of Keratin Biopolymer in Green Chemistry: A Review," *Invit. Innov. J Food Process. Beverages*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2013.

Génération en temps-réel d'un rythme cardiaque biomimétique pour stimulation *in vitro*

Pierre-Marie Faure¹ Timothée Lévi¹ Agnès Tixier-Mita²

pierre-marie.faure@u-bordeaux.fr timothee.levi@u-bordeaux.fr agnes@u-tokyo.ac.jp

¹ IUT, Université de Bordeaux
Laboratoire IMS, UMR 5218

² IIS, The University of Tokyo

THÈMES – *Biologie - Santé - Électronique*

RÉSUMÉ – *Les maladies cardiovasculaires causent chaque année des millions de morts de par le monde. Celles-ci mettent en jeu des mécanismes complexes qui les rendent difficile à étudier. Pour pallier à cet inconvénient, l'association de simulations et de mise en culture biologique permettrait d'améliorer la connaissance de ces phénomènes en simplifiant grandement leur étude. Nous utilisons des circuits électroniques capables de simuler en temps-réel de manière la plus fidèle possible les fonctions biologiques mise en jeu. Des modèles cellulaires à forte cohérence biologique sont implémentées sur FPGA avant d'être interconnecté avec des cultures de cellules in vitro. Ici, le modèle cellulaire est celui de Maltsev-Lakatta qui décrit le comportement des cellules à l'origine du rythme cardiaque pour stimuler une culture de cardiomyocytes.*

MOTS-CLÉS – *FPGA, cardiomyocytes, rythme cardiaque, stimulation*

1 Introduction

Selon les données de l’OMS, en 2019, les maladies cardiovasculaires représentaient 32% de la mortalité mondiale. Elle prévoit que sa part augmente en raison des modes de vie ainsi que par les progrès scientifiques qui réduisent les autres causes de mortalité. Cependant, même si la connaissance sur les phénomènes biologiques responsables de ces maladies s’améliorent, il manque un système capable de reproduire de manière fidèle, les mécanismes impliqués dedans afin de comprendre les interactions mise en jeu. De plus, ce système constituerait un point de départ pour une future solution électroceutique à ces maladies [1]. Dans ce cadre, nous développons une plateforme capable d’atteindre de tels objectifs.

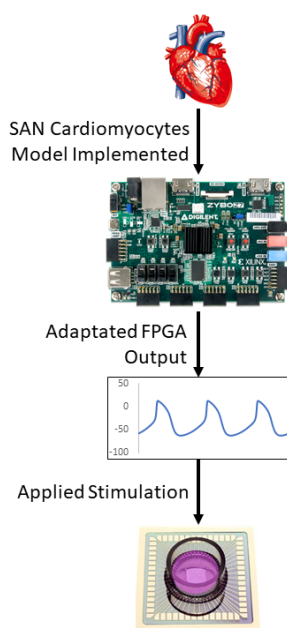


FIGURE 1 – Schéma de la plateforme

2 Origine du rythme cardiaque

De multiples types de cellules constituent le cœur afin de lui permettre d’assurer son but final : la distribution du sang dans l’ensemble du corps. Ainsi, deux catégories principales se dégagent : celle des cardiomyocytes cardionectrices qui génèrent et synchronise la transmission du signal électrique correspondant au rythme cardiaque et les cardiomyocytes contractiles qui transforment ce signal en mouvement mécanique.

Dans un cœur sain, le rythme cardiaque apparaît dans le nœud sinusal, un amas de cellules situé dans l’atrium droit du cœur. Ce nœud est relié aux systèmes nerveux sympathique et parasympathique qui respectivement accélère ou ralentisse le rythme cardiaque. Notre but est de simuler cet

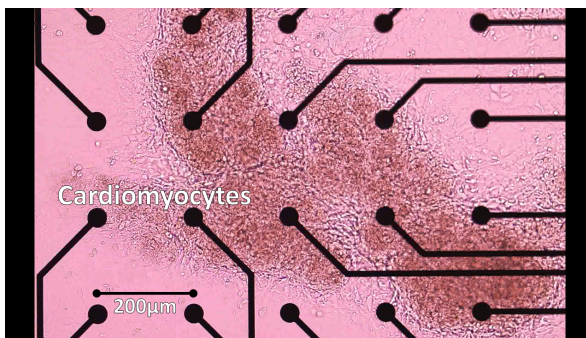


FIGURE 2 – Culture de cardiomyocytes sur MEA à travers un microscope optique

ensemble nœud sinusal et systèmes nerveux afin de contrôler le battement de cardiomyocyte contractiles cultivées *in vitro*.

3 Modélisation des cardiomyocytes

Dans notre système, nous simulons le comportement du nœud sinusal déconnecté du système nerveux en considérant qu’une cellule du nœud suffit à reproduire le signal généré par ce dernier. Nous utilisons pour cela, le modèle de Maltsev-Lakatta [2]. Celui-ci modélise le comportement d’un cardiomyocyte du cœur sinusal en gardant le point de vue de la génération du rythme cardiaque. De plus, il conserve le formalisme d’Hodgkin-Huxley pour décrire les courants ioniques de la cellule en lui ajoutant une description du comportement des ions calcium à l’intérieur de la cellule. Ces deux parties nommées respectivement horloge membranaire et horloge calcique assurent au modèle une plage de fréquence comprise entre 1Hz et 3,3Hz. Un coût de calcul élevé et la complexité à implémenter la partie horloge calcique dans le système calculatoire constituent les principaux inconvénients de ce modèle.

4 Implémentation matérielle

Notre plateforme visant un fonctionnement en temps-réel, nous écartons alors les solutions logicielles trop lentes, afin d’opter pour l’utilisation de circuits numériques reconfigurables (FPGA) qui combinent souplesse d’utilisation et puissance de calcul associées à une faible consommation énergétique[3]. Une implémentation parallèle de sur une carte FPGA de type Zybo-Z7 permet d’atteindre la modélisation de 1000 cardiomyocytes du nœud sinusal en temps-réel.

5 Stimulation *in vitro* des cardiomyocytes

La culture des cardiomyocytes de souris est réalisée sur une matrice de microélectrodes (MEA), afin de stimuler un

point local de la culture tout en l’observant au microscope. Une carte d’adaptation est utilisée pour transformer le signal de sortie numérique du FPGA en signal analogique applicable sur les MEAs ainsi que de contrôler son amplitude et son offset.

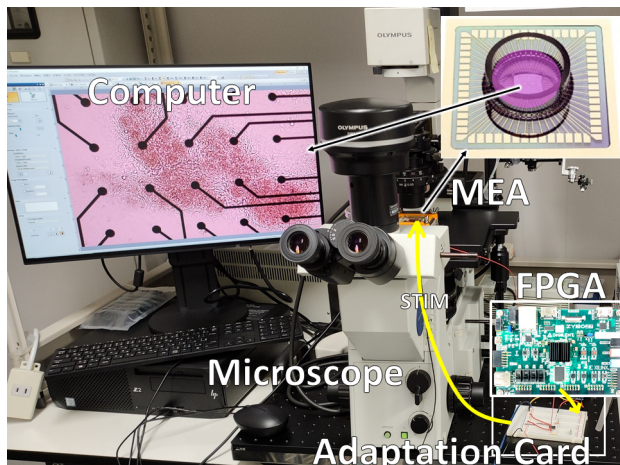


FIGURE 3 – Dispositif expérimental pour la stimulation des cardiomyocytes

Dans un premier temps, nous avons étudié la stimulation la plus appropriée pour générer un battement cardiaque sur les cardiomyocytes contractiles. Pour cela, nous avons testé plusieurs formes de signaux et fait varier leurs différents paramètres. Nous avons découvert que le critère principal pour l’activation du battement était la composante négative de la stimulation de l’ordre du volt. Ainsi, cette étude préliminaire confirme la possibilité d’utiliser directement le résultat du modèle implémenté précédemment pour stimuler une culture biologique. Enfin, pour s’assurer du fonctionnement du système complet, nous réalisons quatre cultures de cardiomyocytes sur MEAs. Ces cultures comprennent différents types de cellules cardiaques qui présentent une activité spontanée plus ou moins erratique. Ainsi, nous appliquons le signal généré par notre modèle sur chaque culture, à la fréquence nominative de l’article (3.1Hz). Une fois la stimulation arrêtée, les cardiomyocytes retrouvent leur rythme de battement spontanée chaotique. Nous avons synthétisé les effets de chaque stimulation dans le tableau 1, tandis que sur la figure 4, nous pouvons observer l’instant de chaque contraction, avant, pendant et après la stimulation.

6 Conclusion

Ainsi, au cours de cette article, nous avons décrit une plateforme matérielle capable de générer en temps-réel un signal biomimétique du rythme cardiaque afin de stimuler des cardiomyocytes cultivés *in vitro*. Cette plateforme se veut simple d’utilisation et la plus compacte possible

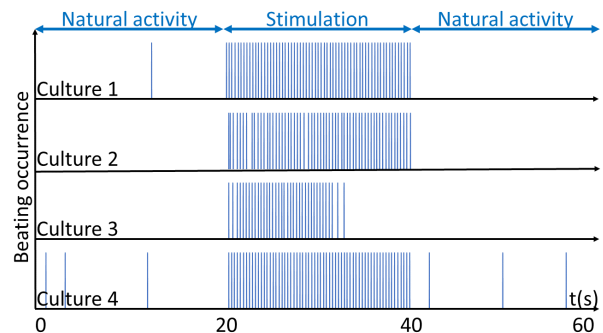


FIGURE 4 – Relevé des contractions de chaque culture, avant, pendant et après la stimulation biomimétique

TABLE 1 – Synthèse des contractions de chaque culture pendant la stimulation biomimétique pour une fréquence visée de 3.1Hz

	Fréquence (en Hz)	Erreur relative
Stimulation	3.1	-
Culture 1	3.15	1.61%
Culture 2	3.06	1.29%
Culture 3	3.01	2.90%
Culture 4	3.14	1.29%

tout en conservant les objectifs précédents. Lors de la prochaine incrémentation de son développement, nous visons à ajouter une commande sur la fréquence soit par l’utilisateur à l’aide d’une interface soit par un réseau de neurone simulant les systèmes nerveux sympathique et parasympathique.

Références

- [1] Famm, K., Litt, B., Tracey, K. J., Boyden, E. S., Slaoui, M. (2013). *A jump-start for electroceuticals*, Nature, 496(7444), 159-161.
- [2] Maltsev, V. A., Lakatta, E. G. (2009). *Synergism of coupled subsarcolemmal Ca²⁺ clocks and sarcolemmal voltage clocks confers robust and flexible pacemaker function in a novel pacemaker cell model*, American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 296(3), H594-H615.
- [3] Khoystatee, F., Grassia, F., Saïghi, S., Levi, T. (2019). *Optimized real-time biomimetic neural network on FPGA for bio-hybridization*, Frontiers in Neuroscience, 13, 377

Création d'une musique neuronale

Timothée Levi¹

Timothee.levi@u-bordeaux.fr

Romain Beaubois¹

romain.beaubois@u-bordeaux.fr

Melissa Hutsebaut¹

melissa.hutsebaut@etu.u-bordeaux.fr

David Molla¹

david.molla@etu.u-bordeaux.fr

Yoshiho Ikeuchi²

yikeuchi@iis.u-tokyo.ac.jp

Guilhem Larrieu³

glarrieu@laas.fr

¹ IUT, Université Bordeaux
Laboratoire IMS, UMR 5218

² IIS, Université de Tokyo

³ CNRS, Université de Toulouse
LAAS, UPR 8001

Thèmes – *Biologie - Santé - Électronique*

Résumé – *L'objectif est de créer une mélodie à partir de l'activité électrique de culture neuronale in vitro. Cette création musicale a un double objectif de performance artistique et usage de diagnostic. Les variations de la musique permettent aux chercheurs d'identifier les différences entre les activités des cultures neuronales et les activités des cultures affectées par des troubles neurologiques. À partir d'enregistrements d'activités neuronales réalisée à l'Université de Tokyo, les étudiants de l'IUT de Bordeaux ont classé et trié les différentes activités en groupes d'amplitudes associées aux notes de la gamme pentatonique mineure.*

Mots-Clés – *Activité neuronale, enregistrement, musique, art et science.*

1 Introduction

Ce travail est un projet collaboratif entre l'Université de Tokyo et l'IUT de Bordeaux. Des étudiants de l'IUT Bordeaux ont travaillé en collaboration avec des chercheurs de l'Université de Tokyo (Japon). Ce projet s'est déroulé sur six mois à partir d'octobre. Les étudiants ont eu la possibilité de poursuivre leur travail dans le cadre d'un stage de trois mois à l'Université de Tokyo à partir de début avril. L'encadrement était assuré par deux professeurs de l'IUT de Bordeaux conseillant les étudiants et jouant le rôle d'intermédiaire entre les deux pays. Le but de ce projet est la création d'une mélodie à partir de l'activité électrique d'une culture neuronale in vitro. Cette création musicale avait un double objectif de performance artistique et de diagnostics. Les variations de la musique pourraient aider les chercheurs à identifier les différences entre l'activité saine des cultures neuronales et l'activité des cultures affectées par des troubles neurologiques.

Les maladies et lésions du système nerveux affectent plus d'un milliard de personnes dans le monde. Ils constituent environ 6,3 % de la charge mondiale de morbidité, avec une tendance évidente à s'aggraver dans les prochaines années en raison du vieillissement de la population et, par conséquent, avec un impact énorme sur la société et l'économie. Pour vaincre les troubles neurologiques, des technologies innovantes sont développées. Parmi elles, la création de systèmes « biohybrides » basés sur l'interaction fonctionnelle entre des systèmes biologiques (par exemple neuronaux) et des dispositifs artificiels [1]. Le concept de technologie biohybride a été récemment exploité pour le développement des interfaces neurales, où le système nerveux humain des patients handicapés est capable de communiquer avec des dispositifs électroniques et/ou robotiques afin de restaurer les fonctions sensorielles, motrices et cognitives [2]. Ces systèmes biohybrides sont ici utilisés pour cette création de musique neuronale.

L'ensemble du système interfaçant les neurones biologiques avec les dispositifs électroniques ainsi que la méthodologie suivie pour créer la mélodie à partir des données acquises est présenté dans la section 2. Un processus basé sur l'amplitude pour la génération de mélodie est présenté comme exemple dans la section 3. La conclusion ainsi que les perspectives d'avenir sont soulignées dans la section 4.

2 Méthodologie

2.1 Description de l'ensemble du système

Les systèmes biohybrides sont caractérisés par des cultures in vitro de neurones généralement couplés à des réseaux de micro-électrodes et constituent un modèle expérimental simple mais puissant qui peut être

facilement contrôlé et enregistré. Ces systèmes sont décomposés en plusieurs blocs présentés sur la Figure 1. A partir d'un réseau de neurones biologiques (BNN) cultivé sur des électrodes, l'activité électrique est filtrée, amplifiée et convertie en données numériques lors de l'acquisition frontale. Ensuite, la détection de l'activité neuronale est calculée grâce à des algorithmes de traitement du signal. Dans certains systèmes biohybrides complexes, un dispositif en boucle fermée est utilisé. Pour fermer la boucle des enregistrements de données, un réseau de neurones artificiels (RNA) génère des stimulations adaptatives envoyées à la partie biologique [3].

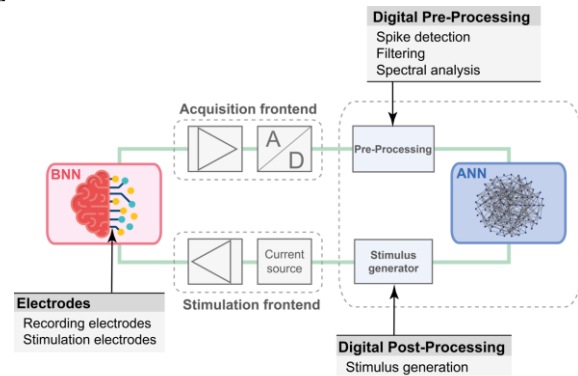


Figure 1 – Description d'un système biohybride

2.2 Culture et enregistrements de réseaux de neurones

La partie BNN est composée de cultures neuronales 3D appelées sphéroïdes. Ils sont créés à partir de cellules iPS humaines avec un récipient de culture peu adhésif qui se différencie en neurones cérébraux sur 25 jours [4]. Des Nano Electrode Array (NEA) sont utilisés pour enregistrer l'activité électrique. Ces nano-sondes à base de nanofils fournissent un rapport signal sur bruit élevé au niveau d'un seul neurone. Le réseau est composé de 64 nano-électrodes (Figure 2).

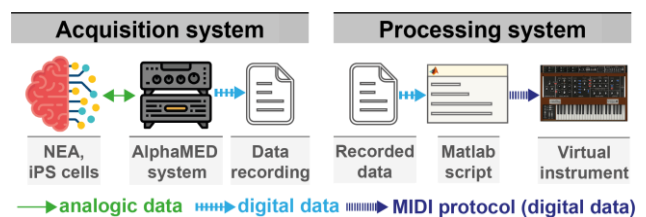


Figure 2 – Méthodologie de création de musique neuronale

Le frontal d'acquisition est assuré par un système AlphaMED effectuant le filtrage et la numérisation de l'activité électrique des électrodes. Des étudiants de l'Université de Bordeaux ont utilisé les données obtenues à partir de ce système. Les données de ce système sont stockées sous forme de fichiers binaires codant la valeur de toutes les électrodes à chaque étape d'échantillonnage.

2.3 Prétraitement

Les enregistrements au format de fichier binaire sont à lire sur Matlab pour ensuite extraire l'activité des pics à l'aide d'un script Matlab fourni par des chercheurs de l'Université de Tokyo. La mélodie est ensuite générée à partir de l'activité neuronale prétraitée.

3 Création des mélodies

3.1 Stratégies pour la création de mélodies

Les étudiants ont réfléchi à différentes stratégies pour créer la mélodie à partir de l'activité neuronale. Pour les stratégies générant la note (hauteur), deux catégories principales ont émergé : basée sur la fréquence ou basée sur l'amplitude. La première, plutôt logique puisque les neurones sont connus pour coder les informations en fréquence, reposait sur la fréquence d'activité pour chaque électrode. La deuxième, associait l'amplitude de l'activité à une note. La méthodologie par l'amplitude a été choisie afin de dissocier les activités par électrode et de faciliter l'implémentation en temps réel. Suivant les mêmes critères et comme point de départ, le rythme a été fixé comme constant.

La mélodie est alors créée à partir de l'amplitude de chaque potentiel d'action observée sur l'ensemble des 64 électrodes. Les amplitudes sont regroupées en 5 plages de valeurs associées aux notes de la gamme pentatonique mineure pour assurer un rendu non dissonant. Chaque pointe déclenche une note d'une durée de 250 millisecondes qui correspondrait à des noires à un tempo de 240 BPM.

Les notes traitées ont été envoyées à un instrument virtuel (synthétiseur) via un protocole MIDI encodé avec Matlab créant ainsi la musique.

3.2 Définition de l'amplitude de la gamme

La stratégie consistait à classer les activités de chaque électrode dans différents groupes d'amplitudes. Chaque groupe correspond à une note spécifique de la gamme pentatonique mineure.

Pour chaque électrode, et sur une durée de 45 secondes, une classification de l'activité est effectuée en fonction de son amplitude. En valeur absolue, les plages d'amplitudes de pointe (mV) suivantes ont été créées [0,0 ; 0,3] ; [0,3 ; 0,8] ; [0,8 ; 2,0] ; [2,0 ; 3,0] ; [3,0 ; 5,0]. Les notes sont ensuite encodées via le protocole MIDI.

3.3 Algorithme de génération de mélodie

Le protocole MIDI encodé par Matlab permet de générer un message pour communiquer avec un instrument virtuel (ici, un synthétiseur) avec les paramètres suivants :

- Activation ou désactivation de la note,
- Canal MIDI, canal sur lequel la note est jouée,

- Numéro de note, caractérisant la hauteur
- La vélocité, caractérisant l'intensité,
- Horodatage, caractérisant le rythme (démarrage et arrêt).

L'algorithme exécuté avec le script Matlab qui traite les données de la détection de l'activité neuronale au codage du protocole MIDI est illustré à la Figure 3.

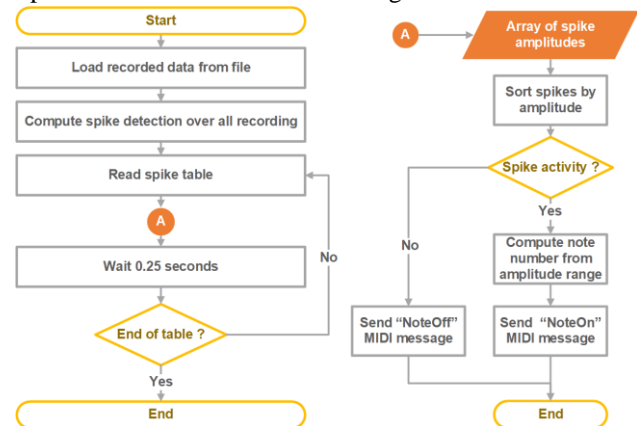


Figure 3 – Algorithme de traitement de l'activité neuronale

3.4 Exemple de mélodie

Une mélodie neuronale créée grâce à cette méthodologie a été téléchargée sur YouTube au lien suivant: https://www.youtube.com/watch?v=Z6dvLjr_C6I

4 Conclusions

Nous avons obtenu un enregistrement des activités neuronales et traité les données à l'aide du logiciel Matlab. Après avoir traité les activités, nous avons développé une stratégie pour créer une mélodie agréable jouée sur un synthétiseur utilisant le protocole MIDI.

La perspective d'avenir est de créer la mélodie en temps réel pour une application à usage de diagnostic. Le programme Matlab sera implémenté dans un système numérique comme un FPGA pour permettre la génération en temps réel de la musique. Un autre axe de développement consiste à ajouter la localisation spatiale des neurones en tant qu'entrées pour créer une mélodie répartie sur plusieurs octaves.

Références

- [1] Panuccio, G. et al., (2018). Progress in Neuroengineering for brain repair: New challenges and open issues. *Brain and neuroscience advances*, 2, 2398212818776475.
- [2] George, R. et al., (2020). Plasticity and adaptation in neuromorphic biohybrid systems. *Iscience*, 23(10), 101589
- [3] Buccelli, S. et al., (2019). A neuromorphic prosthesis to restore communication in neuronal networks. *IScience*, 19, 402-414
- [4] Kirihaara, T. et al., (2019). A human induced pluripotent stem cell-derived tissue model of a cerebral tract connecting two cortical regions. *Iscience*, 14, 301-311

Isolement de bactéries issues de l'épuration de l'eau
Sélection de souches productrices d'exopolymères valorisables dans l'industrie

Valérie Dossat-Létisse¹
valerie.letisse@iut-tlse3.fr

Julie Foulon¹
julie.foulon@iut-tlse3.fr

Elisabeth Neuhauser¹
elisabeth.neuhauser@iut-tlse3.fr

Claire-Emmanuelle Romain¹
claire-emmanuelle.romain@iut-tlse3.fr

¹ IUT Paul Sabatier, Université Toulouse 3
Laboratoire de Biotechnologies Alimentaires et environnementales (LBAE)
24 rue d'Embaquès
32000 AUCH

Thèmes – Biologie – Environnement

Résumé – *La gestion de la ressource en eau potable est un sujet d'actualité préoccupant. De nombreuses études portent sur l'utilisation raisonnée de cette ressource et en particulier sur le traitement des eaux usées et la potabilisation. Notre étude s'intègre dans cette problématique et s'intéresse notamment à la valorisation des sous-produits générés dans le domaine de l'épuration biologique des eaux usées. Les microorganismes vivants impliqués dans l'épuration dégradent la matière organique en formant des agrégats plus ou moins compacts, appelés boues activées, floccs ou granules. Il s'agit d'écosystèmes abritant des micro-organismes vivants enrobés dans une matrice constituée de molécules de type polymères pouvant posséder des propriétés de type gélifiant.*

Le travail de recherche présenté ici s'intéresse à un type d'agrégats issu de l'épuration : les granules. Les microorganismes provenant de cet agrégat sont capables d'adhérer sur des supports inertes (microplaques en polystyrène) en produisant des polymères. Un travail d'isolement est entrepris pour sélectionner, au sein de cette communauté microbienne extrêmement riche, une ou plusieurs souches présentant les meilleures capacités d'adhésion et produisant des polymères valorisables dans l'industrie.

Mots-Clés – *Granules aérobies, agrégats bactériens, exopolymères, adhésion*

1 Introduction

Le traitement des eaux usées est généralement réalisé par des procédés mettant en œuvre des agrégats microbiens communément appelés boues activées. Les procédés utilisant des réacteurs à biofilms granulaires, plus compacts et moins consommateurs en énergie, constituent la technologie d'avenir pour réaliser l'épuration des eaux résiduaires urbaines et des effluents industriels fortement chargés en matière organique (Pronk et al., 2015) [1]. Cette nouvelle technologie repose sur la mise en œuvre d'un réacteur biologique avec alimentation séquentielle (Sequencing Batch Reactor ou SBR) et une succession de cycles épuratoires comprenant différentes phases d'alimentation permettant la mise en place et la formation d'agrégats appelés granules.

Constitués de micro-organismes regroupés au sein d'une matrice complexe de polymères biologiques (protéines, polysaccharides) particulièrement cohésifs (Seviour et al., 2009) [2], ces granules présentent un vif intérêt pour une valorisation potentielle de la matière organique et des déchets. La caractérisation des polymères biologiques met en évidence leur potentialité et leur intérêt en tant que substituts aux polymères issus de la pétrochimie. En particulier, la valorisation des molécules ALE (Alginate-Like Exopolysaccharides), molécules aux propriétés gélifiantes similaires à celles de l'alginate, est l'une des voies ciblées dans le cadre de l'économie circulaire, encouragée par l'UE (van Leeuwen et al., 2018) [3].

Dans cette étude, des granules microbiens produits au laboratoire Toulouse Biotechnology Institute de l'INSA Toulouse (Durieux S., 2022) [4], ont fait l'objet d'une analyse approfondie. Un criblage des capacités d'adhésion sur des supports inertes a été réalisé (microplaques polystyrène). La biodiversité microbienne a ensuite été explorée afin d'isoler une ou plusieurs souches bactériennes productrices d'exopolymères d'intérêt industriel.

2 Test d'adhésion en microplaques 96 puits

Le granule G47 a été prélevé d'un procédé d'épuration de l'eau après 90 jours de fonctionnement. Des tests d'adhésion en microplaque ont été effectués et comparés selon trois conditions nutritives différentes.

Après une nuit d'incubation, la microplaque est vidée, rincée puis colorée au crystal violet. Les cellules adhérentes dans la microplaque se colorent en violet et on mesure ainsi l'intensité de l'adhésion proportionnelle à l'intensité de la coloration (figure 1) grâce à un spectrophotomètre.

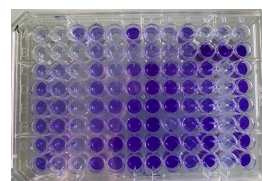


Fig 1 – Coloration de l'adhésion au Crystal violet

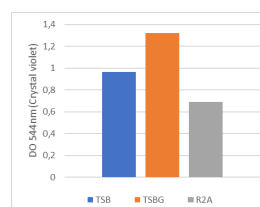


Fig 2 – Adhésion de G47

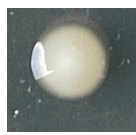

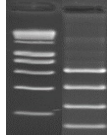
Pour chaque condition d'incubation testée correspondant à un mode d'alimentation de l'agrégat (TSB, TSBG, R2A), on mesure l'intensité de l'adhésion du granule G47. La figure 2 montre que quel que soit le mode d'alimentation, l'écosystème microbien G47 possède des capacités d'adhésion prometteuses.

3 Isolements

A partir de l'écosystème microbien G47, une série d'isolements est entreprise. L'objectif est de récupérer sous forme d'isolat pur, un maximum de souches bactériennes différentes afin de potentiellement en sélectionner une (ou plusieurs) qui sera(ont) valorisable(s) en tant qu'organismes producteurs de polymères d'intérêt.

Dans une première étape, une collection de 58 isolats a été confectionnée. Chaque isolat a été caractérisé d'un point de vue macro, microscopique et moléculaire (empreinte ADN_r16S digéré). (Tableau 1)

Tableau 1 – Caractérisation de l'isolat C4.21 isolé de G47.

Macroscopie	Microscopie	Empreinte moléculaire
		
Circulaire, convexe, bord régulier, opaque, blanchâtre, muqueuse	Coccobacilles Gram -	- Nombre de fragments : 4 - Taille : 650kb, 400kb, 300kb, 200kb

Après analyse des différents critères, un certain nombre de souches en doublons ont été éliminées et le nombre d'isolats a été restreint à 11.

4 Adhésion des isolats sélectionnés

Dans la perspective de sélectionner une ou plusieurs souches bactériennes surproductrices d'EPS d'intérêt, les capacités d'adhésion d'une part, et de production de polysaccharides extracellulaires d'autre part, ont été mesurées sur les 11 isolats.

4.1 Formation d'un biofilm

La capacité d'adhésion des 11 isolats ainsi que celle du consortium G47 et d'une souche pure témoin L17 isolée au LBAE en tant que productrice d'EPS, ont été testées en microplaques.

Après traitement au Crystal violet, l'intensité de l'adhésion a pu être quantifiée pour chaque échantillon (figure 3).

4.2 Production de polysaccharides

En parallèle, le dosage des polysaccharides extracellulaires a été réalisé pour chacun des 11 isolats, ainsi que pour G47 et L17. Cette analyse est une première étape de caractérisation de la nature des polymères produits par les isolats. Il est réalisé après rinçage de la microplaque et coloration au réactif de Schiff. Les résultats sont exprimés en μg d'équivalent dextrane/puits (gamme étalon en dextrane réalisée extemporanément).

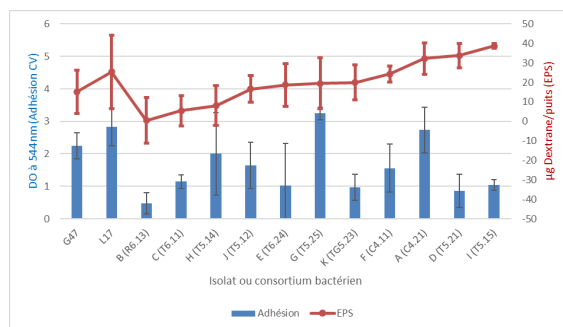


Figure 3 – Capacités d'adhésion (histogramme bleu) et de production d'exopolysaccharides (courbe rouge) des différents isolats, du G47 et du L17.

5 Discussion

La figure 3 montre que le G47 et les isolats C4.21(A) et T5.25(G) possèdent des capacités d'adhésion similaires à celles de la souche témoin L17. Par ailleurs, pour les 2 isolats pré-cités, la quantité d'exopolysaccharides (EPS) est de l'ordre de 30 et 20 μg d'eq dextrane/puits respectivement.

L'isolat T5.15(I) semble produire le plus d'EPS alors que ses capacités d'adhésion sont les plus faibles. De même, les isolats C4.11(F) et T5.21(D), peu adhérents, font partie des producteurs d'EPS les plus importants (> 25 μg d'eq dextrane/puits).

6 Conclusions et perspectives

A partir d'un écosystème microbien, appelé granule, provenant d'un procédé d'épuration de l'eau, une sélection de souches bactériennes surproductrices de polymères a été réalisée.

Dans une première étape, le travail d'isolement entrepris a permis de répertorier 58 souches bactériennes différentes, de les caractériser (examen microscopique, aspect macroscopique après croissance au laboratoire, tests biochimiques et moléculaires). Ce premier travail de caractérisation a permis de restreindre la collection de souches bactériennes de 58 à 11 isolats en éliminant les doublons. Les capacités d'adhésion et de production de polymères (EPS) ont été ensuite étudiées en microplaques. Deux isolats (nommés C4.21 et T5.25) se dégagent de l'étude en montrant des capacités d'adhésion associées à une production d'EPS équivalentes à celles d'une souche témoin du laboratoire. Trois autres isolats (T5.21, C4.11 et T5.15), même s'ils présentent une faible adhésion, produisent une quantité d'EPS notable.

Les 5 isolats pré-cités feront l'objet d'une étude plus ciblée afin, d'une part d'identifier précisément l'espèce bactérienne de chaque isolat et d'autre part, d'analyser la nature des polymères produits et de tester leurs propriétés gélifiantes en vue d'une application industrielle.

A plus long terme, la perspective de cette étude est de produire un polymère aux propriétés gélifiantes par voie biologique en recyclant la matière organique issue du traitement des eaux usées. Cet objectif a un intérêt double puisqu'il permet d'une part de recycler des déchets et d'autre part de produire des molécules biologiques se substituant à celles issues de la pétrochimie.

7 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à S. Durieux, PhD student au laboratoire TBI, INSA Toulouse qui a fourni le matériel biologique en réacteur SBR au cours de sa thèse ainsi que L. Molinier, F. Sarrazin, B. Lemelin et L.M. Lartigue, stagiaires de DUT ou BTS, pour leur soutien technique précieux.

Références

- [1] Pronk, M., Abbas, B., Al-zuhairy, S. H. K., Kraan, R., Kleerebezem, R., & van Loosdrecht, M. C. M. (2015). Effect and behaviour of different substrates in relation to the formation of aerobic granular sludge. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(12), 5257–5268. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6358-3>
- [2] Seviour, T., Pijuan, M., Nicholson, T., Keller, J., Yuan, Z. (2009). Understanding the properties of aerobic sludge granules as hydrogels. *Biotechnology Bioengineering*, 102, 1483-1493. <https://doi.org/10.1002/bit.22164>
- [3] Van Leeuwen, K., de Vries, E., Koop, S., Roest, K., (2018). The Energy & Raw Materials Factory : Role and Potential Contribution to the Circular Economy of the Netherlands. *Environmental Management* 61, 786–795. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-0995-8>
- [4] Durieux S. (2022). Contribution à l'étude de la granulation aérobie et à la production d'ALE : effets d'une charge organique élevée et de différents ratio DCO/N. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA Toulouse), Toulouse.

Effets de bactéries PGPR du genre *Pseudomonas* sur la tolérance au stress hydrique chez le peuplier dans un contexte de réchauffement climatique.

Adnane Hitmi¹ Valérie Polonais²

Adnane.hitmi@uca.fr; valerie.polonais@uca.fr

¹ IUT Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne
Unité Mixte de Recherche Physique et Physiologie
Intégratives de l'Arbre dans un Environnement Fluctuant, UMR INRAE 547

² IUT Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne
Laboratoire Micro-organismes : Génome et Environnement, UMR CNRS 6023

Thèmes – *Biologie - Environnement*

Résumé – *L'objectif de ce projet est de participer à la conception d'agrosystèmes innovants face aux défis du changement climatique. Ainsi, l'influence de bactéries PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) du genre *Pseudomonas*, sur les mécanismes de tolérance du peuplier au stress hydrique a été étudiée. Ce travail a permis (i) de caractériser les propriétés biochimiques des souches de *Pseudomonas* disponibles ; (ii) de mettre en place un protocole de contamination des plants de peupliers cultivés *in vitro* ; (iii) de suivre leur croissance et caractériser leur comportement biologique et physiologique en réponse à un stress hydrique. Parmi les souches testées, *Pseudomonas putida* tolère le mieux le stress hydrique et cette bactérie a un effet positif sur la capacité de tolérance du peuplier au stress hydrique. Sa présence permet également une meilleure reprise de croissance des plantes après réhydratation.*

Mots-Clés – *réchauffement climatique, PGPR, peuplier, conductance hydraulique*

1 Introduction

Dans un contexte de réchauffement climatique, un des grands défis pour l'Humanité est le développement d'une agriculture et d'une sylviculture durables. Une des voies de recherche susceptible d'apporter des solutions est de s'inspirer des interactions microorganismes du sol – végétaux pour concevoir et mettre en œuvre une agriculture productive et durable, plus économe en intrants et moins nocive pour l'environnement.

Les bactéries rhizosphériques, regroupées sous le terme "Plant Growth-Promoting Rhizobacteria" (PGPR), suscitent un intérêt croissant pour leurs rôles écosystémiques. Différentes formulations à base de bactéries PGPR sont de nos jours commercialisées. Ces bactéries présentent l'avantage d'avoir une faible spécificité pour leur hôte et sont capables de stimuler la croissance des plantes par divers mécanismes [1]. Ces interactions peuvent donc représenter un enjeu majeur pour maximiser les performances des productions agricoles et sylvicoles dans des conditions agronomiques de sécheresses modérées. L'objectif ici est de tester les effets de souches PGPR du genre *Pseudomonas* sur la croissance de plants de peupliers et de caractériser l'effet de la symbiose sur les mécanismes de tolérance au stress hydrique chez les plants de peuplier.

2. Matériel et Méthodes

2.1 Caractérisation des souches bactériennes étudiées

Cinq souches isolées de l'environnement (*Pseudomonas fluorescens* B2.6, *Pseudomonas putida* 25.1, *Pseudomonas reactans* 38 et *Pseudomonas fulgida* D6.2) ou de référence (*Pseudomonas fluorescens* ATCC) ont été testées. Chaque souche a été testée pour sa capacité à fixer ou à récupérer l'azote sur milieu NFC dépourvu d'azote selon le protocole de Liu et al. [2]. Leur capacité à solubiliser le phosphate inorganique a été déterminée en cultivant les différentes souches sur milieu NBRIP [3]. La capacité de production de la phytohormone acide indole 3-acétique (AIA) a été déterminée par la méthode de Etesami et al. [4]. La tolérance au stress hydrique a été évaluée en réalisant une cinétique des souches en milieu LB additionné de sorbitol (0,5, 1 ou 2 M).

2.2. Matériel végétal et stress hydrique

Des peupliers cultivés *in vitro* ont été immergés dans une suspension bactérienne de 10^8 UFC.ml⁻¹ pendant 3h avant d'être transférés en culture sous serre. Quatre conditions expérimentales ont été mises en place :

- Plants de peuplier associés à *Ps. fulgida*,
 - Plants de peuplier associés à *Ps. putida*,
 - Plants de peuplier non endophytés avec stress hydrique,
 - Plants de peuplier non endophytés sans stress hydrique.
- L'expérimentation est réalisée à des conditions environnementales optimales. Pendant 4 mois, l'irrigation des plantes maintient l'humidité du sol à 80% de sa capacité de rétention de l'eau. Les plantes subissent un

stress hydrique pendant 15 jours en réduisant l'apport en eau à 20 % de la capacité de rétention du sol. Les plantes sont ensuite réhydratées et maintenues en conditions optimales pendant 4 mois.

Préalablement à l'application du stress hydrique, des mesures de la vulnérabilité à la cavitation au niveau des vaisseaux du xylème des plantes ont été réalisées par la méthode de Cochard et al. [5]. A chacune des étapes de croissance des plants de peuplier, la croissance des plantes (biomasses sèches des tiges et des feuilles et surfaces foliaires totales), la photosynthèse nette (Pn) et l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) ont été mesurées à l'aide du LI-COR 6400XT (LI-COR Inc., USA).

3. Résultats

3.1. Caractérisation physiologiques et métaboliques de souches de *Pseudomonas*

Les souches de *Ps putida* et *Ps fulgida* ont été sélectionnées pour conduire les essais sur peupliers car (i) productrices d'AIA et (ii) ayant une tolérance au stress hydrique variant de 29 % à 59% pour *Ps putida* et *Ps fulgida* respectivement.

Tableau 1 - Caractéristiques des souches étudiées

Souche	Solubilisation Phosphate	Fixation Azote	Production AIA (µg/mL)*	Inhibition lors d'un stress hydrique
<i>Ps fluorescens</i> ATCC	Intermédiaire	+	33,07	67,9%
<i>Ps fluorescens</i>	Bas	-	31,99	58,2%
<i>Ps reactans</i>	Intermédiaire	+	35,33	59,2%
<i>Ps putida</i>	Bas	+	51,63	29,1%
<i>Ps fulgida</i>	Bas	+	83,75	59%

3.2. Effets sur la tolérance à la vulnérabilité à l'embolisme des vaisseaux

Le paramètre P50 traduit la tension au niveau des vaisseaux du xylème qui induit 50 % de cavitation et une réduction d'autant de la conductance de l'eau dans les plantes. Ce paramètre est utilisé comme indicateur de la capacité de distribution des espèces végétales vis à vis de la disponibilité en eau dans les milieux et de leurs capacités de tolérance aux sécheresses extrêmes. La figure 1 montre que les bactéries étudiées n'influencent pas les caractéristiques histologiques des vaisseaux du xylème du peuplier et donc leurs vulnérabilités à la cavitation.

Tableau 2 – Valeurs des tensions dans la tige de peupliers induisant 50 % de perte de conductivité de l'eau (n=3)

Conditions	P50 (-MPa)
Peuplier Control	1,84±0,13 ^a
Peuplier + <i>Ps putida</i>	1,83±0,13 ^a
Peuplier + <i>Ps fulgida</i>	1,75±0,14 ^a

3.3 Effets de PGPR sur la croissance et la tolérance au stress hydrique chez le peuplier

Dans notre étude, l'association des souches bactériennes *Ps putida* ou *Ps fulgida* aux systèmes racinaires du

peupliers n'induit pas d'effet positif significatif sur la croissance et le développement de la partie caulinare du peuplier (Fig. 2).

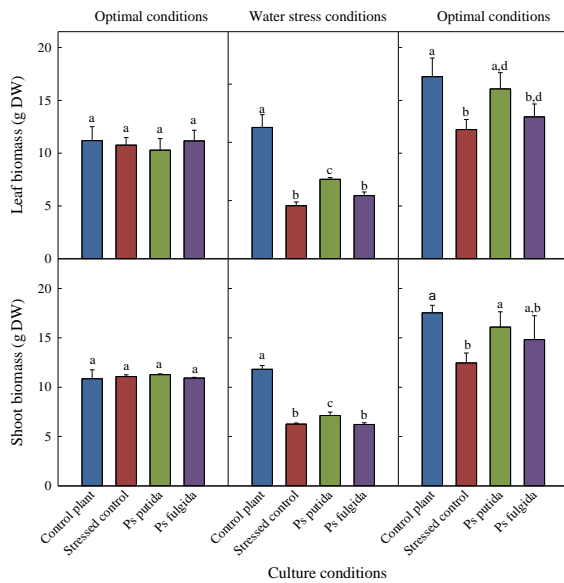


Figure 2 – Suivi de paramètres de croissance des peupliers (n=5).

L'un des principaux avantages de l'inoculation de *Ps putida* pour les plantes de peuplier dans des conditions de sécheresse et après réhydratation des plantes est le maintien de niveaux élevés de la photosynthèse nette et de l'efficacité d'utilisation de l'eau par rapport aux plantes non inoculées (Fig. 3). Ces effets ne sont pas corrélés avec la capacité de synthèse de l'AIA par les souches bactériennes.

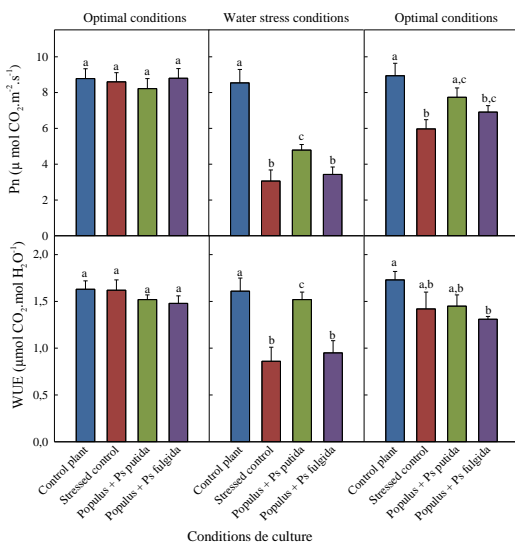


Figure 3 – Suivi de paramètres physiologiques des feuilles de peuplier à différentes étapes de l'expérimentation (n=6).

Ces actions ne sont pas corrélées à de meilleures performances des mécanismes de résistance à la

cavitation chez les plantes de peuplier. *P putida* à l'opposé de *Ps fulgida*, améliore l'activité photosynthétique en réduisant la baisse de la conductance stomatique et en protégeant les processus photochimiques des photosystèmes II (données non communiquées).

4. Conclusion

Parmi les souches étudiées, *Ps putida*, sans stimuler le développement du peuplier en conditions optimales, a un effet positif sur la capacité de tolérance du peuplier au stress hydrique. Sa présence permet également une meilleure reprise de croissance des plantes après leur réhydratation. Ces résultats en font un candidat potentiel pour une valorisation en tant que biostimulant dans une stratégie de mise en place d'une agriculture plus durable dans le but de maintenir les rendements de productions agricoles dans un contexte de réchauffement des climats.

Remerciements

Ce projet a bénéficié d'un financement de la Fédération pour la recherche en Environnement (FRE) de l'Université Clermont Auvergne.

Références

- [1] Della Mónica, I.F., Wong Villarreal, A., Stefanoni Rubio, P.J. et al. (2022) Exploring plant growth-promoting rhizobacteria as stress alleviators: a methodological insight. *Arch. Microbiol.* 204: 316. doi.org/10.1007/s00203-022-02909-7.
- [2] Liu, Y., Wang, R., Li, Y., Cao, Y., Chen, C., Qiu, C., et al. (2016). High-throughput sequencing-based analysis of the composition and diversity of endophytic bacterial community in seeds of "Beijing" hybrid maize planted in China. *Plant Growth Regul.* 81: 1–8. doi.org/10.1007/s10725-016-0208-5
- [3] Nautiyal C.S. (1999) An efficient microbiological growth medium for screening of phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiol. Lett.* 170: 265–270. doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x
- [4] Etesami H, Alikhani HA, Hosseini HM. (2015) Indole-3-acetic acid (IAA) production trait, a useful screening to select endophytic and rhizosphere competent bacteria for rice growth promoting agents. *MethodsX.* 20:72-78. doi: 10.1016/j.mex.2015.02.008.
- [5] Cochard H., Damour G., Bodet C., Tharwat I., Poirier M., Améglio T. (2005) Evaluation of a new centrifuge technique for rapid generation of xylem vulnerability curves. *Physiol. Plant.* 124: 410-418. doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00526.x.

Eradication du VIH : mythe ou réalité ?

Thomas Loustau¹, Clémentine Wallet¹, Christian Schwartz¹, Olivier Rohr¹

thomas.loustau@unistra.fr,
olivier.rohr@unistra.fr

clementine.wallet@unistra.fr,

christian.schwartz@unistra.fr,

¹ IUT Louis Pasteur, Université de Strasbourg
Dynamique des interactions hôte-pathogène (DHPI), EA 7292

Thèmes – Chimie - Biologie - Santé

Résumé –

La transmission d'un virus pathogène d'un animal à l'Homme entraîne l'émergence de maladies infectieuses régulièrement responsables de pandémies. Parmi ces virus, le VIH (Virus de l'immunodéficience humaine) continue, par l'absence de traitement curatif, de constituer une menace globale pour la santé humaine. Malgré l'efficacité des traitements antirétroviraux actuels pour inhiber la multiplication du VIH chez les patients infectés, leur arrêt s'accompagne d'un rebond de la virémie dû à l'incapacité de ces derniers à cibler les cellules latentes possédant le génome viral intégré sans le produire. Les réservoirs de cellules latentes se forment rapidement après la primo-infection et constituent un obstacle majeur à l'éradication virale. La recherche de nouveaux traitements antiviraux ciblant la latence cellulaire du VIH est donc primordiale. La stratégie la plus prometteuse pour supprimer les cellules latentes, dites « shock and kill », consiste à les réactiver pour qu'elles soient ensuite ciblées par les antirétroviraux ou le système immunitaire. Les agents de sortie de latence (LRA), décrits ici, représentent l'avenir de la thérapie anti-VIH.

Mots-Clés – Epidémiologie, virus VIH, traitements, latence virale.

1 Introduction

Le syndrome de l'immunodéficience acquise (SIDA), a été reconnu en tant que maladie émergente en 1981, à la suite d'une augmentation alarmante de cas mortels d'infections opportunistes et de tumeurs malignes rares chez une population saine de jeunes homosexuels. Si la première théorie faisait référence à un organisme sexuellement transmissible, le rétrovirus nommée virus de l'immunodéficience humaine de type 1 (VIH-1) sera dès 1983 identifié en tant qu'agent responsable de cette maladie infectieuse.

L'infection par le VIH demeure un problème de santé publique majeur causant la mort de 32,7 millions de personnes des suites de maladies liées au SIDA depuis le début de l'épidémie. En 2021, le monde comptait encore 38 millions de personnes vivant avec le VIH. Le nombre de nouvelles infections l'année dernière est évalué à 1,5 millions contre 2,8 millions en 1998 et le nombre de morts liés à cette infection est égal à 650 000 personnes, soit un mort par minute (ONUSIDA, 2021). Ces chiffres cachent néanmoins de fortes disparités régionales, avec plus de deux tiers des personnes séropositives vivant en Afrique subsaharienne.

2 Traitements d'aujourd'hui et enjeux de demain

Sans traitement, l'infection par le VIH entraîne une immunodépression, par déplétion quantitative et qualitative des cellules immunitaires lymphocytes T CD4+, principales cibles du virus. En l'absence de traitement, la réplication permanente du traitement et cette immunodépression évolue vers le stade SIDA avec l'apparition de maladies opportunistes et inflammatoires conduisant au décès. Le pronostic de l'infection à VIH a été modifié avec la découverte des thérapies antirétrovirales combinées. Les molécules antirétrovirales sont en général associées en trithérapies incluant des familles à actions pharmacologiques différentes. Ces trithérapies ciblent différentes étapes du cycle de multiplication du virus, permettant de réduire sa réplication. La prise continue de ces traitements permet d'abaisser la charge virale circulante en-dessous du seuil de détection et de restaurer l'immunité. Depuis l'arrivée des antirétroviraux dans les années 90, l'optimisation des molécules a permis d'augmenter l'efficacité de ces derniers (Fig. 1; Lee, Amin, and Carr 2014).

Malgré les avancées, la prise en charge de l'infection doit faire face à plusieurs enjeux. L'efficacité des thérapies antirétrovirales est conditionnée par une prise quotidienne stricte et une mauvaise observance de la part des personnes sous traitement peut entraîner l'inefficacité de ce dernier ainsi que favoriser la sélection de variants

viraux résistants.

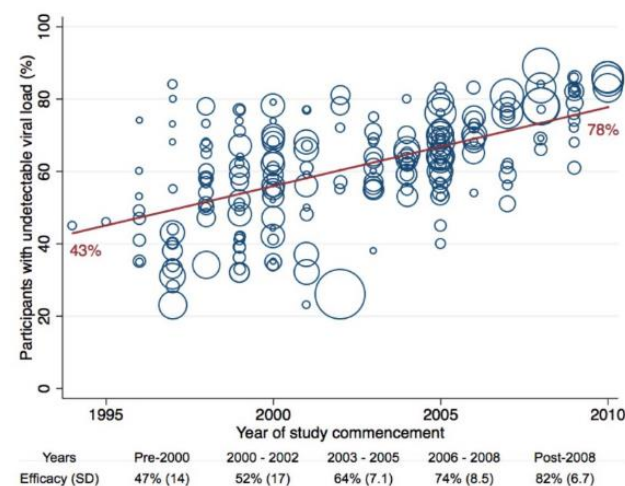


Figure 1 – Efficacité des traitements antirétroviraux selon l'année de début de l'étude. Graphique à bulles affichant la variation de l'efficacité antivirale. Chaque bulle représente un groupe de traitement individuel, proportionnellement à sa taille.

Sur le plan médico-économique, la prise en charge thérapeutique et le suivi clinique de l'infection à VIH ont également un coût important en termes de santé publique et engendre de fortes disparités avec seulement 70% des personnes atteintes du VIH ayant aujourd'hui accès aux thérapies antirétrovirales.

Mises ensemble, ces limitations sont autant d'arguments aux efforts de recherche fournis pour la mise au point de stratégies curatives de l'infection à VIH permettant l'éradication du virus de l'organisme. Cette éradication est avortée en raison de la forte capacité du VIH à intégrer rapidement le génome des cellules de son hôte et d'y persister à long terme sous forme latente. L'ensemble des cellules ayant intégrées le virus à l'état latent est qualifié de réservoir viral. La caractérisation et l'étude de stratégies permettant l'élimination du réservoir viral sont donc primordiales et constituent le dernier palier thérapeutique conduisant à l'éradication du VIH.

3 Cibler l'élimination des réservoirs latents

Actuellement, deux stratégies sont à l'étude : la 1^{ère} vise une guérison stérilisante, cherchant à éliminer toutes traces de virus, et la 2^{ème} consiste en une guérison fonctionnelle par réduction de la taille des réservoirs, afin d'atteindre un contrôle à long terme de la réplication virale. La guérison stérilisante a pour objectif de reproduire les fameux cas des patients de Berlin et de Londres, seules personnes guéries du VIH-1. Ils avaient reçu une greffe de cellules souches hématopoïétiques ne possédant pas le récepteur CCR5 à leurs surfaces, récepteur permettant normalement au VIH de rentrer dans les cellules. Mais ce type de greffe est associé à un risque

élevé de mortalité et ne garantit pas l'éradication du virus. Compte tenu de la difficulté de réaliser une guérison stérilisante, la guérison fonctionnelle des patients est devenue une priorité de la recherche mondiale.

Deux approches de guérison fonctionnelle sont envisagées et sont focalisées sur le contrôle des réservoirs latents du VIH. L'approche nommée « shock and kill » visant à réactiver le virus puis à éliminer les cellules infectées et l'approche « block and lock » consistant à rendre le VIH-1 silencieux de façon permanente. La stratégie du « block and lock » est basée sur l'utilisation d'agents favorisant la latence (Latency promoting agent : LPA) et capable de supprimer les niveaux résiduels de transcription virale dans les cellules infectées latentes (Darcis et al. 2015). Ils comprennent des inhibiteurs de la voie NF- κ B, de l'ARN polymérase et de l'axe transcriptionnel Tat-LTR.

La stratégie du « shock and kill » est basée sur l'utilisation d'agents surpresseurs de la latence (Latency reversing agent : LRA) pour réactiver la transcription et la réplication du VIH dans les cellules réservoirs afin de les rendre visibles aux cellules immunitaires cytotoxiques. Les LRAs diffèrent par leur mode d'action et leur cibles (Darcis et al. 2015). Ils peuvent cibler (1) la libération des facteurs de l'initiation et de l'élongation de la transcription virale (NF- κ B, P-TEFb), (2) la modulation épigénétique du promoteur viral pour favoriser la transcription (inhibiteur de HDAC) et (3) l'élimination immunitaire des cellules réactivées (Perreau et al., 2017). Une efficacité sur la réactivation virale *ex vivo* et parfois *in vivo* a été montrée, cependant aucun LRA n'avait d'action sur la diminution des réservoirs viraux et certains LRAs présentent une toxicité cellulaire (Ait-Ammar et al. 2020). Ces données ont poussé les chercheurs à admettre que des combinaisons de deux agents ou plus avec des mécanismes d'actions différents sont nécessaires, tout comme la découverte d'autres cibles pour les LRAs. Dans cette perspective, les travaux de notre laboratoire se sont portés sur le facteur de transcription CTIP2, fortement exprimé dans le réservoir anatomique du système nerveux central représenté par les macrophages résidents.

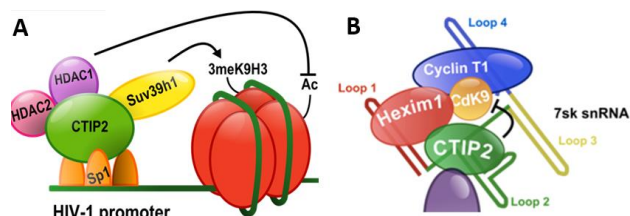


Figure 2 – Influence du facteur CTIP2 dans l'établissement (A) et la persistance (B) de la latence virale.

CTIP2 joue un rôle central dans l'établissement et la persistance de la latence, en servant de plateforme

d'ancrage à de multiples complexes protéiques induisant la méthylation des histones et la formation d'hétérochromatine au niveau du promoteur viral (Fig. 2A) ou l'inactivation du complexe de transcription P-TEFb (Fig. 2B) (Marban et al. 2007 ; Cherrier et al. 2013). Plus récemment, nous avons mis en évidence le rôle de CTIP2 dans l'inhibition de la réponse inflammatoire antivirale médiée par la sécrétion de cytokines de type interféron. L'identification des mécanismes régulant l'expression de CTIP2 et de l'ensemble de ses partenaires d'interactions dans les cellules du système nerveux central, contribuerait sans doute à la mise en place de nouvelles stratégies thérapeutiques aussi bien dans le « shock and kill » que dans le « block and lock ».

4 Conclusions

La thérapie antirétrovirale a considérablement amélioré la prise en charge de l'infection par le VIH-1, ainsi que la survie des patients. Malgré cela, l'arrêt de la thérapie conduit à un rebond qui se produit à partir de réservoirs cellulaires de virus latents. Ces réservoirs persistent sur de longue durée et ne peuvent être ciblés par les thérapies actuelles. La transcription du VIH-1 est rendue silencieuse par des modifications épigénétiques, restant un obstacle majeur à l'éradication et la guérison des patients. La compréhension des mécanismes moléculaires impliqués dans l'établissement et le maintien de la latence du VIH-1 et les progrès significatifs réalisés dans le développement des agents d'inversion de la latence, laissent entrevoir un espoir grandissant de réussir à vaincre le virus dans la prochaine décennie.

Références

- [1] Ait-Ammar, Amina, Anna Kula, Gilles Darcis, Roxane Verdikt, Olivier Rohr, and Carine Van Lint. 2020. 'Current Status of Latency Reversing Agents Facing the Heterogeneity of HIV-1 Cellular and Tissue Reservoirs'. *Frontiers in Microbiology*.
- [2] Cherrier, Thomas, Valentin Le Douce, Sebastian Eilebrecht, Raphael Riclet, Céline Marban, Franck Dequiedt, Yannick Goumon, et al. 2013. 'CTIP2 Is a Negative Regulator of P-TEFb'. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*
- [3] Darcis, G., and Van Lint, C. 2017. HIV Latency: Should We Shock or Lock? *Trends Immunol.*
- [4] Lee, Frederick J., Janaki Amin, and Andrew Carr. 2014. 'Efficacy of Initial Antiretroviral Therapy for HIV-1 Infection in Adults:'. *PLOS ONE*
- [5] Marban, Céline, Stella Suzanne, Franck Dequiedt, Carine Van Lint, Dominique Aunis, and Olivier Rohr. 2007. 'Recruitment of Chromatin-Modifying Enzymes by CTIP2 Promotes HIV-1 Transcriptional Silencing'.
- [6] Perreau, Matthieu, Riddhima Banga, and Giuseppe Pantaleo. 2017. 'Targeted Immune Interventions for an HIV-1 Cure'. *Trends in Molecular Medicine*

La mémoire de l'eau usée, ou l'importance d'une aquathèque dans le suivi épidémique via les eaux usées.

Clémentine Wallet¹ Ghina El Soufi¹ Jeanne Van Assche¹ Thomas Loustau¹
Christian Schwartz¹ Maud Villain-Gambier² Dominique Trebouet² Olivier Rohr¹
Clementine.wallet@unistra.fr ghina.elsoufi@unistra.fr thomas.loustau@unistra.fr
schwartz.christian@unistra.fr maud.villain@unistra.fr dominique.trebouet@unistra.fr
olivier.rohr@unistra.fr

¹ IUT Louis Pasteur, Université de Strasbourg
Laboratoire Dynamique des Interactions Hôte/pathogène, UR7292

² IUT Louis Pasteur, Université de Strasbourg
Laboratoire RePSeM, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, UMR 7178

Thèmes – *Biologie - Santé* -

Résumé – *Les eaux usées domestiques récoltées en station d'épuration contiennent les selles et urines d'une population donnée et sont donc un précieux indicateur de la santé humaine. Pendant la crise du Covid19, le réseau national Obépine, que nous avons rejoint en 2020, a organisé le suivi de la quantification de Sars-Cov2 dans les eaux usées de près de 200 localités françaises. La pertinence de ce mode de suivi épidémiologique a conduit à la création d'une plateforme « eaux usées » sous la forme d'un consortium de laboratoires de recherches mais aussi de différents acteurs de la filière eaux usées. Cette plateforme a pour objectif de pouvoir réagir rapidement en cas de nouvelle émergence virale. Elle se construit autour de zones ateliers, adossées à un ou plusieurs laboratoires de recherche pour répondre à différentes problématiques. C'est aussi l'occasion de construire une aquathèque, répertoriant une collection nationale d'échantillons d'eaux usées, dans l'optique d'études rétrospectives sur les émergences, mais dont le but sera aussi de conserver un historique de l'état de santé d'une population donnée. La richesse de cette aquathèque donnera ainsi accès à une mine d'informations scientifiques qui permettront probablement de nombreuses études futures.*

Mots-Clés – *Eaux usées, épidémiologie, virus, aquathèque.*

1 Introduction : A la recherche de virus dans les eaux usées

Les eaux usées domestiques collectées dans les stations d'épurations contiennent l'ensemble des selles et des urines d'une population donnée. Ces effluents présentent des marqueurs biologiques et chimiques constituant une source d'informations précieuses quant à la santé de cette population. De fait, l'épidémiologie basée sur les eaux usées (Wastewater Based Epidemiology) est une approche importante pour étudier différentes thématiques sanitaires comme l'antibiorésistance, la consommation de drogues ou de médicaments, et enfin, les infections virales et bactériennes. Dans le cadre du suivi épidémiologique viral, cette approche permet de suivre l'intégralité d'une population sans dépendre des tests de dépistage individuels. Ces tests sont en effet sous-représentatifs, du fait de la présence de patients asymptomatiques et de patients ne se faisant pas tester. La crise du COVID19 a permis de constituer une preuve de concept de l'intérêt du suivi de la quantité de virus dans les eaux usées en tant qu'indicateur épidémiologique. En effet le virus du Sars-Cov2 est répliqué en grandes quantités dans les intestins, et se retrouve dans les selles humaines [1]. Dès le mois de mars 2020 une étude néerlandaise a montré que le virus du Sars-Cov2 était détectable dans les eaux usées d'un aéroport [2]. Ce principe d'étude avait déjà été mis en place pour d'autres virus comme les norovirus, ou le polyovirus [3]. En 2020 notre laboratoire a mis en place un protocole de quantification du Sars-Cov2 dans les eaux usées. Ce protocole repose sur la quantification de génome viral par RT-qPCR. Nous avons ainsi intégré le réseau Obépine qui a assuré le suivi hebdomadaire du Sars-Cov2 en France de septembre 2020 à avril 2022 [4]. Le suivi est encore assuré sur quelques stations, notamment les stations Alsaciennes que nous quantifions au laboratoire. L'indicateur eau usée a été élaboré à l'aide d'un modèle mathématique permettant de corriger la quantité de virus mesurée à la pluviométrie, ainsi qu'à différents indicateurs de la proportion de fèces dans les eaux usées. Ces données montrent ainsi l'apparition de pic de virus dans les eaux usées 15 jours avant le pic d'hospitalisation (Figure1).

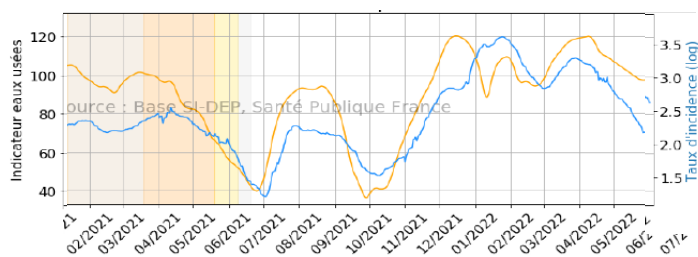


Figure 1 – Indicateur de présence de Sars-Cov2 dans les eaux usées de Weyersheim (département 67) (en orange) et taux d'incidence dans le département 67 (en bleu) au cours du temps.

Des enquêtes flash ainsi que des recherches rétrospectives ont également montré que la détection précoce de variants est possible dans les eaux usées par PCR ou par séquençage [5], [6]. L'épidémie de COVID19 a mis en lumière la pertinence et l'importance de l'analyse des eaux usées en épidémiologie dans le cas de nouveaux virus infectant l'homme. Mais cela montre aussi la pertinence de cette approche pour le suivi de l'émergence saisonnière d'autres virus bien connus (grippe, dengue, norovirus, virus de l'hépatite E, VIH, etc.). De fait, le suivi épidémiologique dans les eaux usées doit être structuré et organisé à l'échelle du territoire afin de répondre rapidement à des problématiques de santé publique. Une recommandation européenne en ce sens a d'ailleurs été publiée dans le journal officiel de l'Union Européenne [7]. C'est pourquoi un projet de plateforme française « eaux usées » est en train de voir le jour.

2 La mise en place de zones ateliers pour l'étude virologique des eaux usées

L'objectif de la plateforme nationale « eaux usées » est de pouvoir mettre en place très rapidement un suivi en cas de nouvelle émergence sur le territoire français métropolitain mais aussi en Outre-mer. Cette plateforme eaux usées permettra de réunir plusieurs laboratoires spécialisés dans la virologie des eaux usées, des spécialistes du séquençage, mais aussi les différents acteurs de la filière eau usée afin de pouvoir mobiliser rapidement le réseau. Dans ce cadre, des zones ateliers réparties sur le territoire, chacune adossée à un ou plusieurs laboratoires de recherche sont essentielles pour acquérir de nouvelles connaissances ou améliorer des protocoles. De plus, la diversité de la localisation mais aussi du type d'effluents étudiés dans les zones ateliers permettront d'apporter une richesse supplémentaire dans l'étude des mécanismes d'émergence virale. Les zones ateliers permettront ainsi de mettre rapidement au point les protocoles d'analyses, et de normalisation pour chaque pathogène ou famille de pathogènes.

Notre laboratoire de recherche est idéalement situé dans l'IUT Louis Pasteur, et voisin du Syndicat Des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle (SDEA) responsable des stations d'épurations alsacienne que nous suivons. Cette position stratégique apporte un avantage pour la constitution d'une zone atelier Grand-Est. En plus de notre laboratoire, celle-ci se compose de du Laboratoire de Chimie Physique et Microbiologie pour les Matériaux et l'Environnement (LCPME) situé à Nancy, et spécialiste de la virologie dans les eaux usées. Nous travaillerons avec différentes structures dans l'optique d'acquérir des échantillons informatifs. Des collecteurs vont être ajoutés à la sortie de l'hôpital de Strasbourg. Les eaux usées provenant principalement des effluents des malades ne seront pas diluées avec des effluents industriels ou

agricoles. La relation entre le nombre de malade et la quantité de virus retrouvée dans les eaux sera donc plus directe et permettra d'apporter des informations supplémentaires sur la normalisation à effectuer pour mettre en relation la quantité de virus trouvée dans les eaux usées et le nombre de malades. Cette normalisation dépend sans doute de chaque virus, et la présence constante de collecteur permettra de donner rapidement des informations en cas de nouvelle infection. Un autre collecteur sera installé à la sortie de l'IUT Louis Pasteur. Comme nous relevons la présence de nos étudiants chaque jour, nous aurons des informations plus précises pour la normalisation, et nous pourrons effectuer un suivi constant de l'émergence. Enfin, la présence d'un collecteur à la sortie d'un abattoir à Nancy permettra de suivre l'émergence virale chez les animaux et pouvoir mesurer sa relation avec l'émergence chez l'homme.

La constitution des zones ateliers permettra de prélever des échantillons précieux sur toute la France afin de constituer une collection sous forme d'une aquathèque nationale « eaux usées » (Figure 2).

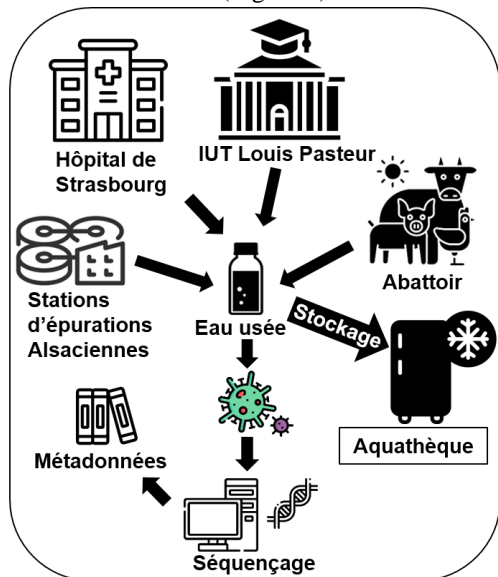


Figure 2 – Organisation d'une zone atelier et de l'aquathèque

3 Garder une mémoire des eaux usées : la construction d'une aquathèque nationale

La constitution d'une collection d'échantillons d'eaux usées sous forme d'aquathèques est indissociable des zones ateliers. Ces banques n'existent pas à l'échelle nationale et permettraient d'effectuer des études rétrospectives, mais aussi de garder une mémoire de la population d'organismes présents dans le cas où les techniques de concentration et de séquençage s'amélioreraient dans le futur. Cette aquathèque garderait en quelque sorte une mémoire de l'état de santé d'une population à différents moments. Le moyen de conservation privilégié des eaux usées pour l'étude des virus est sous forme congelée à -80°C , à la manière des

échantillons biologiques provenant de tissus animaux et végétaux. Cette aquathèque formera une collection singulière, à l'instar des grandes bio-collections constituées d'échantillons provenant de patients. Les aquathèques seront localisés à proximité de chaque zone atelier pour faciliter le traitement et la conservation des échantillons. Etant donné la dilution des virus présents dans ces eaux usées, le volume conservé sera de l'ordre des centaines de mL et même du Litre, ce qui est bien plus important que les échantillons biologiques provenant de prélèvements de sang (quelques mL). Cela implique un dimensionnement important du matériel de stockage (congélateurs et contenants) qui devra donc être pensé en conséquence et homogénéisé sur le plan national. De plus, le mode de conditionnement, c'est-à-dire la dimension et le nombre des aliquots, devra être adapté aux protocoles d'extraction et d'analyse des eaux usées. Afin de pouvoir être utilisé de façon optimale, les informations permettant de caractériser l'échantillon telles des données de prélèvement, des données physico-chimiques (pH, turbimétrie, DCO...) mais aussi des données biologiques (qPCR, séquençage,...) seront centralisées sur un fichier national sécurisé.

Les métadonnées, et les échantillons conservés seront à disposition de la communauté scientifique. La diversité et la représentativité des échantillons apporteront une grande richesse à l'aquathèque ce qui permettra probablement de nombreuses études scientifiques à venir.

- [1] Y. Wu *et al.*, "Prolonged presence of SARS-CoV-2 viral RNA in faecal samples," *lancet. Gastroenterol. Hepatol.*, vol. 5, no. 5, pp. 434–435, May 2020.
- [2] G. Medema, L. Heijnen, G. Elsinga, R. Italiaander, and A. Brouwer, "Presence of SARS-Coronavirus-2 RNA in Sewage and Correlation with Reported COVID-19 Prevalence in the Early Stage of the Epidemic in The Netherlands," *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 7, pp. 511–516, Jul. 2020.
- [3] W. Ahmed *et al.*, "First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewater in Australia: A proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community," *Sci. Total Environ.*, vol. 728, p. 138764, Aug. 2020.
- [4] <https://www.reseau-obepine.fr/donnees-ouvertes/>
- [5] S. Wurtzer *et al.*, "Monitoring the propagation of SARS CoV2 variants by tracking identified mutation in wastewater using specific RT-qPCR," Jun. 2021.
- [6] L. Barbé *et al.*, "SARS-CoV-2 Whole-Genome Sequencing Using Oxford Nanopore Technology for Variant Monitoring in Wastewaters," *Front. Microbiol.*, vol. 13, Jun. 2022.
- [7] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021H0472&from=EN>

**Prévalence contrastée des souches de l'agent causal du flétrissement bactérien
(le complexe d'espèces *Ralstonia solanacearum*)
dans les îles du sud-ouest de l'océan Indien**

Marie Véronique Nomenjanahary¹ Stéphanie Javegny² Jean-Jacques Chéron²
Floriane Ichard² Antinéa Sallen² Manon Langelez² Santatra Ravelomanantsoa³
Stéphane Poussier⁴ Yann Pecrix²

marie-veronique.nomenjanahary@univ-reunion.fr stephane.poussier@univ-reunion.fr
yann.pecrix@cirad.fr

¹ UFR Sciences de l'Homme et de l'Environnement, Université de La Réunion
UMR Peuplements Végétaux et Bioagresseurs en Milieu Tropical, Saint Pierre, La Réunion

² Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
UMR Peuplements Végétaux et Bioagresseurs en Milieu Tropical, Saint Pierre, La Réunion

³ Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural FOFIFA/CENRADERU
Département de Recherche Agronomique, Antananarivo, Madagascar

⁴ IUT de Saint Pierre, Université de La Réunion
UMR Peuplements Végétaux et Bioagresseurs en Milieu Tropical, Saint Pierre, La Réunion

Thèmes – Biologie

Résumé – *Le complexe d'espèces *Ralstonia solanacearum* est l'agent responsable du flétrissement bactérien chez les plantes. Il peut être classifié en trois espèces, quatre phylotypes et une soixante-dizaine de variants phylogénétiques nommés sequevars. Dans le sud-ouest de l'océan Indien, il présente une répartition hétérogène. Le sequevar 31 prédomine partout sauf à Madagascar, à Maurice et à Rodrigues. Les tests de mise en compétition in vitro de ce sequevar prédominant avec le sequevar 18 prédominant à Madagascar montre qu'il est plus compétitif. Dans l'objectif de comprendre pourquoi le sequevar 31 n'arrive pas à prédominer à Madagascar, des analyses de génomiques comparatives ont été réalisées. Un effecteur bactérien, différenciant ces deux sequevars, a été mis en évidence. Des études démontrant l'avirulence de cet effecteur face à un gène de résistance présent chez une accession d'aubergine nous a permis d'établir une carte de prédiction, montrant de nouveau la présence de ce contraste entre Madagascar et les autres îles du sud-ouest de l'océan Indien.*

Mots-Clés – *Flétrissement bactérien, bactérie, pathogène, sud-ouest de l'océan Indien.*

1 Introduction

Le complexe d'espèces *Ralstonia solanacearum* est l'agent responsable du flétrissement bactérien. C'est une maladie qui sévit chez une grande variété de plantes, de cultures maraîchères, fruitières, ornementales et forestières [1].

Cet agent pathogène se retrouve sur tous les continents, mais il est principalement recensé dans les zones tropicales, subtropicales et tempérées chaudes [2]. Il est caractérisé par une forte diversité génétique, constitué de trois espèces ; et de quatre lignées phylogénétiques, appelés phylotypes, regroupant différents sequevars [3], au nombre de 71 répertoriés jusqu'à présent. Un sequevar est un groupe phylétique de souche partageant un seuil d'un pourcent de divergence sur une séquence partielle d'un gène qui code l'*endoglucanase* [3].

Dans le sud-ouest de l'océan Indien, les pertes agricoles engendrées par cet agent pathogène sont élevées. Les différentes prospections faites dans cette région ont montré la présence d'une diversité riche et contrastée dans les différentes îles [4], [5].

En effet, une hétérogénéité est observée dans la répartition géographique des souches dans la région du sud-ouest de l'océan Indien, où huit sequevars du phylotype prédominant (le phylotype I) sont répertoriés (figure 1). Une forte prévalence du sequevar 31 a été établie sur toutes les îles de la région, à l'exception de Madagascar, de Maurice et de Rodrigues ; où ce sont respectivement les sequevars 18 et 33 qui prédominent [4].

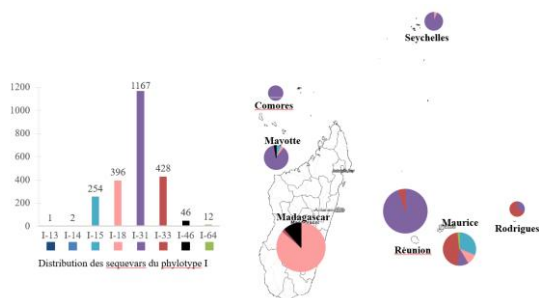


Figure 1 – Contraste dans la répartition des sequevars du phylotype I dans le sud-ouest de l'océan Indien

Nos travaux de recherche ont pour objectif de comprendre l'origine du succès épidémiologique des souches du sud-ouest de l'océan Indien.

2 Un sequevar plus compétitif qu'un autre

Des tests de compétition intraspécifique *in vitro* ont été effectués pour évaluer l'avantage adaptatif des différents sequevars. Pour différencier les deux souches, l'une d'elle a été complétement avec un gène de résistance à la gentamicine, marqué par la lettre « G » dans nos résultats.

Leur abondance relative est suivie au cours du temps. Une souche, isolée à La Réunion, appartenant au sequevar le plus prédominant de la région (sequevar 31 ou 31R) et une souche appartenant au sequevar le plus prévalent à Madagascar (sequevar 18 ou 18M) ont été mises en compétition (figure 2).

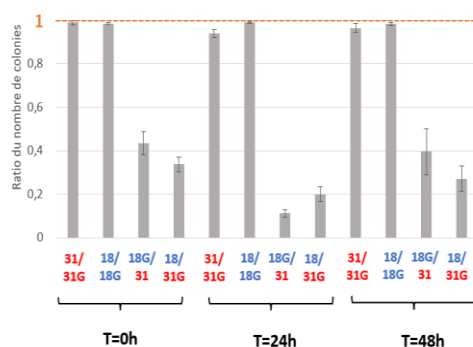


Figure 2 – La souche de sequevar 31 réunionnaise (31R) a un avantage adaptatif sur la souche de sequevar 18 malgache (18M), en compétition *in vitro*, où G=résistance à la gentamicine, un marqueur utilisé pour distinguer les souches en co-cultures compétitives

L'évolution du ratio constaté à T24h et à T48h montre la présence d'une compétition entre les deux souches (figure 2). Au regard des résultats, la souche réunionnaise (31R) présente un avantage adaptatif sur la souche malgache (18M). Pourtant, ce constat n'est pas le même *in situ* à Madagascar où le sequevar 18 est plus prévalent que le sequevar 31.

3 Une différence au niveau moléculaire

Grâce à la disponibilité de génomes de quelques souches représentatives de chaque sequevar prédominant, une analyse de génomique comparative a pu être effectuée sur ces deux souches mises en compétition. La comparaison du nombre de polymorphismes nucléotidiques (SNPs) a montré un éloignement génétique entre les deux sequevars. Un total de 26 516 SNPs diffèrent les génomes des deux souches de ces deux sequevars.

D'une manière exploratoire, une comparaison de contenu en effecteurs de type III chez ces souches a été faite. Par définition, un effecteur de type III est une protéine injectée dans l'espace intercellulaire des plantes hôtes [6]. Ces effecteurs ont plusieurs rôles, notamment, la suppression de défense de la plante hôte, la modification du métabolisme, du fonctionnement et de la structure cellulaire végétale, dans le but de faciliter l'infection bactérienne [7].

Cette analyse a montré que, si aucun effecteur n'est spécifique aux souches du sequevar 31, quelques effecteurs sont propres aux souches du sequevar 18. Il y a

également 22 effecteurs différenciant les deux souches mises en compétition.

4 Un effecteur de type III, cible de mutation

Les effecteurs de type III peuvent être reconnus par de gènes de résistance présents chez les plantes hôtes et déclencher l'immunité. Parmi ces effecteurs figure *RipAX2*. Ce dernier interagit avec un locus de résistance *EBWR9* [8] chez une accession d'aubergine *Solanum melongena* appelée AG91-25 [9], [10]. Il a été démontré que la présence de *RipAX2*, notamment de l'allèle de la souche de référence GMI1000 est suffisante pour que AG91-25 contrôle la maladie du flétrissement bactérien.

Dans l'objectif de pouvoir proposer un plan de déploiement raisonné de ce type d'accession résistante dans les agroécosystèmes du sud-ouest de l'océan Indien, une sélection de 500 souches représentatives ont été analysées. La séquence nucléique de cet effecteur *RipAX2* a été identifiée et testée sur l'aubergine AG91-25.

Il s'est avéré que la totalité des souches réunionnaises (tous sequevars confondus) analysées sont prédites contrôlées. Par contre, 66% des souches malgaches (sequevar 18 pour la plupart) ne le sont pas (figure 3). Ces dernières présentent des mutations majeures modifiant la longueur et la séquence protéique de l'effecteur *RipAX2*.

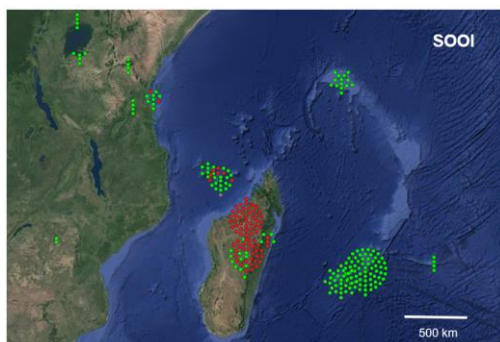


Figure 3 – Prédiction de la virulence des souches malgaches sur l'aubergine AG91-25 dans le sud-ouest de l'océan Indien (en rouge les souches virulentes, non contrôlées par la résistance de la plante et en vert celles avirulentes, contrôlées par la résistance de la plante)

5 Conclusions

Notre étude montre la présence d'un contraste entre La Réunion et Madagascar. Les souches du complexe d'espèces *Ralstonia solanacearum* présentes dans les deux îles semblent avoir une grande différence génétique. Étonnamment, malgré l'avantage adaptatif de la souche du sequevar 31 qui prédomine dans le sud-ouest de l'océan Indien, cette dernière n'arrive pas à s'étendre à Madagascar. Notre hypothèse est qu'il pourrait y avoir à Madagascar des conditions agro-écologiques différenciant la grande île des autres îles de la région. L'hypothèse

principale porte sur *Solanum aethiopicum*, l'aubergine africaine, une plante hôte largement cultivée à Madagascar, d'où proviendrait l'accession d'aubergine résistante AG91-25 [11].

6 Remerciements

Les auteurs remercient la Région La Réunion et le FEDER, ainsi que le CIRAD et l'Université de La Réunion pour le financement octroyé à la réalisation des travaux de recherche. Nous remercions également la Pôle de Protection des Plantes et le FOFIFA où les expérimentations ont été conduites.

Références

- [1] A. C. Hayward, « The hosts of *Pseudomonas solanacearum*. », *Bact. Wilt Dis. Its Causative Agent Pseudomonas Solanacearum*, p. 9-24, 1994.
- [2] EPPO, « *Ralstonia solanacearum* (RALSSL)[World distribution] EPPO Global Database », 2023. <https://gd.eppo.int/taxon/RALSSL/distribution> (consulté le 9 février 2023).
- [3] P. Prior et M. Fegan, « Recent developments in the phylogeny and classification of *Ralstonia solanacearum* », *Acta Hort.*, n° 695, p. 127-136, nov. 2005, doi: 10.17660/ActaHortic.2005.695.14.
- [4] N. Yahiaoui *et al.*, « Genetic Diversity of the *Ralstonia solanacearum* Species Complex in the Southwest Indian Ocean Islands », *Front. Plant Sci.*, vol. 8, p. 2139, déc. 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.02139.
- [5] H. Rasoamanana *et al.*, « Contrasting genetic diversity and structure among Malagasy *Ralstonia pseudosolanacearum* phylotype I populations inferred from an optimized Multilocus Variable Number of Tandem Repeat Analysis scheme », *PLOS ONE*, vol. 15, n° 12, p. e0242846, déc. 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0242846.
- [6] M. Erhardt, K. Namba, et K. T. Hughes, « Bacterial Nanomachines: The Flagellum and Type III Injectisome », *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.*, vol. 2, n° 11, p. a000299, nov. 2010, doi: 10.1101/cshperspect.a000299.
- [7] D. Landry, M. González-Fuente, L. Deslandes, et N. Peeters, « The large, diverse, and robust arsenal of *Ralstonia solanacearum* type III effectors and their in planta functions », *Mol. Plant Pathol.*, vol. 21, n° 10, p. 1377-1388, 2020, doi: 10.1111/mpp.12977.
- [8] S. Salgon *et al.*, « Eggplant Resistance to the *Ralstonia solanacearum* Species Complex Involves Both Broad-Spectrum and Strain-Specific Quantitative Trait Loci », *Front. Plant Sci.*, vol. 8, p. 828, 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.00828.
- [9] J. Guinard, B. A. Vinatzer, S. Poussier, P. Lefeuvre, et E. Wicker, « Draft Genome Sequences of Nine Strains of *Ralstonia solanacearum* Differing in Virulence to Eggplant (*Solanum melongena*) », *Genome Announc.*, vol. 4, n° 1, p. e01415-15, janv. 2016, doi: 10.1128/genomeA.01415-15.
- [10] A. Morel *et al.*, « The eggplant AG91-25 recognizes the Type III-secreted effector *RipAX2* to trigger resistance to bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum* species complex) », *Mol. Plant Pathol.*, vol. 19, n° 11, p. 2459-2472, 2018, doi: 10.1111/mpp.12724.
- [11] G. Ano, Y. Hebert, P. Prior, et C. M. Messiaen, « A new source of resistance to bacterial wilt of eggplants obtained from a cross – *Solanum-aethiopicum* L × *Solanum-melongena* L », *Agronomie*, vol. 11, p. 555-560, 1991.

Criblage de la biodiversité des plantes tinctoriales de l'île de la Réunion pour des applications en coloration industrielle

Shamsia Pithon¹, Mahery Andriamanantena¹, Christophe Lavergne², Manon Dijoux¹,
Thomas Petit^{1,3} & Yanis Caro^{1,3}

Thomas.petit@univ-reunion.fr ; yanis.caro@univ-reunion.fr

¹ Laboratoire de Chimie et Biotechnologie des Produits Naturels (CHEMBIOPRO), Université de La Réunion, La Réunion, France

² Conservatoire Botanique National et CPIE de Mascarin (CBNM), La Réunion, France

³ IUT de La Réunion, Département Hygiène Sécurité Environnement (HSE), La Réunion, France.

Thèmes – Chimie - Biologie - Environnement

Résumé – *La toxicité avérée et les nuisances environnementales causées par les colorants artificiels ont motivé les industriels à se tourner vers les colorants naturels, et notamment ceux issus des plantes. L'île de la Réunion possède un nombre important d'espèces végétales endémiques, ainsi que des espèces indigènes et exotiques tropicales, qui sont riches en pigments de diverses teintes. Dans le cadre du projet européen PLANTIN, mené par le laboratoire ChemBioPro (Université de La Réunion) en collaboration entre autres avec le Conservatoire Botanique National de Mascarin (CBNM), un screening de la biodiversité végétale tropicale a permis d'identifier plusieurs espèces végétales locales prometteuses pour la production de colorants naturels. L'importance de différents critères biologiques et physico-chimiques, tels que l'endémicité, les couleurs extraites, les parties de la plante utilisées pour l'extraction, etc., ont été pris en compte pour établir une méthode de classification des espèces inventoriées productrices de colorants afin de sélectionner les plus intéressantes pour des applications en coloration industrielle. Les plantes tinctoriales découvertes ont montré des propriétés colorantes et physico-chimiques très prometteuses, offrant ainsi des possibilités d'application polyvalentes et ouvrant de nouveaux marchés.*

Mots-Clés – *Île de La Réunion, plantes tinctoriales, pigments et colorants naturels, biodiversité végétale.*

1. Introduction

Les effets toxiques des colorants artificiels sur la santé humaine, comme l'activité cancérogène ou mutagène [1], et la contamination de l'environnement causée par les eaux usées rejetées par les industries de la teinture [2] amènent à étudier de nouvelles sources de colorants écologiques et moins nocifs.

Cette étude vise à inventorier les espèces végétales réunionnaises productrices de colorants, parmi les plantes endémiques, indigènes et introduites de l'île, puis à sélectionner une liste de matières premières végétales qui devra faire l'objet d'une étude plus approfondie pour des applications dans différents domaines industriels.

Une enquête ethnobotanique sur les plantes tinctoriales réunionnaises a été menée par les chercheurs du Conservatoire Botanique National de Mascarin (CBNM), et la sélection des espèces végétales les plus intéressantes a été effectuée en fonction de quatre indices différents, dont l'endémicité, la cultivabilité, l'extrapolation à l'échelle industrielle et le pouvoir colorant.

2. Matériels et méthodes

2.1. Enquêtes ethnobotaniques

L'étude bibliographique a été réalisée en consultant les documents disponibles sur l'histoire et la diversité végétale de La Réunion dans les bibliothèques de l'Université de La Réunion et du CBNM. L'ensemble de ces informations ont été combinées et complétées par les informations issues d'enquêtes ethnobotaniques réalisées par le CBNM sur les plantes tinctoriales de La Réunion auprès de botanistes, teinturiers, fabricants de cosmétiques locaux., etc.

2.2. Notation et évaluation des espèces végétales pour leur application en coloration : calcul du "dye score"

Les auteurs ont développé en interne un système de notation qui attribue à chaque plante un "dye score", permettant d'évaluer le potentiel de chaque plante en tant que plante tinctoriale de La Réunion pour des applications de coloration industrielles. Huit critères et quatre indices ont été définis et sont classés selon la définition de l'échelle du "dye score" développée dans le **Tableau 1**. Les six premiers critères sont basés sur les connaissances empiriques recueillies à partir de la littérature et des enquêtes ethnobotaniques. Les deux autres critères sont basés sur les expériences de laboratoire menées dans l'étude en utilisant un processus d'extraction standardisé [4]. Chaque critère est classé sur une échelle de 1 à 10.

Sur la bases de ces huit critères, quatre indices ont été calculé comme suit : l'indice d'endémicité (Iend.) = C1xC2 ; l'indice de cultivabilité (Icul.) = C3xC4 ; l'indice

d'extrapolation industrielle (Iind.) = C5xC6 ; et l'indice du pouvoir colorant (Icol.) = C7xC8. Les couleurs et les rendements obtenus sont les critères les plus importants pour des applications en industrie, l'indice du pouvoir colorant (Icol.) a été comptabilisé deux fois plus que les autres indices pour le calcul du "dye score". Celui-ci est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Dye\ score = \frac{(Iend. + Icul. + Iind.) + (Icol. \times 2)}{5}$$

Critère	Description
C1 - Endémicité	Valorisation des plantes endémiques en raison de leur potentiel en tant que ressource disponible localement qui peut conduire au développement économique régional en plus de la conservation de la biodiversité.
C2 – Référencement bibliographique	Valorisation de l'identification d'espèces encore non décrites dans la littérature scientifique, ni mises en valeur dans le domaine industriel.
C3 – Accessibilité de l'échantillon et rareté de l'espèce	Valorisation des plantes facilement accessibles qui ne sont pas protégées à La Réunion.
C4 – Maitrise culturelle	Valorisation des plantes déjà cultivées sur l'île et les plantes dont les méthodes de culture sont connues.
C5 – Partie utilisée pour l'extraction des pigments	Valorisation de l'utilisation des parties les plus renouvelables de la plante. Les feuilles peuvent être récoltées tout au long de l'année, l'écorce peut être collectée si elle n'affecte pas le développement futur de la plante. Les fleurs et les fruits sont saisonniers mais si le rendement est élevé ces parties ont un potentiel.
C6 – Autres intérêts et usages connus de la plante	Valorisation des plantes possédant une utilisation en médecine, biogaz, nutrition, ou autres, au-delà des propriétés colorantes de la plante, pour un intérêt économique plus important.
C7 – Couleur et Stabilité des colorants et pigments extraits	Les couleurs rares/spéciales (bleu, magenta, cyan, vert) sont valorisés. Le jaune et le rouge sont recherchés dans l'industrie alimentaire pour remplacer les colorants synthétiques, mais seulement s'ils sont rentables et ont une couleur intense et stable. Les bruns sont plus faciles à trouver et la demande est moindre.
C8 – Rendement et difficulté d'extraction	Valorisation des plantes contenant des pigments et des colorants hydrosolubles facilement extractibles à l'aide d'eau et d'éthanol (solvants éco-compatibles) avec un rendement adéquat pour les applications industrielles, et dont la couleur peut être révélées sans mordantage ni fermentation.

Tableau 1. Critères d'évaluation du "dye score".

3. Résultats et discussion

3.1. Enquêtes ethnobotaniques et liste des principales plantes tinctoriales de la Réunion

194 espèces végétales riches en colorant ont été inventoriées (34 espèces endémiques, 22 espèces indigènes et cryptogènes, et 138 espèces introduites).

L'espèce endémique *Weinmannia tinctoria* [5] est une source de pigments rouges hydrosolubles pouvant être utilisés pour le tannage. Elle est également utilisée comme plante ornementale. Une autre espèce endémique, *Terminalia bentzoe*, est riche en tanins et peut être utilisée pour teindre les fibres naturelles d'une couleur noire ou jaune selon le mordant utilisé lors de la teinture. *T. bentzoe* possède des propriétés biologiques intéressantes comme des activités antioxydantes et cytotoxiques [6]. L'espèce indigène *Thespesia populnea* a été caractérisée dans cette étude et pourra être utilisée comme une source naturelles de couleur rouges et jaunes.

3.2. Évaluation des plantes tinctoriales réunionnaises les plus prometteuses pour leur application en coloration

T. populnea possède le "dye score" le plus élevé (60) et se caractérise par une couleur rouge intense de ses extraits d'écorce, un rendement d'extraction intéressant en utilisant un procédé ASE (*Accelerated Solvent Extraction*) d'eco-extraction, une méthode d'extraction solide-liquide assistée par la température et la pression, avec un mélange d'éthanol/eau et est facilement cultivable à La Réunion. Nous disposons d'informations sur les propriétés tinctoriales des fleurs et des fruits de cet arbre [7, 8] mais aucune information n'est disponible sur les propriétés tinctoriales de ses écorces. La nature des pigments des écorces rouges de cette plante endémique de la Réunion n'a jamais été établie.

La méthode de classification proposée ici est spécifique aux plantes tinctoriales de l'île de La Réunion : elle considère la biodiversité et l'importance de valoriser les espèces endémiques et/ou natives de la biodiversité réunionnaise comme sources de colorants naturels.

4. Conclusion

La filière locale de production de colorants naturels est récente à la Réunion, mais la biodiversité de l'île a le potentiel d'offrir un large choix de sources alternatives de colorants et de pigments pour des applications artisanale et industrielle. Cette étude est basée principalement sur les connaissances actuellement disponibles de ces plantes et met en exergue la nécessité de mener des recherches supplémentaires pour valoriser les extraits colorants issus

de plantes des régions tropicales. Les travaux peuvent être complétés par des études sur les activités biologiques, la toxicité des extraits de ces plantes, le pouvoir tinctorial et la solidité des couleurs obtenues, ou le coût de la production et de l'extraction du colorant.

Remerciements

Ces travaux ont été soutenus par le Conseil Régional de La Réunion et l'Europe (RE0022957/ GURDTI/20200508-0022957).

Références

- [1] Gičević, A., Hindija, L., and Karačić, A. (2020). Toxicity of Azo Dyes in Pharmaceutical Industry. In CMBEBIH 2019, A. Badnjevic, R. Škrbić, and L. Gurbeta Pokvić, eds. (Cham: Springer International Publishing), pp. 581–587.
- [2] Chequer, F.M.D., Lizier, T.M., de Felicio, R., Zanoni, M.V.B., Deboni, H.M., Lopes, N.P., and de Oliveira, D.P. (2015). The azo dye Disperse Red 13 and its oxidation and reduction products showed mutagenic potential. *Toxicology in Vitro* 29, 1906–1915.
- [3] Novais, C., Molina, A.K., Abreu, R.M.V., and Santo-Buelga, C. (2022). Natural Food Colorants and Preservatives: A Review, a Demand, and a Challenge. *J. Agric. Food Chem.* 17.
- [4] Andriamanantena, M., Razafimbelo, F.F., Raonizafinimanana, B., Cardon, D., Danthu, P., Lebeau, J., Petit, T., and Caro, Y. (2021). Alternative sources of red dyes with high stability and antimicrobial properties: Towards an ecological and sustainable approach for five plant species from Madagascar. *Journal of Cleaner Production* 303, 126979.
- [5] De Lanessan, J.L. (2012). Les plantes utiles des colonies françaises (Edition 1886).
- [6] Rummun, N., Rondeau, P., Bourdon, E., Pires, E., McCullagh, J., Claridge, T.D.W., Bahorun, T., Li, W.-W., and Neergheen, V.S. (2020). *Terminalia bentzoe*, a Mascarene Endemic Plant, Inhibits Human Hepatocellular Carcinoma Cells Growth In Vitro via G0/G1 Phase Cell Cycle Arrest. *Pharmaceuticals* 13, 303.
- [7] Amutha, K., Grace Annapoorani, S., and Sudhapriya, N. (2020). Dyeing of textiles with natural dyes extracted from *Terminalia arjuna* and *Thespesia populnea* fruits. *Industrial Crops and Products* 148, 112303.
- [8] Kumaresan, M., Ashwinbalaji, S., and Karthikeyan, B. (2018). Dyeing of Cotton Fabric with Natural Dye obtained From Flower of *Thespesia Populnea* using Combination of Mordants. *J. Environ. Nanotechnol.*, 7, 12–16.

Etude des propriétés techniques et biologiques de deux sources naturelles de pigments

issues de la biodiversité végétale endémique de Madagascar :

Acridocarpus excelsus et *Harungana madagascariensis*

Mahery Andriamanantena^{1,2}, Shamsia Pithon¹, Thomas Petit^{1,3}, Yanis Caro^{1,3}

mahery.andriamanantena@univ-reunion.fr, shamsia.pithon@univ-reunion.fr,
thomas.petit@univ-reunion.fr, yanis.caro@univ-reunion.fr

¹ Université de La Réunion, Laboratoire Chembiopro

² Université d'Antananarivo, ESSA

³ IUT, La Réunion, Département HSE

Thèmes – Chimie - Biologie

Résumé – La zone Océan Indien regorge d'une richesse inestimable en espèces endémiques et indigènes insuffisamment étudiées et exploitées. Cette biodiversité peut répondre à la demande croissante des industriels en ingrédients et produits d'origine naturelle. A l'exemple de l'industrie des colorants, Madagascar dispose d'un savoir-faire ancestral qui s'est transmis de génération en génération pour la teinture de fibres naturelles. A travers le monde, les industriels sont également à la recherche croissante d'ingrédients d'origine naturelle, dont les colorants et pigments. Cette étude a pour objectif d'étudier les propriétés techniques et biologiques de deux extraits végétaux issus de plantes malgaches, *Acridocarpus excelsus* (source de colorants rouges) et *Harungana madagascariensis* (source de colorants jaunes). Après une éco-extraction utilisant un solvant éco-compatible, des tests de colorimétrie et de stabilité ont été réalisés afin de démontrer le potentiel technique de ces deux extraits de pigments pour la coloration industrielle. Une étude de leurs propriétés biologiques et toxicologiques, notamment sur le modèle de souris albinos et sur celui du zebrafish, permettra de valider leur utilisation comme source alternative aux colorants artificiels. Les extraits colorants de ces deux plantes ont démontré des profils techniques stables à différents pH (acides et alcalins) et une bonne stabilité thermique jusqu'à 200°C en particulier pour *A. excelsus*. Ces résultats prometteurs laissent envisager de nombreuses applications en textile, mais également dans les domaines de la cosmétique, de l'agroalimentaire et des bioplastiques, très exigeant en termes de variation de pH et de résistance aux températures élevées. Les tests de toxicité effectués sur les souris ont démontré que les deux extraits colorants ne sont pas toxiques puisqu'aucune mortalité n'a été observée à la plus grande concentration utilisée de 4000 mg / kg de poids corporel. Les essais innovants sur le modèle zebrafish valident également leur faible toxicité comparée à certains colorants artificiels actuellement utilisés sur le marché.

Mots-Clés – Pigments, biodiversité, stabilité, toxicité, *A. excelsus*, *H. madagascariensis*

1 Introduction

Les problèmes environnementaux et toxicologiques liés aux colorants issus de la synthèse chimique ont ravivé le besoin de trouver des solutions naturelles alternatives aux colorants artificiels [1,2]. Dans une optique de remplacement des colorants artificiels par des colorants naturels issus de ressources renouvelables, la production de pigments végétaux et/ou microbiens devrait voir sa croissance augmenter de manière significative dans les prochaines années. Dans le règne végétal, parmi les nombreuses plantes productrices de pigments, la biodiversité végétale tinctoriale de Madagascar peut constituer de précieuses matières premières naturelles pour l'industrie des colorants naturels. Le savoir-faire artisanal pour l'utilisation de certaines plantes pour la teinture de fibres naturelles, comme la teinture du raphia par des extraits d'*A. excelsus*, de *H. madagascariensis* ou de *Indigofera tinctoria* (Figure 1) est très riche dans certaines régions de Madagascar (Majunga...). Ce savoir-faire ancestral s'est transmis de génération en génération.



Figure 1 – Fibres de raphia teintées avec de l'*A. excelsus* (rouge), *I. tinctoria* (bleue), *H. madagascariensis* (jaune)

Dans la perspective de recherche de cette matière première d'origine naturelle, cette étude se focalise sur deux espèces de plantes malgaches, à savoir les écorces de *Acridocarpus excelsus* et celles de *Harungana madagascariensis*, endémiques de Madagascar, qui permettent respectivement de teindre les tissus en rouge et en jaune. Après un procédé d'éco-extraction, les propriétés techniques de ces deux extraits seront étudiées afin de sortir un profil technique qui permettra d'ouvrir leurs domaines d'application vers d'autres types d'applications industrielles. Une analyse de leur profil toxicologique sera également mise en œuvre en utilisant deux méthodes dont les tests de toxicité sur modèle souris albinos et sur modèle *zebrafish* afin de comparer leur profil toxicologique à ceux des colorants artificiels.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matières végétales et matériels

Les prélèvements ont été effectués dans le cadre d'une autorisation spécifique de recherche N° 027/18-MEEF/SG/DGF/DSAP/SCB/2018 à Madagascar. Pour

chaque échantillonnage, un mélange de matières végétales a été collecté sur trois différents individus présents dans une même zone géographique ayant les mêmes caractéristiques pédoclimatiques. Une extraction solide-liquide accélérée par solvant sous pression (ASE) défini comme une extraction éco-compatible a été utilisée. Un mélange éthanol/eau (70 :30, v/v) a été choisi comme solvant d'extraction dans la perspective d'un transfert de technologie à une échelle supérieure, car l'alcool peut être biosourcé aisément par fermentation alcoolique et par distillation.

2.2 Tests de stabilité

La stabilité des pigments par rapport au pH et à la température a été étudiée selon la méthode développée par Torskangerpoll et Andersen (2005) [3] et Marzec (2019) [4], à laquelle des modifications mineures ont été apportées [5]. Les extraits ont été soumis à différents pH acides et alcalins allant de pH3, pH5, pH7, pH9 et pH11 et des températures allant de 30°C à 305°C. Le chroma, calculé à partir d'un rapport des coordonnées colorimétriques b^* (jaune vers le bleu) sur a^* (rouge vers le vert) prélevé par un spectrocolorimètre Minolta CM-3500d, dans le système international CIE $L^*a^*b^*$, permettra de vérifier l'évolution de la couleur, ainsi que la stabilité de l'extrait colorant.

2.3 Tests de toxicité aiguë

Les tests de toxicité aiguë sur modèle souris albinos ont été menés suivant le guide de l'OCDE No 423 [6] et repris par plusieurs auteurs pour l'analyse des extraits de plantes [7,8]. Ces tests consistent à administrer par voie orale différentes doses du produit dissous dans une solution aqueuse afin de déterminer la dose létale 50 (DL₅₀) des individus. Le deuxième test de toxicité a été réalisé sur les embryons de poissons de type « zebrafish » en se basant sur la méthode décrite par le guide de l'OCDE No 236 [9].

3 Résultats et discussions

3.1 Propriétés techniques des extraits de pigments

Les tests de stabilité réalisés sur les extraits de pigments d'*A. excelsus* et de *H. madagascariensis* ont montré que les extraits présentent une bonne stabilité à la fois en milieu acide et en milieu alcalin. Seul des pH fortement alcalins (pH > 11) induisent une variation importante de la couleur de l'extrait défini par une baisse considérable de la valeur du chroma C^* (Figure 2). Les valeurs du Chroma obtenues pour chaque pallier de températures démontrent que ces extraits sont stables à haute température jusqu'à 155 °C pour le *H. madagascariensis*, voire jusqu'à plus de 205°C pour l'extrait rouge d'*A. excelsus* (Figure 2)

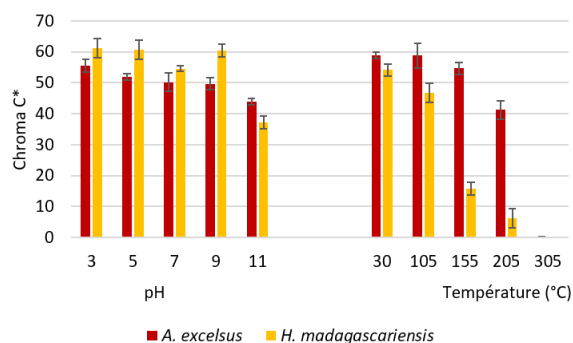


Figure 2 – Evolution du chroma C* = b*/a*

Cette stabilité au pH acide et alcalin ouvre des possibilités d'application dans le domaine de l'agroalimentaire et de la cosmétique qui sont très exigeants pour la conservation de leur produit. D'un autre côté, des pigments qui résistent à une température au-delà de 150°C, voire supérieure à 200°C, pourraient être utilisés dans les domaines de l'agroalimentaire et des bioplastiques avec des procédés nécessitant des températures élevées.

3.2 Tests de toxicité

Des tests de toxicité aiguë ont été réalisés sur les mammifères de types « souris albinos » par administration orale de différentes doses de pigments. Aucun signe de toxicité n'a été observé ce qui peut signifier une non toxicité virtuelle [10]. D'autant plus, les tests de toxicité sur zebrafish ont démontré des doses létales LC₅₀ de 144.32 et de 99.26 µg/mL, respectivement, pour l'extrait colorant de *H. madagascariensis* et de *A. excelsus*. Ces concentrations létales sont largement inférieures à celles de certains colorants artificiels actuellement utilisés dans les industries, i.e., Tartrazine (E102) et Sunset yellow (E110) (Table 1).

Table 1 – Comparaison des LC₅₀ et NOAEL des extraits de plantes et des colorants artificiels

Extraits	LC 50* (µg/ml)	NOAEL* (µg/ml)
<i>A. excelsus</i>	99.26	> 16
Tartrazine (E102) [11]	15.7	2.67
<i>H. madagascariensis</i>	144.32	> 31
Sunset yellow (E110) [12]	17.61	2.26

*LC 50 : Concentration léthales 50% de mortalité

*NOAEL : La dose sans effet nocif observable

Toutefois, des tests de toxicité aiguë ne permettent pas de valider complètement les propriétés toxicologiques de produits naturels pour une éventuelle utilisation sur l'être humain. Des tests de toxicité chroniques devront être mises en œuvre dans ce sens.

4 Conclusions

La biodiversité des plantes dans l'Océan Indien peut permettre de répondre à la demande croissante des industriels en ingrédients d'origine naturelle (colorants, pigments). A travers cette étude, il a été démontré que les deux extraits colorants issus de deux plantes endémiques de Madagascar, jadis utilisées en textile, présentent des profils techniques prometteurs à des fins d'usage dans d'autres domaines d'applications industrielles (cosmétique, bioplastique). Leurs faibles toxicités par rapport à certains colorants artificiels ont été démontrés, ce qui leur confèrent un vrai potentiel de valorisation comme source alternative pour remplacer les colorants artificiels toxiques pour l'Homme et l'environnement.

5 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à l'équipe de TUT de Pretoria et de l'IMRA Madagascar pour leur accueil dans le cadre des études toxicologiques. Cette étude a reçu le soutien financier de la Région Réunion (Grant number : DIREDD/20161450 et Erasmus).

Références

- [1] de Oliveira GAR, de Lapuente J, Teixidó E, Porredón C, Borràs M, de Oliveira DP. *Textile dyes induce toxicity on zebrafish early life stages*. Environmental Toxicology and Chemistry 2016; 35:429–34.
- [2] Markandeya, Shukla SP, Mohan D. *Toxicity of Disperse Dyes and its Removal from Wastewater Using Various Adsorbents: A Review*. Research Journal of Environmental Toxicology 2017; 11:72–89.
- [3] Torskangerpoll K, Andersen ØM. *Colour stability of anthocyanins in aqueous solutions at various pH values*. Food Chemistry 2005; 89:427–40.
- [4] Marzec A, Szadkowski B, Rogowski J, Maniukiewicz W, Zaborski M. *Characterization and Structure–Property Relationships of Organic–Inorganic Hybrid Composites*. Molecules 2019 ;24 :880.
- [5] Andriamanantena M, Razafimbelo FF, Raonizafinimanana B, Cardon D, Danthu P, Lebeau J, et al. *Alternative sources of red dyes with high stability and antimicrobial properties*: Journal of Cleaner Production 2021; 303:126979.
- [6] OCDE. Test No. 423: *Acute Oral Toxicity – Acute Toxic*
- [7] Athinarayanana G, Ranjitsingh AJA, Usha Raja Nanthini A, Padmalatha C. *Toxicological studies of Caesalpinia sappan wood derived dye in Wister albino rats*. Food Science and Human Wellness 2017; 6:34–8.
- [8] Kifayatullah M, Mustafa MohdS, Sengupta P, Sarker MdMR, Das A, Das SK. *Evaluation of the acute and sub-acute toxicity of the ethanolic extract of Pericampylus glaucus (Lam.) Merr. in BALB/c mice*. Journal of Acute Disease 2015; 4.
- [9] OCDE. Test No. 236: *Fish Embryo Acute Toxicity (FET)*
- [10] Lorke D. *A new approach to practical acute toxicity testing*. Arch Toxicol 1983; 54:275–87.
- [11] Joshi V, Katti P. *Developmental Toxicity Assay for Food Additive Tartrazine Using Zebrafish (Danio rerio) Embryo Cultures*. Int J Toxicol 2018; 37:38–44.
- [12] Jiang L-L, Li K, Yan D-L, Yang M-F, Ma L, Xie L-Z. *Toxicity Assessment of 4 Azo Dyes in Zebrafish Embryos*. Int J Toxicol 2020 :109158181989839.

Sélection par mutagenèse UV et caractérisation physiologique de souches mutantes de la levure *Saprochaete suaveolens* (anciennement *Geotrichum fragrans*) hyperproductrices de composés organiques volatils.

Mélissa Tan¹, Yanis Caro², Jean-Marie François³ et Thomas Petit⁴
melissa.tan@univ-reunion.fr ; yanis.caro@univ-reunion.fr; fran_jm@insa-toulouse.fr;
thomas.petit@univ-reunion.fr

^{1,2,4} IUT, Université de la Réunion
Laboratoire de Chimie et Biotechnologie des Produits Naturels (ChemBioPro), Réunion, France

³ INSA de Toulouse
Toulouse Biotechnology Institute (TBI), Toulouse, France

Thèmes – Chimie - Microbiologie – Biotechnologies - Agroalimentaires

Résumé – *Saprochaete suaveolens* est une levure non conventionnelle (LNC) appréciable pour sa haute productivité en composés organiques volatils (COVs), tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Cette souche est notamment très intéressante pour sa production d'esters α -insaturés rarement retrouvés dans le bouquet aromatique des souches levuriennes. Le métabolisme de cette souche peut ainsi être considéré comme un modèle très prometteur pour la production de COVs par les levures. Cette étude visait donc à l'optimisation de la production de COVs par la *S. suaveolens* par une méthode de mutagenèse aléatoire. Ainsi, après avoir mis au point une méthode de mutagenèse UV adaptée à la souche de *S. suaveolens*, une méthode rapide de sélection des mutants d'intérêts a été élaborée. Cette méthode a permis de sélectionner 9 souches mutantes parmi plus de 15 000 clones irradiés. Les analyses de COVs produits par ces 9 souches ont mis en exergue un mutant produisant 8 fois plus de COVs que la souche sauvage de *S. suaveolens*. Les analyses biochimiques ont montré que cette surproduction résultait de la perte d'activité de l'Enoyl-CoA hydratase et d'une augmentation de l'activité de l'acyl-CoA hydrolase chez le mutant.

Mots-Clés – Levures ; Composés organiques volatils ; Mutagenèse UV ; *Saprochaete suaveolens*

1 Introduction

Le laboratoire ChemBioPro s'intéresse depuis une dizaine d'années à la production de composés d'arômes (composés organiques volatils, COVs) par les levures non conventionnelles (levures non-*Saccharomyces*). Dans ce cadre, un premier projet de recherche portant sur l'exploration des levures endémiques et indigènes de la Réunion et de Madagascar à produire des COVs a été réalisé¹. En accord avec les résultats d'autres équipes de recherche²⁻⁵, ce travail a mis en exergue la place particulièrement intéressante de la levure *Saprochaete suaveolens* et des espèces qui lui sont apparentées pour la production de COVs à partir des acides aminés^{6,7}.

Plus particulièrement, il a montré que *S. suaveolens* produit de nombreux COVs sous forme d'esters dont des esters α -insaturés qui sont des familles chimiques très appréciés en aromatisation mais peu produit de façon naturelle. De plus, ce type d'esters est rarement retrouvé dans le bouquet aromatique des levures. L'étude du métabolisme aromatique de *S. suaveolens* a montré que la production de ces esters α -insaturés proviennent de la transformation des acides aminés branchés (BCAAs) via deux voies métaboliques : la voie d'Ehrlich (EP) et la voie de la β -oxydation (BOP) des BCAAs⁸. Néanmoins, la seconde voie permet également à *S. suaveolens* de se développer sur des milieux ne comportant que des BCAAs comme source de carbone (phénotype ILV⁺)⁸, diminuant ainsi le rendement de production en esters à partir des acides aminés.

Dans la continuité de ces travaux, nous nous sommes proposés d'optimiser la production de COVs par la souche de *S. suaveolens* par une méthode de mutagenèse aléatoire. Cet article fait état des principaux résultats obtenus.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels biologiques

Une souche sauvage de *Saccharomyces cerevisiae* CEN.PK 112-2N⁹ et une souche de *Saprochaete suaveolens* isolée du fruit du pitaya à La Réunion (France)⁶ ont été utilisées dans cette étude.

2.2 Mutagenèse UV et sélection des mutants ILV⁻

La mutagenèse par irradiations aux rayons ultraviolets (UV, 254 nm, 180s) de la souche *S. suaveolens* a été réalisée selon la méthode introduite par Winston en 2008¹⁰. 15 393 clones de *S. suaveolens* ont ainsi été isolés. Une pré-sélection des souches ILV⁻ a été réalisée par la méthode de réplique sur velours stériles des boîtes de Pétri. La confirmation du phénotype ILV⁻ a ensuite été réalisée par un test de croissance en goutte classique. 9 mutants ILV⁻ (mutants M2 à M9) ont ainsi été

isolés.

2.3 Analyses semi-quantitative des COVs produits par *S. suaveolens* et les 9 mutants ILV⁻

Les COVs produits par les différentes souches ont été extraits par micro-extraction en phase solide (SPME) et analysés à l'aide d'un chromatographe gazeux couplé à un spectromètre de masse comme détecteur (CG-SM). L'identification de tous les COVs a été réalisée par comparaison de leur spectre de masse et de leurs indices de rétention linéaire expérimentaux (colonnes DB-5) avec ceux proposés par la base de données « NIST database ».

2.4 Mesures des activités enzymatiques

Les levures ont été cultivées dans 50 mL YNB-Glu ou YNB-Glu-Ile pendant 24 h à 30°C. Ensuite, l'équivalent de 100 UDO₆₀₀ de culture a été utilisé pour la préparation des extraits bruts. Les extraits obtenus ont ensuite été purifiés sur colonne Amicon selon le protocole proposé par le constructeur. Les mesures d'activité des enzymes BCKAD (*branched chain ketoacid dehydrogenase*), ECH (*enoyl-CoA hydratase*), DC (*decarboxylase*), ADH (*alcohol dehydrogenase*), AIDH (*aldehyde dehydrogenase*), ACyD (*acyl-CoA dehydrogenase*), AAT (*alcohol acyltransferase*) et ACyH (*acyl-CoA hydrolase*) ont été réalisés selon des protocoles décrits dans la littérature^{11,12,8}.

3 Résultats et Discussion

3.1 Analyse multivariée de la souche sauvage de *S. suaveolens* et des 9 mutants ILV⁻

Les mutants M9 et M10 présentait respectivement des niveaux de production totale en COVs 1.8 et 8 fois plus grand que la souche sauvage (FIGURE 1). De plus, une analyse par composante principale a permis d'identifier 4 groupes de souches et de distinguer clairement les mutants M9 et M10 entre eux et des autres souches. Ces résultats ont ainsi montré le succès de la mutagenèse UV puisque le profil aromatique de la souche M10 et, dans une moindre proportion de la souche M9, se sont avérés être clairement distincts de la souche sauvage.

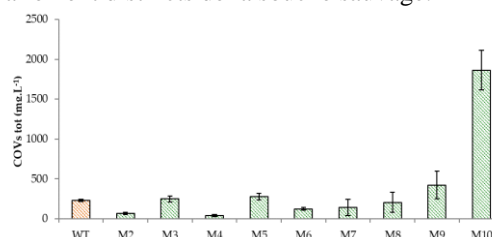


FIGURE 1 – COVs totaux produits par la souche sauvage de *S. suaveolens* (WT) et les 9 mutants ILV⁻

3.2 Comparaison des COVs produits par la souche sauvage et le mutant M10.

Les COVs produits par la souche sauvage et la souche M10 étaient majoritairement des esters pouvant être regroupés en trois catégories selon leur origine métabolique. Le premier groupe comportait les esters issus de la voie classique d'Ehrlich (EP). Le second groupe était constitué d'esters dérivant de l'acyl-CoA de la β -oxydation (BOP). Enfin, le dernier groupe d'esters, propre aux espèces du genre *Saprochaete*, comprenait tous les esters α -insaturés dérivant de l'énoyl-CoA de la BOP.

La **FIGURE 2** illustre la capacité du mutant M10 à produire les esters de ces trois catégories dans des proportions significativement supérieures à la souche sauvage (WT). Plus particulièrement, cette figure montre une production en esters dérivant de l'énoyl-CoA 10 fois supérieure à celle de la souche sauvage pour le mutant M10, ce qui signifie que la mutagenèse UV a permis d'augmenter la production d'esters α -insaturés.

Les activités enzymatiques des enzymes mesurées chez la souche sauvage et le mutant M10 ont montré que l'effet le plus important de la mutagenèse UV était obtenu pour l'ECH et l'ACYH. En effet, l'activité de l'ECH, présente chez la souche sauvage, était indétectable pour le mutant M10 alors que l'activité de l'ACYH, qui catalyse une réaction en amont de l'ECH, était deux fois supérieures à celle observée pour la souche sauvage.

A contrario, les activités de l'ACYD et de la BCKAD ne montraient pas de différence significative entre la souche mutante et la souche sauvage. Enfin, l'activité globale des estérases (AAT) était similaire pour les deux souches.

Ainsi, l'augmentation de la production de COV chez le mutant M10 est probablement due à une perte de l'activité de l'ECH qui conduit à une augmentation de la disponibilité des précurseurs acyl-CoA et énoyl-CoA pour la synthèse d'esters.

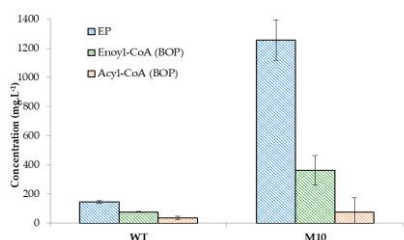


FIGURE 3 – Concentration des esters dérivant de la voie d'Ehrlich (EP), et de l'acyl-CoA et de l'énoyl-CoA de la voie de la β -oxydation (BOP) chez la souche sauvage de *S. suaveolens* (WT) et chez le mutant M10.

4 Conclusion

Cette étude a montré la possibilité d'optimiser la production de COVs, et notamment d'esters α -insaturés par mutagenèse UV chez la souche de *S. suaveolens*. Plus particulièrement cette étude a permis d'identifier les modifications d'activité enzymatiques responsables de cette surproduction. Ainsi, l'exploitation des résultats de cette étude pourront permettre, à terme, de reproduire une

voie métabolique de production d'esters α -insaturés chez une souche de levure mieux maîtrisée (tel que *S. cerevisiae*) afin de produire à l'échelle industrielle des esters α -insaturés par voie fermentaire. Le détail des résultats obtenus a été publié en 2021¹³.

5 Remerciements

Les auteurs expriment leur profonde gratitude à la Région Réunion et l'Union Européenne pour le support financier.

Références

- (1) Grondin, E. Exploration Du Potentiel Biotechnologique Des Levures Endémiques et Indigènes de La Réunion et de Madagascar à Produire Des Molécules d'arômes, Université de la Réunion, 2014.
- (2) İşcan, G.; Demirci, B.; Demirci, F.; Başer, K. H. C. Headspace Solid Phase Microextraction (HS-SPME) and Analysis of Geotrichum Fragrans Volatiles. *Nature volatiles and essential oils* **2015**, *2* (2), 45–51.
- (3) de Oliveira. Production of 2-Phenylethanol by Geotrichum Fragrans, Saccharomyces Cerevisiae, Kluyveromyces Marxianus in Cassava Wastewater. *Journal of food, agriculture & environment* **2013**, *11* (2), 158–163.
- (4) Zhu, J.; Shi, J.; Lu, Y.; Liu, L.; Liu, Y. Application of Strains of *Geotrichum* Spp. to Decrease Higher Alcohols and to Increase Esters: Application of *Geotrichum* Spp. Strains to Decrease Higher Alcohols and to Increase Esters. *Journal of the Institute of Brewing* **2016**, *122* (1), 147–155.
- (5) Damasceno, S.; Cereda, M. P.; Pastore, G. M.; Oliveira, J. G. Production of Volatile Compounds by *Geotrichum* Fragrans Using Cassava Wastewater as Substrate. *Process Biochemistry* **2003**, *39* (4), 411–414.
- (6) Grondin, E.; Shum Cheong Sing, A.; Caro, Y.; Raherimandimby, M.; Lalaniaina Randrianierenana, A.; James, S.; Nueno-Palop, C.; François, J. M.; Petit, T. A Comparative Study on the Potential of Epiphytic Yeasts Isolated from Tropical Fruits to Produce Flavouring Compounds. *International Journal of Food Microbiology* **2015**, *203*, 101–108.
- (7) Grondin, E.; Shum Cheong Sing, A.; James, S.; Nueno-Palop, C.; François, J. M.; Petit, T. Flavour Production by *Saprochaete* and *Geotrichum* Yeasts and Their Close Relatives. *Food Chemistry* **2017**, *237*, 677–684.
- (8) Grondin, E.; Shum Cheong Sing, A.; Caro, Y.; de Billerbeck, G. M.; François, J. M.; Petit, T. Physiological and Biochemical Characteristics of Ethyl Tiglate Production Pathway in the Yeast *Saprochaete Suaveolens*. *Yeast* **2015**, *32*, 57–66.
- (9) van Dijken JP, J.; Bauer, J.; Brambilla, L.; P, null; Francois, null; Gancedo, C.; Giuseppin, M.; Heijnen, J.; Hoare, M.; Lange, H.; Madden, E.; Niederberger, P.; J, null; Parrou, J.; Petit, T.; Porro, D.; Reuss, M.; van Riel, N.; Rizzi, M.; Steensma, H.; Verrips, C.; Vindelø, J.; Pronk, J. An Interlaboratory Comparison of Physiological and Genetic Properties of Four *Saccharomyces Cerevisiae* Strains. *Enzyme Microb. Technol.* **2000**, *26* (9–10), 706–714.
- (10) Winston, F. EMS and UV Mutagenesis in Yeast. In *Current Protocols in Molecular Biology*; Ausubel, F. M., Brent, R., Kingston, R. E., Moore, D. D., Seidman, J. G., Smith, J. A., Struhl, K., Eds.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2008.
- (11) Patston P.A.; Espinal J.; Beggs, M.; Randle P.J. Assay of Total Complex and Activity State of Branched-Chain Alpha-Keto Acid Dehydrogenase Complex and of Activator Protein in Mitochondria, Cells, and Tissues. In *Methods in Enzymology, Branched-Chain Amino Acids*; 1988; Vol. 166, pp 175–189.
- (12) Park, S. J.; Lee, S. Y. Identification and Characterization of a New Enoyl Coenzyme A Hydratase Involved in Biosynthesis of Medium-Chain-Length Polyhydroxyalkanoates in Recombinant *Escherichia Coli*. *Journal of Bacteriology* **2003**, *185* (18), 5391–5397.
- (13) Tan, M.; Caro, Y.; Sing, A. S. C.; Reiss, H.; Francois, J.-M.; Petit, T. Selection by UV Mutagenesis and Physiological Characterization of Mutant Strains of the Yeast *Saprochaete Suaveolens* (Former *Geotrichum Fragrans*) with Higher Capacity to Produce Flavor Compounds. *JoF* **2021**, *7* (12), 1031.

Criblage de la biodiversité microalgale de La Réunion à la recherche de sources potentielles d'astaxanthine

Samuel Jannel^{1,3} Yanis Caro^{1,2} Marc Bermudes³ Thomas Petit^{1,2}
samuel.jannel@univ-reunion.fr yanis.caro@univ-reunion.fr mbermudes@green-mascareignes.com
thomas.petit@univ-reunion.fr

¹ Laboratoire de Chimie et de Biotechnologie des Produits Naturels (ChemBioPro, EA 2212)
Université de La Réunion

² IUT de Saint Pierre, Université de La Réunion
Département Hygiène, Sécurité, Environnement

³ Green Mascareignes Technologies SAS (GMT)
Saint Denis, La Réunion

Thèmes – Chimie - Biologie - Santé - Biotechnologie

Résumé – *Le projet PhycoRed a été initié en 2018 par l'entreprise Green Mascareignes Technologies (GMT) en partenariat avec le Laboratoire ChemBioPro de l'Université de La Réunion et l'IUT de Saint Pierre. Son objectif est d'étudier la faisabilité de produire de l'astaxanthine, un caroténoïde à haute valeur ajoutée, à partir de la culture de souches de microalgues issues de la biodiversité locale. Dans ce cadre, nos travaux sont consacrés à la recherche de souches issues de la biodiversité réunionnaise capables de produire et d'accumuler de l'astaxanthine. Ces travaux ont permis d'isoler 11 souches génétiquement différentes, à partir d'échantillons d'eau douce prélevés aux quatre coins de l'île. Ces souches présentent des caractéristiques morphologiques similaires à l'espèce de référence, Haematococcus pluvialis, qui est déjà cultivée industriellement pour la production d'astaxanthine naturelle. Des analyses moléculaires et phylogénétiques ont révélé qu'elles appartenaient à deux genres différents décrits pour la première fois à La Réunion : Haematococcus et Dysmorphococcus. Des analyses chimiques ont confirmé que les souches locales d'Haematococcus étaient capables de produire de l'astaxanthine et révélé que Dysmorphococcus présentait également cette propriété.*

Mots-Clés – Biodiversité microalgale, Astaxanthine, Haematococcus pluvialis, Dysmorphococcus globosus.

1 Introduction

Le projet PhycoRed a été initié en 2018 par l'entreprise Green Mascareignes Technologies (GMT) en partenariat avec le Laboratoire de Chimie et de Biotechnologie de Produits Naturels (ChemBioPro) de l'Université de La Réunion et l'IUT de Saint Pierre. Son objectif est d'étudier la faisabilité de produire de l'astaxanthine à partir de la culture de souches de microalgues isolées localement. L'astaxanthine est un caroténoïde xanthophylle valorisable dans les domaines de la nutrition et de la santé pour ses multiples activités biologiques, notamment ses fortes propriétés antioxydantes [1]. Pour réaliser ce projet, nous avons d'abord prévu d'isoler des souches natives issues d'eaux douces de La Réunion et de sélectionner celles qui étaient naturellement capables d'accumuler de l'astaxanthine. La cible initiale était de rechercher des souches appartenant au genre *Haematococcus*, mondialement connu pour produire de l'astaxanthine, puis plus généralement, de sélectionner des souches appartenant à d'autres genres de l'ordre des Chlamydomonadales.

2 Méthodologie générale

Des prélèvements d'échantillons d'eau douce ont été réalisés dans différents lieux repartis sur l'ensemble de l'île de La Réunion (Figure 1). Les souches de microalgues ont ensuite été isolées grâce à des techniques de micromanipulation sur des cellules individualisées et ont été mises en cultures monoclonales dans des volumes croissants de milieu nutritif Bold Basal (de 100 µL à 3 L). La caractérisation morphologique par microscopie photonique a permis de sélectionner des souches en fonction de leurs similarités avec *Haematococcus pluvialis* (Figure 2). Leur identification génétique a été réalisée en comparant les séquences du gène codant pour l'ARN ribosomal 18S et du gène chloroplastique codant pour *rbcl* issues de ces souches, amplifiées par PCR et séquencées par la méthode de Sanger, avec la base de données GenBank de la NCBI grâce au logiciel en ligne BLAST [2–3]. A partir de ces résultats, des analyses phylogénétiques ont été effectuées grâce au logiciel MEGA X après alignement des séquences par le logiciel MUSCLE. La production de caroténoïdes a été stimulée par l'application de stress lumineux et/ou nutritionnels aux cultures, puis ces caroténoïdes ont été extraits de la biomasse en utilisant le mélange de solvants dichlorométhane:méthanol (25:75, v/v) [4]. Enfin, les caroténoïdes extraits ont été caractérisés par chromatographie sur couche mince haute performance en phase inverse (RP HPTLC) [5] et par chromatographie liquide haute performance en phase inverse (RP HPLC) [6].

3 Principaux résultats

Les missions de prélèvements dans 12 lieux du territoire

réunionnais ont permis de collecter 105 échantillons d'eau douce. A partir de 6 d'entre eux, issus de 5 lieux de collecte différents, 11 souches de microalgues présentant des caractéristiques morphologiques similaires à celles d'*H. pluvialis* ont pu être isolées et mises en culture de manière monoclonale. Deux exemples de souches isolées et de leur lieu de collecte sont présentés figure 1.

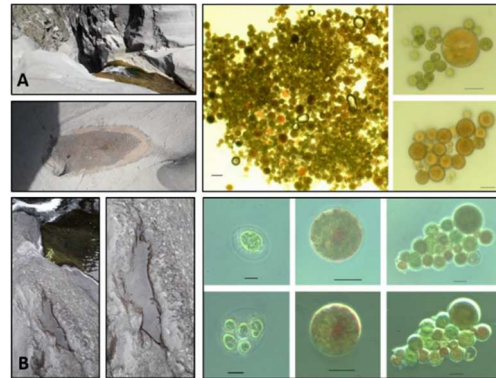


Figure 1 – Photographies de deux lieux de collecte d'échantillons et microphotographies de deux souches isolées qui en sont issues. A : souche CBR5 ; B : souche Lang2

L'identification génétique des 11 souches isolées et l'analyse phylogénétique ont montré que 2 souches (Lang2 et 3RB) appartenaient au genre *Haematococcus* mais qu'elles n'étaient pas identiques génétiquement, tandis que 9 souches appartenaient au genre *Dysmorphococcus* avec, là encore, une relative diversité génétique. La figure 2 présente un exemple d'arbre phylogénétique construit selon la méthode du maximum de vraisemblance basé sur l'analyse des séquences du gène codant pour l'ARN ribosomal 18S.

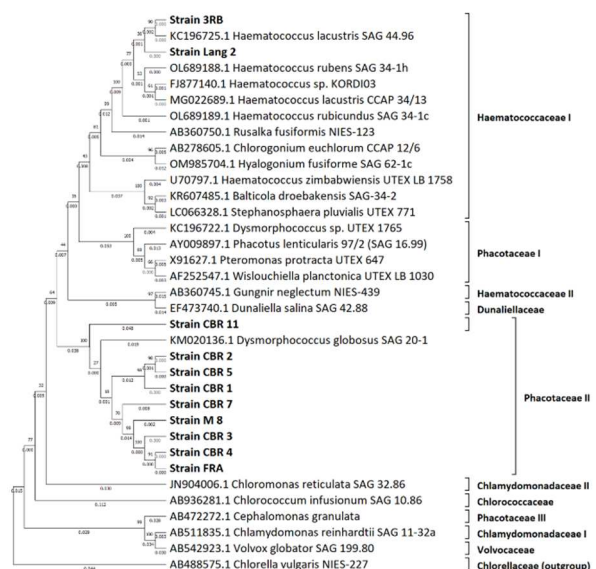


Figure 2 – Arbre phylogénétique des 11 souches isolées comparées certaines espèces appartenant à différentes familles de l'ordre des Chlamydomonadales.

Des souches sélectionnées ont été cultivées en photobioréacteur de 3 L et, après une phase verte de croissance végétative, des stress lumineux et nutritifs ont été appliqués jusqu'à constater une phase orange/rouge de caroténogénèse.

La caractérisation chimique des extraits de caroténoïdes obtenus après l'application de stress a montré que l'extrait issu de la souche Lang2 contenait 90 % d'astaxanthine sous différentes formes (dont 3 % sous forme libre, 88 % sous forme mono-estérifiée et 9 % sous forme di-estérifiée avec un ou deux acides gras, respectivement). L'extrait issu de CBR5 contenait quant à lui 46 % d'astaxanthine (dont 10 % libre, 68 % mono-esters et 22 % di-esters) (Figure 3). Ce résultat montre donc que des espèces du genre *Dysmorphococcus* sont aussi capables de produire de l'astaxanthine comme cela a été évoqué pour la première fois dans un récent article [7].

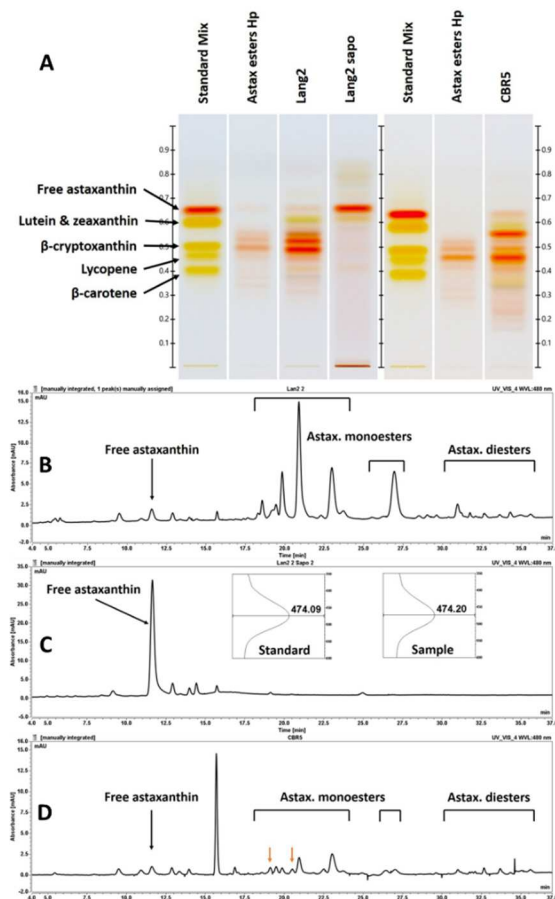


Figure 3 – Chromatogrammes d'extraits de caroténoïdes obtenus à partir de deux souches isolées. A : RP HPTLC en comparaison avec des standards ; B, C, D : RP HPLC (DAD à 480 nm) ; B : Lang2 ; C : Lang2 après saponification ; D : CBR5.

4 Conclusions et perspectives

Nos travaux ont permis d'isoler 11 souches présentant

des caractéristiques morphologiques similaires à celles d'*H. pluvialis* à partir de 6 échantillons prélevés dans 5 lieux de collecte différents de La Réunion. Parmi ces souches, 2 appartiennent au genre *Haematococcus* et 9 au genre *Dysmorphococcus*, tous deux décrits pour la première fois à La Réunion. Les extraits de caroténoïdes issus de la biomasse de la souche Lang2 (*Haematococcus*) ayant subi un stress contiennent environ 90 % d'astaxanthine sous formes libre et estérifiée. Les souches du genre *Dysmorphococcus* accumulent également de l'astaxanthine après l'exposition à des stress lumineux et nutritifs mais dans une moindre mesure. Des analyses biochimiques complémentaires sont en cours pour caractériser la biomasse et les extraits de ces souches. Des études physiologiques approfondies devront permettre d'optimiser les procédés de culture et ainsi rendre possible le changement d'échelle.

Références

- [1] Jannel, S., Caro, Y., Bermudes, M., & Petit, T. (2020). Novel insights into the biotechnological production of *Haematococcus pluvialis*-derived astaxanthin: Advances and key challenges to allow its industrial use as novel food ingredient. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 789. <https://doi.org/10.3390/jmse8100789>
- [2] Chekanov, K., Lobakova, E., Selyakh, I., Semenova, L., Sidorov, R., & Solovchenko, A. (2014). Accumulation of astaxanthin by a new *Haematococcus pluvialis* strain BM1 from the white sea coastal rocks (Russia). *Marine Drugs*, 12(8), 4504–4520. <https://doi.org/10.3390/md12084504>
- [3] Allewaert, C. C., Vanormelingen, P., Proschold, T., Gomez, P. I., Gonzalez, M. A., Bilcke, G., D'Hondt, S., Vyverman, W. (2015). Species diversity in European *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae, Volvocales). *Phycologia*, 54(6), 583–598. <https://doi.org/10.2216/15-55.1>
- [4] Yuan, J. P., & Chen, F. (2000). Purification of trans-astaxanthin from a high-yielding astaxanthin ester-producing strain of the microalga *Haematococcus pluvialis*. *Food Chemistry*, 68(4), 443–448. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00219-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00219-8)
- [5] Rodić, Z., Simonovska, B., Albreht, A., & Vovk, I. (2012). Determination of lutein by high-performance thin-layer chromatography using densitometry and screening of major dietary carotenoids in food supplements. *Journal of Chromatography A*, 1231, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.01.085>
- [6] Peng J, Xiang W Z, Tang Q M, Sun N, Chen F, Yuan J P. Comparative analysis of astaxanthin and its esters in the mutant E1 of *Haematococcus pluvialis* and other green algae by HPLC with a C30 column. *Sci China Ser C-Life Sci*, 2008, 51(12): 1108–1115
- [7] Zohir WF, Kapase VU, Kumar S (2022). Identification and Characterization of a New Microalga *Dysmorphococcus globosus*-HI from the Himalayan Region as a Potential Source of Natural Astaxanthin. *Biology* 2022, 11, 884. <https://doi.org/10.3390/biology11060884>

Caractérisations chimique et biologique en vue d'une valorisation d'espèces du genre *Weinmannia* endémiques : travaux préliminaires sur le tan rouge (*W. tinctoria*) de La Réunion

Shamsia Pithon¹, Jean-Hugues Renault², Simon Remy², Mahery Andriamanantena¹
Thomas Petit^{1,3} & Yanis Caro^{1,3}

shamsia.pithon@univ-reunion.fr ; yanis.caro@univ-reunion.fr ; jean-hugues.renault@univ-reims.fr

¹ Laboratoire de Chimie et Biotechnologie des Produits Naturels (CHEMBIOPRO), Université de La Réunion, F-97490 Sainte-Clotilde, Île de La Réunion, France

² Institut de Chimie Moléculaire de Reims, UMR CNRS 7312, Université de Reims Champagne Ardenne, 51687 Reims Cedex 2, France

³ IUT de La Réunion, Département Hygiène Sécurité Environnement (HSE), 97410 Saint-Pierre, Île de La Réunion, France.

Thèmes – Chimie - Biologie

Résumé – *L'absence de connaissances sur la caractérisation chimique et biologique des espèces endémiques malgaches et réunionnaises du genre Weinmannia en font des plantes à fort potentiel innovant dans la recherche de substances actives originales. Parmi les plantes sélectionnées, le tan rouge (W. tinctoria) est une plante emblématique de la Réunion dont aucune publication scientifique ne mentionne la composition chimique des extraits. Pour répondre au besoin de caractérisation de ces plantes endémiques, des travaux de thèse de doctorat ont été entrepris au laboratoire Chembipro, en collaboration avec l'Institut de Chimie Moléculaire de Reims, dont l'objectif est d'inventorier et de collecter plusieurs espèces de Weinmannia endémiques à Madagascar et à La Réunion, de créer une banque d'extraits naturels, d'évaluer les activités biologiques des extraits et d'identifier les composés présents dans les fractions d'intérêt. Les travaux de thèse ont été initiés récemment et les résultats présentés dans cette étude sont issus de travaux préliminaires réalisés dans le cadre du projet PLANTIN sur la caractérisation du pouvoir colorant des écorces et feuilles de tan rouge.*

Mots-Clés – *Weinmannia sp.*, caractérisation chimique et biologique, profilage chimique, tan rouge colorant naturel.

1 Introduction

Concernant les espèces du genre *Weinmannia* endémiques de Madagascar et de La Réunion, aucune étude scientifique ne rapporte de leur composition chimique ni de leurs propriétés biologiques. Seule une étude récente traite de la composition chimique de *W. trichosperma*, [1] une espèce endémique du Chili et d'Argentine.

Les objectifs de cette étude se décomposent en quatre volets : 1) inventorier et collecter des espèces de *Weinmannia* endémiques ; 2) extraire les substances des différentes espèces et créer une banque d'extraits ; 3) évaluer les activités biologiques et le pouvoir colorant de ces extraits ; 4) fractionner et identifier par profilage chimique les biomolécules présentes.

2 Matériels et méthodes

2.1. Inventaire et collecte des espèces endémiques de *Weinmannia* à La Réunion et à Madagascar

Les collectes seront effectuées à Madagascar et à La Réunion, en partenariat avec le CNARP (Centre National d'Application de Recherche Pharmaceutique) et le CBNM (Conservatoire Botanique National de Mascarin), respectivement. Les différentes parties végétales prélevées (écorces, tiges, feuilles) seront transportées et broyées *in situ* au laboratoire, réduite en poudre et lyophilisées pour être transportées au laboratoire Chembiopro à La Réunion. Un échantillon de chaque collecte sera répertorié à l'herbier du CBNM, et un stock de plante sèche sera conservé dans l'éventualité d'un besoin d'étude complémentaire.

2.2. Extraction des pigments et création d'une extractothèque

Deux procédés d'extraction seront mis en œuvre et comparés : l'ASE™ (*Accelerated Solvent Extraction*) et l'extraction assistée par ultrasons. Dans les deux cas, les solvants biosourcés et à faible impact environnemental seront privilégiés afin de respecter les principes de l'éco-extraction [2]. Les différents extraits seront obtenus avec la stratégie des extractions successives avec des solvants de polarité croissante dans le but d'épuiser progressivement la matière végétale en métabolites. Les extraits générés permettront de constituer une extractothèque, ou banque d'extraits naturels.

2.3. Caractérisation du pouvoir colorant

La couleur des extraits colorés sera caractérisée *via* un spectrophotocolorimètre qui mesurera les données L*a*b* du système international CIE L*a*b*. La stabilité de la couleur sera déterminée en fonction d'une gamme de pH,

de la température et du temps. La variation de la couleur par rapport au témoin, sera évaluée par la valeur de ΔE calculée comme suit : $\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$. Toute valeur de ΔE inférieure à 20 unités arbitraires sera considérée comme stable. Des tests de teinture des extraits colorés sur des fibres naturelles (laine et coton) seront effectués par une entreprise de teinturerie locale partenaire du projet (Whole).

3 Résultats et discussion

3.1. Inventaire et collecte des espèces endémiques de *Weinmannia* à La Réunion et à Madagascar

Les espèces du genre *Weinmannia* endémiques à La Réunion (2) et à Madagascar (28) sont répertoriées dans le **Tableau 1** [3]. Leur classement sur la liste rouge de l'IUCN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) y est également renseigné [4]. À ce stade de l'étude, seule *Weinmannia tinctoria*, une espèce endémique de La Réunion, a été collecté dans la forêt de Notre Dame de La Paix (**Figure 1**).



Figure 1. *Weinmannia tinctoria*. a : arbre ; b : récolte d'écorce ; c : feuille ; d : écorce séchée

Espèces de <i>Weinmannia</i>	Classement IUCN	Répartition géographique
<i>W. aggregata</i> Z.S.Rogers & J.Bradford	EN	Madagascar
<i>W. arguta</i> (Bernardi) J.Bradford	VU	Madagascar
<i>W. baehniiana</i> Bernardi	VU	Madagascar
<i>W. bojeriana</i> Tul.	-	Madagascar
<i>W. commersonii</i> Bernardi	-	Madagascar
<i>W. decora</i> Tul.	LC	Madagascar
<i>W. eriocarpa</i> Tul.	LC	Madagascar
<i>W. henricorum</i> Bernardi	CR	Madagascar
<i>W. hepaticarum</i> Bernardi	EN	Madagascar
<i>W. hildebrandtii</i> Baill.	LC	Madagascar
<i>W. humberiana</i> Bernardi	-	Madagascar
<i>W. humblotii</i> Bail.	LC	Madagascar
<i>W. icacifolia</i> Bernardi	-	Madagascar
<i>W. integrifolia</i>	-	Madagascar
<i>W. louveliana</i> Bernardi	EN	Madagascar
<i>W. lowryana</i> J.Bradford	EN	Madagascar
<i>W. lucens</i> Baker	LC	Madagascar
<i>W. madagascariensis</i> DC. Ex Ser.	-	Madagascar
<i>W. magnifica</i> J.Bradford & Z.S.Rogers	EN	Madagascar
<i>W. mammea</i> Bernardi	VU	Madagascar
<i>W. marojejensis</i>	CR	Madagascar
J.S.Mill. & J.Bradford		
<i>W. mauritiana</i> D.Don	LC	La Réunion

<i>W. minutiflora</i> Baker	-	Madagascar
<i>W. pauciflora</i> J.Bradford	-	Madagascar
<i>W. rakotomalazana</i> J.Bradford	EN	Madagascar
<i>W. rutenbergii</i> Engl.	LC	Madagascar
<i>W. sanguisugarum</i> Bernardi	EN	Madagascar
<i>W. stenostachya</i> Baker	LC	Madagascar
<i>W. tinctoria</i> Sm.	CR	La Réunion
<i>W. venusta</i> Bernardi	EN	Madagascar

Tableau 1. Liste des espèces de *Weinmannia* présentes à Madagascar et à La Réunion ainsi que leur classement sur la liste rouge de l’UICN. * Statut de conservation UICN : LC : préoccupation mineure, VU : vulnérable, EN : en danger, CR : en danger critique d’extinction.

3.2. Extraction des colorants

La méthode d’extraction par ASE à 70% d’éthanol a été utilisée pour la production d’extraits colorants issus des écorces et des feuilles de *W. tinctoria* (Figure 2). Les rendements d’extrait sec à partir de la matière sèche végétale sont de 16,9% et de 18,1% respectivement.



Figure 2. Extrait liquide d’écorces de *W. tinctoria* (gauche) et de feuilles (droite).

3.3. Caractérisation du pouvoir colorant

Les extraits ont été resolubilisé à des concentrations allant de 1 à 32 mg/mL dans la solution hydroalcoolique. Les résultats des données $L^*a^*b^*$ des couleurs des extraits sont indiqués à la Figure 3. L’extrait d’écorce présente une couleur rouge intense alors que l’extrait de feuille est jaune/verdâtre.

L’extrait colorant d’écorces est relativement stable jusqu’à 95°C. La couleur de l’extrait demeure intéressante : rouge prononcé à pH alcalin et orangé à pH acide.

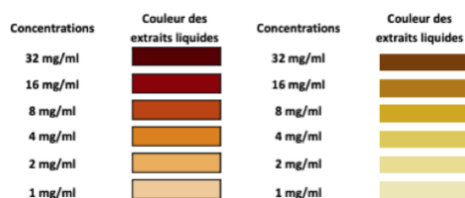


Figure 3. Simulation des couleurs des extraits à 1, 2, 4, 8, 16 et 32mg/ml.

Un premier test de teinture sur coton et sur laine combiné avec différents mordançages a été réalisé avec les extraits d’écorce et de feuille de *W. tinctoria*. L’extrait d’écorce teint les fibres dans les teintes rouges intenses, alors que

l’extrait de feuille dans les teintes noires verdâtre et jaunes (Figure 4).



Figure 4. Test de teinture des extraits d’écorce (gauche) et de feuille (droite) de *W. tinctoria* sur coton et laine.

4 Conclusion

Considérant ces résultats préliminaires, l’espèce *Weinmannia tinctoria* pourrait être utilisée en teinturerie pour la coloration de fibres naturelles telles que le coton ou la laine en rouge et en jaune verdâtre, selon les mordants mis en œuvre. Des études complémentaires concernant la solidité de la couleur dans le temps et avec une exposition aux UV devront être réalisées pour confirmer ces résultats. De plus, la stabilité de la couleur des extraits d’écorce à haute température pourrait permettre leur application en industrie pour la coloration de bioplastiques.

5 Remerciements

Les auteurs remercient Aurélia Wolff qui a fourni les supports techniques pour la teinture de la laine et du coton. Nous remercions le Parc National de la Réunion et l’Office National des Forêts (ONF) qui ont autorisé la collecte du matériel végétal protégé. Ce travail a été soutenu financièrement par des subventions de l’Europe et du Conseil Régional de La Réunion (RE0022957 / GURDTI/20200508-0022957).

Références

- [1] Barrientos, Ruth, Carlos Fernández-Galleguillos, Edgar Pastene, Mario Simirgiotis, Javier Romero-Parra, Shakeel Ahmed, et Javier Echeverría. 2020. « Metabolomic Analysis, Fast Isolation of Phenolic Compounds, and Evaluation of Biological Activities of the Bark From *Weinmannia Trichosperma* Cav. (Cunoniaceae) ». *Frontiers in Pharmacology* 11 (mai): 780. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00780>.
- [2] Chemat, Farid. 2011. *Eco-extraction du végétal*. Dunod. <https://hal.inrae.fr/hal-02804831>.
- [3] « *Weinmannia* L. | Plants of the World Online | Kew Science ». s. d. *Plants of the World Online*. Consulté le 12 juillet 2022. <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:328438-2>.
- [4] Bradford, Jason C. 2001. « The Application of a Cladistic Analysis to the Classification and Identification of *Weinmannia* (Cunoniaceae) in Madagascar and the Comoro Islands », 10.

Des mesures dans le bâtiment de l'IUT : un exemple de SAé pour la recherche

Yacine Boufkhad^{1,2} Steeve Reisberg^{1,3} Laurent Royon^{1,4} Xiaofeng Guo^{1,4}

yacine.boufkhad@u-paris.fr

xiaofeng.guo@u-paris.fr

¹ IUT de Paris Pajol, Université Paris Cité

² Institut de recherche en informatique fondamentale, UMR 8243

³ Laboratoire Interfaces Traitements Organisation et DYnamique des Systèmes, UMR 7086

⁴ Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain, UMR 8236

THÈMES – *Énergie - Informatique - Électronique - Mathématiques - Objets connectés - Mesures Physiques*

RÉSUMÉ – *Dans le contexte de crise énergétique actuelle, les bâtiments publics dans l'enseignement supérieur et la recherche ont un rôle à jouer pour moins consommer de l'énergie et mieux servir leurs usagers. Au sein de l'IUT de Paris Pajol, un projet pédagogique a été expérimenté. Le projet, sous la forme pour l'instant d'une SAé pilote a consisté à instrumenter certaines salles de manière non-intrusive et ce sur plusieurs paramètres physiques. Les données récoltées ont permis de mieux comprendre le fonctionnement du bâtiment et ses systèmes énergétiques. Une modélisation par bilan de masse est proposée et a été validée par les données expérimentales. L'idée est d'étendre le système développé à d'autres paramètres et le déployer sur d'autres bâtiments anciens du même type où il y a une difficulté technique majeure pour mener un audit énergétique précis.*

MOTS-CLÉS – *Mesures Physiques, Situation d'Apprentissage et d'évaluation, Dioxyde de Carbone, Modélisation*

1 Introduction

La SAé présentée dans cet article s'inscrit dans un projet pédagogique plus large et lié à la recherche sur l'énergie et le confort du bâtiment. L'idée centrale du projet est d'utiliser le bâtiment de l'IUT de Paris Pajol comme support où on peut déployer diverses activités pédagogiques destinées aux étudiants du BUT Mesures Physiques. Ces activités (TP, SAé et projets) sont réalisées dans une démarche qui s'inscrit dans les problématiques environnementales, d'économie d'énergie et du confort des usagers tout en étant intégrée dans la logique du cursus universitaire et des apprentissages techniques et professionnalisants définis par le programme national du BUT.

2 La SAé

Elle est destinée aux étudiants du BUT Mesures Physiques en première année. Elle regroupe les SAé 1.01 : traiter des données de mesures et 1.05 : Concevoir et coder des utilitaires informatiques pour la physique définies dans le programme national. Le lien est naturel entre ces deux SAé puisque le traitement des données est toujours informatisé. Par conséquent, les regrouper dans une même application informatique que les étudiants doivent développer a du sens. Le travail proposé consiste à écrire un programme qui permet la consultation et l'acquisition de données à travers des capteurs distants qui transitent par un serveur déjà installé et fonctionnel pour les analyser puis restituer sous une forme exploitable. Ce travail classique pour une chaîne de mesures est mis dans un contexte professionnel où les données récupérées et analysées concernent le taux de CO₂, la température et l'humidité dans certaines salles de cours utilisées par les étudiants.

2.1 Intérêt pédagogique et place dans le programme

Le premier intérêt réside dans la mise en situation professionnelle réaliste. Les grandeurs mesurées dans un lieu familier en lien avec l'emploi du temps de l'étudiant ont un sens concret qui apporte une motivation supplémentaire au traitement des données qui résultent des mesures. Sensibilisés à la problématique de l'aération des salles de cours qui s'est particulièrement posée durant la crise sanitaire et à celle des économies de chauffage durant l'hiver 2022/2023, les étudiants voient l'utilité immédiate de faire ces mesures dans un objectif de diagnostic du bâtiment. De plus, on suscite beaucoup d'intérêt chez les étudiants en leur expliquant que leurs programmes vont servir à collecter des données qui seront par la suite exploitées de diverses manières pour le recherche et notamment dans le domaine de l'environnement.

2.2 Déroulement dans la SAé et évaluation

Tout le matériel pédagogique de la SAé est hébergé sous la forme d'un cours sur Moodle. L'installation des

capteurs et du réseau est présenté aux étudiants comme ayant été faits par une société extérieure qui a fait faillite avant d'avoir fini le projet et qui a laissé une documentation éparse et incomplète. Les étudiants sont donc chargés de finir le volet de consultation, acquisition et traitement des données que la société n'a pas réalisées. Un cahier des charges définit ce qui est attendu avec notamment trois livrables avec des échéances précises. La documentation est volontairement touffue et comporte des informations qui ne sont pas directement utiles pour la SAé. Aux étudiants de faire le tri et d'identifier ce qui est nécessaire au travail demandé. L'évaluation comporte un volet d'auto-évaluation par l'étudiant de son travail, un volet d'évaluation par les pairs. Les étudiants testent les programmes les uns des autres et émettent des remarques. Enfin, ce travail d'évaluation par les pairs ainsi que la réalisation elle-même est noté par l'enseignant selon une grille qui décompose les apprentissages critiques définis dans le programme national.

Un exemple de courbe d'acquisition est donné en Fig. 1, où on remarque clairement la montée en température d'une salle occupée durant la période de chauffage.

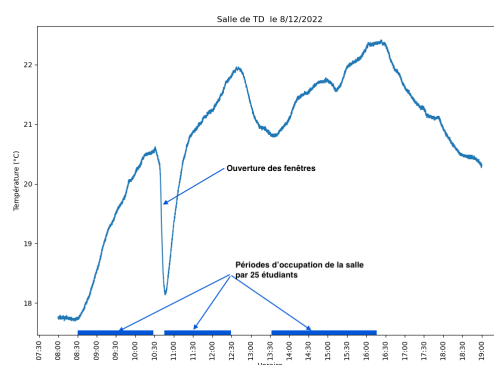


FIGURE 1 – Exemple de relevé de température sur une journée ouvrée dans une salle de TD, corrélé à l'occupation.

3 Exploitation des données pour la recherche : un modèle d'évolution du taux de CO₂ dans une salle

Des techniques d'analyse peuvent être basées sur la physique du bâtiment ou sur la data, voire les deux dans une approche dite hybride [1-3]. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons un modèle physique mono-zone pour analyser le phénomène de transfert de masse dans une salle de TD, en prenant en compte de le renouvellement d'air, des émissions de CO₂ des occupants ainsi que le planning des enseignements.

Le bilan de matière dans une salle ventilée mécanique-

ment, avec une émission de CO₂ par occupant notée \dot{s} , s'écrit :

$$\frac{dC}{dt} = \tau(C_{ext} - C) + \nu\dot{s} \quad (1)$$

où C est la concentration du CO₂ supposée homogène dans la salle, $C_{ext} = 420$ ppm est celle de l'air neuf. τ est le taux de renouvellement d'air par rapport au volume total en vol/h, et enfin ν est le taux d'occupation en occupant/m³.

La solution analytique de ce modèle réduit montre une courbe exponentielle dont l'allure dépend du taux de renouvellement d'air τ :

$$C = (C_{ini} - C_{ext})e^{-\tau t} + C_{ext} + (1 - e^{-\tau t})\frac{\nu}{\tau}\dot{s} \quad (2)$$

avec C_{ini} la teneur initiale de CO₂.

Les résultats du modèle permettent la confrontation des données de mesures réalisées dans la SAé et celles issues du modèle. Fig.2 montre l'évolution de la concentration du CO₂ sur une journée type en semaine. 25 étudiants ont été présents lors de trois séances de TD du matin. Quant à l'après midi, la salle a été inoccupée par des enseignements mais en libre accès. A noter que la porte de la salle est automatiquement fermée après chaque passage durant les pauses.

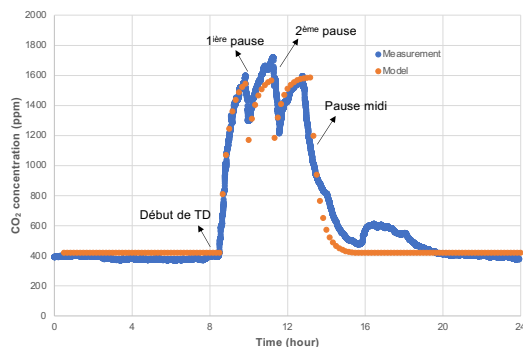


FIGURE 2 – Comparaison des concentration de CO₂ entre relevé et modèle. Données sur une journée ouvrée dans une salle de TD où il y a trois séances de TD le matin et en libre accès l'après midi.

Nous constatons globalement une très bonne adéquation entre le modèle et les mesures, en particulier sur la montée de la courbe au démarrage de la journée (premier TD). Durant cette période, il n'y a pas eu d'ouvertures de portes ou fenêtres jusqu'à la pause. Le léger décalage sur la descente est dû à la présence des occupants en salle pendant la pause, contrairement au modèle qui suppose une présence nulle. De ce fait, le modèle prédit une plus faible concentration avant le démarrage du second TD. Ainsi le pic de concentration constaté par les mesures n'apparaît pas dans le modèle. De la même manière, la présence de certains

étudiants dans la salle en accès libre, entre 16h et 18h, a contribué à l'augmentation de CO₂. Le modèle ne tient pas en compte de cela. A terme, un détecteur du nombre d'occupants serait nécessaire afin de mieux chiffrer leur nombre en particulier sur les créneaux horaires hors planning scolaire.

A noter que les données recueillies ainsi que le code de traitement développé par les étudiants servent à la recherche actuellement sur deux volets : une collaboration entre les laboratoires LIED et IRIF pour le développement d'un modèle basé sur le deep learning pour prédire l'évolution du taux de CO₂ en fonction de l'occupation ou, à l'inverse, la déduction de l'occupation des salles grâce au taux de CO₂ et une collaboration avec le laboratoire ITO-DYS pour valider des prototypes de capteurs de CO₂ à base d'électronique imprimée.

4 Conclusions

On peut voir la SAé décrite et le travail de modélisation qui en résulte comme une preuve de concept pour le projet PajolConnecté qui démarre cette année et qui consiste à instrumenter le bâtiment de l'IUT dans le but de mesurer bien d'autres grandeurs que le taux de CO₂, température et humidité... afin, toujours, de faire des audits qualité du bâtiment dans les domaines de l'énergie, de la qualité de vie et de confort. Les outils développés et les données recueillies durant un semestre sont utilisés dans des projets de recherche dans le domaine de qualité de l'air et d'énergie ainsi que dans le développement de capteurs.

5 Remerciements

Le projet PajolConnecté a bénéficié du soutien financier du projet IdEx Université de Paris (ANR-18-IDEX-0001). Nous remercions l'ensemble des personnels techniques pour leur collaboration sur la mise en place des capteurs.

Références

- [1] Bourdeau, M., Zhai, X.-Q., Nefzaoui, E., Guo, X., Chatellier, P. Modelling and forecasting building energy consumption : a review of data-driven techniques. *Sustain. Cities Soc.* 48, 101533 (2019).
- [2] Bourdeau, M., Guo, X., Nefzaoui, E. Buildings energy consumption generation gap : A post-occupancy assessment in a case study of three higher education buildings. *Energy Build.* 159, 600–611 (2018).
- [3] Allab, Y., Pellegrino, M., Guo, X., Nefzaoui, E., Kindinis, A. Energy and comfort assessment in educational building : Case study in a French university campus. *Energy Build.* 143, 202–219 (2017).

Récupération d'énergie électromagnétique avec une rectenna réalisée en impression 3D par dépôt de fil fondu

Tristan FOUGEROUX¹ Alexandre DOUYERE¹ Nour Mohammad MURAD²
Julie SIBILLE¹ Laurent CHANE KUANG SANG¹ Jean-Lou DUBARD³

tristan.fougeroux@univ-reunion.fr

¹ IUT, Université de La Réunion,
Laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procédés (LE²P - ENERGY ^{Lab})

² IUT, Université de La Réunion,
Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie,
L'Environnement et le Bâtiment (PIMENT^{Lab})

³ IUT, Université Côte d'Azur,
Laboratoire d'Electronique Antennes et Télécommunications (LEAT)

THÈMES – *Énergie - Environnement - Informatique - Électronique*

RÉSUMÉ – *Dans un contexte où la consommation d'énergie est une variable très importante, il est primordial de réduire notre consommation et d'éviter les pertes énergétiques. La multiplication des points d'accès sans fil fait allusion à la possibilité de collecter l'énergie électromagnétique ambiante inutilisée. Ces sources d'énergie inexploitées se développent de plus en plus, en raison de la croissance rapide de l'activité des communications sans fil. La plupart de ces émissions sont omnidirectionnelles et permanentes dans le temps. La disponibilité de cette énergie rayonnante peut devenir intéressante pour certaines applications de faible consommation. La récupération de cette énergie peut représenter une alternative énergétique capable de remplacer totalement ou en partie, la batterie de certains microsystèmes. L'objectif du présent article est de concevoir et tester un dispositif de récupération d'énergie électromagnétique réalisé par impression 3D à l'aide de filament conducteur.*

MOTS-CLÉS – *Antenne, Convertisseur RF/DC, Rectenna, Impression 3D*

1 Introduction

Dans un contexte où la question de l'énergie est au cœur du débat de notre société, le constat de l'augmentation du nombre d'objets connectés peut être mis en corrélation avec l'augmentation de la consommation énergétique mondiale. Le nombre d'objets connectés en France est évalué à 244 millions par l'ADEME et l'ARCEP dans une étude de janvier 2022. Cela représente 15% de la consommation électrique des biens et des services numériques [1]. Cependant, les systèmes de télécommunication actuels (5G, Wifi, Bluetooth, Radio, ...) produisent des ondes électromagnétiques pour communiquer. Une partie de ces ondes ne sont pas utilisées et sont perdues dans l'environnement. Ainsi, pour alimenter totalement ou partiellement les objets connectés, la solution rectenna se positionne comme une alternative intéressante pour recycler la pollution électromagnétique ambiante de divers systèmes de télécommunication sans fil.

La rectenna, pour rectifying antenna ou antenne redresseuse, est le dispositif qui permet de convertir les ondes électromagnétiques en électricité. Elle se compose généralement d'une antenne qui permet de collecter les ondes électromagnétiques et d'un circuit redresseur qui convertit les signaux Radio Fréquence (RF) en Courant Continu (CC). Dans une chaîne de récupération d'énergie électromagnétique ambiante, l'objectif est d'alimenter à distance un objet, tel qu'un capteur ou un microsystème embarqué consommant très peu de puissance (FIGURE 1).

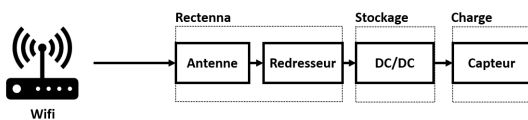


FIGURE 1 – Chaîne de récupération d'énergie électromagnétique.

Généralement, les méthodes de fabrication dites soustractive sont utilisées pour réaliser une rectenna, comme la gravure chimique ou mécanique. Ces méthodes consistent à usiner du cuivre sur un substrat pour obtenir le circuit souhaité. Cependant, ces méthodes comportent certains inconvénients, comme la perte de matière due à l'usinage, le traitement et l'utilisation de produit chimique ou encore la difficulté de réalisation de circuit comportant des formes géométriques complexes. Pour surmonter ces problématiques, il est possible d'utiliser une technique de réalisation antagoniste qu'on nomme la Fabrication Additive (FA), plus communément appelée l'impression 3D. On distingue plusieurs techniques d'impression 3D : DFF, SLA, DLP, LCD, SLS [2]. Ici, le Dépôt de Fil Fondu (DFF) sera utilisé pour réaliser la rectenna. Cette technologie est accessible au grand public à bas coût et offre plus de liberté

de conception. Dans cette étude, nous proposons d'établir une récupération d'énergie sans fil avec une rectenna réalisée en impression 3D DFF. Un banc d'expérimentation représentant un cas de récupération d'énergie électromagnétique est présenté et permet de valider le fonctionnement de la rectenna.

2 Méthodes et matériaux

2.1 Conception de la rectenna en H

Généralement, la conception d'une rectenna débute par son antenne qui est un élément essentiel à la collecte des ondes électromagnétiques environnantes. Ici, une borne d'accès Wifi à 2,45 GHz représente la source. L'antenne, un dipôle en H, est conçue et adaptée à cette même fréquence. Ses dimensions vont conditionner directement son fonctionnement.

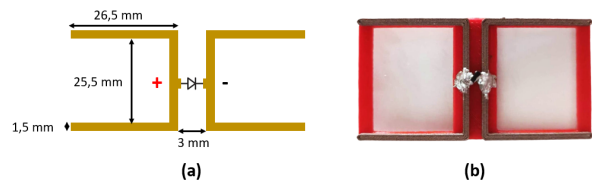


FIGURE 2 – Le schéma (a) et la photo (b) de la rectenna en H.

Cependant, étant donné la topologie de notre rectenna, les éléments du redresseur (diode et condensateur) perturbent l'adaptation de l'antenne et donc le rendement de celle-ci. Il faut alors prendre en compte cette perturbation et ajuster les dimensions de l'antenne en conséquence pour garder une fréquence de fonctionnement de l'antenne à 2,45 GHz. Les redresseurs sont caractérisés selon leur capacité à convertir efficacement les signaux RF en courant continu, avec un minimum de puissance dissipée. Il y a plusieurs types de topologie de redresseur, mais dans notre cas la topologie parallèle est la plus appropriée et la plus simple à mettre en application. L'élément central du redresseur est la diode Schottky, de par son seuil de tension très bas et son temps de commutation très court. La FIGURE 2(a) montre les dimensions finales de la rectenna réalisée. Pour concevoir l'antenne avec une imprimante 3D de technologie DFF, un filament conducteur, à base de particules de cuivre, appelé Electrifi [3] est utilisé. Le filament conducteur est imprimé sur du PLA (acide polylactique) afin de solidifier la structure. La photo de la rectenna finale est visible sur la FIGURE 2(b).

2.2 Banc d'expérimentation

En pratique, pour simuler le fonctionnement d'une box internet, nous faisons le choix en émission d'une antenne omnidirectionnelle avec une puissance maximale fixe de

+20 dBm (100 mW) à une fréquence de 2,45 GHz. Un PXIe-5652 est utilisé comme générateur de données avec une modulation Phase-Shift Keying (PSK). Les deux éléments sont alors couplés pour créer une communication d'information. En récupération d'énergie ambiante, on sait que les densités de puissance récoltées sont très faibles. Il est donc nécessaire d'accumuler de l'énergie pour pouvoir alimenter un système. Pour cela, il est possible d'utiliser un convertisseur DC/DC en élévateur de tension. Dans le cas de cette étude, on utilise le circuit pompe de charge S-882Z [4] couplé à un condensateur de 470 μ F. Dans notre configuration, la tension en entrée doit être au minimum à 0,3 V et la tension de sortie fixée par la référence du composant est ici de 1,8 V. Cependant, la tension de sortie n'est pas disponible instantanément, la charge et décharge du condensateur détermine temporellement le cycle de fonctionnement. À 23 cm de l'antenne émettrice, nous obtenons la tension minimale nécessaire au fonctionnement de notre dispositif à savoir rectenna et convertisseur DC/DC. Un capteur de température très faible consommation (MT-1) est choisi comme application directe. Ainsi, on montre qu'il est possible de visualiser la température sur un écran LCD non rétroéclairé. La FIGURE 3 montre le schéma du banc d'expérimentation.

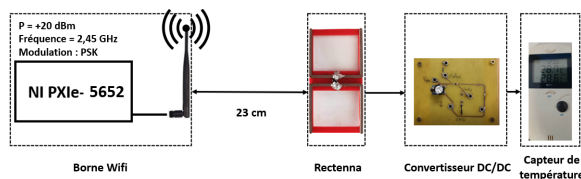


FIGURE 3 – Banc de mesure

3 Mesures et analyses

Afin d'évaluer le fonctionnement de la chaîne de récupération d'énergie avec notre rectenna, des mesures de tensions et de courant sont effectuées à l'aide du multimètre Keysight 34465 A. La FIGURE 4 montre les résultats de mesure de tension aux bornes du condensateur et de courant consommé par le capteur de température. La rectenna est capable de fournir une tension d'environ 0,3 V à une distance de 23 cm de l'antenne omnidirectionnelle avec un débit d'informations en continu. Cette tension alimente le circuit pompe de charge qui charge complètement un condensateur de 470 μ F en 5 minutes et 18 secondes. Après une charge complète, le condensateur se décharge en alimentant le capteur de température pendant 37 secondes. Lorsque la tension aux bornes du condensateur atteint 1,3 V, le capteur n'est plus alimenté et le condensateur repasse en mode chargement. Cependant, partant de 1,3 V, la recharge dure 2 minutes et le processus devient alors périodique.

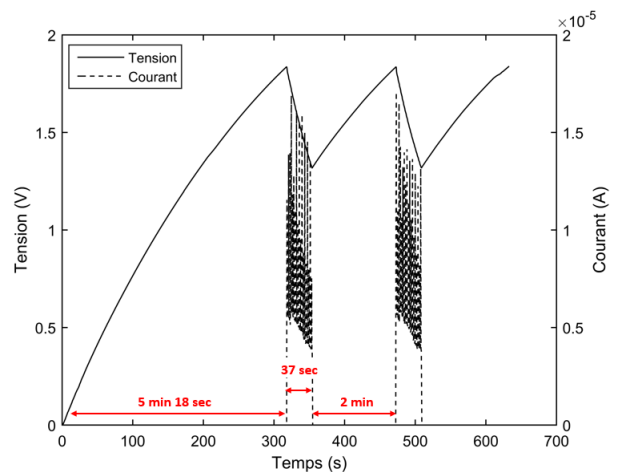


FIGURE 4 – Résultats de mesure

4 Conclusions

Une chaîne de récupération d'énergie sans fil a été présentée avec une rectenna réalisée par impression 3D DFF. Les résultats montrent la possibilité de récupérer 0,67 mJ de la pollution électromagnétique ambiante avec une rectenna réalisée en impression 3D. En augmentant la surface de collecte par un réseau de plusieurs rectennas interconnectées, il serait alors possible de s'éloigner de la borne Wifi, d'alimenter des systèmes plus énergivore ou encore d'améliorer les temps de fonctionnement du capteur de température.

5 Remerciements

Ces travaux ont reçu le soutien financier de la Région Réunion et de l'Union Européenne - Fonds européen de développement régional (FEDER) PO -2020.

Références

- [1] Etude de l'Ademe et de l'Arcep; Online (2022). <https://www.vie-publique.fr/rapport/283458-impact-environnemental-du-numerique-en-france>.
- [2] Ben Redwood, Filemon Schöffner, and Brian Garret. *The 3D printing handbook : technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017.
- [3] Site internet du vendeur du filament Electrifi; Online (2022). <https://www.multi3dllc.com/product/electrifi/>.
- [4] Datasheet du circuit pompe de charge; Online (2022). <https://cdn.hackaday.io/files/10801462109984/S-882Z.pdf>.

La restauration des écosystèmes : de l'amélioration des services écosystémiques à la restauration écologique

Léo Rocher¹ Léa Saby¹ Romane Blaya¹ Sarah Kubien¹ Emile Melloul¹
Clémentine Mutillod¹ Aure Durbecq¹ Armin Bischoff¹ Olivier Blight¹ Thierry
Dutoit¹ Marthe Lucas¹ François Mesléard^{1,2} Hervé Ramone¹ Christel
Vidaller¹ Elise Buisson¹

prenom.nom@univ-avignon.fr

¹ IUT, Avignon Université

IMBE – Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie, UMR 7263, Avignon Univ, CNRS, IRD, Aix Marseille Univ

² Institut de Recherche Pour la Conservation des Zones Humides Méditerranéennes Tour du Valat, Le Sambuc, Arles 13200, France

Thèmes – *Biologie - Droit - Environnement – Autre (Ecologie)*

Résumé – *La restauration des écosystèmes consiste à inverser leur dégradation afin de retrouver leur fonctionnalité et leur capacité à répondre aux besoins de la société. Au sein de l'équipe « Ingénierie de la Restauration des Patrimoines Naturels et Culturels » de l'UMR « Institut Méditerranéen de Biodiversité et Ecologie » sur l'IUT d'Avignon, nous travaillons en écologie de la restauration, une branche des sciences écologiques qui fournit les concepts et les outils pour la mise en pratique de la restauration. Nous étudions différents types d'écosystèmes (naturels, semi-naturels et agro-écosystèmes) pour identifier i) les processus clés qui limitent leur résilience naturelle après dégradations anthropiques, ii) les actions à mettre en œuvre pour les restaurer et iii) la mesure du succès de la restauration. En particulier, nous étudions les relations sol - plantes, plantes - plantes et plantes - arthropodes ainsi que le droit de la protection de la nature. Nous présentons ici trois cas d'étude qui illustrent la variété de nos approches : l'amélioration des services écosystémiques, la restauration de pelouses pour le pâturage ovin, et le contrôle d'espèces exotiques envahissantes en milieu naturel.*

Mots-Clés – *écologie de la restauration, réhabilitation, agroécologie.*

1 Introduction

La restauration des écosystèmes consiste à inverser leur dégradation afin de retrouver leur fonctionnalité écologique et d'améliorer leur productivité et leur capacité à répondre aux besoins de la société [1]. Au sein de notre équipe, nous travaillons en écologie de la restauration, une branche des sciences écologiques qui fournit les concepts, les modèles et les outils pour la mise en pratique de la restauration des écosystèmes. Nous étudions différents types d'écosystèmes (naturels, semi-naturels et agro-écosystèmes) pour identifier i) les processus clés qui limitent leur résilience après dégradation anthropique, ii) les actions à mettre en œuvre pour les restaurer et iii) la mesure du succès de la restauration. En particulier, nous étudions, dans le cadre de la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature pour la restauration écologique, les relations sol - plantes, plantes - plantes et plantes - arthropodes (e.g. insectes et araignées) ainsi que le droit de la protection de la nature. Nous présentons ici trois cas d'étude qui illustrent la variété de nos approches.

2 Améliorer les services écosystémiques dans les agro-écosystèmes

La surexploitation des sols, l'utilisation massive d'intrants, et l'homogénéisation des surfaces de cultures sont des causes directes de la perte de biodiversité et notamment de celles des arthropodes [2]. La restauration de structures semi-naturelles (haies, bandes enherbées, etc.) dans les paysages agricoles apparaît ainsi comme une solution pour une agriculture plus durable. Il s'agit à la fois d'augmenter la diversité végétale ainsi que la complexité du paysage. En verger et vignobles, les couverts végétaux permanents peuvent alors offrir des bénéfices. Bien que constitué d'espèces n'apportant aucun gain financier direct (pas de production de biomasse valorisable financièrement), le couvert végétal apporte des avantages agronomiques et environnementaux. En fournissant une diversité et abondance de niches écologiques, les couverts végétaux augmentent la biodiversité [3]. L'enherbement et sa diversité contribuent également à une meilleure structuration du sol [4] ainsi qu'à la lutte contre les espèces adventices [5].

Dans ce cadre, nos recherches visent à rétablir des couverts végétaux en vignobles, avec une composition spécifique et fonctionnelle attractive pour les arthropodes bénéfiques (i.e. arthropodes participant au contrôle biologique, à la pollinisation, et à la dégradation de matière organique). Deux mélanges de graines ont été testés en 2021 sur 12 hectares : un mélange haute diversité constitué de 22 espèces (flore locale présentant des ressources pour pollinisateurs et ennemis naturels) et un enherbement plus traditionnel, appelé basse diversité,

constitué seulement de deux espèces de graminées (Ray-Grass *Lolium perenne* et Fétuque rouge *Festuca rubra*).

Les résultats six mois après le semis montrent que la richesse en espèces végétales est marginalement supérieure sur les parcelles semées avec le mélange haute diversité par rapport aux parcelles semées avec le mélange basse diversité (Figure 1A).

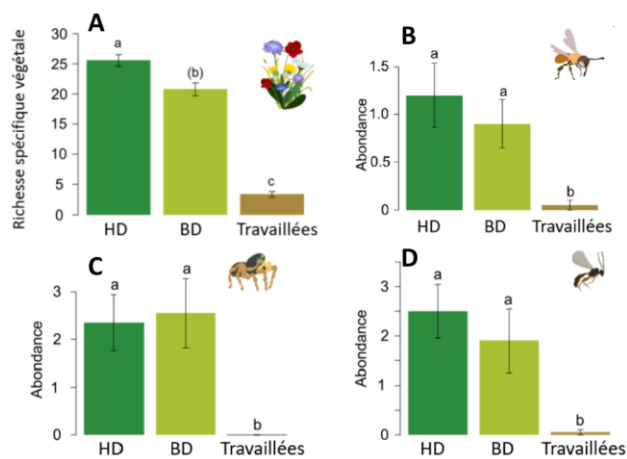


Figure 1 – Différence de richesse végétale ou d'abondance en arthropodes auxiliaires en fonction des trois modalités : Mélange haute diversité (HD), Mélange de basse diversité (BD) et parcelles travaillées et non-semées. A. Richesse spécifique végétale, B. Abeilles sauvages, C. Araignées, D. Micro-hyménoptères (Rocher, inédit).

Nous ne mesurons pas par contre de différences significatives pour les trois groupes d'arthropodes considérés (Figure 1). Des nouveaux relevés sont prévus en 2023.

3 Restaurer des pelouses sèches pour le pâturage ovin

La législation actuelle oblige la remise en état des carrières suite à leur exploitation [6]. Lorsque l'objectif est de restaurer un écosystème proche de celui ayant préexisté, comme par exemple des terres de parcours ovin semi-naturelles méditerranéennes, la restauration des conditions du sol (isolement de la nappe phréatique, épaisseur du substrat) est un préalable indispensable. Nous avons ensuite testé un grand nombre d'actions de restauration pour s'approcher de l'écosystème souhaité (Figure 2) [7] : transfert de sol, mélanges de terre et de matériaux bruts, labour profond semis d'espèces clés, semis de mélange de graines, transfert de foin, transfert de graines récoltées par les fourmis.



Figure 2 – A gauche : restauration de substrats constitués de différents mélanges de terre et de matériaux bruts [8] ; A droite : semis d'un mélange de graines, transfert de foin ou de graines récoltées par les fourmis (étude en cours) (crédits photos J. Chenot-Lescure et L. Saby, IMBE).

Le mélange 50% terre – 50% matériaux bruts permet de reconstituer un substrat avec le meilleur compromis entre la colonisation des espèces typiques des parcours ovins et la colonisation par des espèces non-cibles (mauvaises herbes). Ce mélange assure également une quantité substantielle de substrat recréé (ce qui n'aurait pas été le cas avec un mélange avec + de 50% de terre). Le semis de *Brachypodium retusum*, une espèce clé des parcours ovins semi-naturels, réduit le recouvrement de toutes les espèces (cibles et non-cibles) mais permet cependant de donner à la végétation restaurée une physionomie plus proche à celle des parcours ovins [7].

4 Contrôle d'espèces exotiques envahissantes en milieu naturel

Les espèces exotiques envahissantes (EEE) sont un élément majeur du changement global et contribuent à la perte de biodiversité, à la dégradation des écosystèmes et des services écosystémiques dans le monde entier [8]. Le contrôle des EEE est une action de restauration courante [10], mais les suivis des succès d'éradication ne sont pas toujours menés sur des pas de temps suffisants, ni sur beaucoup d'éléments composant les écosystèmes (souvent, seule la reprise de la végétation est suivie). Lors d'une opération d'éradication d'un hectare de griffes de sorcière (*Carpobrotus* sp.) au sein du Parc National de Port Cros (Figure 3), nous avons évalué les coûts du retrait et des suivis de biocontrôle, la dynamique de la végétation indigène et des arthropodes (coléoptères, araignées, fourmis) sur 10 ans.

L'arrachage a conduit au rétablissement des communautés végétales indigènes [10] ainsi qu'à la diversification de la fréquentation des sites par les coléoptères, les araignées et les fourmis [11,12].



Figure 3 – Photographies avant éradication de *Carpobrotus edulis* (2010) et après recolonisation par la végétation indigène (2014). *C. edulis* © C. Delnatte.

5 Conclusion

Les trois exemples présentés ici montrent comment l'écologie de la restauration (science) informe la restauration écologique (pratique de restaurer les écosystèmes). La mise en place d'expériences sur le terrain en conditions réelles permet de tester des protocoles qui, s'ils s'avèrent efficaces, peuvent être étendus à de plus grandes surfaces ou adaptés à des écosystèmes semblables.

Références

- [1] UNEP & FAO, *UN Decade on Restoration* Available from: <http://10.0.179.31:32149/node>, 2022.
- [2] Cardoso P et al., *Scientists' warning to humanity on insect extinctions*. *Biol Conserv.* 242:108426, 2020.
- [3] Woltz JM et al., *Landscape structure and habitat management differentially influence insect natural enemies in an agricultural landscape*. *Agric Ecosyst Environ.* 152:40–9, 2012.
- [4] Sapkota TB et al., *Fifteen years of no till increase soil organic matter, microbial biomass and arthropod diversity in cover crop-based arable cropping systems*. *Agron Sustain Dev.* 32:853–63, 2012.
- [5] Creamer NG et al., *Mechanisms of Weed Suppression in Cover Crop-based Production Systems*. *HortScience* 31:410–3, 1996.
- [6] Buisson E et al., *Promoting ecological restoration in France: issues and solutions*. *Restor Ecol.* 26:36–44, 2018.
- [7] Chenot-Lescure J et al., *Using various artificial soil mixtures to restore dry grasslands in quarries*. *Restor Ecol.* 30:e13620, 2022.
- [8] Pyšek P et al., *Scientists' warning on invasive alien species*. *Biol Rev.* 95:1511–34, 2020.
- [9] Weidlich EWA, et al., *Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review*. *J Appl Ecol.* 57:1806–17, 2020.
- [10] Buisson E, et al., *Native plant community recovery after *Carpobrotus* (ice plant) removal on an island — results of a 10-year project*. *Appl Veg Sci.* 24:e12524, 2021.
- [11] Braschi J, et al., *Impacts of the removal of invasive *Carpobrotus* on spider assemblage dynamics*. *Biodivers Conserv.* 30:497-518, 2021.
- [12] Braschi J, et al., *Beetle assemblage dynamics after invasive ice plant (*Carpobrotus*) removal on a small Mediterranean island*. *Restor Ecol.* 29:e13387, 2021.

Elisabeth Pereira¹ Marie Madeleine Ottaviani-Spella² Yann Quilichini³
en collaboration avec Lillia Fausti⁴ Laetitia Hugot⁴

pereira_e@univ-corse.fr spella_m@univ-corse.fr quilichini_y@univ-corse.fr Lillia.Fausti@oec.fr Laetitia.Hugot@oec.fr

¹ IUT, Université de Corse, MCF en géologie
CNRS UMR 6134 Sciences Pour l'Environnement

² FST, Université de Corse, MCF émérite en géologie, HDR
CNRS UMR 6134 Sciences Pour l'Environnement

³ FST, Université de Corse, IR, HDR, Responsable du SERME
CNRS UMR 6134 Sciences Pour l'Environnement

⁴ Conservatoire Botanique National de Corse, Office de l'Environnement de la Corse

Thèmes – communication orale - Autre : *Géologie/Environnement*

Titre – *Biscutella rotgessii* Foucaud : une espèce végétale corse serpentinicole

Résumé – La Lunetière de Rotgès, *Biscutella rotgessii*, est une espèce végétale protégée, endémique stricte de Corse, à l'aire de répartition restreinte. Elle n'est présente que dans quatre stations naturelles de Haute-Corse : Inzecca (communes de Ghisoni et de Ghisonaccia), à Cima di Tozzo au Nord de Ponte-Leccia (commune de Morosaglia), à Salastraco (commune de Pietrosu) et à Murzaio (commune de Ville-di-Pietrabugno).

Après quelques généralités sur la lunetière, sur les serpentinites de Corse, et sur les diverses analyses réalisées (macroscopique, microscopique, chimique, MEB...), nous exposerons les résultats relatifs à l'étude géologique des substrats (roches et/ou lithosols). Cette petite plante semble privilégier des substrats de type serpentinites très peu ou pas altérés, non amiantifères, composés essentiellement de minéraux serpentineux de type lizardite et/ou chrysotile. Ces substrats sont hydratés, magnésiens et ferrifères, contenant peu de Ca et des traces de Cr, Ni, Co, V et Zn.

Ces travaux, inédits, ont eu pour objectif d'orienter les recherches sur l'ensemble des espèces végétales considérées comme serpentiniques dans le cadre du futur Plan National d'Action (PNA) en faveur de la flore et de la végétation des serpentinites de Corse.

Mots-Clés – Corse, serpentinites, Lunetière de Rotgès, amiante

1. Contexte de l'étude et méthodologie

Cette étude géologique intervient dans le cadre du Plan National d'Action (PNA) Lunetière de Rotgès [1] et fait suite à une demande du Conseil National de la Protection de la Nature relative à « l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques du substrat sur lequel se développe la Lunetière de Rotgès, *Biscutella rotgesii* Foucaud, 1898 ». Cette espèce végétale (fig. 1) est une endémique stricte de Corse. Elle est inscrite sur la liste régionale des espèces végétales protégées de Corse et figure dans le livre rouge de la flore menacée de France. Elle est classée en « Vulnérable » par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN) en raison de son effectif limité, de son aire de répartition géographique restreinte et des menaces auxquelles elle est exposée : incendie, pâturage, fermeture des milieux, travaux routiers...



Figure 1 - *Biscutella rotgesii* à Salastraco. © Pereira, 2020

Ainsi, pour comprendre l'interaction entre l'espèce végétale et son substrat, nous avons réalisé en concertation et collaboration avec le Conservatoire Botanique National de Corse (CBNC), dans le cadre d'une convention de recherche, une étude du substrat (roches et sols) des 4 stations à *B. rotgesii*.

Chacune des stations a fait l'objet d'une description topographique et géologique, d'une campagne de terrain avec prélèvements d'échantillons de roches et de sols.

Après une détermination macroscopique des roches (21), des lames minces de roches (19) ont été confectionnées afin de caractériser au microscope polarisant à transmission les minéraux. Des analyses chimiques sont venues compléter ces déterminations : - analyses par diffraction des rayons X (DRX) sur poudres de roches (fraction roche totale – Nombre : 10) et sols (fraction argileuse – Nombre : 10) ; - analyses semi-quantitatives dites EDS-MEB (Nombre : 417) sur lames minces de roches grâce à un analyseur EDS couplé au microscope électronique à Balayage (MEB). - analyses géochimiques (analyses spectrométriques des éléments majeurs et mineurs, des traces par ICP-MS) sur 10 roches et sur 10 sols microbroyés.

Dix sols ont fait l'objet d'analyse granulométrique et d'une mesure de potentiel hydrogène (pH).

2. Comparaison interstations

La confrontation des observations réalisées sur le terrain et celle des résultats analytiques (cf. 2.1, 2.2) ont permis de constater une grande similarité entre les 4 stations et de

définir les caractéristiques générales du substrat préférentiel de *B. rotgesii*.

Ainsi, dans chacune des stations (Inzecca, Ponte-Leccia, Salastraco, Murzaio), *Biscutella rotgesii* a été observée dans le même environnement géologique (substratum de nature serpentinique) et le même contexte : - en positions subverticale, horizontale ; - sous la forme de pieds fleuris ou flétris, de pousses ou de touffes ; - entourée de fragments de roches sombres à verdâtres et/ou d'aiguilles, de pommes de pins, de brindilles... ; - enracinée plus ou moins profondément dans le sol (entre 0 et 15 cm) ; - dans des éboulis de bas de pente naturels, sur des talus anthropisés, sur des versants de massifs peu à très pentus (de < 5 % à 70 %), exposés au Nord (Nord-Est, Nord-Ouest), au Sud (Sud-Ouest) et à l'Ouest.

2.1 Comparaison des échantillons de roches

Les échantillons de roches prélevés et analysés sont assez comparables des points de vue minéralogique, textural, chimique et géochimique. Ainsi, le cortège minéralogique des roches est celui de la serpentinite. Quelques variations ont été néanmoins constatées entre les stations, au niveau de leur composition minéralogique. Ces variations résultent de l'intensité de la serpentinitisation (transformation métamorphique et/ou altération hydrothermale) qui a affecté la(es) roche(s) d'origine (péridotite ? autre ?) : certaines roches apparaissent en microscopie optique plus métamorphosées que d'autres, et présentent des textures variées.

D'après l'observation microscopique des textures et les analyses par diffraction des rayons X (fraction roche totale), deux types de serpentines (minéraux dont la structure cristalline est organisée en empilements de feuillets (phyllosilicates) ; satisfaisant à la formule chimique générique $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ et pouvant contenir d'autres éléments comme le chrome, le manganèse, le cobalt ou le nickel...) sont présentes : lizardite et clinochrysotile. Ces minéraux serpentiniteux sont majoritaires dans toutes les roches et sont associés à d'autres minéraux (chlorite, grenat, spinelle, sphène secondaire...) issus du métamorphisme des minéraux primaires et/ou de la transformation des serpentines et/ou d'autres minéraux secondaires.

Des microanalyses, réalisées sur les lames minces de roches, ont permis d'avoir une idée de la chimie des minéraux des serpentinites étudiées (Tab. 1).

Tableau 1 - Minéraux identifiés en microscopies optique et électronique (EDS-MEB).

Minéraux	Formules chimiques simplifiées
Serpentine	$Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$
Chlorite magnésienne (clinochlore)	$Mg_6(Mg_4Al_2)[Si_6Al_2O_{20}](OH)_{16}$
Chlorite ferrifère (chamosite)	$Fe^{2+}_6(Fe^{2+}_4Al_2)[Si_6Al_2O_{20}](OH)_{16}$
Chlorite-Serpentine	Intermédiaire
Pyroxène (chrome-diopside)	$CaMg[Si_2O_6]$
Grenat (andradite)	$Ca_3(Fe^{2+}, Ti^{4+})_2[(Si, Al, Fe^{3+})_3O_{12}]$
Grenat (entre andradite et ouvarovite)	Andradite $Ca_3(Fe^{2+}, Ti^{4+})_2[(Si, Al, Fe^{3+})_3O_{12}]$ Ouvarovite $CaCr_2[Si_3O_{12}]$
Spinelle (chromite)	$(Fe, Mg)Cr_2O_4$
Sphène secondaire	$CaTi[SiO_5]$
Oxyde de fer (magnétite)	Fe_3O_4
Millérite	NiS
Pentlandite	$(Fe, Ni)_9S_8$

Les données géochimiques obtenues pour les roches sont comparables entre les stations. Parmi les éléments majeurs et mineurs, il est à noter la forte proportion de SiO₂, MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃. CaO et MnO sont beaucoup moins représentés, suivis par TiO₂ (fig. 2).

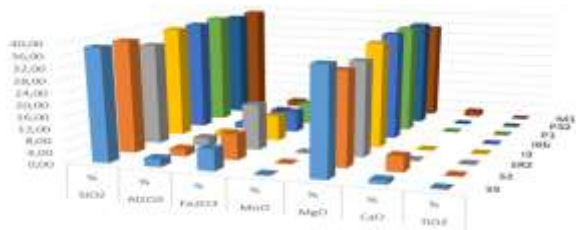


Figure 2 - Substrat « Roches ». Comparaison interstations des éléments majeurs et mineurs.

Les analyses des éléments traces attestent la présence, dans les roches, des éléments suivants (des plus fortes concentrations aux plus faibles) : Cr, Ni suivis par Co, V, Zn, Sc, Cu, Ga,...

2.2 Comparaison des échantillons de sols

Les sols des diverses stations présentent les mêmes tendances granulométriques : - partie grossière composée de fragments de serpentinites de forme subrectangulaire (cailloux > graviers) ; - partie fine sableuse pauvre en limon et/ou argile ; - une structure particulière. La couleur de ces sols varie du vert (clair à foncé) au marron, dépendant ainsi d'un certain nombre de paramètres (présence d'oxyde de fer...). Leur pH est neutre.

Les analyses DRX fraction argileuse de ces sols montrent des similitudes. Elles ont permis d'identifier les minéraux suivants dans des proportions variables : serpentines (lizardite/clinochrysotile), minéraux argileux (chlorite, illite, interstratifiés). Tous sont composés de serpentines et de chlorite.

Les données géochimiques (éléments majeurs et mineurs) obtenues pour les sols sont relativement comparables (fig. 3). Comme pour les échantillons de roches, notons la forte proportion de SiO₂, MgO, Fe₂O₃. Al₂O₃ et CaO sont beaucoup moins représentés suivis par MnO et TiO₂.

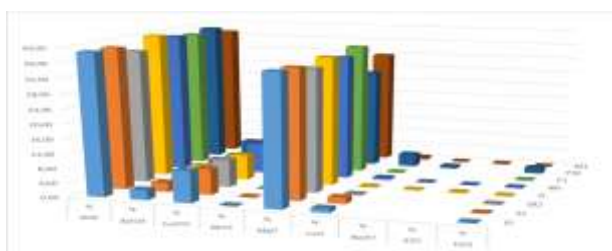


Figure 3 - Substrat « Sols ». Comparaison interstations des éléments majeurs et mineurs.

Les analyses des éléments traces attestent la présence (des plus fortes concentrations aux plus faibles) des éléments : Cr, Ni suivis par Co, V, Zn... Ces résultats sont similaires à ceux obtenus pour les roches prélevées

au même endroit. Les éléments constituant ces sols peu profonds proviennent à l'évidence de l'altération météoritique (processus mécaniques, physico-chimiques ou biologiques conduisant à la réduction des roches et/ou des minéraux) plus ou moins poussée du substratum serpentinique.

3. Conclusions et perspectives

Au terme de cette étude géologique, nous pouvons dire que cette petite plante semble privilégier des substrats (roches et/ou lithosols) de type serpentinites très peu ou pas altérés, non amiantifères, composés essentiellement de minéraux serpentineux de type lizardite et/ou chrysotile. Ces substrats sont hydratés, magnésiens et ferrifères, contenant peu de Ca et des traces de Cr, Ni, Co, V et Zn... Ces données ont été confrontées au niveau micro-régional avec des données relatives à des études réalisées sur d'autres serpentinites de Haute-Corse [ex. 2, 3, 4]. *Biscutella* n'a pas été répertoriée sur des substrats (roches/lithosols/déblais) amiantifères contenant des amphiboles calciques (actinote/trémolite), beaucoup plus riches en CaO et Al₂O₃ et beaucoup plus pauvres en MgO.

Une comparaison entre les substrats à *Biscutella* et ceux des autres plantes serpentinicoles insulaires, associées ou pas à *Biscutella* et répertoriées par le CBNC, permettra peut-être de valider ou d'infirmer nos premières hypothèses et d'envisager une étude au niveau micro-régional. Une étude avec d'autres espèces serpentinicoles et leur substrat au niveau mondial serait également intéressante [5].

Références

- [1] Revaka M.-A., Piazza C., Hugot L., 2012, Plan national d'actions en faveur de *Biscutella rotgeisii* Foucaud - Lunetière de Rotgès - 2012 – 2017, Rapport du Conservatoire Botanique National de Corse (CBNC), 67 p.
- [2] Brocard E., 1992, *Etude minéralogique et chimique des fibres pathogènes et minéraux serpentineux de quelques gisements d'amiante de la Corse alpine*, Mémoire de DESS « Ressources animales et végétales », Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire des Sciences de la Terre, Centre de Valorisation des Ressources Naturelles, 52 p.
- [3] Lahondère D., Cagnard F., Coutin C., 2020, Reconnaissance de zones naturelles amiantifères sur douze communes du Cap Corse (Haute-Corse) - Pino, Luri, Barrettali, Cagnano, Canari, Pietracorbara, Ogliastru, Sisco, Olcani, Nonza, Olmeta di Capocorso, Farinole, Rapport final. BRGM/RP-70672-FR, 307 p., 170 fig., 20 tab., 3 ann.
- [4] Ottaviani-Spella M. M., Pereira E., Berlinghi A., 2005, Rapport d'analyse sur la recherche d'affleurements amiantifères sur la nouvelle route nationale 193 Corte-Omessa. Identification de l'amiante macroscopiquement et microscopiquement (au microscope polarisant à transmission), Rapport pour le compte de la Collectivité Territoriale de Corse, 10 p.
- [5] Jaffré T., 1992, Floristic and ecological diversity of the vegetation on ultramafic rocks in New Caledonia. In A. J. M. Baker, J. Proctor, and R. D. Reeves, eds., *The Vegetation of Ultramafic (Serpentine) Soils*, International Conference on Serpentine Ecology, Intercept Ltd., Andover, Hampshire, U.K., Proc. 1st, 101-108.

Etude de chaîne de distribution optimale d'hydrogène dans les territoires insulaires : Exemple de la Corse

T. Moustapha Mai¹

C. Cristofari²

C. Azzaro-Pantel³

moustapha-mai_m@univ-corse.fr cristofari_c@univ-corse.fr catherine.azzaropantel@toulouse-inp.fr

^{1,2} Centre de recherche Georges Peri, Université de Corse
Laboratoire Science Pour l'Environnement, UMR CNRS 6134

³ INPT, UPS, Université de Toulouse
Laboratoire de Génie Chimique, UMR CNRS 5503

Thèmes –Énergie - Environnement - Informatique

Résumé – *Les territoires insulaires ne sont pas ou très peu connectés au réseau électrique continental, et doivent gérer leur propre approvisionnement énergétique, afin d'équilibrer la production et la demande notamment d'électricité. Cela implique un coût beaucoup plus élevé que dans d'autres régions, donnant ainsi l'ouverture à des réflexions sur d'autres systèmes énergétiques mieux adaptés. À cet égard, l'hydrogène peut être utilisé pour apporter plus de flexibilité au réseau électrique mais aussi proposer une alternative à l'utilisation de carburant d'origine fossile pour le transport. Cette étude a pour but de proposer un cadre méthodologique permettant, de déterminer une chaîne logistique optimale d'hydrogène pour la Corse, en utilisant une approche géo-spatiale et multi-période. Ce cadre d'étude permet à cet effet de déterminer le nombre, la taille, le type de technologie et la localisation des unités de la chaîne logistique en utilisant une approche de Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) et un Système d'Information Géographique (SIG).*

Mots-Clés –Hydrogène, carburant alternatif, Optimisation mathématique, Chaîne logistique.

1 Introduction

L'urgence contre le changement climatique a stimulé un intérêt croissant dans le transfert des investissements des énergies fossiles vers les énergies renouvelables. Dans ces territoires isolés, l'impact du prix du combustible fossile sur le prix final de l'électricité est encore plus élevé en raison de son transport vers ces sites et du coût de gestion des réseaux électriques (qui sont très peu stables) [1]. L'intégration massive des énergies renouvelables (EnR) sur les réseaux des petites îles pourrait encore augmenter les perturbations entre la production et la demande en raison de leur intermittence. Dans ce contexte, l'hydrogène peut être considéré comme un "vecteur énergétique", et jouer un rôle majeur dans la décarbonisation, s'il est généré par électrolyse en utilisant le surplus d'énergie renouvelable [2]. En raison de la capacité actuelle de demande d'hydrogène, les investissements actuels restent encore trop risqués pour une production d'« hydrogène vert » à grande échelle, ce qui pourrait éventuellement réduire les coûts de production, un paradoxe souvent qualifié du « paradoxe de l'œuf et de la poule ».

L'objectif de ce travail est de déterminer la configuration optimale qui représente un système logistique d'hydrogène de manière intégrée dans un territoire isolé, ici le cas de la Corse. La formulation est basée sur une approche de PLNE. La valeur ajoutée proposée par ce travail consiste à étendre ce cadre à la conception et la planification combinées sur une courte période en utilisant les fluctuations mensuelles de la demande en hydrogène en fonction de la consommation de carburant du territoire.

2 Méthodologie

Le cadre méthodologique utilisé dans ces travaux, pour la conception et l'exploitation d'une chaîne logistique d'hydrogène, est défini suivant une approche géo-spatiale et multi-période afin de fournir le profil de demande d'hydrogène d'une zone géographique donnée. Le problème d'optimisation est formulé sous la forme d'un modèle de Programmation Linéaire en Nombre Entiers (PLNE) à l'aide du logiciel d'optimisation GAMS® sous le solveur CPLEX 12 [3]. Trois objectifs d'optimisation sont considérés dans cette étude : un critère économique qui consiste à minimiser le coût total du réseau, à la fois en termes de dépenses d'investissement et d'exploitation, un critère environnemental lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES) de la chaîne logistique et un indice de risque soumis à : l'offre, la demande, la conservation de la masse et la performance technique. Un ensemble de paramètres technico-économiques est pris en compte notamment les moyens de production, de stockage, de transport, et de distribution, l'emplacements possibles de

ces unités, le type de sources d'énergie disponibles, les caractéristiques techniques (efficacité, capacité, durée de vie, facteurs de charge, ...), les émissions de GES de toutes ces technologies et leurs coûts associés. Plusieurs contraintes technico-économiques sont introduites dans le modèle. Elles sont formées par les variables continues, entières et binaires. Le modèle propose ensuite comme résultat une configuration optimale de la chaîne logistique d'hydrogène (HSC) qui prend en compte toutes les contraintes introduites suivant l'objectif choisi. La figure 1 suivante donne une vue d'ensemble sur la démarche systémique de cette méthodologie.

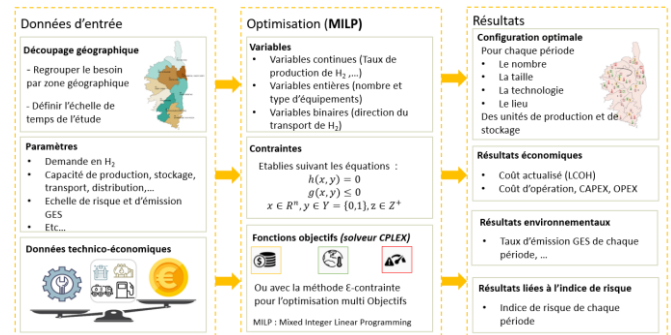


Figure 1 – Processus méthodologique

3 Cas d'étude : Chaîne d'hydrogène Corse

Cette méthodologie a été appliquée à l'île de Corse. Le territoire est divisé en 9 localités qui correspondent aux collectivités territoriales. Chaque localité se voit attribuer une demande d'hydrogène différente en fonction de la concentration de population, de la consommation de carburant et de la densité touristique. Cette demande est ensuite répartie de manière saisonnière pour l'horizon de temps 2030, en considérant les projections démographiques et énergétiques de l'île [3]. Trois types de technologies d'électrolyseurs sont utilisés, à savoir l'électrolyse alcaline, l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM) et l'électrolyse à oxyde solide (SOEC). Chaque technologie d'électrolyseur est disponible en quatre tailles (mini : 300 KW, petit : 1000 KW, moyen : 2500 KW et grand : 5000 KW). Les unités de stockage et de livraison sont également proposées en quatre tailles différentes.

L'hydrogène est produit à 30 bars et stocké dans un réservoir à basse pression pour servir de réserve en cas de panne. Lorsque la production d'hydrogène dépasse les besoins locaux d'une zone donnée, il est transporté par camion-citerne à 300-350 bars vers une autre zone où la production est insuffisante. La figure 2 illustre cette gestion de la chaîne d'approvisionnement en hydrogène.

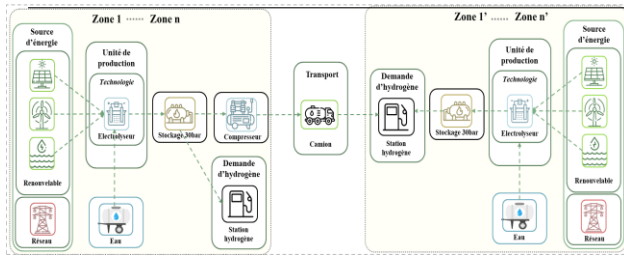


Figure 2 – chaîne d'approvisionnement d'hydrogène en Corse

4 Résultats

Le tableau 1 présente les valeurs des principaux indicateurs pour chaque optimisation à objectif unique. Le coût moyen du système, qui comprend les coûts d'investissement et de maintenance, est le plus élevé (plus de 2000 k€/jour) lorsque l'objectif est de minimiser l'indice de risque. Aussi, dans ce scénario le modèle évite autant que possible d'introduire des unités de transport dans la matrice (soit 2 unités de transport dans la configuration où l'objectif de risque est retenu, contre 6 unités de transport dans la configuration où c'est l'objectif de coût qui est utilisé). Par conséquent, la configuration basée sur l'indice de risque, surdimensionne le système de production dans chaque zone et augmente les unités de stockage en conséquence, ce qui engendre des fortes émissions de GES, 101 gCO₂eq/kWh pour scénario.

En fixant comme objectif, le minimum d'émissions de GES, l'indice de risque du système devient le plus élevé (208) avec la mise en place d'unités de production et de stockage de petite et moyenne taille (plutôt que de moyenne ou grande taille), pour cette configuration par rapport aux configurations basées sur l'objectif coût et de risque. Ce choix diminue pourtant le taux d'émission de GES global du système qui est d'environ 33 gCO₂eq/kWh mais augmente significativement le niveau de risque total en raison de la forte densité des unités à installer.

Le coût actualisé de production d'hydrogène (LCOH) obtenu lorsqu'on minimise le coût du système est de 6,13 €/kg.

Table 1 – titre de la table

Les fonctions objectives	Coût total du système (k€/jour)	Facteur environnemental (gCO ₂ eq/kWh)	Facteur Risque	LCOH (€/kg)
Objectif Coût	61,4	40.45	80	6,13
Objectif émissions GES	475,3	33.82	208	43.4
Objectif risque	2024,5	101.18	40	138

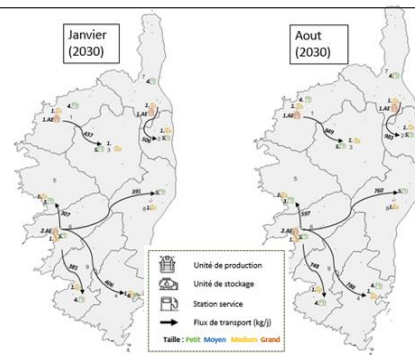


Figure 2 – Scénario de HSC de la Corse

Les configurations optimales de la chaîne logistique d'hydrogène sont présentées au niveau de la figure 2. Elles indiquent le nombre, la taille et la technologie des équipements de production, de stockage et de distribution ainsi que la quantité et la direction des unités de transport entre les zones. Globalement, on constate que la quantité de flux importés a presque doublé de Janvier à Août, ce qui correspondent respectivement à la saison de basse et haute demande, elle-même directement corrélée avec l'activité touristique. La quantité d'importation de la zone 6 vers la zone 5, passe par exemple de 391 kg/jour en Janvier 2030 à 760 kg/jour en Août 2030.

5 Conclusion

Cette étude présente un cadre méthodologique permettant de déterminer une configuration optimale de la chaîne logistique d'hydrogène en Corse en tenant compte des variations mensuelles de la demande d'hydrogène à l'horizon 2030. Trois critères mono-objectifs notamment le coût du système, les émissions de gaz à effet de serre et l'indice de risque de l'installation ont été étudié. L'originalité de cette étude consiste en sa capacité à croiser des résultats périodiques suivant une simulation mathématique multi périodes et la représentation géo-spatiale de ces résultats sur la Corse. Cette approche peut être utilisée pour étudier les mécanismes d'incitation et de soutien politique appropriés pour lancer l'économie de l'hydrogène dans les territoires isolés.

Références

- [1] J. Lamas, "Energy supply in isolated areas: an outline of the current situation and the potential of hydrogen technologies for distributed power generation," *Global Resource Management*, vol. 2, pp. 31–53, Mar. 2016.
- [2] G. Krajačić, R. Martins, A. Busuttill, N. Duić, and M. da Graça Carvalho, "Hydrogen as an energy vector in the islands' energy supply," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 1091–1103, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.12.025.
- [3] Moustapha Mai T., Cristofari C., Azzaro-Pantel.C, and Carrera E., "Renewable hydrogen supply chain for transport application in Corsica island," in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 51, Ludovic MONTASTRUC and Stephane NEGNY, Eds. Elsevier, 2022, pp. 885–900. doi: 10.1016/B978-0-323-95879-0.50150-8.

Stratégie de conception d'une micro-STEP (Station de Transfert Energétique par Pompage) solaire en Zone Non-Interconnectée (ZNI) en Colombie

Nathan Guignard¹

nathan.guignard@stepsol-energy.com

¹ IUT, Université de Corse Pascal Paoli, Laboratoire Sciences pour l'Environnement (SPE) , UMR 6134

Thèmes – *Énergie - Environnement*

Résumé – *Actuellement, la production d'électricité dans les communautés hors réseau se fait au moyen de générateurs diesel polluants et souvent inefficaces, parfois couplés à des batteries chimiques, dont les spécificités s'adaptent mal aux environnements éloignés et difficiles. En tant qu'alternative plus durable, cet article examine le stockage d'énergie hydroélectrique par micro-STEP couplé à la production solaire photovoltaïque. L'électrification rurale en Colombie est sélectionnée comme meilleur contexte potentiel pour une telle solution. Plusieurs machines électriques sont envisagées pour la conversion d'énergie (associées aux pompes et turbines) et évaluées sur des critères précis : puissance réactive, rendement, prix, souplesse d'absorption de puissance, complexité et robustesse. Cette phase d'esquisse met en lumière deux machines : une machine à induction et une machine synchrone à aimants permanents, toutes deux couplées à un variateur de fréquence. Deux configurations de micro-réseaux sont également sélectionnées parmi quatre principales, qui accueillent le mieux un tel système de stockage dans la zone colombienne non interconnectée (ZNI).*

Mots-Clés – *Solaire PV, stockage, offgrid.*

1 Introduction

L'équilibre entre la production et la consommation d'électricité est l'un des principaux enjeux dans un monde qui vise à réduire l'utilisation des centrales électriques à combustible fossile. Ainsi, pour rendre le même service que les centrales thermiques qu'ils remplacent, les énergies renouvelables (PV, éolien) ont besoin de stockage pour faire face aux intermittences de production et variations de consommation.

La principale technologie de stockage pour les systèmes électriques est la STEP (Station de Transfert Energétique par Pompage). En 2017, elle représentait 97 % de la puissance installée [1] et 97 % de l'électricité produite à partir du stockage [2]. Bien que la plupart des STEPs soient de grande taille et connectées à de larges réseaux électriques, de plus en plus d'initiatives se créent pour adapter cette technologie aux petites communautés hors réseau (ou offgrid) qui ont des coûts prohibitifs de connexion aux réseaux nationaux ou régionaux. Dans les endroits où l'eau est disponible et l'altitude suffisante, c'est une alternative intéressante aux moyens de production actuels : les générateurs diesel [3].

2 Contexte de Recherche

L'ensemble des zones non interconnectées colombiennes (ZNI) est la zone géographique choisie pour cette étude. L'IPSE (L'Institut de planification et de promotion des solutions énergétiques dans les zones non interconnectées) fournit des chiffres pertinents pour les zones étudiées avec l'aide d'autres institutions publiques colombiennes. La ZNI colombienne s'étend sur plus de 600 000 km² (53% de la superficie du pays), 273 MW de puissance installée génère 387,8 MWh par an. Elle abrite près de 730 000 foyers, dont 500 000 sans couverture électrique du tout) répartis sur 1772 communes et villages [3].

Des données détaillées datant de 2021 sur les 1772 communautés en ZNI nous disent que 97% des communautés sont alimentées uniquement par des groupes électrogènes diesel, 1% par des énergies renouvelables.

Pour compléter les données sur les groupes électrogènes diesel : la puissance totale installée moyenne dans une collectivité est de 150 kW (médiane 40 kW), 90 % des collectivités moins de 115 kW et 95 % moins de 170 kW. 71 localités sont même totalement privées d'électricité à cause de pannes. Cela montre le niveau de précarité énergétique dans les ZNI colombiennes et leur dépendance à un seul type de production d'énergie (diesel) et souvent à une seule machine. Connaissant la disponibilité de l'altitude en Colombie, il est logique d'étudier comment le mix énergétique de ces communautés peut être décarboné grâce à une micro-

STEP couplée à l'énergie solaire photovoltaïque [4].

La Figure 1 montre les courbes de charges quotidiennes typiques de 4 communautés alimentées avec un seul groupe électrogène diesel. Elles sont toutes situées dans la partie sud-ouest de la Colombie, une région où se trouve la plus grande concentration de communautés isolées du pays.

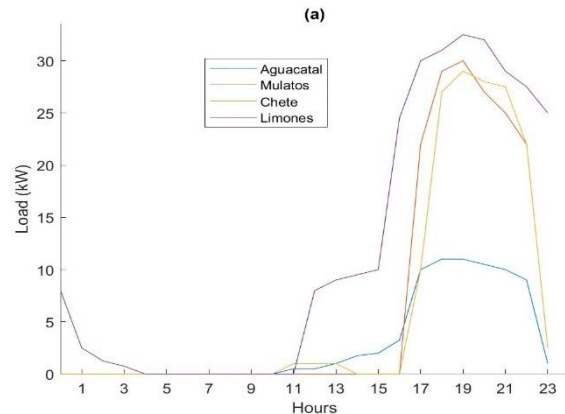


Figure 1 – Profils de charge journaliers dans 4 communautés du Sud-Ouest de la Colombie [5]

Les générateurs diesel sont pour la plupart surdimensionnés et fonctionnent souvent en dehors de leur puissance nominale, d'où des inefficacités majeures et une surconsommation de carburant [6].

Les groupes électrogènes apparaissent comme une solution simple nécessitant des capacités d'investissement faibles à moyennes (CAPEX 450-750\$/kW [7]), de petites infrastructures et un transport léger jusqu'au site. Cependant, la fiabilité dépend fortement de l'accès au carburant, que ce soit par le biais d'une chaîne d'approvisionnement solide ou de prix suffisamment bas, et de la capacité de l'opérateur à entretenir avec succès le générateur. Cela induit des coûts opérationnels élevés qui ont l'autre inconvénient d'être très fluctuants : OPEX fixe annuel = 2-4% de CAPEX plus 0,3-0,5 \$/kWh d'OPEX carburant [8]. Ce mode de production d'électricité a également une forte teneur en carbone (environ 1200 gCO₂/kWh [9]) ce qui est problématique compte tenu de l'effort à fournir pour atténuer le changement climatique.

L'IPSE cherche donc à augmenter la part de renouvelables dans les ZNI et nécessite des solutions de stockage fiable en milieu isolé et hostile climatiquement.

3 Conception d'un micro-réseau avec micro-STEP

Pour des raisons de simplicité et de robustesse, l'organe de production de la micro-STEP est une pompe pouvant également fonctionner en mode réversible et générer de l'électricité (PAT : Pump as Turbine). Une seule machine électrique est couplée à cette PAT, elle doit donc faire office de moteur et de génératrice. La Table 1 pose le

récapitulatif des différentes machines et équipements nécessaires à leur fonctionnement : vanne de laminage, régulateur de fréquence (VFD).

Machine Electrique	Système de régulation de puissance ; Intervalle de Puissance (% de P-Nominale)	Intervalle de rendement [I0] [I1]	Mécanisme de démarrage	Source de puissance réactive	Intervalle de prix [I2] [I3]	Commentaires
Machine Asynchrone +VFD	Pompage: VFD; 0-100% Turbinage: VFD +vanne; 25-100%	IE1-IE4 70-90%	VFD donne des courants de démarrage faibles	Seulement avec VFD 4Q	Moteur: 90-120 USD/kW VFD: 50-70 USD/kW	Surchauffe à basses vitesses
Machine Synchrone à Aimants Permanents +VFD	Pompage: VFD; 0-100% Turbinage: VFD +vanne; 20-100%	IE3-IE5 85-95%	VFD Obligatoire	Oui	Moteur: 150-200 USD/kW VFD: 50-70 USD/kW	Terres rares possibles (aimants)
Machine Synchrone à Aimants Permanents +Cage	Pompage: Vanne laminage; 25-100% Turbinage: Vanne laminage; 20-100%	IE3-IE5 85-95%	Inhérent (Courants de démarrage forts)	Oui	Moteur: 150-200 USD/kW	Pas d'électronique de puissance Terres rares possibles (aimants)
Machine Synchrone à Excitation +Cage	Pompage: Vanne laminage; 25-100% Turbinage: Vanne laminage +AVR; 20-100%	IE3-IE5 85-95%	Inhérent (Courants de démarrage forts)	Oui	Moteur: 150-200 USD/kW	Petit convertisseur AC/DC pour le système d'excitation

Tableau 1 – Comparaison des Machines Electriques

Quatre configurations pour un micro-réseau solaire PV/micro-STEP/Diesel pour les communautés colombiennes en ZNI sont présentées. La première (C1) reste à dominante diesel et les trois autres peuvent réduire plus significativement le rôle de la génération diesel sans nécessiter l'installation d'un stockage d'énergie chimique. C2 offre un moyen de communication entre tous les organes de production (diesel compris), et 24h d'électricité sans interruption. C3 n'utilise le groupe diesel qu'en cas de coupure. C4 demande des démarrages manuels de chaque moyen de production avec coupure d'électricité à chaque changement de régime. C1 et C2 représentent un niveau de confort proche des sociétés urbaines occidentales C3 un compromis intéressant et C4 plus rudimentaire encore. La capacité de chaque machine électrique à satisfaire chaque niveau de confort et configuration est présenté dans le Tableau 2.

	C1	C2	C3	C4
Machine Asynchrone +VFD	Oui	Seulement avec VFD 4Q	Seulement avec VFD 4Q	Seulement avec banc de condensateurs
Machine Synchrone à Aimants Permanents +VFD	Oui	Oui	Oui	Seulement avec VFD pour démarrage pompe
Machine Synchrone à Aimants Permanents +Cage	Oui (charge constante)	Oui (charge constante)	Oui (charge constante)	Oui (charge constante)
Machine Synchrone à Excitation +Cage	Oui	Oui	Oui	Non

Tableau 2 – Adéquation des Configurations et des Machines Electriques

4 Conclusions

Sur la base des observations de la production d'électricité en ZNI colombienne, des profils de charge typiques et de la nécessité d'être une alternative crédible aux groupes électrogènes diesel (à la fois en service et dans la gamme de prix) : il a été décidé que l'utilisation d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents (avec VFD ou cage d'écureuil) ainsi que la machine Asynchrone avec un VFD à 4 quadrants étaient les solutions techniques à approfondir dans la mise en œuvre d'un micro-réseau PV + micro-STEP hors réseau. Les simulations MATLAB doivent être mises en œuvre à la fois à long terme (scénario énergétique sur plusieurs jours) et à court terme (réponse en fréquence et en tension

de la pompe/turbine) pour évaluer la validité de ces choix.

La plateforme PAGLIA ORBA située à Ajaccio et appartenant à l'Université de Corse contient une micro-STEP de 15kW et a la possibilité de passer en "mode offgrid", permettant ainsi une expérimentation à l'échelle et dans des conditions de terrain similaires aux communautés isolées. Cette expérience ainsi que les simulations numériques feront l'objet d'une prochaine publication.

5 Remerciements

L'auteur remercie Jean-Laurent Vellutini, délégué régional de l'ANRT en Corse, et Didier Pierrat-Agostini, président et fondateur de STEPSol.

Références

- [1] Sandia Labs, « DOE Global Energy Storage Database ». <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/projects.html> (consulté le 18 janvier 2022).
- [2] P. Nikolaidis et A. Poullikkas, « A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability », p. 27, 2017.
- [3] IPSE, « Caracterizacion ZNI ». 24 juin 2020.
- [4] IPSE, « IPSE- Tabla Excel ZNI ». 2020.
- [5] IPSE, « INFORME TELEMETRÍA MENSUAL DE AGOSTO ». août 2021.
- [6] International Finance Corporation (World Bank), « The Dirty Footprint of the Broken Grid ». 2019.
- [7] Rockefeller Foundation, « COMPARING COSTS OF AN INTEGRATED APPROACH VERSUS PURE GRID EXTENSION ». 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rockefellerfoundation.org/wp-content/uploads/2020/12/EE-Download-Opportunity-Datasheet-Detailed-Cost-Models-and-Benchmarks.pdf>
- [8] E. U. MWH, « Sustainable Energy Handbook Module 6.1 Simplified Financial Models ». 2016.
- [9] A. Q. Jakhriani, A.-K. Othman, A. R. H. Rigit, et S. R. Samo, « Estimation of carbon footprints from diesel generator emissions », in *2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology*, Jakarta, juill. 2012, p. 78- 81. doi: 10.1109/GUT.2012.6344193.
- [10] ABB, « IE5 synchronous -reluctance motors », *News*. <https://new.abb.com/news/detail/80775/ie5-synchronous-reluctance-motors> (consulté le 9 février 2022).
- [11] M. Alizadeh Bidgoli, W. Yang, et A. Ahmadian, « DFIM versus synchronous machine for variable speed pumped storage hydropower plants: A comparative evaluation of technical performance », *Renew. Energy*, vol. 159, p. 72- 86, oct. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.163.
- [12] A. Bhatt, M. P. Sharma, et R. P. Saini, « Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro-photovoltaic-biomass and biogas-diesel-battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, p. 53- 69, août 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.030.
- [13] P. Sethupathi et N. Senthilnathan, « Comparative analysis of line-start permanent magnet synchronous motor and squirrel cage induction motor under customary power quality indices », *Electr. Eng.*, vol. 102, n° 3, p. 1339- 1349, sept. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00955-2.

Collecter l'eau de rosée : un défi scientifique et sociétal

Laurent Royon¹, Remy Herbaut¹, Joachim Troseille², Anne Mongruel², D. Beysens²

Laurent.royon@u-paris.fr

¹ IUT Paris Pajol, Université de Paris Cité
LIED, UMR 8436

¹ ESPCI, Sorbonne Université
PMMH, UMR 7636

Thèmes – *Physique - Énergie - Environnement - - Matériaux -*

Résumé – *Le changement climatique a fortement limité l'accès à l'eau potable dans certaines régions du globe. Récupérer la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère grâce à des condenseurs de rosée pourrait résoudre en partie ce problème et constituer une source d'eau supplémentaire, s'ajoutant à l'eau de pluie. Pour accroître le rendement de ces dispositifs encore beaucoup trop faible (~0,4 litre/m²/jour), nous proposons d'exploiter ici deux effets : i) les effets de bords et ii) les effets d'une texturation biomimétique. L'exploitation de ces 2 effets sur des plaques d'aluminium montre une augmentation de près de 30% de l'eau collectée comparée à la même surface non traitée. La technique est simple, peu coûteuse et sera facile à mettre en œuvre pour développer des condenseurs plus performants.*

Mots-Clés – *Condensation, échange radiatif, rosée, tension superficielle*

1 Introduction

Dans un contexte de réchauffement climatique et de diminution des ressources en eau, il est urgent de trouver de nouvelles issues pour collecter de l'eau pure. Une solution est de condenser de façon passive, par refroidissement radiatif, la vapeur d'eau atmosphérique présente partout dans le monde ($\sim 12900 \text{ km}^3$). L'eau de rosée, souvent ignorée jusqu'à présent, peut servir de source d'eau supplémentaire, s'ajoutant à l'eau de pluie et de brouillard. Les condenseurs actuels offrent cependant des rendements relativement modestes ($\sim 0,4 \text{ l/jour/m}^2$) alors que le rendement maximum théorique est de l'ordre de 1 l/jour/m^2 [1].

Notre travail, initié à la suite d'un projet tuteuré portant sur le froid radiatif et la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique sur une surface refroidie, s'est porté sur la recherche de surfaces innovantes, peu coûteuses et issues du bio-mimétisme dans l'objectif d'améliorer le rendement de la collecte d'eau de rosée. Cet article dresse, après un rappel sur le procédé physique et la méthodologie adoptée, un panorama et résumé de nos études réalisées sur cette activité de recherche.

2 Présentation du procédé

La figure 1 présente le spectre du rayonnement reçu à la surface de la Terre dans la gamme U-visible-IR. Entre 8 et $12 \mu\text{m}$, on peut observer une faible densité de rayonnement dans cet intervalle de longueur d'onde appelé « sky windows ». Un corps noir à 15°C ou à 25°C émettra alors largement plus que ce qu'il recevra du ciel. Un simple bilan thermique permet de montrer que la surface exposée au ciel est alors en déficit radiatif si son émissivité est proche de 1 et que le milieu environnant n'interagit que très peu par rayonnement.

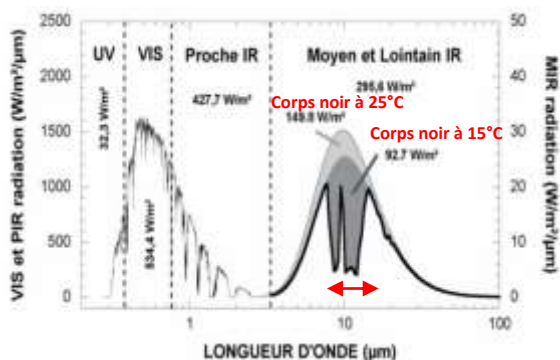


Figure 1 - spectre du rayonnement solaire incident et spectre infrarouge incident à la surface du globe (en gras). Trait gris foncé, émittance d'un corps noir (288,1K, 15°C); trait gris clair, émittance d'un corps noir (303,1K, 30°C).

La surface est alors en déficit radiatif et la température de surface va par conséquent diminuer avec la possibilité

d'atteindre la température de rosée. La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère près de la surface peut alors se condenser et former des microgouttelettes qui vont par la suite coalescer pour former des gouttes de tailles plus importantes. Sur une surface est inclinée d'un angle α , la goutte glissera uniquement si son poids devient supérieur à la résultante des forces de tension superficielle comme l'illustre la figure 2.

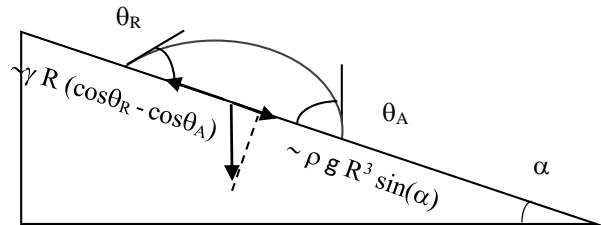


Figure 2 – représentation schématique d'une goutte de rayon moyen R sur un plan incliné, présentant un angle de contact θ_A à l'avant et θ_R à l'arrière).

La taille critique du rayon pour une goutte d'eau est $R \sim 1 \text{ mm}$ pour un angle de 30° sur une surface lisse. Si cette taille n'est pas atteinte, la goutte reste accrochée sur la surface comme la goutte de pluie sur un pare-brise.

Comment alors faire déplacer des gouttes, de taille plus petite, de manière naturelle ? Une démarche biomimétique peut apporter quelques éléments d'inspiration pour répondre à ce challenge.

3 Une démarche biomimétique

Certains animaux et certaines plantes ont la possibilité grâce à la forme structurale de leur surface et une forte émissivité dans l'infra-rouge, de pouvoir récupérer de l'eau de l'atmosphère. La figure 3 montre deux expériences réalisées en chambre radiative sur une araignée recouverte en surface des micro-poils et sur un cactus. Le résultat montre que la goutte de rosée se forme en priorité à la pointe du poil pour l'araignée et à l'extrémité de l'épine pour le cactus. La goutte glisse par gravité ou se déplace par des phénomènes de tension superficielle. Cette collecte naturelle de la rosée a constitué notre source d'inspiration en vue d'entreprendre de développer des formes de condenseurs plus efficaces.

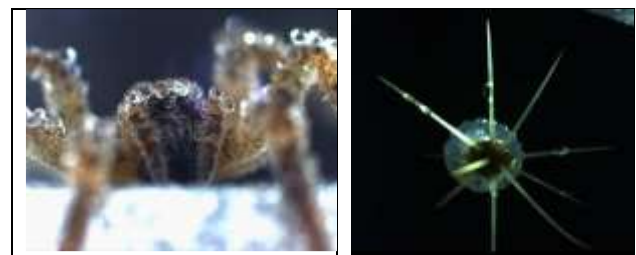


Figure 3 – goutte de rosée sur une araignée (à gauche) et sur les épines de cactus (à droite) (crédit photographique : j. Trosseille).

4 Exploiter les effets de bords

Lorsque vous faites de la cuisine l'hiver, il est fréquent de voir la formation de gouttelettes de condensation sur la vitre froide de la fenêtre. Si vous regardez leur croissance, vous remarquez que les gouttes près du bord grossissent nettement plus vite que celle au centre. Partant de cette observation, nous avons refroidis une plaque métallique et observer qu'une goutte sur un bord grossit 2,5 fois respectivement plus vite que celle au centre, comme l'illustre la figure 3 présentant ce phénomène de condensation à la surface d'un corps de pompe.



Figure 3 – goutte de condensation à la surface froide d'un corps de pompe.

Les grosses gouttes vont donc glisser plus tôt que les autres et jouer le rôle d'essuie-glace lors de leur chute. Ce phénomène a donc un intérêt notable dans le défi d'améliorer la collecte de rosée.

5 Exploiter une texturation de surface

Les exemples précédents montrent que la présence d'aspérités joue un rôle précurseur dans la formation des gouttes de condensation. Dans l'objectif de créer des condenseurs à la fois bon marché et exploitant ces effets, nous avons choisi d'utiliser la technique de sablage. Des billes de silice à une pression de 2 bar sont projetées pour créer de la rugosité à la surface d'une plaque d'aluminium. L'intérêt de cette méthode est d'une part sa facilité de mise en œuvre et son coût et d'autre part une rugosité aléatoire moyenne de $r=2\mu\text{m}$ bien répartie sur l'ensemble de la plaque initialement lisse ($r\sim 0,5\mu\text{m}$). Des expériences plaçant des surfaces rugueuses et lisses dans des conditions identiques de condensation ont été réalisées. Sur les plaques lisses, le départ de la collecte d'eau de rosée est très aléatoire alors que sur la surface rugueuse, les différents essais montrent un début identique à quelques dizaines de secondes près. Cette différence peut être expliquée par la distribution des défauts sur chaque surface. La nucléation des gouttes d'eau sur la surface lisse est très sensible aux contaminations de gras, de poussières ou de dépôts minéraux présents dans l'air. En revanche sur le duralumin rugueux, les défauts créés par sablage sont plus homogènes et ont une distribution plus stable, ce qui donne des résultats plus reproductibles.

En cumulant les effets de bords, la collecte s'effectue de manière plus précoce comme le montre la courbe de la figure 4 présentant le volume d'eau récupéré en fonction du temps. La pente est similaire sur tous les essais.

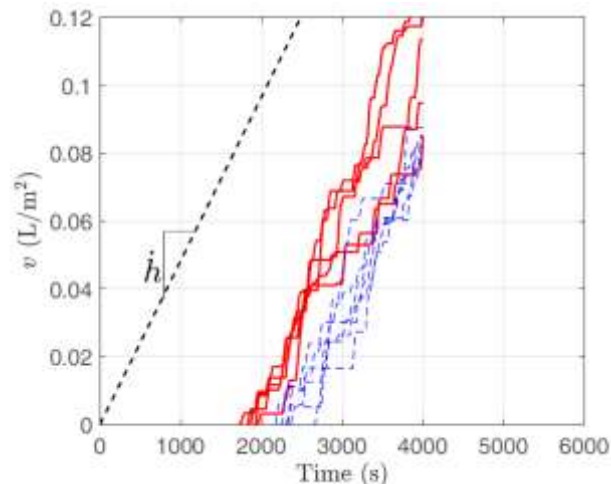


Figure 4 Volume d'eau condensé par unité de surface et collecté en bas de la plaque de Duralumin rugueux en fonction du temps. T de l'air = 30°C, HR = 70%, T en surface = 23,5°C. Lignes continues : avec effets de bord. Lignes interrompue : sans effets de bord. Ligne pointillée : épaisseur du film équivalent sur la surface de référence avec $\dot{h} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ mm s}^{-1}$

6 Conclusions

Le décrochage des gouttes de condensation s'effectue plus rapidement sur une surface préalablement traitée par sablage que sur la même surface lisse non traitée, augmentant ainsi le volume d'eau collectée. La rugosité de la surface, composée de défauts topologiques permanents, augmente en effet le nombre et la qualité des sites de nucléation, améliorant la reproductibilité de la collecte. En combinant les effets du sablage et les effets de bord, on peut accroître substantiellement la collecte passive par gravité de l'eau condensée sur un substrat. Des gains d'environ 30% comparé à la même surface non traitée peuvent être espérés grâce à cette technique simple et peu coûteuse pouvant ainsi améliorer les performances des futurs condenseurs.

7 Remerciements

Les auteurs remercient la fondation nationale IUT et l'Anr 20-CE08-0023-01 Metawater pour leur soutien financier à ces travaux de recherche.

Références

- [1] Daniel Beysens, Dew Water, River Publishers, Gistrup, 2018.
- [2] J. Trosseille, A Mongruel, L. Royon, D. Beysens, Radiative cooling for dew condensation, Int. J. Heat & Mass Transfer, 172 (4), 121160, 2021.

Traitement des sédiments de dragage : Evolution d'un dépôt à terre et valorisation

Ahmed Benamar

ahmed.benamar@univ-lehavre.fr

Mohamed Ammami

mohamed-tahar.ammami@univ-lehavre.fr

Ahmed Zein-Eddin

[ahmad.zein-eddin@univ-](mailto:ahmad.zein-eddin@univ-lehavre.fr)

[lehavre.fr](mailto:ahmad.zein-eddin@univ-lehavre.fr)

IUT, Le Havre-Normandie Université
Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, UMR 6294

Thèmes – Environnement - Matériaux

Résumé – *Le dragage maritime génère des volumes importants de sédiments et leur immersion crée un risque environnemental sur le milieu marin en raison de leur potentielle contamination. Une alternative au dragage intensif consiste à déposer le matériau à terre en vue d'un traitement avant une éventuelle valorisation, mais la législation régissant les sédiments de dragage demeure un frein au développement de voies de valorisation. Le présent article détaille l'évolution d'un site de dépôt de sédiment à Tancarville (76) qui a été suivie pendant une dizaine d'années par rapport à la concentration des métaux lourds, de la salinité, de la matière organique et de l'humidité. L'analyse du sédiment le long de cette période a montré que ces caractéristiques ont évolué significativement, permettant au matériau d'acquiescer les qualités physiques et pédologiques requises pour un matériau de construction ou un sol cultivable. Les sédiments dragués dans l'estuaire de la Seine peuvent ainsi être mis en dépôt aménagé avant de pouvoir être potentiellement valorisés dans la fabrication de briques ou la reconstruction de sols dégradés.*

Mots-Clés – Sédiment, polluant, salinité, sol.

1 Introduction

Les pratiques de dragage constituent un défi pour le développement et le maintien des activités portuaires et fluviales. Ils présentent également un risque de contamination des eaux côtières qui peut affecter les écosystèmes. Plusieurs ports importants font face à une grande quantité de matériaux dragués susceptibles de contenir une grande diversité de polluants. L'inadéquation et la restriction de l'immersion des sédiments conduisent les autorités portuaires à fournir un traitement à terre en raison du volume important à gérer [1]. En 2004, environ 200 millions de m³ et 55 millions de m³ de sédiments étaient dragués en Europe et en France, respectivement [2]. Le dépôt à terre représente de faibles quantités puisque seulement 7,3%, 3,9% et 13,8% des volumes dragués en Manche, en océan Atlantique et en mer Méditerranée, respectivement, sont concernés (GEODE, 2012). Les opérations de dragage dans les deux principaux ports (Le Havre et Rouen) concernent près de 7 millions de m³/an de sédiments dragués [3]. Ces matériaux sont composés principalement de limon, de sable et d'argile, mais contiennent également des polluants organiques et inorganiques. Les sédiments dragués dans les ports maritimes peuvent présenter un intérêt majeur pour le remplacement des matériaux argileux et sableux prélevés dans les carrières. Plusieurs études ont été menées dans de nombreux pays pour trouver des formulations appropriés pour réutiliser les sédiments dans le cadre de l'économie circulaire et du développement durable.

2 Description du site de dépôt de Tancarville

La chambre de dépôt de sédiment a été aménagée en 2008 pour recevoir près de 60 000 m³. Ce mode de gestion des déblais de dragage à terre est un choix économique pris par le Port du Havre (HAROPA) et non une obligation réglementaire. En effet, les matériaux à draguer sont localisés loin de la zone d'immersion autorisée, la considération économique et les contraintes nautiques étaient telles qu'il était plus approprié d'envisager un dépôt à terre. Le dépôt est une zone ouverte située à proximité du site de dragage dans l'estuaire de la Seine (figure 1). Le site comprend la partie principale de dépôt d'une superficie de 57 325 m² et une zone de décantation de 36 115 m² avant le rejet de l'eau de drainage dans la Seine. La taille des grains est l'analyse physique la plus courante et la plus utile du point de vue de l'évaluation environnementale. Les analyses de la teneur en eau et de la densité des sédiments sont également utiles. Le sel peut être un problème majeur pour les sédiments marins. Au fur et à mesure que les sédiments sèchent, le sel concentré dans le sol peut

inhiber la croissance des plantes si le drainage manque.



Figure 1 – Situation de la chambre de dépôt

En raison de la conception de la chambre de dépôt, la distribution granulométrique du matériau consolidé diffère d'un côté à l'autre. Ainsi, trois points (A, B et C) ont été sélectionnés pour l'analyse granulométrique. Mais pour évaluer l'évolution des polluants dans le matériau, le point C a été choisi en raison de la forte concentration de métaux en raison de la nature fine des sédiments dans cette zone. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

Table 1 – Propriétés granulaires du matériau et leur répartition

Point	D ₁₀ (μ m)	D ₅₀ (μ m)	D ₉₀ (μ m)	Fines (%)	Sable (%)
A	1.8	30	69	95	18
B	1.2	12	41	99	3
C	1.6	16	12	99	2

Des échantillons de chacune des trois zones ont été analysés en ICP-AES pour déterminer la concentration de huit éléments-trace [4]. Les concentrations moyennes d'oligo-éléments provenant des trois échantillons prélevés sont indiquées dans le tableau 2. L'analyse granulométrique (tableau 1) et la caractérisation chimique (tableau 2) ont montré la distribution assez homogène des paramètres physiques et chimiques mesurés sur la vaste zone d'étude. La salinité est uniformément répartie, montrant un niveau significatif.

Table 2 – Propriétés chimiques du matériau et leur distribution

Point	Salinité (g/L)	pH	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
A	20	7.5	9.4	1.2	74	34	0.66	21	55	160
B	25	7.9	9.1	1.4	92	45	0.79	28	71	200
C	25	7.8	11.0	1.6	94	46	0.89	26	71	200

3 Evolution du sédiment en dépôt

L'assèchement a été mesuré par la valeur moyenne de la teneur en eau au point C (côté le plus humide) (figure

1). Les données ont montré une diminution rapide de l'humidité les deux premières années et après neuf ans, le sédiment a atteint une humidité cinq fois inférieure. La salinité a diminué de manière très importante après deux ans et a atteint une très faible valeur de conductivité électrique (1mS/cm), le drainage étant le moyen de contrôle de la salinité du sol. Il est généralement admis qu'une salinité inférieure à 2mS/cm dans le sol n'est pas préjudiciable à la croissance des végétaux. Les activités de dragage dans l'estuaire côtier perturbent les processus à la fois dans ces écosystèmes et dans les matériaux de dragage. Cela peut entraîner la libération du carbone stocké sous forme d'émissions de gaz à effet de serre [5]. L'oxygène est l'élément clé qui facilite la dégradation microbienne rapide du carbone organique stocké dans les sédiments fins. Après le dragage, la disponibilité accrue d'oxygène dans les sédiments accélère le processus de dégradation, ce qui entraîne une réduction de la teneur en carbone organique par l'augmentation des émissions de CO₂. La figure 1 montre l'évolution de la matière organique (MO) avec de faibles variations entre les couches supérieure et inférieure et une teneur modérée (environ 3%). La présence de matière organique dans les sédiments peut affecter leur potentiel de valorisation en matériau de construction, mais au contraire peut améliorer leur aptitude à être utilisé dans la reconstruction de sols. La teneur en MO a augmenté rapidement dès que la végétale s'est installée et a atteint une valeur intéressante de 5% après moins de huit ans.

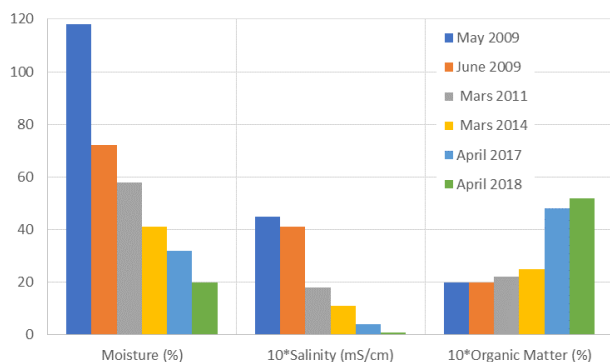


Figure 2– Evolution des propriétés physiques du sédiment

Les sédiments ont montré une concentration faible à moyenne d'éléments trace après une longue période de maturation. Dans l'ensemble, le niveau de contamination a légèrement diminué dans la zone du point C (le plus touché). Dans de nombreuses situations, la concentration de métaux augmente avec le temps dans la zone du point C (figure 2) en raison de la topographie du dépôt qui permet de drainer les polluants de la zone voisine A. Le pH alcalin (8,2) ne permet pas la dissolution des métaux. Ainsi, l'atténuation de la concentration est très lente. L'évolution de la concentration de métaux dans les sédiments déposés a été assez longue, mais les niveaux

atteints peuvent permettre la réutilisation des matériaux dans la reconstruction des sols. Dans les couches supérieure et inférieure, Cd, Zn et Hg sont les principaux contaminants, dépassant respectivement de 90 %, 34 % et 7 fois le niveau géochimique. Les concentrations de la plupart des éléments trace ont atteint la concentration maximale admissible pour les sols peu dangereux. En ce qui concerne la réglementation pour l'épandage des boues tous les éléments restent en-dessous des valeurs limites. Par conséquent, le sédiment de ce dépôt peut être utilisé dans l'amendement des sols, dans la construction ou comme substrat de culture végétale urbaine.

4 Conclusions

La valorisation des matériaux de dragage constitue une alternative prometteuse par rapport à l'immersion et peut contribuer à l'économie circulaire et à la sauvegarde de l'environnement. Les mesures effectuées durant une dizaine d'années ont montré que la salinité et la matière organique évoluent de manière significative après une longue maturation, alors que les concentrations de métaux diminuent légèrement dans la zone étudiée. Les valeurs atteintes restent au niveau de celles des déchets non dangereux. Cependant, lorsque les valeurs mesurées sont comparées avec celles utilisées pour les boues d'épandage elles restent conformes aux valeurs autorisées, sauf pour Cd, Hg, Cr et Zn. Par conséquent, les sédiments dragués de l'estuaire de la Seine peuvent être déposés dans des installations terrestres et après maturation ils peuvent être utilisés pour les sols reconstruits ou comme substrat de culture pour les espaces paysagers.

Références

- [1] Mannino I., Soriani S., Zanetto G., *Management of port dredged material: an environmental-political issue, the changing coast*, In Proceedings of EUROCO AST/ EUCC, Porto, Portugal, 2002
- [2] SedNet, *Contaminated Sediments in European River Basins*, European Sediment Research Network, Netherlands 2004, <https://sednet.org/wp-content/uploads/2016/03/Sednet>
- [3] Dauvin J.C., Desroy N., Janson A.L., Vallet C., Duhamel S., *Recent changes in estuarine benthic and suprabenthic communities resulting from the development of harbour infrastructure*, Marine Pollution Bulletin 2006, 53:80–90
- [4] Ammami M.T., Portet-Koltalo F., Benamar A., Bailleul C., Wang H., Le Derf F., *Application of biosurfactants and periodic voltage gradient for enhanced electrokinetic remediation of metals and PAHs in dredged marine sediments*, Chemosphere 2015, 125:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.087>
- [5] Macreadie P.I., Anton A., Raven J.A., *The future of Blue Carbon science*, Nature Communications 2019, 10, 3998. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>

Fluxmètre thermique à faible résistance thermique et Applications

Katir Ziouche^{1,2}

Katir.ziouche@univ-lille.fr

Zahia Bougrioua²

Zahia.bougrioua@univ-lille.fr

¹ IUT, Université de Lille

² IEMN, Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies, UMR 8520

Thèmes – *Microtechnologies, Electronique, Métrologie, Instrumentation*

Résumé – *Les mesures de flux thermiques sont devenues incontournables dans l'industrie, d'une part, elles permettent de quantifier les déperditions thermiques à travers une partie de la surface d'un système, et d'autre part, elles permettent de prédire les fluctuations de températures à l'intérieur même du système bien avant qu'aucun capteur de température ne détecte la moindre variation. Cependant, ces mesures de flux de chaleur sont très délicates et difficiles à mettre en œuvre. La qualité métrologique nécessite des fluxmètres thermiques (capteurs de flux de chaleur, ou HFS, Heat Flux Sensors) qui soient précis, stables et qui ne soient pas intrusifs. Généralement, ces dispositifs sont construits sur des substrats souples en polymères. C'est dans ce contexte que nous avons développé un microcapteur de flux thermique (μ HFS) original basé sur la technologie Silicium (Si), possédant une haute sensibilité (S_E) et une faible résistance thermique (r_{TH}). Le microcapteur repose sur l'utilisation de caissons en Silicium mésoporeux, gravés localement dans un wafer de Silicium par anodisation. Cette gravure chimique du Silicium permet de réduire drastiquement sa conductivité thermique : de 140 W/m/K la conductivité passe à près de 1W/m/K dans les zones poreuses (caissons), créant ainsi des dissymétries thermiques dans la structure. L'élément sensible du μ HFS est une thermopile planaire constituée d'un grand nombre de thermocouples Or/polySilicium associés en série (jusqu'à 500) sur une distribution périodique de boîtes Si-poreuses. Ce type de dispositif présente des sensibilités allant jusqu'à 260 mV/W avec une résistance électrique d'une centaine de k Ω . Dans cette présentation seront décrit le processus de fabrication de ces capteurs, leur principe de fonctionnement et quelques applications mises en œuvre grâce au concours d'étudiants de DUT dans le cadre de leur stage de fin d'étude.*

Mots-Clés – *Thermoélectricité, fluxmètrie, capteur, silicium poreux.*

1 Introduction

L'énergie thermique, ou chaleur, qui est générée par l'agitation désordonnée des atomes, est la forme d'énergie la plus abondante. Sa mesure est devenue indispensable dans tous les secteurs de l'industrie comme l'énergie, la chimie, l'automobile, l'aérospatiale, l'environnement, la médecine et l'agroalimentaire, ...

Les capteurs de flux de chaleurs sont conçus pour obtenir une lecture directe des transferts thermiques à travers une surface en termes d'énergie par unité de surface et de temps ($W.m^{-2}$), ce qui permet d'avoir des informations supplémentaires pour la mesure de température. Le flux de chaleur mesuré prend en compte tous les phénomènes d'échange thermique par conduction, convection et rayonnement. Ces capteurs actifs sont généralement basés sur l'utilisation d'une thermopile qui délivre une tension proportionnelle au flux thermique qui traverse le capteur [1,2]. Néanmoins, il existe peu de technologies de fluxmètres disponibles. Les fluxmètres classiques développés industriellement sont généralement réalisés par des techniques de fabrication coûteuses utilisant des feuilles minces ou des matériaux polymères [3-5], ce qui leur confère une résistance thermique élevée.

Dans cet article, nous présentons une technologie de fluxmètres miniatures réalisés sur un substrat silicium fin ($\sim 400 \mu m$) et très bon conducteur thermique ($\lambda_{Si} \sim 140 W/m/K$), ce qui permet de réduire drastiquement la résistance thermique des capteurs. De nombreux étudiants issus de nos formations à l'IUT ont pu contribuer, dans le cadre de leur stage de fin d'études, à l'intégration de ces capteurs, fabriqués à l'IEMN, dans des dispositifs industriels et ont ainsi permis le développement de nouvelles applications.

2 Principe de fonctionnement

La fabrication des fluxmètres en technologie Silicium est décrite dans [4 et 5]. La taille de chaque capteur avoisine le $\frac{1}{4}$ de cm^2 . Leur principe de fonctionnement repose sur la déviation des flux de chaleur traversant le capteur, imposée par la présence de dissymétries thermiques générées dans la structure par l'intégration des caissons de silicium poreux (SiP) à très faible conductivité thermique. En effet il y a une importante différence entre la conductivité thermique des caissons SiP fabriqués par anodisation localisée, et celle du silicium brut : $\lambda_{Si \text{ Poreux}} \sim 1 W/m/K$ vs $\lambda_{Si} \sim 140 W/m/K$ [6,7]. Toute chaleur captée par le fluxmètre (flux thermique ϕ , en W/m^2) est canalisée préférentiellement à travers les zones non poreuses, comme représenté sur la Figure 1, générant de ce fait un champ superficiel de température périodique. Les gradients de température ainsi générés sont convertis au niveau de chaque thermocouple Polysilicium/Or de la thermopile planaire

en tensions Seebeck : ces dernières s'additionnent du fait de l'association des thermocouples (TCs) en série. Ainsi la force électromotrice totale générée est donnée par :

$$V_{Seebeck} = N \cdot \Delta\alpha_{Poly/Or} \cdot \Delta T$$

où N est le nombre de TCs, $\Delta\alpha$ est leur pouvoir thermoélectrique ($\mu V/^\circ C$) et ΔT est le gradient de température entre les jonctions des TCs.

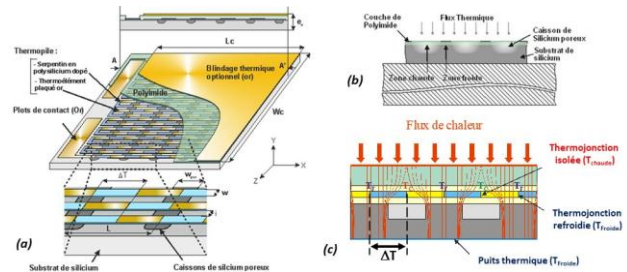


Figure 1 – (a) Fluxmètre thermique, (b) Zone d'échauffement dans le fluxmètre et (c) Gradients thermiques générés ΔT

Cette famille de capteurs présente l'avantage d'avoir un faible coût de fabrication (elle emploie une technologie dite compatible CMOS), ainsi qu'une forte sensibilité. Cette dernière, donnée par :

$$S_E = \frac{\delta V}{\delta \phi}$$

dépend directement des dimensions et de la nature des éléments qui constituent le fluxmètre. Par ailleurs, un autre avantage de ces capteurs est le fait d'avoir une faible résistance thermique, définie par $r_{TH} = \Delta T / \phi$. Celle-ci peut être déduite par modélisation sous COMSOL 3D® et est ainsi estimée à une valeur proche de $2K/W$, ce qui est clairement inférieur aux $50K/W$ obtenus pour les capteurs industriels à base de Kapton de Captec®.

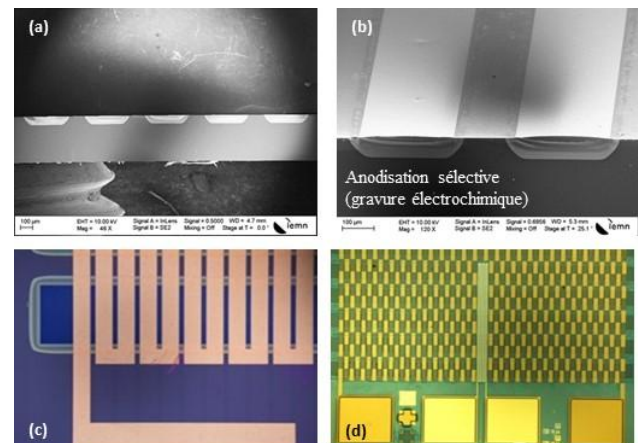


Figure 2 – (a) et (b) Caissons de SiP, silicium poreux, (c) Piste thermoélectrique disposée au-dessus du SiP et (d) Thermopile et sonde de température Pt_{100} à la surface du capteur

La Figure 2 montre des photographies prises au Microscope à Balayage Electronique, de la tranche du capteur et des vues planes des pistes thermoélectriques.

3 Caractérisations du fluxmètre

La sensibilité du fluxmètre S_E peut être déterminée par la mesure du signal de sortie $V_{Seebeck}$ pour différentes valeurs de densité de flux de chaleur φ , incident sur la zone active du capteur [1,2]. Le flux incident permettant d'éclairer le capteur à différents niveaux est généré par une méthode radiative employant une plaque chauffée de façon calibrée. Les réponses de quelques capteurs sont données sur la Figure 3.

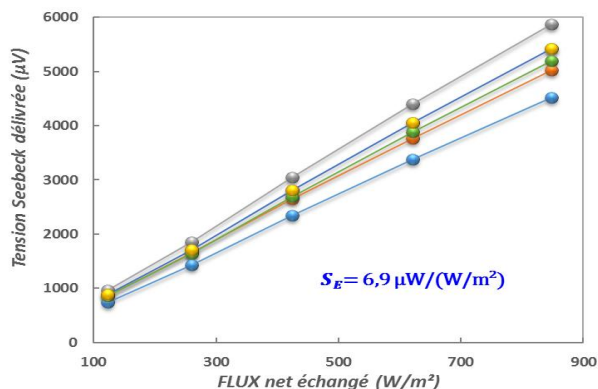


Figure 3 – (a) Tension délivrée par le fluxmètre en fonction de la densité radiative de flux net échangé

La sensibilité maximale obtenue est de $6.9 \mu V / (W/m^2)$ soit une réponse de $276 mV/W$ (surface capteur $\sim 0.25 cm^2$). La résistance électrique de la thermopile, mesurable au multimètre, est de l'ordre de $100 k\Omega$.

4 Exemples d'applications

Dans le cadre de plusieurs projets, cette technologie de capteurs a permis de développer des applications originales avec le concours d'étudiants en DUT, qui ont participé activement à l'intégration de ces capteurs (étudiants GMP) et au développement de la partie instrumentale (étudiants en GEII). Nous donnons dans ce qui suit deux exemples de réalisations.

4.1 Mesure de température sans contact

La mesure de température sans contact, et ce même dans des environnements industriels « sales », nécessite de nombreuses précautions. Le dispositif présenté ci-dessous a permis de mesure des flux de chaleurs sans contact à partir desquels il a été possible de déterminer précisément la température des cibles.

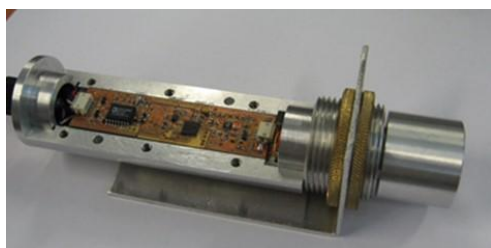


Figure 4 – Mesure de températures sans contact en environnement sale

4.2 Optimisation de la cuisson d'aliments

L'objectif principal du projet « Open Food System », piloté par le groupe SEB, est de développer un système de recettes intelligent pour obtenir les meilleures cuissons d'aliments. La mesure de température des aliments permet d'adapter la puissance et les paramètres de cuisson. Le capteur IEMN, a permis à partir de la mesure de flux thermiques, de déduire la température des aliments avec des protocoles calibrés (profil de la T° , ambiance chauffée sèche ou humide, dimensions du four, nature de la nourriture/viande/"corps-noir", etc...).

Le comportement des capteurs IEMN a été comparé à ceux de capteurs IR commerciaux : leur fonctionnement s'est avéré très bon voire meilleur dans certaines circonstances.



Figure 5 – Mesure de température d'aliments en cours de cuisson dans un four industriel.

5 Conclusions

Nous avons présenté des capteurs de flux thermique originaux réalisés en technologie Silicium et dont les principaux critères de qualité allient grande sensibilité et faible résistance thermique. Ces fluxmètres ont permis le développement d'applications dans le cadre de partenariats industriels avec le concours des étudiants de l'IUT qui ont participé à la réalisation des démonstrateurs.

6 Remerciements

Ce travail a été soutenu par RENATECH, le Réseau académique Français de micro- et nano-technologies.

Références

- [1] K. Ziouche et al., *Quasi-monolithic heat flux microsensor based on porous silicon boxes*, Sensors and Actuators A: Phys. (2010), doi: 10.1016/j.sna.2010.09.015
- [2] K. Ziouche et al., *Dispersion of Heat Flux Sensors Manufactured in Silicon Technology*, Sensors **16** (2016) 853
- [3] Vatel Corporation, USA, <http://www.vatell.com>
- [4] Hukseflux Sensors B.V., <http://www.hukseflux.com>
- [5] Captec Entreprise, France. <http://www.captec.fr>
- [6] K. Ziouche et al., *Probing technique for localized thermal conductivity measurement*, Measurement Science and Technology **26** (2015) 087003
- [7] K. Ziouche et al., *Thermoelectric properties of nanostructured porous-polysilicon thin films*, Nano Energy **80** (2021) 105553

Etude du déploiement du vecteur hydrogène en Corse

Maude Chin Choi¹

Samir Jemei²

Cristofari Christian¹

Chin-choi_m@univ-corse.fr samir.jemei@univ-fcomte.fr cristofari_c@univ-corse.fr

¹ Centre de recherche Georges Peri, Université de Corse
Laboratoire Science Pour l'Environnement SPE, UMR CNRS 6134

² FEMTO-ST Institute, FCLAB, Université de Franche-Comté, CNRS Belfort France ;

Thèmes : *Énergie - Environnement - Informatique*

Résumé – *L'indépendance énergétique et la neutralité carbone des zones non-interconnectées (ZNI) telles que la Corse et l'île de la Réunion nécessiteraient le déploiement massif d'installations de productions renouvelables mais également de systèmes de stockages. Ainsi, le vecteur hydrogène est vu comme une solution prometteuse. Le projet HyLES tend à vérifier la pertinence de l'intégration de ce dernier au sein des réseaux électriques de trois ZNI françaises. Plusieurs disciplines y seront abordées : les sciences humaines et sociales, les aspects techniques, les sciences du climat... Le projet est décomposé en cinq tâches. Les travaux de thèse, s'attachent au sein de deux tâches, visant à intégrer l'hydrogène-énergie à différentes échelles spatio-temporelles. Au préalable un travail d'élaboration de scénarios prospectifs de consommation et de production a été mené. Une première étude se portera sur des écosystèmes territoriaux spécifiques par territoires. Dans le cas de la Corse, l'application locale retenue est un usage de type infra-portuaire stationnaire. La seconde étude concerne une extension à l'échelle du réseau électrique de l'île. Après avoir modélisé le réseau, une optimisation sur le positionnement des équipements de la chaîne hydrogène sera réalisée.*

Mots-Clés – *Hydrogène-énergie, Optimisation multi-objectif par essais particuliers, centrale de production hybride*

1 Introduction

Au sein des zones non-interconnectées, la forte dépendance aux importations des énergies fossiles génère une production d'électricité de plus en plus polluante et coûteuse [1]. En Corse, le coût de production de l'électricité est environ trois fois plus important que celui de la France continentale. Selon l'observatoire régional des énergies (OREGES), en 2017, la consommation totale d'énergie primaire dépendait d'approvisionnements extérieurs à hauteur de 90.2%. Quant à l'approvisionnement électrique de la Corse, ce dernier est assuré sous forme d'un « trépied énergétique » intégrant à part égale : les importations via les liaisons SARCO et SACOI, les moyens thermiques du Vazzio et de Luccianna et les productions renouvelables. Une nouvelle centrale sera mise en service courant 2025. La loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte du 18 août 2015 prévoit l'autonomie énergétique de la Corse à l'horizon 2050. En effet, elle présente des potentiels de production d'électricité à partir de sources renouvelables non négligeables [2]. Néanmoins étant donné le caractère intermittent de ces sources, l'addition de systèmes de stockages permet un maintien de l'équilibre entre l'offre et la demande. Le stockage électrochimique est un des plus connus et exploités mais il demeure intéressant à court terme. Depuis ces dernières années le stockage chimique sous la forme d'hydrogène énergie se développe et s'avère prometteur. L'hydrogène est un vecteur d'énergie c'est-à-dire que cette source n'est pas présente à l'état naturel mais peut être convertie en une autre forme d'énergie. L'hydrogène-énergie s'avérerait être une alternative intéressante pour l'indépendance énergétique et la neutralité carbone des ZNI.

2 Elaboration des scénarios prospectifs

2.1 Elaboration des scénarios prospectifs

Les scénarios de différents rapports [3] qui étaient envisagés pour la période 2018-2021 ont été comparés aux données actuelles (capacités électriques installées, consommation électrique, croissance démographique...). Les plus représentatifs ont ainsi été sélectionnés pour l'élaboration des scénarios propres au projet HyLES. Ces derniers sont présentés au sein de cette partie.

Scénarios de consommation

Le premier scénario est un scénario de type « Tendancier ». Il prend en compte l'intégration des dynamiques de MDE actuelles. Le volet véhicules électriques se base sur les ambitions de la PPE. Le parc de véhicules électriques augmente ainsi de 1% à 20% entre 2020 et 2030 et de 20% à 50% entre 2030 et 2050. Le second scénario correspond à un scénario de « Sobriété Énergétique ». Les actions de MDE considérées sont fortement renforcées et des actions et préventions sur la

sobriété énergétique sont mises en place. Le parc de véhicules électriques augmente de 1% à 50% puis à 100% en 2050. L'hypothèse d'une production électrique majoritairement d'origine renouvelable entre 2030 et 2050 est supposée.

Scénarios de production

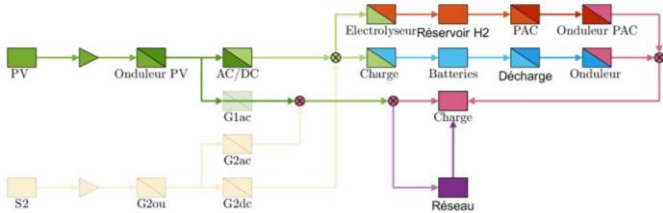
Le premier scénario correspond à un scénario « Tendancier à Catastrophe » en ne proposant aucuns objectifs en termes de développement des énergies renouvelables. Concernant les moyens thermiques, il y a uniquement la centrale du Vazzio qui est arrêtée en 2030. A partir de 2030, une seule filière renouvelable émerge : la filière solaire thermique. Le deuxième scénario intitulé « Sécurité énergétique » vise à garantir la sécurité en approvisionnement électrique de la Corse en développant toutes les filières possibles (renouvelables et thermiques). Le troisième scénario correspond au scénario d'un mix électrique à 100% d'origine renouvelable. Il intègre un développement accéléré de toutes les filières renouvelables existantes et un déploiement de nouvelles filières entre 2040 et 2050 (éoliennes marines). Il suppose également la mise en œuvre de moyens de stockages importants et l'hydrogène pourrait être un des recours de stockage à moyen et long terme.

3 Application aux différentes échelles spatio-temporelles

Application à l'échelle locale

L'île de Corse est dotée de 7 ports dont 2 commerciaux. Dans le cas où le raccordement des ferries à quai deviendrait obligatoire et afin de répondre à cet appel de puissance pouvant dépasser 1 MW, il serait intéressant d'étudier la pertinence d'une centrale hybride intégrant une production d'électricité renouvelable couplée à des systèmes de stockages dont un sous forme chimique c'est-à-dire un stockage hydrogène. L'étude locale se localise à Ajaccio et correspond à un usage infra-portuaire stationnaire avec comme profil de consommation : la consommation électrique de la gare maritime d'Ajaccio et celle d'un ferry lors de son raccordement à quai. Une seule ressource renouvelable est considérée ; la ressource solaire. L'irradiance globale horizontale mesurée à Ajaccio est d'environ 1605.8 kWh/m². Les profils de production et de consommation modélisés sont implantés au sein d'un algorithme de dimensionnement technico-économique. L'optimisation est de type multi-objectif avec la minimisation du coût total du système et de l'énergie importée du réseau électrique. Elle est résolue à l'aide d'un algorithme d'optimisation multi-objectifs par essais particuliers (MOPSO en anglais). Les résultats sont affichés sous la forme d'un Front de Pareto. Cet outil fournit le meilleur compromis entre les deux fonctions objectives. La production d'électricité renouvelable assure les besoins de la charge. Dans le cas d'un surplus de

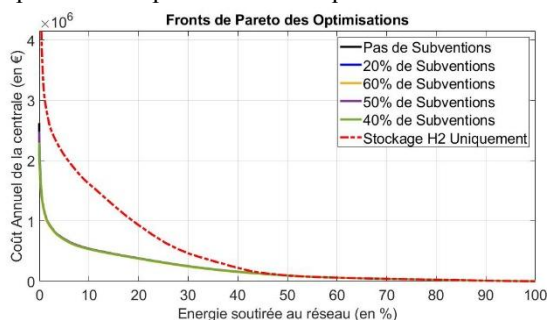
production, l'énergie produite charge les batteries ou alimente un électrolyseur afin de produire de l'hydrogène. Cette production est conservée sous forme gazeuse au sein d'un réservoir en acier. Ce stockage constitue un moyen de stockage à long terme. Quand la production renouvelable n'est pas disponible ou insuffisante pour assurer l'alimentation de la charge, l'hydrogène produit est converti en électricité via une pile à combustible et les batteries se déchargent pour répondre aux pics de puissance non-couverts. La Figure 1 présente un schéma de la centrale décrite précédemment. Du fait de leur manque de maturité, les coûts des équipements hydrogène sont beaucoup plus élevés que le coût des modules de batteries. Néanmoins, les objectifs gouvernementaux et l'augmentation des déploiements de démonstrateurs hydrogène à grande échelle permettent d'ajouter aux coûts des équipements hydrogène des subventions. Pour



l'étude, un éventail de subventions entre 20% et 60% est appliqué sur les coûts de l'électrolyseur, du réservoir et de la pile à combustible.

Figure 1 – Schéma de la centrale hybride

Les premiers résultats de l'étude en Figure 2, montrent dans un premier temps qu'une centrale hybride ayant uniquement un stockage hydrogène possède un coût annuel trois fois plus important qu'une centrale avec deux types de stockages pour un même pourcentage d'énergie importée. Pour des pourcentages de subventions entre 20% et 50%, le coût annuel du système et la configuration de la centrale restent quasiment similaires. Enfin lorsque les subventions apportées sont supérieures à 50%, la capacité des batteries diminue, un électrolyseur de 533 kW et une pile à combustible de 335 kW sont installés. Ainsi des soutiens financiers sur 50% des coûts des équipements hydrogène permettent de viabiliser des centrales hybrides intégrant le vecteur hydrogène. Cependant l'exploitation de cet algorithme présente quelques limites et donc quelques améliorations pourraient être apportées comme par exemple la prise en compte d'autres paramètres tels que le coût d'abattement



du dioxyde de carbone.

Figure 2 – Front de Pareto des optimisations réalisées

Application à l'échelle de l'île

Intégrer l'hydrogène énergie au niveau du réseau électrique suppose d'identifier le placement et le positionnement des équipements hydrogène par rapport au réseau électrique. L'optimisation est réalisée en langage Python, avec l'outil de modélisation PyPSA. Ce dernier est un outil de simulation et d'optimisation des systèmes énergétiques. La fonction objectif est la minimisation des coûts totaux du système et l'optimisation est résolue à partir d'un algorithme de programmation linéaire en nombres entiers (MILP en anglais). Deux approches différentes seront prises en compte, selon l'horizon d'étude considéré. Les résultats attendus pour l'étude sont typiquement : les investissements nécessaires à apporter au réseau électrique et le fonctionnement simultané des composants.

4 Conclusions

Cet article présente les objectifs de cette thèse réalisée dans le cadre du projet HyLES. A l'instar de ce dernier, l'idée est d'apporter une contribution sur l'intérêt de l'hydrogène énergie dans la transition énergétique et la neutralité carbone de trois ZNI dont la Corse. Les travaux réalisés durant cette première année démontrent que l'hydrogène est un bon candidat pour le stockage des énergies renouvelables intermittentes, malgré certains verrous en matière de coûts des équipements et de maturité technologique. Cependant les volontés politiques ainsi que la croissance de la filière et le déploiement de nombreux démonstrateurs devraient permettre de massifier cette technologie et ainsi de viabiliser l'hydrogène dans un futur proche.

5 Remerciements

Ce travail est supporté par l'Agence Nationale de la Recherche sous le projet HyLES (contrat ANR-20-CE05-0035).

Références

[1] CRE (Commission de Régulation des Energies). Transition énergétique dans les ZNI., Septembre 2021. <https://www.cre.fr/Transition-energetique-et-innovation-technologique/soutien-a-la-production/transition-energetique-dans-les-zni/> (consulté le 09.09.2022).

[2] G. Notton. Importance of islands in renewable energy production and storage : The situation of the French islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) doi : 10.1016/j.rser.2015.03.053.

[3] AUE Corse. Programmation Pluriannuelle de l'Energie 2016-2018 et 2019-2023. Octobre 2015. (consulté de 09.09.2022)

Valorisation de déchets de fibres-ciment non amiantes en substitution du ciment dans des mortiers

Nordine Leklou¹, Samir Bouharoun¹, Pierre Mounanga¹

¹ Nantes Université, IUT de Saint Nazaire, CNRS, GeM, UMR 6183, 44600 Saint-Nazaire, France

nordine.leklou@univ-nantes.fr

Thèmes – Génie Civil - Ecomatériaux – Environnement

Résumé – *Ce travail a pour objectif d'étudier la faisabilité de l'utilisation de déchets de fibres-ciment non amiantés en substitution de ciment Portland ordinaire pour la fabrication de mortiers. Les déchets de fibres-ciment, produits lors de la fabrication d'éléments de toiture, ont été initialement broyés pour augmenter leur surface de contact avec l'eau de gâchage. Ils ont ensuite été tamisés afin d'obtenir trois granulométries différentes (0/80 μm , 80/100 μm et supérieure à 100 μm). Après ce traitement mécanique, les particules de fibres-ciment ont été incorporées dans des pâtes et des mortiers avec des taux de substitution massique de 5 et 20%. La cinétique d'hydratation des pâtes et la maniabilité, le retrait total, la porosité accessible à l'eau et les performances mécaniques des mortiers fabriqués avec les fibres-ciment broyées ont été mesurés et comparés aux propriétés d'une pâte et d'un mortier témoins. Les résultats ont montré que la présence de fibres-ciment allonge la période dormante de l'hydratation du liant de 5 à 10% par rapport au ciment Portland utilisé et selon le taux de substitution considéré. Par ailleurs, le remplacement de 5 et 20% de ciment avec des fibres-ciment provoque une réduction de la résistance à la compression à 28 jours des mortiers de 14 à 35% par rapport au mortier de référence. Cette diminution des performances est plus importante que celle observée sur des mortiers incorporant du filler calcaire avec les mêmes taux de substitution du ciment. Les résistances obtenues restent cependant acceptables pour des applications structurelles.*

Mots-Clés – Ciment Portland - filler calcaire - fibres-ciment – valorisation - mortiers.

1. Introduction

La fibre-ciment non amiantée est un matériau de construction relativement récent : les premiers produits en fibres-ciment ont été incorporés dans la construction il y a environ 30 ans, notamment en éléments de toiture. La fibre-ciment est un matériau composite fabriqué à partir de ciment, de fibres de cellulose, d'adjuvants et d'eau. Chaque année, plusieurs tonnes de déchets sont générées par la découpe de panneaux en fibres-ciment durant le processus de production. Ces déchets industriels contiennent du ciment non-hydraté, dont l'activité hydraulique pourrait être (ré)exploitée pour la fabrication de mortiers ou de bétons. Aujourd'hui, la valorisation de ces déchets est une alternative économique envisageable dans différentes applications, mais ils doivent pour cela répondre aux mêmes exigences en termes de qualité et de performances que les matériaux traditionnellement utilisés. De récents travaux ont été menés sur le recyclage de déchets de fibres-ciment non amiantés concassés et utilisés comme granulats de couche de base pour des structures routières [1], mais très peu d'études ont été réalisées sur l'incorporation de ces déchets dans la formulation de mortiers ou de bétons.

L'objectif de notre travail est d'évaluer expérimentalement les propriétés à l'état frais et à l'état durci de mortiers confectionnés avec des déchets de fibres-ciment et de comparer l'effet de ces déchets à celui de filler calcaire couramment utilisé dans la fabrication de matériaux cimentaires. Pour cela, plusieurs formulations de pâtes et de mortiers incorporant des fibres-ciment et du filler calcaire à différents dosages (5 et 20% en remplacement partiel du ciment Portland) ont été réalisées. La contribution de ces matériaux a été évaluée sur les propriétés au jeune âge (notamment la chaleur résultant des réactions d'hydratation), les résistances mécaniques, le module d'Young, la porosité accessible à l'eau, le retrait total et la perte de masse par séchage.

2. Matériaux et mélanges

2.1 Ciment

Un ciment Portland ordinaire (CEM I 52,5 R, en conformité avec la norme européenne NF EN 197-1) a été utilisé. Ce ciment est caractérisé par une finesse Blaine de $440 \text{ m}^2/\text{kg}$ et une masse volumique absolue de $3\,140 \text{ kg}/\text{m}^3$.

2.2 Sable

Pour la fabrication des mortiers, le sable siliceux de Leucate, conforme aux normes EN 196-1, a été utilisé.

2.3 Additions minérales

2.3.1 Filler calcaire

Parmi les 16 mélanges étudiés, 2 pâtes et 2 mortiers ont été fabriqués avec un mélange de filler calcaire et de ciment, afin de comparer les effets de cette addition minérale avec ceux des fibres-ciment. Le filler calcaire (fc) utilisé est du BETOCARB P2, sa teneur en CaCO_3 est de 97,30 %. Ce filler calcaire est caractérisé par une

finesse Blaine de $397 \text{ m}^2/\text{kg}$, une masse volumique absolue de $2\,710 \text{ kg}/\text{m}^3$ et une teneur en eau de 0,1 %.

2.3.2 Fibres-ciment

Les fibres-ciment utilisées proviennent de l'entreprise Ciments Renforcés Industries, filiale de production du groupe ETEX. L'usine produit annuellement plus de 100 000 tonnes de fibres-ciment, et a pour objectif de recycler environ 4 000 tonnes de déchets de fibres-ciment par an. La fibre-ciment est un matériau composite fabriqué à partir de ciment (de 70 à 80 %), de fibres de cellulose (de 5 à 10 %), d'adjuvants et d'eau. Compte tenu du faible dosage en eau utilisé, une quantité non négligeable de ciment reste à l'état anhydre dans le matériau final. Les fibres-ciment pourraient donc posséder un potentiel hydraulique, favorable au développement des performances de mortiers de ciment. Les déchets de fibres-ciment étudiés se présentent sous la forme de copeaux plats et allongés de quelques millimètres d'épaisseur et de plusieurs centimètres de longueur (Figure 1). Ils ont été initialement broyés pour augmenter la surface de contact entre l'eau et les particules de ciment non-hydraté. Ils ont ensuite été tamisés sur une colonne de deux tamis de 80 et 100 μm , afin d'obtenir trois granulométries différentes, inférieure à 80 μm (notée FC80), entre 80 et 100 μm (notée FC100) et supérieure à 100 μm (notée FC>100). La masse volumique absolue des broyats, mesurée au pycnomètre, est donnée dans le Tableau 2.

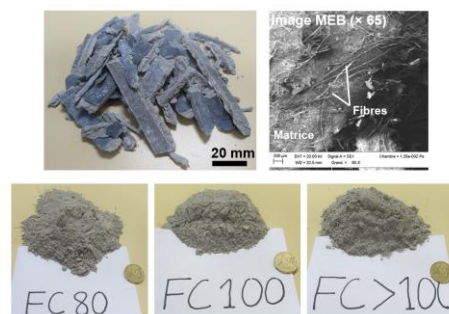


Figure 1. Déchets de fibres-ciment à l'état brut et après broyage et tamisage (FC80, FC100 et FC>100).

Tableau 2. Masse volumique absolue des fibres-ciment.

	FC80	FC100	FC>100
Masse volumique (kg/m^3)	2 250	2 230	2 190

2.4 Mélanges et conditions de conservation

8 mortiers et 8 pâtes de ciment ont été confectionnés et malaxés suivant la norme EN 196-1 avec un rapport eau-sur-liant (E/L) égal à 0,60. Pour les mortiers, le rapport sable-sur-liant (S/L) est égal à 3. Dans cet article, le terme « liant » indique le ciment, utilisé seul dans le cas du mortier de référence (C-100%), ou le mélange binaire de ciment et de fibres-ciment (FC80-5%, FC80-20%, FC100-5%, FC100-20% et FC>100-20%) ou de ciment et de filler calcaire (fc-5% et fc-20%). Les liants binaires sont composés en substituant 5 ou 20 % de la masse de ciment par des fibres-ciment ou du filler calcaire. Des

essais de résistances mécaniques (NF EN 196-1, 2006) ont été réalisés sur les mortiers, tandis que la chaleur d'hydratation a été mesurée sur pâtes par microcalorimétrie isotherme. Les mortiers ont été coulés dans des moules de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Des échantillons de pâtes fraîches ont été prélevés et placés dans des flacons pour la mesure de la chaleur d'hydratation. Les propriétés des mélanges incorporant des fibres-ciment broyées ou du filler calcaire ont ensuite été comparées à celles du mortier et de la pâte témoins fabriqués avec du ciment pur. Après coulage, les moules ont été stockés dans une chambre humide à $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90 % pendant 24 h. Après 24 h, les éprouvettes ont été démoulées et maintenues en chambre humide.

3. Résultats et analyses

3.1 Cinétique d'hydratation

La Figure 2 présente les courbes de chaleur d'hydratation et de flux de chaleur des mortiers en fonction du temps, pour des taux de substitution massique du ciment de 5 et 20%, respectivement. Par effet de dilution [2], la chaleur dégagée par les pâtes contenant les fibres-ciment ou le filler calcaire est plus faible que celle dégagée par la pâte de ciment pur (C-100%). La diminution du flux de chaleur dégagée et de la chaleur de réaction s'accroît à mesure que le taux de substitution du ciment par des fibres-ciment ou du filler calcaire augmente. Les résultats obtenus montrent un retard à l'apparition du principal pic d'hydratation des courbes microcalorimétriques des liants binaires, par rapport à celui de la courbe calorimétrique du ciment pur. Ceci indique notamment que, pour les systèmes cimentaires considérés, les ajouts étudiés ont tendance à allonger la phase dormante de l'hydratation. On note que les retards causés par la présence des fibres-ciment et du filler calcaire sont comparables, pour un taux de substitution donné. Par ailleurs, la finesse des fibres-ciment semble avoir une faible influence sur la vitesse d'hydratation des pâtes pour un dosage en fibres-ciment donné.

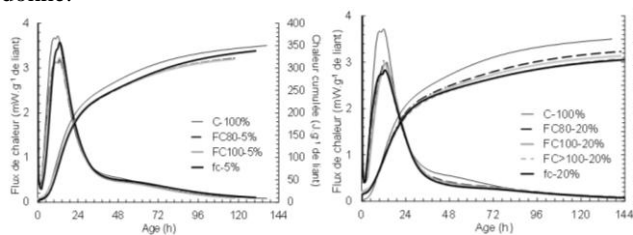


Figure 2. Évolution du flux de chaleur et de la chaleur d'hydratation en fonction du temps pour un taux de substitution du ciment de 5% et 20%.

3.2 Performances mécaniques : résistances à la compression et à la flexion

Les résistances en compression et en flexion à 28 jours des mortiers sont présentées en fonction du taux d'incorporation (5 et 20%) en fibres-ciment et en filler calcaire aux Figures 3a et 3b. Le remplacement partiel du ciment par des fibres-ciment ou du filler calcaire engendre une diminution de la résistance à la compression. Cette

diminution est croissante à mesure que le taux de substitution du ciment augmente : elle se situe entre 12 et 19% pour un taux de substitution de 5% et entre 22 et 35% pour un taux de substitution de 20%. La réduction de la résistance à la compression des mortiers à liant binaire s'explique par leur porosité plus élevée et leur dosage en ciment plus faible, qui induit une diminution de la production d'hydrates. La fraction de fibres celluloses présentes dans la poudre de fibres-ciment (Figure 1), plus légères et relativement peu résistantes en compression, est probablement à l'origine de cet écart de performances. On note également que les mortiers incorporant les fibres-ciment les plus grossièrement broyées (FC>100-5% et FC>100-20%) possèdent les résistances à la compression les plus faibles et que les mortiers confectionnés avec des fibres-ciment FC80 et FC100 ont des propriétés mécaniques quasi similaires, pour un dosage en fibres-ciment donné. En termes de résistance à la flexion, les mortiers FC80-5% et FC100-5% ont les performances les plus élevées, tandis que les mortiers FC>100-5% et FC>100-20% montrent les propriétés les plus faibles. On note par ailleurs que la diminution de performances liées à l'augmentation du dosage en fibres-ciment est moins sensible sur les résultats de résistance en flexion que sur ceux de résistance à la compression.

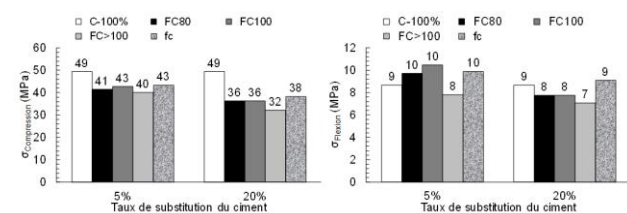


Figure 3a. Résistance en compression à 28 jours. Figure 3b. Résistance en flexion à 28 jours.

Figure 3. Résistance en compression (a) et en flexion (b) à 28 jours.

4. Conclusions

Les résultats obtenus au cours de cette étude nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. La substitution partielle de ciment par des fibres-ciment provoque un allongement de la période dormante d'hydratation du liant comparable à celle observée sur un liant binaire ciment-filler calcaire, pour un même taux de substitution et un même rapport eau-sur-liant ;
2. L'incorporation de fibres-ciment provoque une réduction de la résistance à la compression à 28 jours des mortiers de 14 à 35% par rapport au mortier de référence. Cette diminution est plus importante que celle observée sur des mortiers incorporant du filler calcaire. Les résistances obtenues restent cependant acceptables pour des applications structurales.

5. Références

- [1] Müller A., Schnellert T. et Seidemann M. (2011), *Material Utilization of Fibre Cement Waste*, ZKG International, 3: 60-72.
- [2] Ballim Y. et Graham P.C. (2009), *The Effects of Supplementary Cementing Materials in Modifying the Heat of Hydration of Concrete*, Materials and Structures, 42: 803-811.

Etude et Conception de turbines d'éolienne recyclées pour accroître le taux d'électrification rural à Madagascar : Puissance et efficacité énergétique

L. A. Rajoharisoa ¹

N. Randriatefison ¹

N. M. Murad ²

lalaniaina.physique@gmail.com

randriatefison@yahoo.fr

nour.murad@univ-reunion.fr

¹ Ecole Normale Supérieure, Université d'Antananarivo, Madagascar
Laboratoire des Sciences Expérimentales et Mathématiques (LSEM)

² IUT, Département Réseaux et Télécoms, Université de La Réunion, France
Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie,
L'Environnement et le Bâtiment (PIMENT^{Lab})

Thèmes – *Énergie – Eolienne – Mécanique – Matériaux recyclés*

Résumé – *Le présent article étudie la conception d'une éolienne à partir des matériaux recyclés : turbine de ventilateur, moteur courant continu, bois, sèche-cheveux, pour un banc d'enseignement et de recherche sur l'énergie renouvelable. Après avoir cité les ressources naturelles et les besoins pour accroître le taux d'électrification rurale à Madagascar, nous avons réalisé le système éolien sur un banc d'expérimentation afin de mesurer et d'étudier l'efficacité de rendement de puissance pour plusieurs formes de turbine. Pour des conditions expérimentales données, nous avons étudié les puissances théoriques en fonction de leurs dimensions selon la loi de Betz, puis nous avons mesuré les puissances électriques pour 3 turbines recyclés. Avec une vitesse de vent fixée à 20m/s, les puissances électriques montrent que la turbine 3 est 26,6% plus efficace que la turbine 2 et 52,7% plus efficace par rapport à la turbine 1.*

Mots-Clés – *Eolienne, Turbine, Aérodynamisme, Recyclage, Puissance électrique.*

1 Introduction

Madagascar dispose de multiples ressources énergétiques renouvelables : le vent, le soleil, les rivières, les marées, la géothermie ou la biomasse. Le Programme « De l'électricité verte pour un million de ruraux à Madagascar », est la première initiative d'envergure nationale en matière de développement des énergies renouvelables locales pour : apporter l'électricité à plus d'1 million de ruraux dans les 9 régions du sud de l'île ; améliorer leurs conditions de vie ; promouvoir l'émergence des activités génératrices de revenus dans ces régions

Sachant qu'aujourd'hui ce taux d'électrification rurale est inférieur à 5 %, alors que 70 % de la population vit en milieu rural. Ainsi, il est nécessaire de contribuer au développement social et économique du pays en relevant le challenge de l'accroissement du taux d'électrification rural.

Notre stratégie est d'exploiter des sources d'énergie locales qui n'alourdissent pas la facture énergétique, tout en permettant à la population éloignée du réseau électrique des villes de bénéficier d'énergies modernes. Cette stratégie permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de protéger l'environnement malgache qui est déjà soumis à rude épreuve dans les agglomérations.

Madagascar dispose d'un potentiel d'énergies renouvelables très important et encore peu valorisé, qu'il soit solaire, éolien ou hydraulique. Le projet d'éolien pour 22 communes est en lancé [1]. L'installation se fera dans une région de Madagascar à fort vent où le vent est présent 40% de l'année et où le potentiel de vent reste élevé avec une moyenne journalière de vitesse supérieure à 5m/s. Le choix se porte sur la partie extrême Nord de Madagascar qui est très venteuse avec un maximum de 25,11 m/s et une moyenne de 9 m/s [2].

L'utilisation de l'énergie éolienne pour désenclaver des petits villages et apporter un peu de confort électrique aux habitants sera adopté grâce à la construction d'éolienne artisanale conçue à partir de matériels recyclés : turbine de ventilateur, moteur courant continu, bois, ...

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière [3, 4]. L'énergie cinétique du vent est captée par des pâles afin de la transformer en énergie mécanique. La transformation de cette dernière en énergie électrique est assurée par un générateur électrique [5, 6].

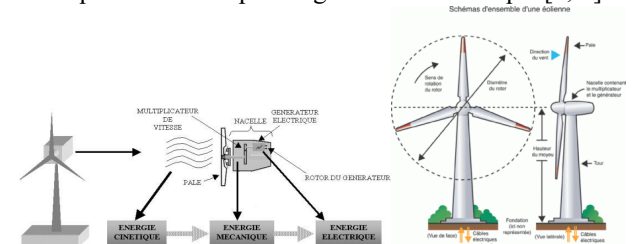


Figure 1 – (a) Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne [4], (b) Schémas d'ensemble d'une éolienne [5]

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie, il existe deux grandes catégories d'éoliennes, qui se réfèrent à la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- les turbines éoliennes à axe horizontal ;
- les turbines éoliennes à axe vertical.

Dans notre cas, les turbines éoliennes à axe horizontal sont privilégiées. Une classification des turbines éoliennes selon leur puissance délivrée et le diamètre de leur hélice est donnée dans le tableau 1 [3]. Pour simplifier la fabrication artisanale en milieu rural, des hélices à petite échelle seront fabriquées et recyclées.

Table 1 – Classification des turbines éoliennes

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 999 kW
Grande	46 m et plus	1.0 MW et plus

Dans cet article, nous avons réalisé un dispositif pour mesurer de l'énergie électrique à partir d'une éolienne construite avec des matériels récupérés pour l'enseignement et la recherche sur l'énergie renouvelable. Ainsi, le modèle de Betz a été utilisé pour définir le seuil théorique de puissance électrique max pour une turbine donnée. Puis, nous avons construit un banc d'expérimentation avec des turbines recyclés. Enfin, l'efficacité mesurée des 3 turbines est confrontée selon la puissance électrique fournie pour un vent constant et une charge électrique donnée.

2 Modélisation aérodynamique

La limite de Betz selon l'équation (1) ne contient que la densité de l'air, la surface du rotor et la vitesse du vent. Selon la théorie de Betz, la puissance maximale ne peut être obtenue qu'avec un rotor idéal [6] et s'exprime de manière simplifier par

$$P_{w\max} = 0,37.S.v^3 \quad (1)$$

Avec, v, la vitesse du vent avant le rotor en m/s et S, la surface (m²) balayé par la longueur aérodynamiquement utile des pales. Le moyeu d'un rotor horizontal, au quelle sont fixées les pales, ne fournit pas de puissance. Toutefois, en tenant compte que son diamètre est petit par rapport au diamètre du rotor D (m), nous introduisons la surface balayée S par

$$S = \frac{\pi.D^2}{4} \quad (2)$$

Alors, on a

$$P_{w\max} = 0,29.D^2.v^3 \quad (3)$$

Nous fixons la vitesse de l'air à v = 20m/s et donnons la puissance max théorique pour les 3 turbines de la figure 3 dans le tableau 2.

Table 2 – Puissance max théorique (vent à 20m/s) par les turbines

	Turbine 1	Turbine 2	Turbine 3
D (10 ⁻² m)	7,4	8,6	11
P _{wmax} (W)	12,70	17,16	28,07

3 Conception du banc d'expérimentation et des turbines éolienne

Des hélices de type Savonius compatible pour le vent, ont été recyclées (figure 3). Un trou au centre de l'hélice a été fait pour insérer l'axe du rotor et devant ce dernier, nous avons fixé un cône avec une colle bougie.



Figure 3 - Turbine n°3, n°2 et n°1 de gauche à droite.

Le dispositif de soufflerie est composé d'un sèche-cheveux et de l'éolienne à la figure 4(a). La turbine démarre et tourne avec le vent produit par la soufflerie. La vitesse du vent est maîtrisée grâce à un variateur de vitesse du moteur dans le sèche-cheveux. On fixe la vitesse à 20 m/s, car la majorité des ventilateurs de sèche-cheveux sont équipés d'un moteur à grande vitesse courant continu de 20 000 tr/min [7]. La turbine est fixée sur l'arbre du moteur à courant continu. L'éolienne est modélisée par un circuit électrique sur la figure 4(b). Le dispositif électrique permet de mesurer la tension U et le courant I aux bornes du moteur CC de l'éolienne pour chaque valeur de la résistance R du potentiomètre. Un potentiomètre de 10kΩ fait office de charge électrique qui modélise la demande en consommation d'un utilisateur.

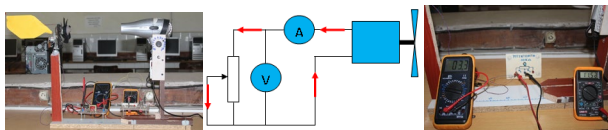


Figure 4 – (a) Dispositif expérimentale de l'éolienne, (b) Schéma électrique de l'expérimentation, (c) Mesures de la tension U et de l'intensité I

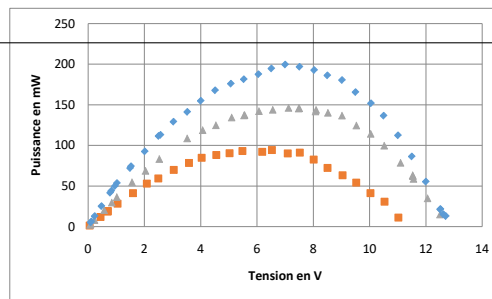
4 Mesures et analyses de performances

En faisant varier la charge R, on mesure le couple U et I (figure 4(c)). On déduit la puissance électrique fournie P. Le tableau 3 montre la puissance max mesurée pour chaque turbine avec une source de vent d'une vitesse v=20 m/s. La distance entre la source de vent et la turbine de l'éolienne est de 25cm.

Table 3 – Puissance électrique mesurée suivant les turbines

Paramètres	Turbine 1	Turbine 2	Turbine 3
S (10 ⁻⁴ m ²)	43,00	58,08	95,03
Poids (10 ⁻³ kg)	20,70	28,36	36,90
U (V)	6,53	7,11	7,00
I (mA)	14,4	20,60	38,9
Pmax (mW)	94,29	146,47	199,5

Chaque courbe de puissance P des turbines, en sortie du moteur électrique, présente un maximum à U=7V (figure 5).



■ Turbine 3, ▲ Turbine 2, ■ Turbine 1

Figure 5 – Puissances électriques générées par les 3 turbines

On définit l'efficacité par $(P_{\max_j} - P_{\max_i}) / P_{\max_j}$, avec i et j l'indice de turbine. Ainsi, la turbine 3 est 26,6% plus efficace que la turbine 2 et 52,7% plus efficace que la turbine 1. De plus, la turbine 2 est 35,6% efficace par rapport à la turbine 1.

5 Conclusions

Madagascar possède un gisement éolien important, surtout dans les parties nord de l'île. Ces ressources peuvent contribuer au développement socio-économique durable pour désenclaver des petits villages ruraux et apporter un peu de confort aux habitants qui n'ont pas de réseau électrique. Cela nécessite une certaine maîtrise des technologies de l'éolienne, qui joue un rôle essentiel pour la formation des élèves par la recherche et aussi à consolider leur engagement personnel pour l'environnement. La conception de l'éolienne à partir des matériels recyclés nous a permis d'étudier et de mesurer l'efficacité des trois turbines suivant leurs dimensions. De plus, sachant que la puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est proportionnel à la surface de la turbine, nos mesures expérimentales sont validées bien que la perte de conversion mécanique/électrique reste importante. Ainsi, la turbine 3 est choisie pour fournir la meilleure puissance électrique pour une électrification en milieu rural avec 3 Leds en série à 7V.

Références

- [1] Fondation Énergies pour le Monde, Ministère de l'Énergie et des Mines, *De l'électricité verte pour un million de ruraux à Madagascar*, www.fondem.org, 60 pages, Mars 2021
- [2] Tamo Andy, Randrianantenaina Eugène J., Soanaoly Juliette, Razafindrazaka Tsilavo M., Ratiarison Adolphe A, *Regionalisation Et Etude Du Vent A 950 Hpa Au Nord De Madagascar (Regionalization And Wind Study At 950 Hpa North Of Madagascar)*, Revue des Sciences, de Technologies et de l'Environnement, p. 244, 245, 2020
- [3] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphane Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nichit, *Etat de l'Art dans les Aérogénérateurs Electriques*, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-154, 2002. HAL Open Science
- [4] Redouane Marouane, *Chapitre I Etat de l'Art sur l'Energie Eolienne*, University of Oxford, Electrical engineering, Academia.edu, Electrical engineering, Academia 2023
- [5] UPVD, *Les Energies Renouvelables : Etat des Lieux et Perspectives*, Université de Perpignan - Via Domitia, UVED-2013
- [6] Manuel Franquesa Voneschen, *Introduction à la théorie des éoliennes*, LA VERITAT, 2010
- [7] Frédéric Pimpaud, *Le catalogue 2021*, Socomix Hygiène, 35 pages, 2021

La plateforme GREEN un laboratoire scientifique à forts potentiels pour la recherche, formation et R&D

Harry RAMENAH

harry.ramenah@univ-lorraine.fr

IUT de Metz, Université de Lorraine
Département Mesures Physiques 57070 Metz

Thèmes – *Énergie – Gestion de l'énergie- Energies Renouvelables*

Résumé – *Les exigences du développement durable incitent les acteurs politiques, économiques et scientifiques à rechercher des solutions pour décarboner, rendre efficace la production, la distribution, le stockage, et augmenter la part de l'électricité d'origine renouvelable. Ces objectifs nécessitant des recherches spécifiques afin de réduire la consommation énergétique des infrastructures et des équipements terminaux, en adéquation avec les quantités d'énergie produites à partir de sources renouvelables. C'est dans ce contexte que le département de mesures physiques de l'IUT de Metz a créé un laboratoire, dit plateforme GREEN*, dédié à la formation, R&D, transfert de compétences, et initiation à la recherche pour les lycéens. La plateforme GREEN est équipée de technologies d'énergies renouvelables fonctionnant en conditions réelles afin de pouvoir modéliser la production d'énergie pour de l'énergie à la demande. Cet article décrit la structure de ce laboratoire, son bilan depuis sa création, son interface avec le secteur industriel et la passerelle vers la recherche.*

* GREEN : *Gestion de Ressources Energétiques et Energies Nouvelles*

Mots-Clés – *Energies Renouvelables, Tous Chercheurs, formation, R&D*

1 Introduction

La plateforme GREEN est installée depuis 2009 au département Mesures Physiques de l'IUT de Metz, sur 200 m², sur deux niveaux et équipée des technologies énergies renouvelables. Financée par des entreprises leaders dans le domaine énergétique et subventionnée par les collectivités locales, elle a été inaugurée [1] en novembre 2011. L'ensemble des équipements est estimé à plus de 700 k€. Soutenue par plus de 600 entreprises dans le Grand Est de la France et pays frontaliers (Allemagne, Luxembourg, Belgique), elle permet en retour d'alimenter ces entreprises en techniciens, ingénieurs, chercheurs et docteurs. Ce laboratoire est dédiée à la formation, R&D et aux transferts de compétences. La plateforme accueille des lycéens de premières et terminales scientifiques ou en filières professionnelles pour de l'initiation à la recherche de par le projet Tous Chercheurs financé par la fondation Bettencourt Schueller à la hauteur de 800 k€ sur 5 ans. La structure de la plateforme est illustrée sur la figure 1.

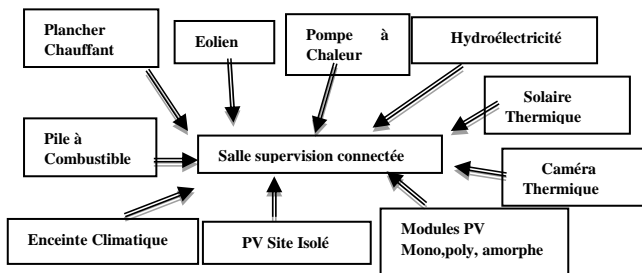


Figure 1. Structure de la plateforme

La salle de supervision et connectée est illustrée sur la figure 2, où chaque ordinateur (20 ordinateurs) est équipé d'un logiciel spécifique suivant le souhait de l'entreprise partenaire de la plateforme.



Figure 2. Salle principale de supervision

Depuis sa création, la plateforme GREEN forme les apprentis en licence professionnelle, propose, des travaux pratiques (TP) et stages PFE pour les élèves d'ingénieurs des grandes écoles de Metz et Nancy, des TP pour des étudiants en L3 et Master (M1 & M2) de l'UFR SciFa à Metz ainsi que des stages pour des entreprises. En recherche et depuis 2011, la plateforme a accueilli

plusieurs doctorants et post doctorants de l'Université de Lorraine afin d'effectuer leurs recherches ainsi que des stages doctoraux de 3 à 6 mois pour d'autres universités françaises, de Maroc, d'Algérie et des Etats Unis. Les sujets doctoraux et stages ont été proposés et dirigés par l'auteur.

2 Description synthétique de la plateforme

Les modules photovoltaïque (PV) polycristallins de marque SCHÜCO sont connectés en séries et sont en façade sud du bâtiment, inclinés à 60° pour favoriser la production pendant la période hivernale. Les modules PV amorphes de marque UNI-Solar d'une puissance équivalente aux polycristallins sont installés sur la toiture du bâtiment sur une surface plane avec une inclinaison de 5°. La puissance totale installée est de l'ordre de 2,5k Wc. L'onduleur des modules polycristallins est un sunny boy de SMA et pour les amorphes c'est de la marque SCHÜCO 1500T monophasé avec un transformateur. Le logiciel PVSOL est utilisé pour dimensionner en 3D les installations PV suivant les projets des entreprises.

Les piles à combustible d'AREVA sont du type PEMFC. L'objectif est d'étudier leurs composantes et performances [2] pour les applications dans le domaine du transport.

Le micro-éolien Skystream de 2,5 kW est à 12 m de haut. Le but est d'adapter le modèle de Weibull pour une zone urbaine [3].

La pompe à chaleur air-eau de Stieble-Eltron fonctionne continuellement entre les mois octobre et mai depuis 2009 afin d'étudier le comportement du COP et autres performances.

La pompe à chaleur alimente la salle de cours de 100 m² en plancher chauffant. Le logiciel de REHAU Win traçant permet de dimensionner une installation.

Dimensionnement et modélisation d'une turbine PELTON compacte pour les projets hydroélectriques, suivant les aspects électriques, mécaniques, hydrauliques et civils.

L'enceinte climatique permet de caractériser les matériaux du bâtiment ainsi que la ventilation [4,5].

Les panneaux solaires thermiques de VIESSMANN sont de deux types, plans et tubes sous vide. L'objectif est de comparer leurs fonctionnements dans les mêmes conditions météorologiques et orientations.

Pour le site isolé, l'objectif est de dimensionner les modules PV et batteries suivant les différentes charges dans une maison.

Les caméras thermiques sont utilisées pour former les industriels afin de vérifier que les normes réglementaires thermiques sont respectées.

L'ensemble du matériel est équipé des capteurs spécifiques (température, ensoleillement, humidité, vent, etc) . Les données sur plusieurs années sont stockées et

utilisées pour modéliser et optimiser la production des différentes technologies[3,6,7,8]fonctionnant dans les conditions réelles.

3 Projet Tous Chercheurs

Le projet Tous Chercheurs est financé par la fondation Bettencourt Schueller à la hauteur de 800 k€ sur 5 ans. Ce projet a contribué en la loi LPR promulguée le 24 décembre 2020. Ainsi, 1 % du budget d'intervention de l'ANR est dédié au financement pérenne du dialogue entre sciences, recherche et société. L'objectif vise à mettre la recherche scientifique à la portée de tous et en particulier à la portée des lycéens. Les élèves adoptent pendant trois jours consécutifs une position de chercheur afin de comprendre une observation et résoudre un problème. Ils proposent des hypothèses de travail, expérimentent, discutent puis communiquent leurs résultats. Des doctorants-tuteurs qui ont bénéficié d'une formation spécifique à l'encadrement de stages Tous Chercheurs guident les élèves dans toutes les phases de leurs recherches (réflexion, questionnement, expérimentation, analyse et restitution des résultats).

Le stage proposé par Tous Chercheurs de Metz [9] avait pour objectif de réfléchir à la conception d'un éco-paquebot utilisant les technologies énergies gratuites naturelles ou énergies propres tout en étant respectueux de l'environnement. Les thèmes proposés sont: photovoltaïque pour un site isolé, photovoltaïque en conditions réelles, étude d'un micro-éolien, étude d'une pile à combustible, caractérisation thermique des matériaux du bâtiment. La figure 3, illustre les différentes phase du projet.



Figure 3. Les phases de réflexion, expérimentation, résultats

Une dizaine de stages de trois jours est organisée chaque année pour des lycéens en terminales scientifiques et bilan a été l'accueil de plus de 700 lycéens de la région Lorraine et d'un autre département entre 2016 et 2020. Malheureusement, les conditions sanitaires covid 2019 ont perturbé le déroulement des stages.

3.1 Exemple des recherches à partir de la plateforme

A partir des données sur plusieurs années, un modèle innovant de prédiction PV, Engle & Granger a été étudié et publié [7]. Ce modèle a ensuite été amélioré pour le rendre encore plus robuste de par le modèle Johansen. Ce dernier a été testé et validé [10] à partir des données PV de l'île de la Réunion. Une validation de prédiction horaire du modèle à partir des données PV de l'île

Maurice est cours avec une équipe de recherche de l'University of Mauritius.

4 Conclusions

La plateforme GREEN est continuellement visitée par les chercheurs, des dirigeants d'entreprises, le grand public, les décideurs politiques et on peut aussi citer son excellence l'ambassadeur de l'Inde. Copiée depuis sa création, on peut constater un essaimage de la plateforme sur plusieurs sites universitaires en métropole. En terme de bilan, c'est la formation de plus 1200 étudiants de L3 au Master et élèves d'ingénieurs, 5 thèses soutenues, 4 projets post doctorants accueille de plusieurs chercheurs invités. A noter que le passage de DUT à BUT permet aux étudiants de MAE au département MP de faire des TP et mener des projets sur la plateforme.

Références

- [1]<http://maxevilleunnouvelelan.over-blog.com/article-conseil-regional-inauguration-de-la-plateforme-green-iut-metz-90167480.html>
- [2] Harry Ramenah, Camel Tanougast. *Techniques of the Green platform for research activities*, IOSR 2019. [doi:10.9790/2402-1312023241](https://doi.org/10.9790/2402-1312023241).
- [3] Harry Ramenah. Camel Tanougast., *Reliably model of microwind power energy output under real conditions in France suburban area*. *Renewable Energy* 91, 2016, p1-10. doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.019
- [4] Souad Morsli, Harry Ramenah, et al. *Effect of aligned and misaligned ventilation opening affecting energy demand, and air quality in buildings* EPJAP 2018 <https://doi.org/10.1051/epjap/2018180119>.
- [5] Lahoucine.Ouhsaine, Harry Ramenah et al. *Dynamic state-space model and performance analysis for solar active walls embedded PCMs*, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Oct.2020, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100401>
- [6] Moustapha Ba, Harry Ramenah et al. *Forseeing energy photovoltaic output determination by a statistical model using real module temperature in the North East of France*, *Renewable Energy*, doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.051, 2017.
- [7] Harry Ramenah, et al, *Accurate Determination of Parameters Relationship for Photovoltaic Power Output by Augmented Dickey Fuller Test and Engle Granger Method*, *AIMS-Energy*,2019 pp.19–48. [doi: 10.3934/energy.2018.1.19](https://doi.org/10.3934/energy.2018.1.19).
- [8] Harry Ramenah,, *From Engle & Granger model to Johansen model for a more accurate PV power output forecast*.*Annals of M&P*. sept.2022 .doi: [10.17352/amp.000051](https://doi.org/10.17352/amp.000051)
- [9] Harry.Ramenah, Camel Tanougast. *Understanding Sciences Through Participatory Research*. *Advances in SSRJ* 2019. [doi: https://doi.org/10.14738/assrj.611.7418](https://doi.org/10.14738/assrj.611.7418).
- [10] Yannick .Fanchette, Harry Ramenah, et al. *Applying Johansen VECM cointegration approach to propose a forecast model of photovoltaic power output plant in Reunion Island*. *AIMS Energy* 2020. [doi:10.3934/energy.2020.2.179](https://doi.org/10.3934/energy.2020.2.179)

BUT, SAé et recherche
Démarche QHSSE en microbrasseries et perception de la qualité de la bière
BeeR Economic in Water

Claire-Emmanuelle MARCATO-ROMAIN¹

claire-emmanuelle.romain@iut-tlse3.fr

Valérie DOSSAT-LETISSE¹

valerie.letisse@iut-tlse3.fr

Mikaël AKIMOVICZ²

mikael.akimovicz@iut-tlse3.fr

¹ IUT Paul Sabatier, Département HSE

Université Toulouse 3, Laboratoire de Biotechnologies Alimentaires et environnementales (LBAE)
24 rue d'Embaquès
32000 AUCH

² IUT Paul Sabatier, Département GEA

Université Toulouse 3, Laboratoire d'Etude et de Recherche sur l'Economie, les Politiques et les Systèmes sociaux (LEREPS)
24 rue d'Embaquès
32000 AUCH

Thèmes – *Biologie - Environnement - SHS*

Résumé – *Dans le cadre du développement simultané d'activités de recherche interdisciplinaires, entre sciences humaines et sociales (SHS) et biotechnologies, et de Situations d'Apprentissage et d'Evaluation (SAé) sur le campus d'Auch, un pont a été fait entre le projet de recherche BREW (BeeR Economic in Water) portant sur la réutilisation des eaux usées dans les microbrasseries, et le BUT Hygiène Sécurité Environnement.*

Ancrée territorialement, cette action a permis aux étudiants de trouver un terrain d'apprentissage « grandeur nature », et en échange d'apporter des éléments de connaissance aux brasseurs sur la gestion de leurs déchets, de leurs eaux usées et de la qualité alimentaire dans leur processus de fabrication.

Cette première collaboration a également permis une évaluation des rejets et des analyses préliminaires au projet de recherche BREW, soulignant la nécessaire quantification des eaux usées rejetées pour identifier des solutions de réutilisation, d'une part, et les actions déjà entreprises en terme de Responsabilité Sociétale de l'Entreprise pouvant contribuer au volet SHS et à la perception de la qualité de la bière par le consommateur d'autre part.

Mots-Clés – *Déchets, eau, qualité alimentaire, résilience économique*

1 Contexte

1.1 Water Occitanie

Les « défis clés » sont des initiatives de la Région Occitanie pour soutenir les dynamiques collectives des acteurs de la recherche en Occitanie autour de 15 thématiques, dont l'eau. Ainsi, le défi Water Occitanie (WOC) vise à stimuler des recherches interdisciplinaires sur la réutilisation de l'eau, sa mise en œuvre et l'évaluation de sa pertinence.

Dans le cadre d'un appel à projets lancé par ce défi clef, des enseignants-chercheurs de l'IUT Paul Sabatier se sont associés pour allier des compétences en sciences humaines et sociales (SHS) et en biotechnologies.

1.2 Projet BREW - BeeR Economic in Water

Le brassage de la bière, activité qui s'est largement développée en Occitanie, est une activité gourmande en eau. Susceptibles de pouvoir réaliser des efforts sensibles pour réduire leur consommation d'eau via des étapes de traitement et de réutilisation des effluents aqueux et de leurs contenus minéraux et organiques, les brasseurs sont également sensibles à l'intégration de la dimension environnementale dans la définition de la qualité de leurs bières.

Question sociétale, la gestion de l'eau est également un sujet de préoccupation pour les consommateurs de plus en plus responsables de leurs décisions d'achats. Toutefois les procédés de traitement et de réutilisation de l'eau peuvent être perçus de manière négative par ces derniers. Dans le projet interdisciplinaire BeeR Economic in Water (BREW), nous proposons de qualifier les eaux grises issues de l'activité de brassage pour définir des scénarii de traitement et de réutilisation de l'eau tout en nous posant simultanément la question de la perception de la qualité de la bière par les consommateurs afin de mettre en évidence les facteurs contribuant à la construction de cette qualité.

1.3 BUT HSE

Le déploiement de la 2ème année du BUT Hygiène Sécurité Environnement (HSE) demande à développer une Situation d'Apprentissage et d'Evaluation (SAé) consacrée à la proposition d'un plan de gestion des déchets, rejets et/ou ressources.

Ainsi, il a été imaginé que les étudiants contribuent au projet BREW en établissant un inventaire des eaux usées des microbrasseries et en caractérisant certains de leurs rejets, en collaboration avec le Laboratoire de Biotechnologies de l'Environnement (LBE), partenaire du projet BREW. Dans cette SAé, les étudiants agissent en tant que conseillers en management des risques pour

l'environnement sollicités par un réseau de brasseries de très petite taille pour les accompagner dans le déploiement d'une démarche environnementale et de la communication associée.

Ainsi, outre les missions adossées au projet BREW, d'autres missions leur ont été confiées :

- Une analyse du contexte réglementaire applicable aux micro-brasseries (eaux usées, déchets) ;
- Une évaluation des déchets et un plan d'actions assorti ;
- Une première approche de la qualité alimentaire avec notamment le contrôle de la flore d'altération de la bière (bactéries lactiques, *Saccharomyces diastaticus*) ;
- Un accompagnement pour faire valoir les actions entreprises en terme de Responsabilité Sociétale de l'Entreprise (RSE).

2 Méthode

Les étudiants ont dans un premier temps réalisé une recherche juridique en se centrant sur des spécialités telles que « eaux usées », « biodéchets » ou encore « hygiénisation » de façon à cibler les obligations des microbrasseries.

Puis ils ont réalisé une visite d'entreprise de façon à établir un diagramme de flux et à procéder à une évaluation des déchets et des rejets. La Braxéenne et Jean Brasse, deux micro-brasseries membres de l'association BRIO (BRasseurs Indépendants d'Occitanie), créée en 2017, ont ainsi accueilli les étudiants. Au cours de la visite, des échantillons d'eaux de lavage et de drèches ont été prélevés pour analyse au LBE. Les échantillons d'eau ont ensuite été analysés en termes de pH, conductivité, turbidité, filtrabilité, et demande chimique en oxygène (DCO). Le potentiel méthanogène des drèches a été évalué.

En parallèle, des prélèvements de moût et de bière d'une part, et d'air dans les salles de brassage et de concassage du malt d'autre part, ont été réalisés pour l'analyse de la flore d'altération. La détection des bactéries lactiques et des levures a été conduite sur les échantillons de bière par une méthode PCR (Invisible Sentinel, Biomérieux). Les prélèvements d'air ont été impactés sur géloses sélectives de différents types de flore (flore totale, levures et moisissures notamment).

3 Premiers résultats

3.1 Déchets

Le travail en temps limité dans un cadre pédagogique n'a pas permis de finaliser un inventaire des déchets quantitatif. Une des poursuites du travail d'évaluation

serait donc de mieux quantifier les volumes ou masses produits.

En ce qui concerne le plan de maîtrise des déchets, les microbrasseries étudiées sont déjà particulièrement attentives au devenir de leur déchets, et différentes actions sont déjà conduites pour les réduire à la source, les réemployer ou les valoriser au maximum.

La réduction à la source et le réemploi sont notamment mis en œuvre par l'utilisation de la consigne sur les bouteilles de verre de 75 cL, via le système Consign'Up. Les déchets plastiques d'emballage sont repris par les fournisseurs, les biodéchets (drèches) sont valorisés en alimentation humaine ou animale.

Quelques pistes d'améliorations ont pu être formulées par les étudiants, relatives notamment au suivi documentaire des déchets par la mise en place d'un registre des déchets, conformément au Code de l'Environnement.

3.2 Eaux usées

Pour cette partie encore, il n'a pas été possible de conduire une approche quantitative précise, mais il apparaît que les volumes les plus importants sont produits au moment du nettoyage et de la désinfection des équipements.

L'analyse qualitative des eaux de lavage a souligné les fortes variations de pH dues aux agents utilisés pour la désinfection des équipements (soude, acide péraétique), ainsi que des teneurs très variables en DCO. Ces résultats sont en accord avec les observations réalisées par l'ENIL sur 20 microbrasseries franc-comtoises. Cependant, la qualification et la quantification des eaux usées produites lors du nettoyage devra être précisée dans le cadre du projet de recherche BREW, et toutes les informations restent à obtenir pour les eaux usées produites en phase de fabrication (brassage essentiellement).

3.3 Flore d'altération

La bonne qualité de l'air dans les différentes salles des microbrasseries a pu être vérifiée aussi bien pour la flore totale que pour les levures et moisissures.

Cependant, l'analyse met en évidence un effet de l'étape de concassage sur la charge en levures et moisissures dans la salle. Une circulation d'air assurée par la présence d'une ouverture vers l'extérieur (fenêtre ou porte) limite l'accumulation de cette contamination. La vigilance doit donc être mise sur le système de ventilation dans toutes les zones et notamment dans la zone de concassage afin de renouveler l'air plus souvent. Un système de captation à la source peut aussi être envisagé.

L'absence de bactéries lactiques a été vérifiée dans tous les fermenteurs analysés, mais pour un, la présence de

levures *S. diastolicus* a été mise en évidence par l'approche PCR. La provenance de cette contamination est à déterminer : levain, grain concassé. Une attention particulière devra être portée sur ce fermenteur afin d'identifier la cause de cette pollution.

3.4 Responsabilité Sociétale de l'Entreprise

Les microbrasseries La Braxéenne et Jean Brasse conduisent déjà différentes actions sur les piliers établis par la norme ISO 26000 relative à la RSE. Les étudiants ont pu ainsi établir une liste d'actions et proposer une page web valorisant la démarche des brasseurs, en particulier sur les questions centrales relatives à l'environnement, aux Communautés et développement local, et aux questions relatives aux consommateurs.

A moyen terme, ces actions pourraient également être considérées dans le projet de recherche BREW sur le volet SHS lors de l'étude de la perception de la qualité de la bière par les consommateurs.

4 Conclusions

L'adossement d'une SAé à un projet de recherche interdisciplinaire a permis des bénéfices réciproques entre étudiants, brasseurs, et laboratoires de recherche :

- De l'avis unanime des étudiants, apprendre dans le cas d'un projet de recherche, en lien direct avec un professionnel, a permis de s'impliquer davantage dans le travail et d'élever le niveau d'exigence ;
- Les professionnels ont apprécié l'apport plutôt théorique des étudiants et espèrent pouvoir prolonger le travail sur les déchets et la RSE, même en dehors du projet de recherche ;
- Les différentes parties du projet BREW ont pu mieux comprendre les attentes et contraintes matérielles des autres, ce qui sera très utile à la réalisation de campagnes d'échantillonnage de plus grande ampleur dans le cadre du projet de recherche.

5 Remerciements

Les auteurs remercient la région Occitanie pour le soutien financier du projet BREW et expriment leur gratitude à A. Champeau, E. Bille, S. Dauvois, A. Battimelli et G. Plantard pour l'accompagnement des étudiants.

Références

[1] ENIL, Vincent Alarcon. Maîtrise de l'eau et des effluents dans les microbrasseries. Projet R&D BEER : Bière Eau Effluent Région, 2019, 28 p.

Installation d'un nanoréseau CC (Courant Continu) pour l'étude des gains énergétiques dans le secteur tertiaire à La Réunion

Olivia Bory Devisme¹ Pierre-Olivier Lucas de Peslouan² Frédéric Alicalapa³
Denis Genon-Catalot⁴ Jean-Pierre Chabriat⁵ Laurent Lemaitre⁶

olivia.bory-devisme@univ-reunion.fr pierre-olivier.lucas-de-peslouan@univ-reunion.fr
frederic.alicalapa@univ-reunion.fr denis.genon-catalot@lcis.grenoble-inp.fr

^{1,2,3,5} Université de La Réunion

Laboratoire ENERGY-Lab, EA4079

⁴ Université Grenoble Alpes

Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes, EA3747

⁶ Intégrale Ingénierie

L'Eperon, Saint-Gilles-les-Hauts, La Réunion

Thèmes – *Énergie - Environnement - Informatique - Électronique*

Résumé – *Dans le cadre de la Loi de la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) les départements français d'outre-mer, dont l'île de La Réunion, ont pour objectif d'atteindre l'autonomie énergétique en 2030. Le territoire, actuellement dépendant à 68% des énergies fossiles, possède un fort potentiel d'énergie solaire. Afin de maximiser la production d'électricité provenant de panneaux photovoltaïques, cet article présente la conception et l'implémentation d'un nanoréseau PV-Batterie distribué en courant continu (CC) dans des locaux du secteur tertiaire. Le but principal de ce projet est de diminuer les pertes énergétiques liés aux multiples étapes de conversion, présentes dans le cas d'un nanoréseau intégrant de l'énergie solaire et distribué en courant alternatif (CA). Le nanoréseau CC déployé est détaillé en plusieurs parties : différences avec un nanoréseau CA, conception et intégration d'un système de gestion de l'énergie basé sur le protocole PoE (Power Over Ethernet).*

Mots-Clés – *Nanoréseau CC, énergie solaire, batterie LifePO4, système de gestion de l'énergie.*

1 Introduction

Le décret BACS (Building Automation and Control System) stipule qu'à partir de septembre 2022, les bâtiments tertiaires de plus de 1000 m² doivent référencer leurs données de consommation énergétique afin de justifier leur engagement au respect du décret tertiaire [1]. En 2020, à La Réunion, le secteur tertiaire représente 41% de la part d'électricité consommée, selon EDF Réunion. Par ailleurs, 1 kWh électrique produit sur l'île émet 687 gCO₂eq [2]. Diminuer l'impact carbone des bâtiments nécessite donc d'agir premièrement sur la réduction des consommations énergétiques, par l'utilisateur et les rénovations (sensibilisation, instrumentation, isolations, protections solaires). Quant à la production d'électricité, les énergies renouvelables sont une des solutions locales permettant de diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Le potentiel des nanoréseaux CC (Courant Continu) est étudié depuis plusieurs années [3] puisqu'ils présentent des avantages en termes d'efficacité, de gains énergétiques (de 15 à 40%) et d'impact carbone : ils promettent moins de conversions d'énergie, moins d'équipements et un rendement global supérieur à un nanoréseau CA (Courant Alternatif).

2 Les nanoréseaux CA et CC

2.1 Définition

D'après [4], un nanoréseau est défini comme un « système de distribution de l'énergie, ayant au moins une charge et au moins une passerelle vers l'extérieur. Il a la capacité de fonctionner en mode îloté ou connecté au réseau ». La distribution électrique du nanoréseau peut s'effectuer en courant continu, en courant alternatif ou de façon hybride. Généralement, ils intègrent des sources d'énergies renouvelables (PV, éolienne) et un système de stockage. Plusieurs nanoréseaux interconnectés forment un microréseau.

2.2 Les nanoréseaux dans le secteur tertiaire

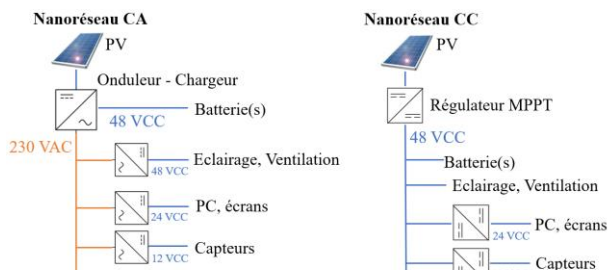


Figure 1 – Distribution électrique d'un nanoréseau CA et CC

La figure 1 représente la distribution électrique effectuée dans le cas d'un nanoréseau CA (architecture électrique classique, majoritairement déployée

actuellement) et CC (celle choisie dans le cadre de ce projet) intégrant de l'énergie solaire en secteur tertiaire.

Dans le cas d'un nanoréseau CA, chaque équipement possède un convertisseur CA/CC intégré, afin d'être compatible avec une distribution en 230 VAC. Le nanoréseau CC n'a pas d'onduleurs mais possède plusieurs bus de distribution (**48, 24, 12 et 5 VCC**) afin d'alimenter aux tensions adéquates les équipements fonctionnant nativement courant continu.

3 Déploiement d'un nanoréseau CC

3.1 Présentation du site

Le site choisi pour le déploiement du nanoréseau CC est une entreprise du secteur tertiaire dont les locaux de 589.58 m², sont localisés à l'Eperon au 3^{ème} étage du bâtiment « Le Carat », à Saint-Gilles-les-Hauts sur l'île de La Réunion.



Figure 2 – Vue extérieure site d'installation du nanoréseau CC

Le comptage d'énergie des locaux est réalisé par typologie d'équipements (éclairage, climatisation, bornes de véhicules électriques, équipements bureautiques). La consommation énergétique des locaux est de **83.3 kWh/m²/an** selon les relevés réalisés en 2022.

La part des équipements fonctionnant en courant continu (bornes VE, éclairage, onduleur, serveurs, ordinateurs, écrans) représente **42 %** de l'énergie totale consommée.

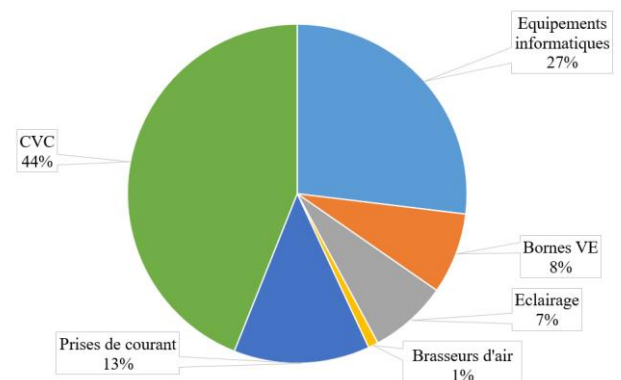


Figure 3 – Répartition de la consommation énergétique annuelle (kWh/an) par équipements

Les serveurs et la majorité des écrans et ordinateurs des locaux sont alimentés par un **onduleur** équipé de plusieurs batteries de 12V. En cas de coupure électrique, une autonomie énergétique de quelques minutes est assurée pour ces équipements. Des compteurs d'énergie ont été placés en amont de l'onduleur et en amont de chaque équipement alimenté par l'onduleur. Les mesures

démontrent que le fonctionnement de l'onduleur sollicite **18 %** de l'énergie dédiée aux équipements informatiques.

Quant à l'**éclairage**, des mesures ont été réalisées en laboratoire, sur les panneaux de leds utilisés dans les locaux. La consommation d'énergie mesurée en amont et sortie du convertisseur CA/CC des leds démontre que **13%** de l'énergie utilisée pour l'éclairage est destinée à la conversion du courant alternatif en continu.

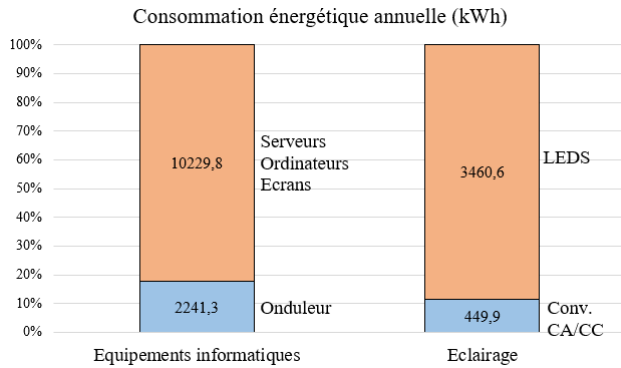


Figure 4 – Consommation énergétique (kWh) des conversions liées à l'éclairage et les équipements informatiques

Pour ce projet, il a été choisi d'étudier les gains énergétiques d'une distribution CC pour les équipements informatiques, l'éclairage et la ventilation. Deux bureaux des locaux serviront de « bancs de tests » et seront exploités pour le déploiement du nanoréseau CC.

3.2 Eléments du nanoréseau CC

Le nanoréseau est constitué d'une centrale photovoltaïque de 3 kWc, une batterie LifePO4 de 3.3 kWh, de panneaux de leds, de brasseurs d'air CC, deux écrans et deux micro-ordinateurs, alimentés en 48 VCC grâce à la technologie PoE (Power Over Ethernet). Ces éléments sont présentés sur la figure 4 :

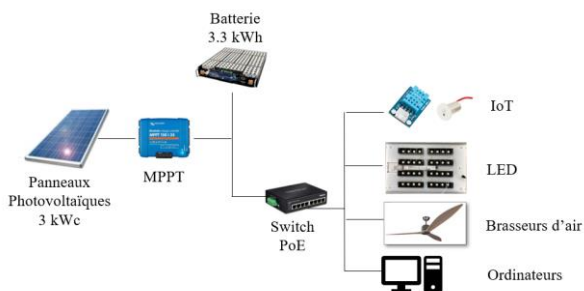


Figure 5 – Architecture du nanoréseau CC

La norme PoE 802.3bt a été choisie afin de diminuer les quantités de câblages puisqu'elle permet grâce à un seul câble RJ45, d'alimenter et piloter les équipements en IP (Internet Protocol), tout en mesurant leur consommation énergétique.

3.3 Prévision solaire et gestion de l'énergie

Afin d'anticiper l'état de charge de la batterie, il est prévu d'implémenter un système de gestion de l'énergie basé sur la prévision d'énergie solaire disponible. Une

station solaire et météorologique référencée sur le réseau IOS-net du laboratoire ENERGY-lab [5] a été installée sur le toit des locaux. La toiture est inclinée de 15° et est orientée Ouest. La station est équipée de 2 pyranomètres, dont un positionné dans le plan d'inclinaison de la centrale photovoltaïque :

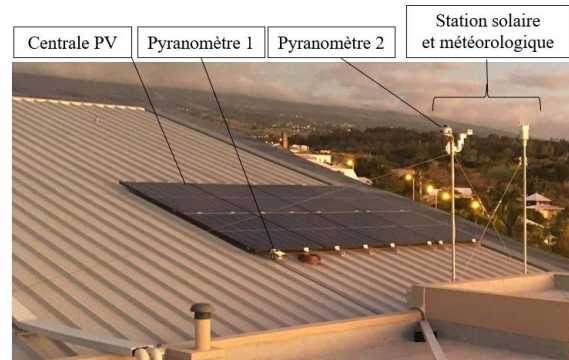


Figure 6 – Centrale photovoltaïque, station solaire et météorologique en toiture

4 Conclusions

Cet article met en évidence par l'instrumentation de certains équipements, les pertes énergétiques liées aux étapes de conversion du courant alternatif vers continu dans des locaux tertiaires. L'implémentation d'un nanoréseau CC dans les mois à venir, devrait permettre de confirmer ou non les gains énergétiques potentiels qui pourraient être obtenus sur l'éclairage, la ventilation et les équipements bureautiques. L'ajout d'un système de gestion de l'énergie a pour objectif d'anticiper le comportement de charge et décharge de la batterie, et d'agir en conséquence sur le pilotage des équipements terminaux pour augmenter sa durée de vie.

5 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude envers l'entreprise Intégrale Ingénierie, l'Université de La Réunion, l'Université de Grenoble-Alpes et l'ANRT dont les financements permettent la réalisation de ce projet.

Références

- [1] Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021, *JORF n° 0196 du 24 août 2021*, 2021
- [2] Vanessa Rakotonso, *Évaluation des émissions de gaz à effet de serre du mix électrique de territoires insulaires*, Conférence IBPSA France – Marne-la-Vallée, 2016.
- [3] Gelani, H.E.; *AC vs. DC Distribution Efficiency: Are We on the Right Path?* Energies, 2021.
- [4] Daniel Burmester, *A review of nanogrid topologies and technologies*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.
- [5] IOS-net open data network : <https://galilee.univ-reunion.fr>

Modélisation de l'évaporation et de la condensation à micro-échelle

Moritz Wolf¹

Eric Valério²

Irina Graur Martin³

M.C.W.Wolf@tue.nl eric.valerio@univ-amu.fr irina.martin@univ-amu.fr

¹Eindhoven University of Technology

² IUT, Aix-Marseille Université
Laboratoire IUSTI, UMR CNRS 7343

Thèmes – *Énergie - Mathématiques - Mécanique*

Résumé – *Un test de référence (benchmark) cinétique est proposé pour l'évaporation de l'argon à partir de sa phase liquide. Nous avons simulé l'évaporation et condensation par trois méthodes différentes. Ces méthodes sont : la méthode des moments appliquée à l'équation de Boltzmann, la méthode de vitesses discrètes appliquée à l'équation cinétique S- modèle et celle de la dynamique moléculaire. Les résultats obtenus sont comparés avec l'approche classique de Hertz-Knudsen et de Schrage en termes du taux d'évaporation, des sauts de pression et de température.*

Mots-Clés – *changement de phases, évaporation, cinétique approche, saut de pression et de température*

1 Introduction

L'évaporation et la condensation sont les processus les plus efficaces pour améliorer le transfert de chaleur dans les espaces confinés. Cependant, le développement d'outils performants pour la modélisation de ces processus nécessite une compréhension claire de l'applicabilité des approches existantes.

On sait depuis longtemps [1], [2] qu'au voisinage d'une surface de liquide en évaporation existe une couche, où la vapeur est dans l'état de non-équilibre. Cette couche, dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques libres parcours moyens moléculaires, est trop fine à l'échelle macroscopique et les comportements des paramètres macroscopiques à l'intérieur de cette couche ne peuvent pas être décrits dans le cadre d'une approche continue. A l'intérieur de cette couche, appelée habituellement la couche de Knudsen, les paramètres macroscopiques ont de forts gradients, surtout lorsque la vitesse d'évaporation n'est pas faible par rapport à la vitesse de gaz la plus probable. Par conséquent, la température de l'interface liquide et la pression de saturation de vapeur correspondante pourrait être différente de la température et de la pression du côté supérieur de la couche de Knudsen. Par conséquent, lors de l'utilisation de l'approche continue pour simuler les phénomènes d'évaporation-condensation, il est important de relier les paramètres sur l'interface liquide, comme la température et la pression de saturation correspondante, avec les paramètres à la limite supérieure de la couche de Knudsen où la modélisation basée sur l'approche continue commence à être pertinente. Ces expressions, qui permettent de relier les paramètres macroscopiques des deux côtés de la couche de Knudsen sont souvent appelées conditions de sauts de pression et de température. Néanmoins, les deux paramètres, la pression et la température, varient continument à travers cette couche, seule sa très faible épaisseur pourrait donner l'impression à l'échelle macroscopique que les deux paramètres subissent un saut.

2 L'approche cinétique

Pour simuler le phénomène d'évaporation en utilisant l'approche continue de Navier-Stokes-Fourier les relations entre les paramètres à l'interface d'évaporation, à savoir, la température du liquide, T_L , et la pression de saturation correspondante, $p_{sat}(T_L)$ et les paramètres sur la limite extérieure de la couche de Knudsen, à savoir la vitesse d'évaporation, u_{inf} , la pression, p_{inf} , et la température, T_{inf} , doivent être connus.

Toutes les expressions largement utilisées pour relayer les paramètres mentionnés ci-dessus proviennent de la théorie cinétique des gaz [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Les expressions de Hertz-Knudsen [1], [2] et de Schrage [3]

très largement utilisées, ont été dérivées en supposant uniquement la conservation de la masse à travers la couche de Knudsen et en ignorant les collisions intermoléculaires à l'intérieur de cette couche. La méthode des moments de l'équation de Boltzmann (MM) [4], [5] est basé sur trois lois de conservation (masse, quantité de mouvement et énergie) et permet de considérer la collision intermoléculaire en introduisant un paramètre supplémentaire. Cette approche représente donc une technique plus fiable.

Toutes les approches mentionnées ci-dessus sont valable pour les gaz monoatomiques. C'est ainsi que l'évaporation de l'argon monoatomique de sa phase liquide a été simulée à l'aide de l'équation cinétique du S-modèle [8], par la méthode de vitesse discrète [9]. Les données d'évaporation d'argon issues de la dynamique moléculaire (MD) [10] sont choisies pour avoir la possibilité de comparer les approches analytiques et numériques issue de la théorie cinétique avec celle de la technique MD.

Nous avons constaté que la solution numérique de l'équation cinétique du S-modèle [8] fournit des résultats en bon accord avec les résultats de dynamique moléculaire de Réf. [10], voir Tableau 1. Les résultats de la méthode des moments concordent très bien avec les deux approches mentionnées précédemment, tandis que les expressions analytiques de Hertz-Knudsen et de Schrage, largement utilisées, surestiment le taux d'évaporation et ne permettent pas d'obtenir tous les paramètres macroscopiques au limite supérieure de la couche de Knudsen.

Table 1 – Le taux d'évaporation J

T_L K	u_∞ $m \cdot s^{-1}$	J		
		MM	S-mod	[10]
		$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$		
86.8	14.7	105.24	105.27	105.46
87.8	26.3	185.11	185.04	184.45
89.4	38.3	276.43	276.33	278.44
90.6	49.2	351.05	350.99	365.52
94.1	73.0	541.25	541.90	583.24

Les profils de la distribution de température à l'intérieur de la couche de Knudsen sont présentés sur la Fig. 1, où les résultats MD sont tracés avec les résultats du modèle S. Il est clair que la composante normale de la température de vapeur subit un saut essentiel sur l'interface.

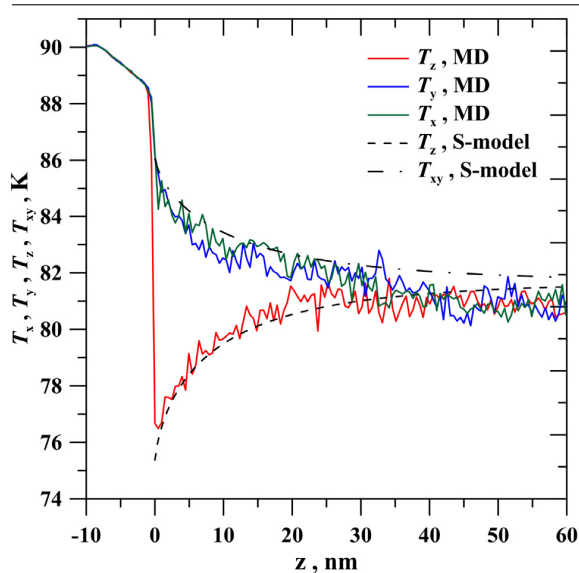


Figure 1 – Comparaison des résultats de la dynamique moléculaire avec les résultats du modèle S pour $Ma = 0.2$ températures parallèles $T_{x,y}$ et normales T_z .

3 Conclusions

Les hypothèses faites pour la dérivation des expressions les plus utilisées de Hertz-Knudsen et de Schrage ainsi que celles pour les expressions analytiques de la méthode du moment ont été comparées et les recommandations de leur utilisation sont fournies. Les résultats obtenus à partir de la solution numérique de l'équation cinétique du S-modèle ont été comparés à l'expression citée précédemment et l'excellent accord entre les résultats de la méthode des moments et de l'équation du S-modèle a été montré. Les données de dynamique moléculaire sont également très proches des résultats cinétiques du S-modèle. Les données proposées pour l'évaporation de l'argon pourraient être utiles pour le développement ultérieur des approches numériques pour simuler le processus de l'évaporation.

Références

- [1] H. Hertz, Über die verdunstung der flüssigkeiten, insbesondere des quecksilbers, im luftleeren raume, Ann. Phys. Chem. 17 (1882)177-200.
- [2] M. Knudsen, Die maximale verdampfungsgeschwindigkeit des quecksilbers, Ann. Phys.Chem. 47 (1915) 697{708.
- [3] A. Schrage, A Theoretical Study of Interphase Mass Transfer, Columbia University Press, New York, 1953.
- [4] S. I. Anisimov, Vaporization of metal absorbing laser radiation, Journal of Experimental and Theoretical Physics 54 (1) (1968) 339{342.
- [5] T. Ytrehus, Molecular flow effects in evaporation and condensation at interfaces, Multiphase Sci. Technol. 9 (2005).
- [6] C. Cercignani, Rare ed gas dynamics. From basic concepts to actual calculations, 1st Edition, Cambridge University Press, 2000.

[7] Y. Sone, Kinetic Theory and Fluid Mechanics, Birkhauser, Boston, 2002.

[8] E. M. Shakhov, Generalization of the Krook kinetic relaxation equation, Fluid Dyn. 3 (5) (1968) 95-96.

[9] A. P. Polikarpov, I. Graur, E. Y. Gatapova, O. A. Kabov, Kinetic simulation of the nonequilibrium effects at the liquid-vapor interface, International Journal of Heat and Mass Transfer 136 (2019) 449-456.

[10] Z. Liang, T. Biben, P. Keblinski, Molecular simulation of steady-state evaporation and condensation: Validity of the Schrage relationships, International Journal of Heat and Mass

Caractérisation et performances thermiques des fibres de *Furcraea Foetida* en tant que matériau isolant en vrac

Hélène CAILLET^{1,2}

helene.caillet@univ-reunion.fr

Julie BASCAULES^{1,2}

julie.bascaules@gmail.com

Youssoufou MAHAMAN²

yousoufou.mahaman-laouali-souley@univ-reunion.fr

Patrick ROUSSET³

patrick.rousset@cirad.fr

Jean-François MARTIN¹

jean-francois.martin@univ-reunion.fr

Laetitia ADELARD^{1,2}

laetitia.adelard@univ-reunion.fr

Olivier MARC^{1,2}

olivier.marc@univ-reunion.fr

¹ IUT de Saint-Pierre

40 Avenue De Soweto, Saint-Pierre, 97410, La Réunion

² Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT)

15 Avenue René Cassin Sainte-Clotilde, 97715, La Réunion

³ CIRAD UPR BioWooEB

73 Rue Jean François Breton, 34398, Montpellier

Thèmes – Environnement - Matériaux - Thermique - Génie civil.

Résumé – À la Réunion, le *Furcraea Foetida* (communément appelé choka) est une espèce invasive non valorisée. Parallèlement, dans le secteur de la construction, les isolants classiques, telle que la laine de roche, permettent de réduire les consommations énergétiques des bâtiments, mais génèrent des impacts environnementaux négatifs notamment en fin de vie. Il est donc crucial de proposer des solutions conjuguant les économies d'énergie et la valorisation des déchets. Pour répondre à ces enjeux, cette étude porte sur la valorisation des feuilles de choka, à travers le développement d'isolant thermique biosourcé à base de fibres de choka. Dans un premier temps, nous caractérisons les fibres de choka (diamètre et rendement de défibrage). Dans un deuxième temps, nous évaluons (i) la conductivité thermique apparente et (ii) la teneur en eau de l'isolant en vrac de choka pour deux densités (0,018 et 0,022). Le diamètre moyen des fibres est de 161 µm. Le rendement de défibrage obtenu est de l'ordre de 1,3 %. La conductivité thermique minimale est de 0,066 W/m.K pour une densité de 0,022. L'augmentation de la densité permet de réduire la conductivité.

Mots-Clés – Isolant thermique, fibres, matériaux biosourcés, *Furcraea Foetida*.

1 Introduction

L'isolation des bâtiments est devenue incontournable pour réduire les dépenses énergétiques. En effet, le plan de sobriété énergétique, lancé en 2022, vise à réduire la dépendance de la France aux énergies fossiles et une réduction de sa consommation d'énergie de 40 % d'ici 2050. La Réunion, territoire insulaire situé dans l'Océan Indien, est particulièrement vulnérable énergétiquement avec un taux de dépendance énergétique de 88,2 % (charbon, fiouls lourds et carburants).

Dans le domaine de la construction, les isolants non biosourcés génèrent des impacts environnementaux importants. Les isolants majoritairement utilisés sont la laine de verre, la laine de roche et le polystyrène. En fin de vie, ces matériaux sont théoriquement recyclables, cependant il n'existe que très peu de centres de recyclage en métropole, tandis qu'ils sont enfouis à La Réunion.

Nous faisons donc face à un double enjeu, la nécessité de réduire les dépenses énergétiques et de valoriser nos déchets. A La Réunion, une espèce invasive [1] le *Furcraea Foetida*, appelé également choka vert ou cadère prolifère sur les terres. Le choka vert peut être valorisé sous différents aspects grâce à l'extraction des fibres contenues dans ses feuilles. Dans ce sens, la présente étude porte sur le développement d'isolants biosourcés à partir de ressources locales, les fibres de feuilles de choka.

2 Préparation des fibres et de l'isolant en vrac



Figure 1 – étapes de la préparation de l'isolant en vrac à base de fibres de choka

La première étape porte sur la préparation des fibres de choka. Les feuilles de *Furcraea Foetida* sont récupérées à Saint-Pierre et directement défibrées. Pour ces essais, nous avons choisi d'extraire les fibres par raclage manuel grâce à un couteau et une table jusqu'à l'obtention de fibres sans résidu non cellulosique à la surface des fibres. Les fibres sont ensuite séparées de sorte à ne pas avoir d'amas de fibres, et placées en vrac dans la boîte d'essai de conductivité.

3 Caractérisation des fibres de feuilles de choka

Pour la caractérisation, nous étudions le diamètre et la masse de fibres par feuille et le rendement de défibrage.

Le diamètre des fibres est mesuré à l'aide d'un microscope équipé d'un oculaire gradué étalonné avec une lame de calibration. Un diamètre moyen d'une fibre est calculé en prenant dix valeurs le long d'une même fibre. Nous estimons ensuite le diamètre moyen à partir des mesures réalisées sur trois fibres de choka.

Le rendement de défibrage est le ratio en pourcentage entre la masse des feuilles et celle des fibres extraites.

4 Evaluation de la conductivité thermique apparente de l'isolant de choka

Nous étudions la conductivité thermique apparente de deux échantillons d'isolant de fibres en vrac, le premier avec une densité de 0,018 et le second avec une densité de 0,022.

Expérimentalement, nous avons utilisé une cellule de mesure de conductivité. Le matériau est placé dans une boîte (27x27x4 cm) à température constante froide, puis un flux de chaleur est imposé à la boîte uni-directionnellement jusqu'à ce que le régime permanent soit atteint. Les températures de surface supérieure et inférieure de la boîte, à l'intérieur de la source chaude et dans la salle sont mesurées. Bien que les pertes soient faibles, il y a des pertes latérales puisque la température à l'intérieur de la source chaude est légèrement supérieure à la température de la salle. La conductivité thermique et la constante de refroidissement sont calculées avec les expressions suivantes :

$$\dot{q}_1 = C(T_B - T_a)$$

\dot{q}_1 : pertes latérales, W

C : constante de refroidissement de la boîte chaude, W/°C

T_B : température à l'intérieur de la source chaude, °C

T_a : température de la salle d'expérimentation, °C

En régime permanent :

$$\dot{q} = \frac{\lambda A}{e}(T_C - T_F) + \dot{q}_1$$

\dot{q} : flux de chaleur émis par effet joule par la résistance, W

λ : conductivité thermique de l'échantillon, W/m.K

A : aire de l'échantillon, m²

e : épaisseur de l'échantillon, m

T_C : température de surface supérieure (côté chaud), °C

T_F : température de surface inférieure (côté froid), °C

Avec :

$$\dot{q} = \frac{U^2}{R}$$

U : tension, V

R : résistance, Ohm

En fonction des densités d'échantillon, nous avons opté pour une tension d'alimentation de 42 V. Nous effectuons deux mesures qui encadrent cette valeur (37 et 47 V) afin de déterminer la constante de refroidissement et la conductivité thermique. Elle est ensuite validée par un troisième essai avec une tension de 42 V et la constante de refroidissement précédemment obtenue. Nous effectuons ensuite la moyenne des deux conductivités calculées. Pour fiabiliser les résultats, ces essais sont réalisés en triplicat pour chaque échantillon.

5 Influence de la teneur en eau de l'isolant

L'échantillon est placé dans la salle deux jours avant le début des essais afin de s'assurer de son équilibre thermique et hydrique avec l'environnement de la salle d'expérimentation. La teneur en eau de l'échantillon est évaluée avant et après chaque essai de conductivité afin de vérifier qu'elle ne varie pas au cours de l'essai, ce paramètre impactant la valeur de la conductivité thermique du matériau [3].

La teneur en eau est calculée à partir des masses à température ambiante (avant et après essai) et la masse sèche de chaque échantillon. Cette dernière est obtenue après le séchage de l'isolant à 105 °C pendant 24 h.

6 Résultats

6.1 Caractéristiques dimensionnelles des fibres et rendement du défibrage

Le diamètre moyen des fibres est de $161 \pm 45 \mu\text{m}$. Les diamètres inférieur et supérieur sont de 100 et 245 μm . L'écart-type élevé est dû au fait que le diamètre des fibres est nettement plus faible aux extrémités de celles-ci qu'en partie centrale. Le procédé d'extraction peut également abimer les fibres en réduisant leur diamètre.

La masse totale des 21 feuilles récoltées est de 4583,1 g, nous en avons extrait 60,3 g de fibres. La masse moyenne de fibres par feuille est donc de 2,9 g. Le rendement est estimé à 1,3 %, ce qui est proche des valeurs de la littérature (1 %) [4].

6.2 Conductivité thermique apparente et teneur en eau de l'isolant

Les conductivités thermiques moyennes obtenues sont de 0,066 et 0,079 W/m.K pour des densités respectives de 0,022 et 0,018 (cf. Tableau 1). La conductivité diminue avec l'augmentation de la densité de l'isolant. Il est nécessaire de tester d'autres configurations afin de réduire la conductivité thermique pour atteindre des valeurs de l'ordre de celles des isolants classiques de type laine de roche de 0,040 W/m.K (cf. Tableau 1). Une étude sur le chanvre a permis d'obtenir une conductivité thermique de 0,040 W/m.K pour une densité de 0,085 [2].

La teneur en eau reste inférieure à 10 % pour l'ensemble

des essais et varie peu au cours des essais. Pour des panneaux de fibres de bois, une teneur en humidité de 14,29 % en comparaison à un échantillon sec, entraîne une augmentation de la conductivité thermique de 0,049 à 0,060 W/m.K à 20 °C, et de 0,052 à 0,067 W/m.K à 30 °C [3].

Tableau 1 – comparaison des densités (conditionnement en vrac), conductivités thermiques, constantes de refroidissement et teneurs en eau des échantillons avec la littérature

Matériau	Densité	$\lambda_{moyenne}$ W/m.K	C W/°C	W_{av} %	W_{ap} %
Choka	0,018	0,079	0,236	8,49	8,77
Choka	0,022	0,066	0,263	8,37	9,68
Chanvre [2]	0,085	0,040	-	-	-
Laine de roche	-	0,035-0,039	-	-	-

7 Conclusions

Nous avons déterminé la conductivité thermique apparente d'un isolant en vrac à base de fibres de choka pour deux densités. Nous remarquons que l'augmentation de la densité permet de réduire la conductivité. Par conséquent, des densités supérieures seront testées ultérieurement. De plus, d'autres conditionnements seront également étudiés, tel que le mélange de fibres avec des liants organiques. Enfin, nous évaluerons l'impact de l'humidité relative sur la conductivité du matériau.

8 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à l'IUT de Saint-Pierre (La Réunion) pour le financement du matériel et les étudiants Éric Cazeau, Loïck Payet et Damien Siconine pour leur participation à ce projet.

Références

- [1] C. Barbosa, J. M. Ojalora, E. L. Giehl, F. Villalobos, R. Loyola G. Tessarolo, N. Machado, T. T. Castellani, *Changes in the realized niche of the invasive succulent CAM plant *Furcraea foetida**, Austral Ecol., 42-6 (2017) 643-654.
- [2] P. Kosinski, P. Brzyski, A. Szewczyk, W. Motacki, *Thermal properties of raw hemp fiber as a loosefill insulation material*, J. Nat. Fibers., 15-5 (2018) 717-730.
- [3] E. Troppovà, M. Svehlik, J. Tippner, R. Wimmer, *Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards*, Mater. Struct., 48-12 (2015) 4077-4083.
- [4] T. Totong, W. Wardiningsih, M. Al-Ayyuby, R. Wanti, R. Rudy, *Extraction and Characterization of Natural Fiber from *Furcraea foetida* Leaves as an Alternative Material for Textile Applications*, J. Nat. Fibers., 19-13 (2021) 6044-6055.

Supervision et contrôle intelligent des climatiseurs individuels pour maîtriser l'énergie dans un bâtiment en zone tropicale

Nour Mohammad MURAD^{1,2}, Jean-François MARTIN¹, Rosa ABBOU³,
Rudy GRONDIN⁴, Olivier MARC^{1,2}

nour.murad@univ-reunion.fr / jean-francois.martin@univ-reunion.fr / rosa.abbou@univ-nantes.fr
rudy.grondin@dsinstruments.fr / olivier.marc@univ-reunion.fr

¹ IUT de Saint-Pierre
40 Avenue De Soweto, Saint-Pierre, 97410, La Réunion

² Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT)
15 Avenue René Cassin Sainte-Clotilde, 97715, La Réunion

³ IUT, Université de Nantes,
Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N UMR CNRS 6004)

⁴ Demand Side Instrument,
Impasse Henri Madore ZIE Les Sables, 97427 L'Étang Salé La Réunion

Thèmes – Énergie - Environnement - Informatique - Électronique.

Résumé – *Le travail présenté dans ce papier décrit un système de supervision et de pilotage intelligent de climatiseurs individuels installés dans des salles de cours, de bureaux et de laboratoires du département Génie Civil de l'IUT de La Réunion. Le suivi de l'évolution de la température et de l'hydrométrie des salles ainsi que de la consommation électrique des climatiseurs sont remontés au travers d'un réseau de capteurs sans fil jusqu'au stockage dans un cloud. Ces données sont accessibles via une application web. Le système de pilotage intelligent intégrant un contrôle commande par palier est ensuite présenté. Les résultats expérimentaux montrent que l'installation du boîtier intelligent conduit à une diminution de la consommation électrique d'un facteur 4.*

Mots-Clés – *Maîtrise de l'énergie, Climatiseur individuel, Contrôle commande, Environnement tropical.*

1 Introduction

La climatisation conventionnelle s'est largement implantée dans les pays développés depuis le siècle dernier. Aujourd'hui, son essor s'étend progressivement aux pays en développement comme l'Inde et la Chine, qui combine climat chaud et forte démographie [1]. Selon le rapport de l'agence internationale de l'énergie [2], la consommation énergétique liée au rafraîchissement des bâtiments a triplé entre 1990 et 2016, devenant ainsi le poste de consommation d'énergie finale qui a le plus augmenté ces dernières années. Et elle devrait, entre 2010 et 2050, être multipliée par 1,3 pour les pays membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) et par 4,5 pour les autres [3].

Cette demande en constante augmentation exerce des contraintes fortes sur le réseau électrique des zones tropicales car elle est responsable de 70 % du pic de puissance électrique appelé par les bâtiments. De plus, la climatisation a aussi un très fort impact sur l'environnement avec des émissions de CO_2 qui ont également triplé depuis 1990.

À La Réunion, le constat est le même puisque le secteur du bâtiment représente 85 % de la demande en électricité et la climatisation 50 % de la consommation du bâtiment. Par conséquent, les systèmes de climatisation consomment une part importante de l'électricité produite et avec un impact fort sur l'environnement.

Les solutions pour réduire cette consommation d'énergie liée à la climatisation rentrent dans deux catégories : l'efficacité énergétique et la sobriété. L'efficacité énergétique consiste en l'amélioration des performances des systèmes de climatisation utilisés en utilisant des technologies de production de froid innovante. La sobriété comporte toutes les pratiques permettant une utilisation plus raisonnable de la climatisation, allant de la sensibilisation des usagers aux bonnes pratiques, à la conception même des bâtiments.

C'est dans ce contexte de sobriété énergétique qu'un outil de contrôle de l'utilisation des climatiseurs a été mis en place dans certaines salles du département Génie Civil de l'IUT de La Réunion. Cet outil, appelé Nœud Intelligent (NI) a été conçu et installé en partenariat avec l'entreprise Demand Side Instrument (DSI), une entreprise innovante dans le domaine de la maîtrise de l'énergie.

2 Présentation de l'outil de contrôle intelligent de l'utilisation des climatiseurs individuels

Le terrain d'expérimentation choisi est le bâtiment du département de Génie Civil composé de 4 salles de cours, de 2 laboratoires de TP et de 2 bureaux soit au total 8 salles distinctes (Figure 1). Une quarantaine de capteurs sans fils (températures et humidités relatives des salles, détecteur de présence, taux de CO_2 , consommation des climatiseurs...) ont été installés et les données sont acheminées via à une

passerelle Lora qui les transmet vers le cloud de la société DSI à l'aide d'une liaison LoraWan déployée sur le site de l'IUT de Saint Pierre (Figure 2).

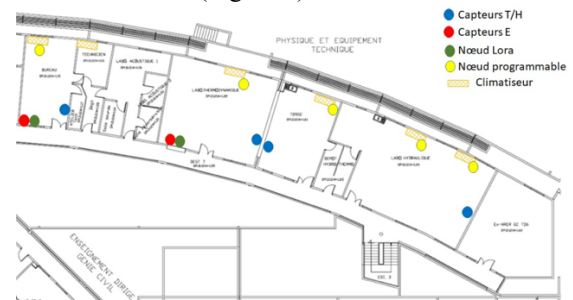


Figure 1 – Site expérimental – Département Génie Civil R+1

Ce système a l'avantage de simplifier grandement son installation puisqu'aucun fil ne relie les capteurs à une centrale d'acquisition. Chaque valeur est moyennée sur un pas de temps de 10 minutes, stockée sur le cloud de DSI et consultable à tout moment via une application web.

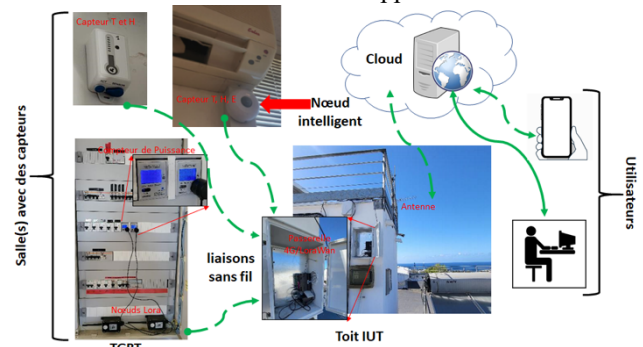


Figure 2 – Réseaux d'instrumentation sans fil

Le système de pilotage intelligent restreint la période d'utilisation du climatiseur sur les plages d'occupation des salles de cours (8h-12h et 13h-17h), limite la consigne à 26°C minimum et oblige à éteindre le climatiseur lorsque la salle est inoccupée. Ce système innovant a la particularité de s'adapter à n'importe quel modèle de climatisation de la plus vétuste à la plus récente.

3 Résultats et discussion

Afin de comprendre l'enjeu et le gain du système de contrôle intelligent des climatiseurs individuels, nous avons choisi de présenter les résultats d'une seule salle de cours sur 2 semaines types d'utilisation. Lors de la première semaine nous avons laissé le contrôle des climatiseurs aux utilisateurs et la seconde semaine, nous avons activé le système de contrôle intelligent.

Les figures 3 et 4 présentent les évolutions des températures et humidités relatives dans la salle de cours ainsi que la consommation de la climatisation du lundi 28 février au dimanche 6 mars 2022. Les plages d'occupation de la salle de cours vont de 8h à 12h le matin puis de 13h à 17h l'après-midi pendant toute la semaine.

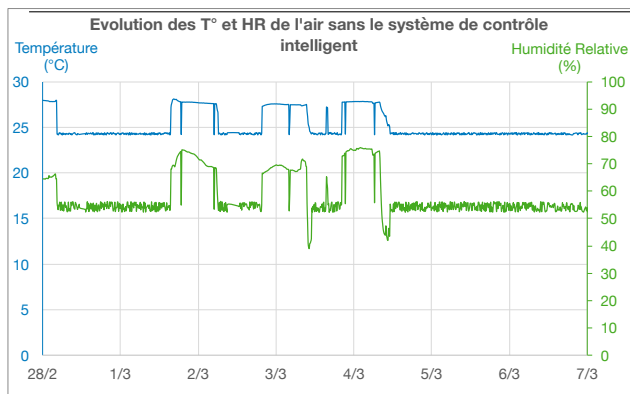


Figure 3 – Évolution des températures et humidités relatives sans le système de contrôle intelligent

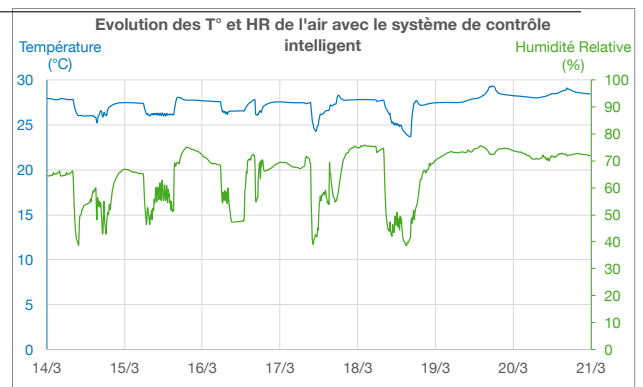


Figure 5 – Évolution des températures et humidités relatives avec le système de contrôle intelligent

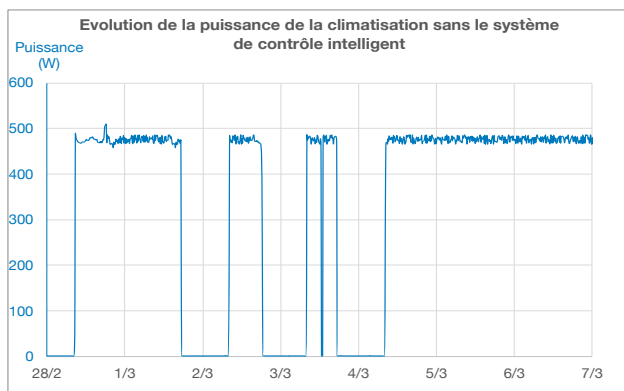


Figure 4 – Évolution de la puissance électrique consommée de la climatisation sans le système de contrôle intelligent

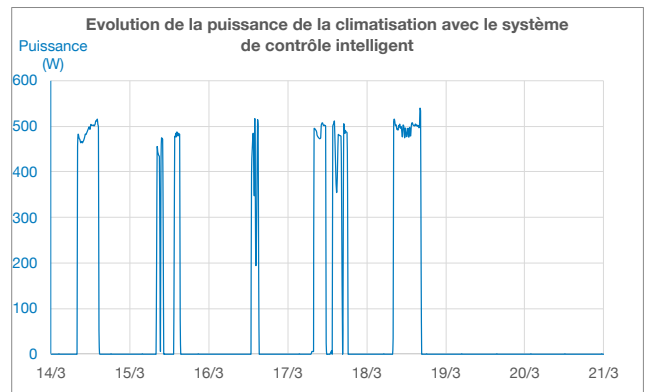


Figure 6 – Évolution de la puissance électrique consommée de la climatisation avec le système de contrôle intelligent

En théorie, si les utilisateurs étaient consciencieux, les plages de fonctionnement du climatiseur individuel devraient suivre celles de l'occupation de la salle or on remarque sur les figures 3 et 4 que la climatisation n'a pas été éteinte le lundi 28 février à 17h entraînant une consommation inutile dans la nuit du lundi au mardi.

Il en est de même pour le vendredi soir à 17h entraînant une consommation électrique inutile durant tout le week-end. De plus il semblerait que la consigne de température ait été fixée à 24°C au lieu de 26°C recommandé par l'ADEME. En effet 1°C en moins sur la consigne du climatiseur c'est environ 7% de consommation d'électricité en plus [4]. Au total, ce climatiseur a consommé 47,2 kWh sur cette semaine.

Lors de la seconde semaine, le système de pilotage intelligent a été activé et les résultats sont présentés sur les figures 5 et 6. On voit sur ces figures que le climatiseur fonctionne uniquement lorsque la salle est occupée et que la consigne de température est d'environ 26°C toute la semaine excepté le jeudi et le vendredi où elle descend en dessous de 25°C. En effet, l'utilisateur peut choisir de reprendre le contrôle du climatiseur via la télécommande s'il juge que les conditions de confort dans la salle ne sont pas atteintes.

Durant cette seconde semaine, la consommation du climatiseur est de 11,1 kWh, le pilotage intelligent a donc eu pour effet, une baisse significative de la consommation électrique d'un facteur 4.

4 Conclusion

Nous avons présenté le fonctionnement d'un nouveau système de pilotage intelligent, basé sur un réseau de capteurs sans fils, destiné à contrôler les climatiseurs individuels existants du département Génie Civil de l'IUT de La Réunion. Ce nouveau système conduit à une diminution des consommations électriques d'un facteur 4 sur une salle d'enseignement.

Références

- [1] Goetzler W, Guernsey M, Young J, Fujrman J and Abdelaziz A 2016 The Future of Air Conditioning for Buildings
- [2] International Energy Agency (IEA) 2018 The Future of Cooling 92
- [3] International Energy Agency 2013 Transition to sustainable buildings: strategies and opportunities to 2050 (Paris: IEA Publi)
- [4] <https://expertises.ademe.fr/professionnels/entreprises/performance-energetique-energies-renouvelables/lenergie-bureaux/dossier/ventilation-climatisation/saviez>

ISEE

Un système pour l'explication d'événements dans les environnements hybrides

Sébastien Laborie¹

sebastien.laborie@univ-pau.fr

Nabila Guennouni²

nabila.guennouni2016@gmail.com

Christian Sallaberry¹

christian.sallaberry@univ-pau.fr

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, LIUPPA
Anglet, France

² SEI Groupe LKS
374 Allée Antoine d'Abbadie 64210 Bidart, France

Thème – Informatique

Résumé – Généralement, lorsqu'un événement se déclenche dans un environnement connecté (c'est-à-dire un espace pourvu de capteurs) la réaction naturelle d'une personne en charge de la surveillance consiste à détecter ce qui s'est passé pour ensuite fournir une explication sur le pourquoi du déclenchement. Ce processus de recherche d'explication est actuellement très coûteux et fastidieux puisque l'opérateur doit interroger manuellement différentes sources de données à disposition, par exemple le système d'information du réseau de capteurs qui exploite une technologie dédiée et d'autres systèmes d'informations documentaires exploitant d'autres types de technologies. Dans cet article, nous présentons le système ISEE (Information System for Event Explanation) qui d'une part unifie au sein d'un même modèle sémantique différentes sources d'informations (dans notre cas, réseau de capteurs et documents), et qui d'autre part fournit aux utilisateurs des explications potentielles lorsqu'un événement se déclenche. Un prototype valide la preuve de concept de notre démarche et celui-ci a été évalué auprès d'étudiants en IUT issus des départements Informatique et Génie Industriel et Maintenance.

Mots-Clés – Recherche d'information, Réseau de capteurs, Web sémantique, 5WIH.

1 Introduction

De nos jours, de plus en plus d'environnements hybrides sont mis en place afin d'améliorer la productivité, l'économie d'énergie, la sécurité et le confort des usagers de manière générale. Un environnement hybride est un espace comprenant à la fois un réseau de capteurs (*ex., capteurs de présence, de température, de luminosité...*) et un corpus documentaire (*ex., fiches d'employés ou de clients, fiches techniques d'objets évoluant dans l'environnement, rapports de maintenance...*). Les hôpitaux, les fermes agricoles et les bâtiments intelligents sont quelques exemples parmi tant d'autres qui caractérisent un environnement hybride.

Au sein des environnements hybrides, des événements peuvent se déclencher. Cela peut aller d'événements urgents sur le court terme, tels que des hauts niveaux de chaleur ou bien de concentrations en CO₂, jusqu'à d'autres types d'événements relevant plus d'une analyse sur le long terme, comme par exemple un recensement de l'usage de la lumière ou bien du chauffage au sein d'un bâtiment.

Actuellement, lorsqu'un événement se déclenche dans un environnement hybride, l'opérateur doit manuellement exploiter différents systèmes d'information. D'un côté, il doit se concentrer sur les données issues du réseau de capteurs grâce à un système d'information dédié. D'un autre côté, il doit fouiller dans une collection de documents des informations complémentaires à l'aide d'autres types de systèmes qui exploitent d'autres technologies que celle du réseau de capteurs.

Dans ce cadre, rechercher une explication au sujet d'un événement dans un environnement hybride comporte plusieurs limites. Tout d'abord, les systèmes associés aux capteurs et ceux liés au corpus documentaire sont actuellement indépendants. Par conséquent, l'opérateur doit effectuer des allers-retours entre plusieurs systèmes différents pour combiner les informations ce qui est très fastidieux. De plus, la quantité d'information disponible dans ces systèmes d'information (*réseau de capteurs et corpus documentaire*) est à la fois très importante et très hétérogène puisque de multiples structures de données sont utilisées avec différents langages, différents niveaux de détails, différentes versions, etc. Enfin, les éléments de réponses qui fournissent une explication au sujet d'un événement qui est déclenché sont très souvent dispersés entre les différentes sources de données. Il appartient donc à l'opérateur de filtrer, de combiner et de résumer de lui-même cette explication.

Pour répondre à toutes ces limites, nous proposons une nouvelle démarche qui exploite l'approche 5W1H [1] pour relier sémantiquement les informations du réseau de capteurs avec celles du corpus documentaire mais aussi pour construire des explications structurées d'événements.

L'approche 5W1H est une approche qui a été utilisée dans le domaine de la recherche d'information dans les systèmes de questions-réponses. Elle a notamment été appliquée sur des actualités en ligne pour extraire de ces contenus textuels des réponses autour de six questions : Quoi ? (*What*), Qui ? (*Who*), Où ? (*Where*), Quand ? (*When*), Pourquoi ? (*Why*) et Comment ? (*How*). Nous faisons donc l'hypothèse dans cet article qu'en utilisant une telle approche pour les environnements hybrides cela permettra de mieux guider la recherche d'information et de mieux structurer la réponse sur l'explication d'un événement à l'utilisateur.

Dans un premier temps, nous allons décrire de façon générale notre proposition intitulée ISEE (*Information System for Event Explanation*) qui allie les environnements hybrides, l'approche 5W1H et l'explication d'événements. Puis, dans un second temps, nous présenterons notre prototype ISEEapp. Enfin, nous détaillerons une expérimentation qui a été effectuée avec des étudiants en IUT (*Dept. Informatique et GIM*).

2 Notre proposition ISEE

L'objectif de notre proposition ISEE consiste à fédérer les données issues d'un réseau de capteurs avec celles issues d'un corpus documentaire. La Figure 1 présente une vue générale de notre proposition avec ses principaux modules.

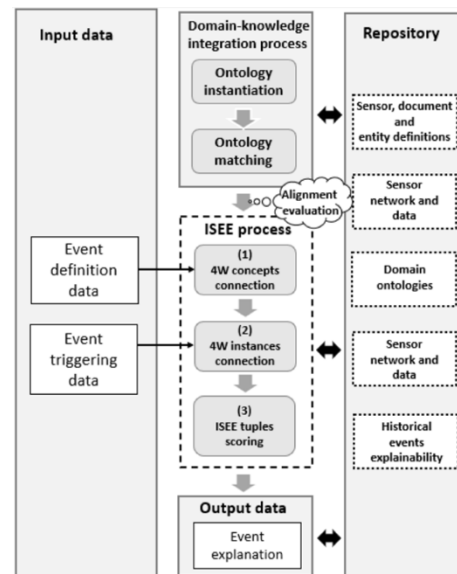


Figure 1 – ISEE : une vue générale

À droite de la Figure 1, notre proposition prend en entrée des données issues d'un réseau de capteurs et d'un ensemble de documents hétérogènes. Des ontologies de domaine sont également préalablement définies afin d'apporter de la sémantique à toutes ces données. À gauche de la figure, l'utilisateur peut définir des événements qu'il souhaite détecter à l'aide d'un modèle d'événement que nous avons défini.

Les principales étapes de notre proposition ISEE sont ensuite disponibles au centre de la figure. Au préalable, une étape d’instanciation d’ontologies (*relations entre données brutes et ontologies*) ainsi qu’une étape d’alignement d’ontologies (*appariement sémantique d’informations*) sont réalisées. Ce processus préliminaire a pour objectif d’alimenter au fur et à mesure un graphe de connaissance en y intégrant toutes les informations provenant de l’environnement hybride dans les ontologies puis d’interconnecter ces ontologies (*concepts et instances*) entre elles. Une fois ce processus réalisé, trois modules ISEE sont exécutés afin d’enrichir le graphe de connaissance guidés par l’approche 5W1H : (1) établir des relations 5W1H à un niveau conceptuel, (2) établir des relations 5W1H au niveau des instances, et (3) extraire des parties du graphe de connaissance enrichi pour fournir des explications potentielles au déclenchement d’un événement.

De plus amples détails de tous ces modules sont présentés et illustrés au sein d’une publication récente [2].

3 Notre prototype ISEEapp

Nous avons développé un prototype intitulé ISEEapp. Une vidéo de présentation de notre outil est disponible : <https://slaborie.perso.univ-pau.fr/images/site/ISEEapp.mp4>.

Comme il est possible de le constater, ISEEapp fournit à l’utilisateur des candidats potentiels d’explication d’événements au sein d’un environnement hybride. La Figure 2 illustre une réponse du système sous la forme 5W1H. Dans cet exemple, un événement « *gaspillage de lumière le soir* » a été défini par un opérateur. Le système propose à l’utilisateur une explication potentielle du déclenchement de cet événement en fournissant tout d’abord le capteur ayant détecté une source de lumière (*LightSensor15*), le lieu (*Office 400*) ainsi que le moment de cette détection (*20:00:14*), les valeurs détectées (*au-delà de 60 lumens*) et une piste d’explication potentielle avec une valeur de confiance (*L’employé Roland Perrin a probablement oublié d’éteindre la lumière*). Bien entendu, d’autres explications potentielles sont présentées à l’utilisateur et il lui appartient d’en vérifier la conformité.

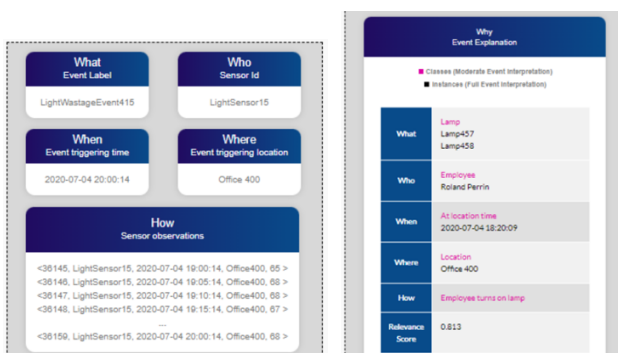


Figure 2 – ISEEapp : une explication d’un événement

4 Expérimentation et résultats

Nous avons conduit une expérimentation sur l’usage de notre outil ISEEapp au sein de deux classes d’étudiants en IUT : une classe de 28 élèves en informatique et une autre classe de 34 élèves en génie industriel et maintenance (GIM). L’idée de cette expérimentation consiste à évaluer la facilité de compréhension des explications retournées par notre prototype. Pour ce faire, après une rapide présentation de notre outil aux étudiants, nous avons créé un questionnaire d’évaluation qui se concentre sur la structure en 5W1H des explications potentielles de déclenchement d’un événement.

La Figure 3 présente les résultats de notre évaluation auprès des étudiants en IUT (*GIM en bleu, Informatique en orange et la moyenne totale en gris*) avec l’exemple d’un événement de type « *gaspillage de lumière le soir* ».

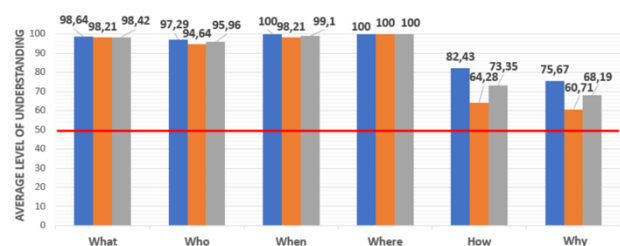


Figure 3 – Résultats de l’expérimentation en IUT

Comme il est possible de le constater, la grande majorité des étudiants comprennent les éléments retournés par ISEEapp qui concernent les réponses aux questions de type quoi (*what*), qui (*who*), où (*where*) et quand (*when*). Le contexte du déclenchement d’un événement est donc parfaitement maîtrisé. En ce qui concerne l’élément comment (*how*), il y a plus de difficultés de compréhension pour les informaticiens car les étudiants en GIM sont plus habitués aux valeurs de capteurs issues d’un bâtiment. Pour la structuration de l’élément pourquoi (*why*), plus de 50% des utilisateurs comprennent les retours de notre outil. Néanmoins, il convient d’améliorer notre interface graphique afin d’augmenter ce résultat.

5 Conclusion

ISEE est une nouvelle proposition dans le cadre des environnements hybrides qui combine données de capteurs et corpus documentaire. L’approche 5W1H est exploitée pour notamment offrir une meilleure structuration de l’explication d’un événement déclenché.

Références

- [1] C. C. Karaman, S. Yaliman, S.A. Oto, *Event detection from social media: 5W1H analysis on Big Data*, In the 25th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2017, Antalya (Turkey), May 15–18, 2017.
- [2] N. Guennouni, C. Sallaberry, S. Laborie, R. Chbeir, E. Mansour, *ISEE: A heterogeneous information system for event explainability in smart connected environments*, In Internet of Things, Elsevier journal, 2021.

Vers la neutralité énergétique des objets connectés

Maryline Chetto¹

Rola El Osta²

maryline.chetto@univ-nantes.fr

rola.elosta@ul.edu.lb

¹ IUT de Nantes

Nantes Université, École Centrale Nantes,
CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

² IUT de Saïda, Université libanaise

Laboratoire des Systèmes embarqués et en réseaux (LENS)
BP 813 Saïda, Liban

THÈMES – *Informatique*

RÉSUMÉ – *Le présent article a pour objectif de décrire des contributions de recherche collaborative entre l'IUT de Nantes et l'IUT de Saïda au Liban. L'initiation de cette collaboration a été concomitante de celle d'un nouvel axe de recherche du LS2N centré sur les systèmes temps réel autonomes en énergie. Il se rapporte à la conception des infrastructures logicielles spécifiques pour assurer ce que l'on nomme la neutralité énergétique, en particulier dans les noeuds de capteur sans fil, principaux maillons de l'Internet des Objets. Par nos travaux, nous montrons notamment comment les stratégies d'ordonnancement temps réel peuvent impacter favorablement la neutralité énergétique, comment celles-ci peuvent éviter la famine d'énergie ou le gaspillage d'énergie et comment elles garantissent des résultats de calcul sous contraintes temporelles strictes.*

MOTS-CLÉS – *capteur sans fil autonome, récupération d'énergie renouvelable, temps réel, ordonnancement.*

1 Introduction

Les travaux de recherche menés conjointement par l'IUT de Nantes et l'IUT de Saïda ont démarré en 2009. Ils concernent le développement, l'évaluation de performance et la mise en oeuvre d'ordonnanceurs temps réel pour la gestion optimale de l'énergie ambiante servant à alimenter des capteurs sans fil totalement autonomes [1][2]. Ils ont été supportés dans la phase de démarrage par un PHC (Partenariat Hubert Curien). Celui-ci a permis d'assurer une collaboration avec une équipe de recherche alors émergente à Saïda. Quatre thèses de doctorat issues de cette recherche collaborative ont été soutenues conduisant à la création du laboratoire LENS (Laboratory of Embedded and Networked Systems) au Liban.

2 Capteurs et autonomie énergétique

On peut considérer que le réseau de capteurs sans fil constitue l'une des plus importantes technologies qui a donné naissance à l'Internet des Objets. En effet, notre société a un besoin accru dans ces dernières années d'observer, de mesurer et de contrôler des phénomènes physiques et biologiques. Cela concerne le domaine industriel pour le contrôle/commande d'un système de climatisation par exemple, le domaine de l'écologie et l'environnement pour la surveillance du taux de CO₂, de la pression atmosphérique, de l'hygrométrie, etc. mais également celui de la santé pour le suivi à distance des patients par le recueil périodique de données physiologiques. Utiliser une pile ou une batterie pour alimenter un capteur suppose que celle-ci soit changée ou rechargée périodiquement. La maintenance engendre alors des coûts prohibitifs et peut s'avérer laborieuse voire impossible vu l'hostilité ou l'inaccessibilité du milieu dans lequel les capteurs sont déployés. Une nouvelle gamme de capteurs sans fil est entrain de naître, celle dite des capteurs entièrement autonomes [2]. Plutôt que d'intégrer une pile, ils tirent dans l'environnement, l'énergie requise pour leur fonctionnement. Cette technologie est connue sous le vocable "Energy Harvesting". L'architecture matérielle d'un dispositif autonome se compose de plusieurs blocs fonctionnels, comme représentés sur la Figure 1.

3 Contraintes temps réel

Les besoins en énergie d'un noeud de capteur sont réduits car il bénéficie des avancées d'une technologie de l'électronique dite du "low power" voire du "ultra low power". Il récolte des données en provenance de différents périphériques et ce, de manière cyclique. Le logiciel applicatif se compose ainsi d'activités périodiques souvent appelées tâches ou jobs qui doivent être exécutées dans le respect de contraintes temporelles (exprimées sous forme d'échéances) sous peine de ne pas disposer de données ex-

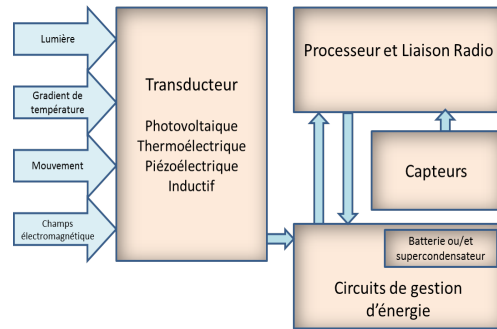


FIGURE 1 – Schéma d'un noeud de capteur autonome

ploitable. Le système doit s'appuyer sur un ordonnanceur adapté c'est à dire de type préemptif [1]. Le non-respect d'une contrainte comme l'envoi d'une donnée après une échéance pré-spécifiée peut avoir des conséquences catastrophiques sur l'application (pertes humaines, matérielles ou économiques).

4 Problématique de recherche

La question clé attachée à la gestion de l'énergie dans un capteur autonome ne se ramène pas à minimiser la puissance de consommation instantanée pour maximiser la durée de vie du dispositif comme dans les matériels portables traditionnels. Le problème revient à garantir un mode de fonctionnement qualifié d'«énergétiquement neutre» dans lequel à tout moment le dispositif ne consomme jamais plus d'énergie que celle récupérée. L'objectif scientifique principal de nos recherches est de proposer des stratégies d'ordonnement visant à faire le meilleur usage de l'énergie disponible tout en garantissant l'exécution temps réel de l'application embarquée. Concevoir un système embarqué autonome tel qu'un noeud de capteur sans fil signifie pouvoir garantir avant son déploiement un mode de fonctionnement qualifié d'énergétiquement neutre sans gaspillage ni famine. Une politique d'ordonnement détermine donc une planification en ligne de l'activité du processeur en calculant précisément les périodes d'oisiveté et les périodes de travail du processeur et ce, en plus d'ordonner les tâches temps réel selon leur urgence exprimée par une priorité. A noter que celle-ci pourra être fixe ou dynamique. En résumé, la question à laquelle nos travaux tentent d'apporter des réponses depuis dix ans peut se formuler comme suit : Comment déterminer les périodes d'oisiveté du processeur et comment ordonner le logiciel applicatif pour respecter perpétuellement les contraintes temporelles exprimées en termes de date de fin d'exécution au plus tard.

La Figure 2 illustre un ordonnancement temps réel optimal sensible à l'énergie qui ne doit pas être systématiquement ASAP (As Soon As Possible), non plus ALAP (As

Late As Possible).

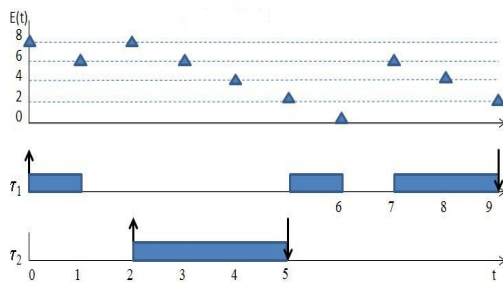


FIGURE 2 – Illustration d'un ordonnancement optimal

5 Aperçu des résultats

L'ordonnancement temps réel est une thématique de recherche dynamique et riche en résultats depuis les années 70. Malgré des avancées significatives, les spécificités des systèmes temps réel autonomes en énergie ne sont toujours pas supportées aujourd'hui par les ordonnanceurs temps réel intégrés dans les systèmes d'exploitation du commerce. De plus, la très grande majorité des travaux de recherche sur l'ordonnancement temps réel contraint par l'énergie visent à minimiser l'énergie consommée en vue de maximiser le délai qui sépare les recharges successives de batterie ou les changements de pile. Ils ignorent donc la problématique liée à un fonctionnement énergétiquement neutre. Les quatre thèses soutenues ont ainsi porté sur les problématiques suivantes :

1. La première contribution, issue de la thèse de H. El Ghor soutenue en 2009 définit un nouveau concept, la laxité énergétique, puis propose et valide par simulation, une heuristique d'ordonnancement appelée EDeg [3]. Celle-ci vise à assurer l'autonomie énergétique d'une plateforme monoprocesseur mono-fréquence.
2. Les travaux de la thèse de M. Abdallah, défendue en 2014 s'appuient sur le modèle dit "skip over" pour représenter un système soumis à des surcharges de traitement ou/et des pénuries temporaires d'énergie. Dans ce contexte, de nouvelles stratégies d'ordonnancement sont proposées, visant l'optimisation de la Qualité de Service définie comme le ratio d'échéances satisfaites.
3. Dans la thèse de N. Abdallah, soutenue aussi en 2014, les travaux s'inscrivent dans le contexte d'une architecture répartie constituée de plusieurs processeurs identiques [4]. On fournit des stratégies de partitionnement de tâches sous l'hypothèse que chaque processeur dispose de son propre réservoir d'énergie de taille donnée.
4. R. El Osta défend sa thèse en 2017 sur les systèmes temps réel autonomes qui supportent une mixité de tâches périodiques critiques et de tâches aperiodiques non critiques [5]. On démontre l'optimalité d'un serveur

de tâches aperiodiques au regard du temps de réponse moyen, spécifiquement adapté à la variabilité de l'énergie d'alimentation.

La collaboration entre nos deux IUT a très récemment été valorisée au travers de nouveaux sujets d'étude communs en lien avec l'autonomie énergétique des objets connectés. Nous pouvons citer :

1. l'ordonnancement de tâches temps réel sous contraintes de précedence [6],
2. l'ordonnancement de tâches temps réel sur une architecture munie de la technologie DVFS (Dynamic Voltage Frequency Scaling) [7].

6 Conclusion

Les travaux évoqués dans cet article portent sur les objets autonomes en énergie c'est à dire alimentés par une source renouvelable mais possiblement instable. La neutralité énergétique de ceux-ci passe par l'intégration de nouvelles approches d'ordonnancement et de gestion dynamique de puissance, objet de notre travail de recherche collaborative. Celui-ci se poursuit actuellement en s'intéressant aux architectures tolérantes aux pannes.

Références

- [1] J. Liu *Real-Time Systems*; Prentice Hall, United States, 2000.
- [2] D. Ma, G. Lan, M. Hassan, W. Hu S. K. Das, *Sensing, Computing, and Communications for Energy Harvesting IoTs : A Survey. IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(2), 1222-1250, 2020.
- [3] H. El Ghor, M. Chetto, R. Hage Chehade, *A real-time scheduling framework for embedded systems with environmental energy harvesting*. *Computer Electrical Engineering*, 37(4), pp. 498-510, 2011.
- [4] A. Queudet, N. Abdallah and M. Chetto, *KTS : a real-time mapping algorithm for NoC-based many-cores*. *Journal of Supercomputing*, 73(8), pp. 3635-3651, 2017.
- [5] R. El Osta, M. Chetto and H. El Ghor *Optimal Slack Stealing Servicing for Real-Time Energy Harvesting Systems*. *The Computer Journal* 63(10), pp. 1537-1546, 2020.
- [6] M. Chetto and R. E. Osta *Real-Time Scheduling of DAG Tasks in Self-Powered Sensors with Scavenged Energy*, 4th Int. IEEE Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM), Mauritius, pp. 1-6, 2022.
- [7] H. El Ghor and M. Chetto *Optimal Real-Time Scheduling Algorithm for Wireless Sensors with Regenerative Energy*, *The Computer Journal* 65(8), pp. 2087-2097, 2022.

Modèle d'apprentissage des habitudes pour la détection d'évènements à risques : Cas d'une expérimentation technologique en maisons partagées

Laura Maligne^{1,4} Eric Campo^{1,2} Adrien van den Bossche^{1,3}
Nadine Vigouroux³ Frédéric Vella³ Olivier Negro¹ Pierre Rumeau⁴

laura.mlge@gmail.com eric.campo@univ-tlse2.fr vandenbo@univ-tlse2.fr
vigouroux@irit.fr vella@irit.fr olivier.negro@univ-tlse2.fr rumeau.p@chu-toulouse.fr

¹ IUT, Blagnac, Université Toulouse Jean Jaurès

² LAAS, UPR8001, CNRS, Toulouse

³ IRIT, UMR5505, CNRS, Université Toulouse 3, Toulouse

⁴ Laboratoire de Gérontechnologie La Grave, CHU Toulouse / CERPOP, Toulouse

Thèmes – Santé - Informatique - Électronique

Résumé – *Le travail présenté dans cet article a été réalisé par une équipe de recherche pluridisciplinaire dans le cadre d'un projet de recherche impliquant la plateforme Maison Intelligente située sur le campus de l'IUT de Blagnac. Ce travail mené en collaboration entre des laboratoires toulousains et le CHU de Toulouse en partenariat avec l'association ASF (Ages Sans Frontière) a consisté à déployer sur un lieu de vie, de 2 maisons partagées par des personnes âgées, un réseau de capteurs ambiants qui fournit des données d'observation objective pour l'analyse des comportements individuels et collectifs. Cet article présente l'architecture technologique conçue et testée sur la plateforme Maison Intelligente puis déployée sur site réel. L'analyse des données exploite les techniques d'apprentissage des comportements habituels et la détection de leurs dérives au cours du temps. Les résultats obtenus sur plusieurs mois de suivi mettent en exergue la relation entre les dérives constatées sur les modèles et des évènements survenus comme les chutes ou retours d'hospitalisation. Un exemple de résultat significatif est montré et discuté.*

Mots-Clés – *Apprentissage du comportement actimétrique, réseau de capteurs ambiants, personnes âgées fragiles, habitats partagés.*

1 Introduction

Le mode d'habiter des personnes âgées fragiles et seules ainsi que la place des innovations numériques et technologiques au sein des établissements et des services dédiés aux personnes âgées [1] sont au cœur des préoccupations actuelles dans le champ de l'autonomie. L'équipe de chercheurs pluridisciplinaires de la plateforme Maison Intelligente de Blagnac (MIB)¹ a initié une collaboration avec l'association Ages Sans Frontière ASF (acteur majeur de l'économie sociale et solidaire dans le Tarn) et le Gérontopôle/CHU de Toulouse pour identifier les besoins des personnes cohabitant dans une Maison Partagée (MP)². Les MP sont un concept décliné sous plusieurs formes en Europe [2]. Les 2 MP considérées ont 6 habitants chacune. Ces habitants ont, préalablement à l'étude ici rapportée, déjà participé à une analyse de besoins menée par l'équipe de chercheurs de la MIB [3]. L'étude présentée vise à structurer la plateforme technique d'un suivi longitudinal des comportements en collaboration avec ASF et le Gérontopôle. Cette étape de faisabilité concerne ici la mesure objective de la mobilité, et des entrées/sorties de chaque résident. Un des verrous étudiés est la combinaison de ces mesures pour en dégager des habitudes, des signes inhabituels et des indicateurs d'un changement de comportement. Dans ce papier, nous montrons les premiers résultats obtenus sur la modélisation des habitudes de mobilité basés sur les capteurs de mouvement.

2 Méthodologie

Le projet a suivi un processus méthodologique déjà éprouvé [4] par l'équipe de chercheurs et approuvé par le comité éthique de la recherche de Toulouse (2022-469). Il débute par une visite sur site pour rencontrer les résidents afin de leur présenter les objectifs du projet et procéder à la lecture et signature de la lettre d'information et du formulaire de consentement. Cette présentation est réalisée sous la forme d'un atelier participatif. On procède ensuite à l'installation des capteurs et à leurs tests de fonctionnement. Puis c'est l'observation longitudinale.

3 Infrastructure technologique

L'infrastructure complète a été conçue et testée dans un premier temps en environnement contrôlé au sein de la Maison Intelligente de Blagnac. Au total, ce sont 44 capteurs qui sont distribués recueillent les données d'activité dans les espaces privés et communs. Il s'agit de capteurs de mouvement infrarouge passifs, de contact d'ouverture de porte et de d'utilisation des 2 télévisions, communicant selon le protocole sans fil Z-Wave, le tout relié à un Raspberry Pi par chambre. Les Raspberry Pi

envoient leurs données journalières via le Wi-Fi de la maison (Figure 1) sur un ordinateur local. Cet ordinateur est connecté à un serveur de données sécurisé SFTP localisé en laboratoire, via la connexion ADSL de la MP. Un cahier d'observation des événements observés (chute, toux, non présence dans la MP, etc.) mis à jour par le personnel de suivi (gouvernants des MP) vient compléter les sources de données. Chaque lieu privatif est identifié par un numéro aléatoire et seulement connu des responsables scientifiques du projet.

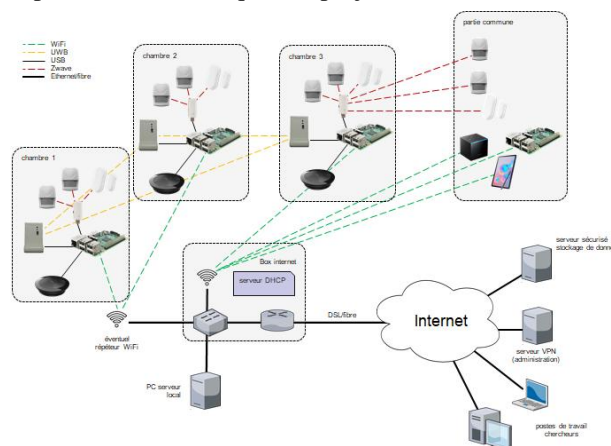


Figure 1 – Architecture globale déployée au sein des MP.

Les données recueillies sont incrémentées dans une base de données structurée ad hoc. La récupération des données dans des tables et l'uniformisation des pas de temps ont été effectuées sous Python. Enfin, des outils de monitoring de l'infrastructure ont été déployés (collectd, smokeping) afin d'en vérifier le bon fonctionnement à distance et un portail web chiffré et protégé par mot de passe a été développé pour permettre aux chercheurs de se connecter simplement.

4 Elaboration et représentation des modèles

Les données utilisées dans ce papier pour chaque pièce privative concernent uniquement les mouvements dans la chambre et dans la salle de bain, l'ouverture/fermeture de la porte menant à la chambre. Pour les lieux communs, nous disposons des mouvements dans la cuisine et dans le salon, de l'ouverture/fermeture de la porte d'entrée de la maison. Nous exploitons ces données sous forme de séries temporelles : pour chacune des pièces nous établissons un modèle avec des patrons qui se répètent selon la périodicité des données.

Le prétraitement comporte 3 phases : le nettoyage des données, la correction des valeurs manquantes et la normalisation des données. Deux types de détection sont mis en œuvre. Le suivi temps réel des indicateurs d'activités suivant des tranches horaires (taux de présence dans une pièce, fréquence de mouvement, nombre d'entrée/sortie...), basé sur des seuils prédéfinis ou moyennés pendant une période d'apprentissage, permet

¹ <http://mi.iut-blagnac.fr>

² <https://www.agesansfrontieres.fr/>

de détecter des évènements critiques appelant une intervention très rapide (chute, absence, agitation...). Le suivi longitudinal basé sur la dérive temporelle des modèles comportementaux individuels permet la détection de modifications progressives. Contrairement au modèle statique qui n'évolue pas une fois appris, sur une période de référence, nous avons choisi un modèle dynamique qui lui évolue continuellement via un moyennage des observations par fenêtre glissante sur 7 jours et est mis à jour quotidiennement. Une évolution significative du modèle au cours du temps est un indicateur d'une modification des habitudes d'activité et donc de comportement. Nous avons voulu le mettre en évidence sur des cas recensés d'évènements singuliers.

5 Résultats

La Figure 2 représente le modèle dynamique d'une résidente qui a chuté dans sa salle de bain le matin du 16 mai 2022.

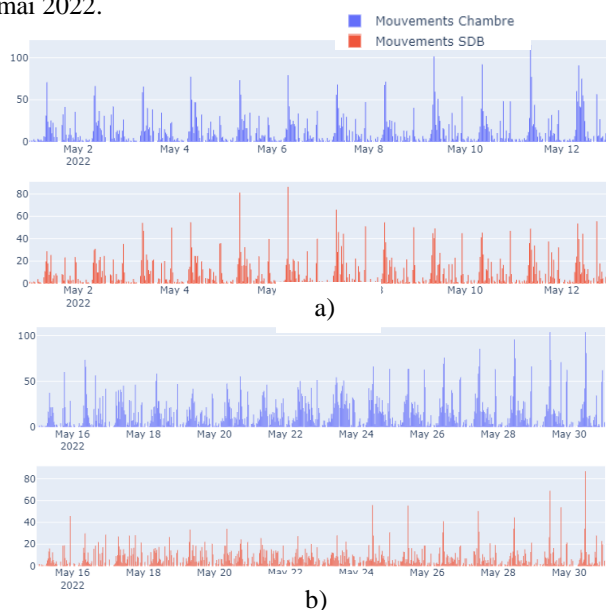


Figure 2 –Modèle dynamique avant a) et après la chute b) (SDB : salle de bains)

Elle est ensuite restée à la MP durant une quinzaine de jours avant d'être hospitalisée le 3 juin 2022 en raison d'une fracture au bassin. Son retour à la MP s'est effectué le 20 juin 2022. Nous remarquons que suite à la chute, l'activité dans la chambre augmente progressivement. Cela peut indiquer une difficulté dans les déplacements en dehors du lieu individuel et donc un isolement involontaire. Les cinq sous-séquences du modèle dynamique (Figure 3) montrent une évolution notable de l'activité. Les modèles A et B représentent le comportement habituel de la résidente avant sa chute. Les graphes C et D représentent respectivement l'activité moyenne au jour qui a suivi la chute et celle un peu plus d'une semaine après. Nous remarquons que le patron a changé : le pic d'activité en matinée est légèrement décalé

(autour de 10h au lieu de 9h avant) et le mouvement dans la chambre l'après-midi semble régulier ce qui indique une personne qui reste dans sa chambre, potentiellement du fait d'une mobilité réduite et plus difficile pouvant causer un isolement. Enfin, le graphe E montre la moyenne d'activité une semaine après le retour de la résidente à la MP suite à son hospitalisation. Nous retrouvons un patron similaire aux deux premiers jours avec moins de concentration des mouvements dans la chambre lors des après-midis. Nous pouvons supposer qu'il y a eu un retour à la normale et donc un rétablissement de la résidente ce qui a été attestée par le cahier d'observation du personnel.

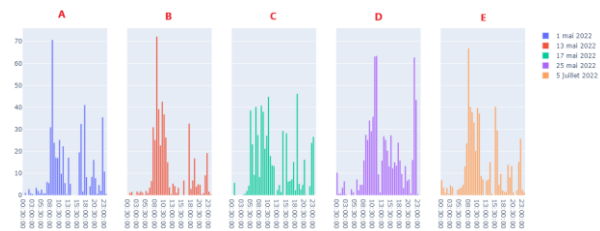


Figure 3 – Sous-séquences du modèle dynamique

6 Conclusion

Nous avons montré qu'en s'appuyant sur une étape préparatoire en environnement contrôlé, il était faisable de porter une infrastructure de monitoring complète sur site réel. Nous avons mis en évidence dans le cas d'une chute des changements comportementaux par évolution des modèles d'activité. Un travail en cours porte sur l'utilisation des algorithmes de classification non-supervisées K-means et DBSCAN à l'identification automatique des déviations en amplitude ou rythme chronologique pour prédire un risque d'évènement.

7 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à ASF pour le financement du matériel ainsi que les résidents de la MP de Brens (81) pour leur participation au projet.

Références

- [1] J.P. Aquino, M. Bourquin, *Les innovations numériques et technologiques dans les établissements et services pour personnes âgées*, Rapport de la filière Silver économie, 2019.
- [2] P. Rumeau, N. Vigouroux, E. Campo, E. Bougeois, F. Vella, A. Van Den Bossche, T. Val, J. Ancilotto, *Technological Services in Shared Housing: Needs Elicitation Method from Home to Living Lab*, IRBM, 42(2), 2021, p. 73-82
- [3] A. Labit. *Habiter et vieillir en citoyens actifs : regards croisés France-Suède*, La doc. française, 65, 2013, p. 101-120
- [4] N. Vigouroux, F. Vella, D. Istrate, E. Campo, L. Caroux, N. Lompre, P. Gorce, J. Jacquier-Bret, N. Pinede, M. Sacher, A. Serpa, A. Van den Bossche, *Multimodal observation method of digital accessibility for elderly people*, IRBM, 42(3), 2021, p. 135-145.

Estimation automatique du ressenti conducteur dans les ADAS

Houda Rafi¹ Yannick Benezeth^{1,2} Cédric Demonceaux^{1,3} Fan Yang^{1,2}

prenom.nom@u-bourgogne.fr

¹ Laboratoire Imagerie et Vision Artificielle, EA 7535

² IUT Dijon-Auxerre, Université de Bourgogne

³ IUT Le Creusot, Université de Bourgogne

Thèmes – Informatique - Robotique - Imagerie - Électronique - Mathématiques

Résumé – *Les aides à la conduite (ADAS en anglais : Advanced Driver-Assistance System) ne peuvent pas être développées indépendamment du ressenti du conducteur. Selon le profil de celui-ci (conducteur expérimenté ou novice, prudent ou sportif), des grandeurs objectives telles que les accélérations latérales et radiales, la loi de variation du freinage ou encore le contrôle sous virage, seront considérés comme acceptables ou intolérables. Les sensations de confort et de sécurité consistent à corrélérer ces grandeurs physiques de la conduite avec le ressenti subjectif du conducteur, selon son profil. Le ressenti conducteur peut être capturé et mesuré sous différents angles : mouvements faciaux, comportement des mains (pieds), signaux physiologiques comme la pression sanguine, ou la réaction électrodermale, etc. Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode d'apprentissage du SVM (Support Vector Machine) pour catégoriser automatiquement le niveau de stress des conducteurs en exploitant deux signaux physiologiques EDA (Electrodermal Activity) et IBI (Inter-Beat-Interval). Avec ce modèle personnalisé en intelligence artificielle, le profil du conducteur peut bien être pris en compte. Les résultats expérimentaux obtenus avec une base de données publique prouvent la supériorité de notre approche par rapport à l'état de l'art.*

Mots-Clés – *Estimation d'émotion, signaux physiologiques, apprentissage fédératif, classification automatique.*

1. Introduction

Le monitoring du stress des conducteurs est crucial pour connaître leur tolérance vis-à-vis d'une situation. La méthode classique consiste à collecter des réponses auto-rapportées aux questionnaires ; souvent biaisées pour de diverses raisons, la principale limitation de ces réponses est le manque d'objectivité [1]. Des études plus récentes analysent des caractéristiques extraites des signaux physiologiques comme la pulsation sanguine (BVP – Blood Volume Pulse en anglais), l'activité électrodermale, la respiration ou le rythme cardiaque et obtiennent des résultats performants pour l'estimation du niveau de stress [2]. Avec l'avancé des nouvelles technologies, nous pouvons capter ces signaux d'une manière continue, non-invasive et sans contact permettant ainsi d'estimer objectivement l'état de stress des conducteurs.

De nos jours, l'apprentissage automatique entraîné avec des exemples fait avancer grandement l'intelligence artificielle dans beaucoup de domaines. Le traditionnel paradigme du SVM (Support Vector Machine) maximise les performances de l'ensemble des échantillons de la base de données utilisée. Cette approche ne permet pas de différencier le traitement pour chaque individu dans l'estimation du ressenti, pourtant chaque conducteur possède sa propre manière d'exprimer son état émotionnel. Dans ce contexte, si l'on arrive à considérer simultanément le facteur commun et la variance des caractéristiques des signaux physiologiques de chaque profil, nous pouvons espérer améliorer les performances du monitoring [3].

Basée sur cette idée, nous avons proposé un nouvel algorithme d'apprentissage du SVM : *apprentissage fédératif*, permettant de réaliser d'abord des calculs décentralisés avec des sous-ensembles de données différents et ensuite combiner collaborativement tous les résultats pour la mise à jour des paramètres.

2. Conception d'un SVM personnalisé en utilisant l'apprentissage fédératif

La figure 1 illustre le processus d'apprentissage fédératif pour établir un modèle personnalisé. Pour ce schéma simplifié, nous avons les données de 3 conducteurs servant d'exemples d'apprentissage pour prédire le niveau de stress du conducteur ciblé. L'idée consiste à accentuer les caractéristiques proches de celles de la cible [4].

Pour chaque itération d'apprentissage, nous calculons la distribution de probabilités des caractéristiques pour l'ensemble des conducteurs de la base d'apprentissage et le conducteur cible. Ensuite, le coefficient Bhattacharya (BC_i en anglais) est utilisé pour mesurer la similarité entre l'exemple i et le conducteur cible de test t . Finalement la matrice de paramètres W de cette itération est mise à jour

à l'aide d'une fonction d'agrégation proportionnelle aux BC_i . Un modèle de SVM personnalisé pour le conducteur de test est ainsi créé à la fin de toutes les itérations d'apprentissage.

La base de données AffectiveRoad [5] a été utilisée pour tester et valider notre approche. Cette base a été collectée en enregistrant les données de 13 conducteurs dans des conditions réelles avec trois environnements différents : à l'arrêt, ville et autoroute. Chaque conducteur est équipé de 2 capteurs (une montre E4 et une ceinture Zephyr), permettant de capter plusieurs signaux physiologiques comme EDA, IBI, le rythme respiratoire et la température de la peau, *etc.* Le niveau de stress a été annoté avec une courbe continue entre 0 et 1. Pour notre étude, nous classifions 3 niveaux de stress : 0 pour la zone [0, 0.3] d'une courbe, 1 entre [0.3 et 0.7] et 2 correspondant à l'intervalle [0.7, 1].

Notre étude se focalise sur deux signaux physiologiques : EDA et IBI enregistrés par la montre E4. Après quelques pré-traitements pour éliminer les bruits d'acquisition, ils sont entrés dans des fenêtres temporelles glissantes de 1 min avec une superposition de 30s entre les deux fenêtres successives. Trois caractéristiques sont calculées à partir de l'EDA et les 10 autres sont obtenues à partir du IBI (voir le tableau 1).

3. Résultats expérimentaux

Nous avons utilisé un SVM linéaire pour estimer les 3 niveaux de stress. Le protocole LOOCV (Leave One Out Cross-Validation) est appliqué pour évaluer les performances de prédiction. C'est-à-dire, pour chaque modèle seul un conducteur est considéré comme cible de test et ses caractéristiques ne participent pas à l'apprentissage.

Les performances finales ont été calculées par la moyenne obtenue sur chaque individu. Cette performance correspond à la formule suivante :

$$BA(\%) = \frac{1}{2} \left(\frac{TP}{TP+FN} + \frac{TN}{FP+TN} \right)$$

Ici les TP, FP, TN et FN correspondent respectivement au pourcentage de vrais positifs, de faux positifs, de vrais négatifs et de faux négatifs.

Plusieurs expériences ont été réalisées avec deux méthodes d'apprentissage (classique et fédératif) sur les caractéristiques issues de l'EDA seule, du IBI seul et de la combinaison des deux. Les résultats montrés au tableau 2 illustrent l'efficacité de notre approche : une augmentation de 15% (de 52% à 67%) peut être observée en utilisant les caractéristiques IBI ou EDA+IBI. De même, la valeur de BA a aussi accru de 5% (de 53% à 58%) pour l'EDA.

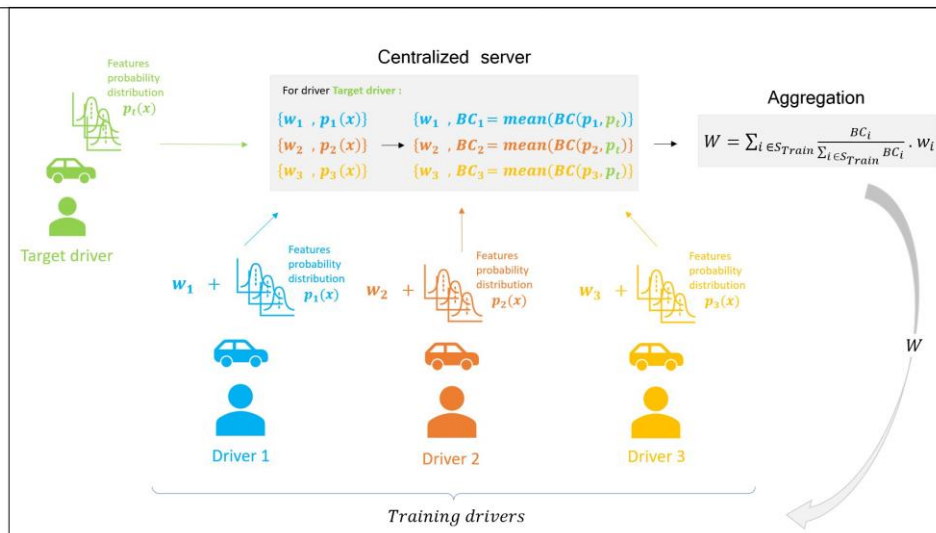


Figure 1 – Illustration du processus d'apprentissage fédératif.

EDA – L'activité électrodermale	La valeur maximale de la réponse de conductance cutanée (SCR), composante de l'EDA
	Nombre de pics dans la réponse de conductance cutanée (SCR)
	La somme des valeurs moyenne des deux composantes de l'EDA : la réponse de conductance cutanée (SCR) et le niveau de conductance de la peau (SCL)
IBI - Intervalle entre battements successifs	La valeur moyenne des intervalles RR (RR : le temps entre chaque battement cardiaque détecté)
	La valeur médiane des intervalles RR
	Ecart type des intervalles RR
	La racine carrée moyenne des différences d'intervalle RR successifs
	Le nombre d'intervalles RR successifs différant de plus de 50 ms (NN50)
	La valeur correspondante du NN50 en pourcentage.
	Le rapport du coefficient de variation de l'écart type des intervalles RR par rapport à l'intervalle RR moyen.
	La valeur maximale des IBIs
	La valeur minimale des IBIs
L'écart type de l'IBIs	

Table 1 – 13 Caractéristiques extraites de l'EDA et l'IBI.

	EDA + IBI	EDA	IBI
Apprentissage classique	52%	53%	52%
Apprentissage fédératif	67%	58%	67%

Table 2 – Comparaison des performances d'estimation.

4. Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous proposons une chaîne de traitements pour prédire automatiquement le ressenti du conducteur dans les ADAS. Pour mieux prendre en compte le profil particulier de chaque conducteur, nous avons

conçu un nouvel algorithme d'apprentissage SVM : *apprentissage fédératif*. L'approche proposée a été testée et validée sur la base de données publique *AffectiveRoad*. Une augmentation de performance entre 5% et 15% a été constatée par rapport à l'apprentissage classique. Dans le futur, avant de valider cette approche pour résoudre d'autres problèmes d'informatique affective, nous allons d'abord effectuer plus d'expériences avec des précisions pour analyser les limites des modèles, ensuite nous souhaitons aussi tester la robustesse avec d'autres caractéristiques et des bases de données plus larges.

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à la société Renault pour le financement de la thèse CIFRE.

Références

- [1] Randall A. Gordon, *Social desirability bias: A demonstration and technique for its reduction*, Teaching of Psychology, 14(1): 40–42, 1987.
- [2] Giorgos Giannakakis, Dimitris Grigoriadis, et al., *Review on psychological stress detection using biosignals*, IEEE Transactions on Affective Computing, 13(1):440–460, 2022.
- [3] Sara Taylor, Natasha Jaques, Ehimwenma Nosakhare, Akane Sano, and Rosalind Picard, *Personalized multitask learning for predicting tomorrow's mood, stress, and health*, IEEE Transactions on Affective Computing, 11(2):200–213, 2017.
- [4] Jakub Konečný, H Brendan McMahan, Felix X Yu, Peter Richtárik, Ananda Theertha Suresh, and Dave Bacon, *Federated learning: Strategies for improving communication efficiency*, arXiv preprint arXiv:1610.05492, 2016.
- [5] Neska El Haouij, Jean-Michel Poggi, Sylvie Sevestre-Ghalila, Raja Ghozi, and Mériem Jaïdane, *Affectiveroad system and database to assess driver's attention*, In Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing, pages 800–803, 2018.

Workshop Interdisciplinaire en Master sur la mise en oeuvre d'un procédé robotisé d'impression 3D pour la construction en Outre-mer

Kevin Subrin¹ Elodie Paquet¹ Halim El Baba¹ Benoit Furet¹

kevin.subrin@ls2n.fr elodie.paquet@ls2n.fr halim.elbaba@univ-nantes.fr benoit.furet@ls2n.fr

¹ IUT de Nantes, Nantes Université
Ecole Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes

THÈMES – *Environnement - Informatique - Robotique - Matériaux*

RÉSUMÉ – *Travailler sous la forme d'un Workshop sur une thématique est une forme d'apprentissage favorisant l'autonomie s'approchant du fonctionnement d'une équipe projet en entreprise. C'est dans ce cadre, que 25 étudiants du Master Interdisciplinaire en Technologie Innovante de l'IUT de Nantes ont réalisé durant une semaine un workshop intérogeant sur la conception et la construction d'habitats sur l'île de Mayotte. En effet, les chiffres récents font apparaitre que 40% des logements sont précaires et insalubres représentant 20000 logements alors que l'île aurait un besoin de 8000 logements locatifs sociaux à l'horizon 2025. Le workshop a pour objectif de prendre le sujet selon une approche systémique en analysant les problématiques autour des éléments "matière première, conception, procédé, machinerie" suivantes: Comment structurer la logistique de chantier pour être efficient en limitant l'impact environnemental ? Quelle perception a ce mode de construction robotisée et comment faciliter son adoption ? Quelles caractéristiques mécaniques doit avoir la terre pour s'adapter aux conditions climatiques de l'île ? Quels moyens à concevoir au plus proche du besoin ? L'article se focalise sur les problématiques recherche et présente les premiers résultats obtenus.*

MOTS-CLÉS – *Impression 3D, robotique, logistique de chantier, relocalisation*

1 Contexte

1.1 Nos étudiants

Le Master Interdisciplinaire en Technologies Innovantes (ITI) développe un parcours pédagogique scientifique et technologique où l'innovation est continuellement présente dans les cours en présentiel et dans les projets. Cette formation de cadre R&D répond aux besoins d'évolution de l'outil industriel des entreprises du territoire. Les parcours choisis par les étudiants sont personnalisables et polyvalents et se font par le choix d'1 majeure et de 2 mineures dans les domaines suivants : Matériaux - Produits - Procédés, Ingénierie de la Production, Électronique et Numérique, Environnement et Gestion de l'Énergie, Fabrication Avancée et Robotique ; Dans le cadre de cette formation, les étudiants réalisent un workshop dont l'objectif est de s'appuyer sur les 5 parcours en les faisant travailler en mode projet collaboratif.

1.2 L'habitat mahorais

Sur le territoire de Mayotte, près d'un tiers des résidences principales sont des logements de fortune en tôle, dépourvus de tout confort sanitaire et d'électricité. Pour lutter contre le mal-logement, la Direction Générale des Outre-Mer s'est alliée à Nantes Université pour expérimenter de nouveaux modes de construction dans le cadre de son Plan logement Outre-Mer 2019-2022. Plus spécifiquement, il s'agit de mettre en œuvre des mesures pour lutter contre un accroissement de l'habitat spontané et précaire qui se développe sous la pression démographique. Une des idées de ce projet est d'imaginer, tester et valider l'exploitation de l'impression 3D robotisée pour la construction d'habitats par l'intermédiaire d'un logement témoin de 60m² spécifique pour Mayotte utilisant au maximum les ressources et les moyens locaux dans la construction des logements adaptés aux usages et aux conditions climatiques du territoire (températures, risques cycloniques et sismiques).

Les premiers chiffres recensés par les organismes font apparaître un besoin de 1000 logements à construire par an. Nantes Université a été choisie pour avoir été un des pionniers sur l'Habitat social après avoir réalisé une première mondiale : l'impression 3D robotisée d'un logement social [1]. L'apport de la robotisation vise à réduire la pénibilité du travail et limiter les non-qualités et les aléas de chantier surtout si la main d'œuvre est peu ou pas qualifiée.

1.3 Le projet

Dès lors, il est nécessaire de développer une solution adaptée. Celle-ci se fera par l'intermédiaire d'un robot déplaçable et l'exploitation de matériaux locaux, recyclés ou disponibles sur l'île. Le principe constructif par impression 3D retenue est la terre crue.

2 Des problématiques aux résultats

2.1 Définition des objectifs

4 problématiques ont été émises correspondant aux parcours du Master. Le "mahorais" étant une des deux langues sur l'île de Mayotte, nous utilisons la contraction "Maho" dans le cadre des problématiques adressées.

1. Problématique MAHO-Logistique - environnementale : l'objectif est d'analyser la question dans une approche systémique. Il est nécessaire dès lors de recenser les lieux potentiels de chantier, de mise à disposition des matières et de faire des hypothèses sur les scénarios possibles afin d'évaluer la meilleure stratégie à partir de critères d'évaluation basés sur l'impact environnemental et économique.
2. Problématique MAHO-Trajectoire : L'objectif est d'analyser l'adéquation entre le procédé et la machinerie. Les étudiants doivent dès lors maîtriser les caractéristiques mécaniques lors de l'impression et après quelques dizaines d'heures de séchage. Un ensemble de mesures et d'essais doivent permettre la réalisation de cordons réguliers d'impression déposés à une altitude maîtrisée.
3. Problématique MAHO-Paramétrique : L'objectif est de s'intéresser à la chaîne numérique depuis l'expression du besoin (forme et orientation de la maison données par l'habitant) jusqu'à la génération des trajectoires robot. Il est fait le choix de mettre en œuvre une CAO Paramétrique de la maison. Dès lors, l'analyse des espaces de travail permet de cerner les zones de posage pour pouvoir "trancher" le modèle dans l'objectif de générer les trajectoires comme dans Subrin et al. 2018 [3].
4. Problématique MAHO-Precision : l'objectif est de travailler sur la qualité de la réalisation. En effet, le fait de gérer plusieurs posages doit faire appel à des solutions de recalages géométriques du robot pour assurer le bon positionnement des éléments imprimés.

2.2 Premiers résultats

2.3 Maho-Logistique-Environnementale

La mise en œuvre d'une organisation de chantier efficiente fait appel à une compréhension des méthodes mises en œuvre dans le domaine. Dès lors, les étudiants ont travaillé sur une modélisation multi-vue du chantier et on produit un tableau multi-critères (performance environnementale et économique) mettant en œuvre des scénarios incluant les équipements potentiels à prévoir, les terrains, les transports de matériaux, les personnels à mobiliser, l'approvisionnement, le stockage...Le résultat obtenu éclaire le déroulement d'un chantier mais la complexité est autre sur le déploiement de la solution faute d'échanges avec les acteurs locaux.



FIGURE 1 – Impression de cordons; Impression finale double buse; Impression double et simple buse

2.3.1 Maho-Trajectoires

La mise en oeuvre de l'impression 3D repose sur une méthodologie dont les étapes sont présentées dans Paquet et al. 2022 [2]. Dès lors, les étudiants ont eu à qualifier la géométrie des cordons en fonction de la vitesse du robot (Figure 1A). Une fois réalisée, plusieurs cordons sont imprimés pour tester la tenue d'une impression fermée (Figure 1D). Au regard des temps de dépose calculés par l'équipe Logistique, il a été nécessaire de doubler la quantité de terre déposée via la conception d'un effecteur double buse (Figure 1C). Egalement, des effondrements répétés ont amené à réfléchir sur un motif interne pour la tenue des parois extérieures. Dès lors, un prototype d'effecteur en impression 3D ABS a été réalisé et de nouvelles trajectoires ont été générées incluant un motif interne (Figure 1B).

2.3.2 Maho-Paramétrique

Le but étant de créer des quartiers facilitant une acceptation, il est émit rapidement l'idée de faire collaborer les habitants par l'intermédiaire d'une application. Le futur habitant définit l'organisation interne et externe de sa maison ainsi que l'orientation sur le terrain. Après quelques heures de réflexion sur les formes de l'habitat pour une maison de 60m², 4 posages permettraient d'accéder aux différents murs. 3 posages sont à l'intérieur de la maison, le dernier est à l'extérieur et doit laisser suffisamment de places pour extraire le robot avec un dispositif à fourches. La Figure 2 montre une vue de dessus de la maison, les 4 posages ainsi qu'une sphère représentant l'espace de travail du robot.

2.4 Maho-Precision

La qualité de réalisation repose sur la bonne planification des trajectoires au regard du positionnement du robot sur la dalle. Le travail a consisté en un recensement des

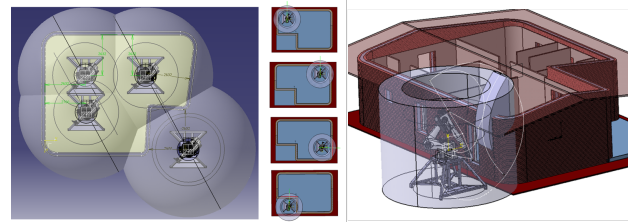


FIGURE 2 – Conception paramétrique des maisons - Analyse des posages pour analyse de la logistique

technologies existantes permettant d'estimer la pose du robot. Cette étude a mené à la mise en oeuvre d'une analyse de risques pour mettre en avant les événements redoutés.

3 Conclusion et Perspectives

Ce workshop interdisciplinaire s'est avéré être une semaine riche de travail en mode projet avec des relations humaines fortes, des échanges constructifs et du partage d'expériences. Ce travail continue dès lors avec un ensemble de projets de recherche portant notamment sur les îlots de fraîcheur avec un projet commun entre les IUTs de Nantes et de St Nazaire et l'Ecole d'Architecture de Nantes. Egalement, Nantes Université et son projet TIRREX XXL est pilote français dans la robotique grande dimension.

4 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude aux étudiants, à l'équipe encadrante du Master, I.Petit, C.Raillard, C.Martinez, B.Feuverie, P-Y Jouan. Nous remercions également le projet EquipEx-TIRREX - ANR-21-ESRE-0015 et ses responsables S. Caro et J-P Gazeau.

Références

- [1] Furet, Benoit, Poullain, Philippe, et Garnier, Sébastien, *3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete*, Additive Manufacturing, 2019, vol. 28, p. 58-64.
- [2] Paquet, Elodie, Metillon, Marceau, Subrin, Kevin, Furet Benoit et Caro Stephane *Path Generation for Foam Additive Manufacturing of Large Parts with a Cable-Driven Parallel Robot*, In : 39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2022). 2022.
- [3] Subrin, Kévin, Bressac, Thomas, Garnier, Sébastien, Paquet, Elodie, Furet, Benoit *Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing*, IFAC-PapersOnLine, 2018, vol. 51, no 11, p. 716-721.

Étude et développement d'un convertisseur réversible adapté aux applications HEMS

Ismail Aouichak^{1,2}, Yves Raingeaud^{1,2}, Jean-Charles Le Bunetel^{1,2}
aouichak@univ-tours.fr

¹ IUT DE TOURS, Université de Tours

²Groupement de Recherche En Matériaux Microélectronique, Acoustique et Nanotechnologie, UMR 7347

Thèmes – Énergie - Environnement - Électronique

Résumé. *La réduction du coût de la consommation d'électricité reste une préoccupation majeure, notamment dans le secteur résidentiel. Les systèmes de gestion de l'alimentation domestique intelligents (HEMS) sont de plus en plus populaires pour fournir une alimentation sans interruption, améliorer la qualité de l'alimentation et réduire le coût de la consommation d'énergie. Des convertisseurs DC-AC bidirectionnels doivent être utilisés dans ces HEMS si un transfert d'énergie entre le système de stockage et le réseau électrique ou vice versa est nécessaire. Cet article met en évidence la valeur potentielle des topologies conçues basées sur la génération de signaux sinusoïdaux à partir d'ondes demi-sinusoïdales. Un étage DC-DC agissant comme une source de tension configurable en série avec un étage DC-AC pour fournir une architecture pouvant fonctionner à la fois dans des configurations réseau et îlotage.*

Mots-Clés – Convertisseur, Batteries, Smart Grid

1 Introduction

Les défis de la politique énergétique de l'Union européenne sont plus grands que jamais. L'un de ces enjeux est la gestion intelligente de l'énergie à tous les niveaux, de la production à la consommation finale [1, 2]. L'efficacité de la livraison et la fiabilité de la prestation de services sont deux mesures qui peuvent être utilisées pour évaluer les performances du réseau de distribution [3,4]. L'utilisation accrue des réseaux intelligents a amélioré la surveillance et le contrôle [3]. Des exemples de capacités de réseaux intelligents, modernes incluent la capacité de faciliter le transfert de charge, de limiter les pics de charge et de détecter automatiquement les pannes et les dysfonctionnements [4]. Ces questions deviennent de plus en plus controversées à mesure que le nombre de microgrids (petits réseaux électriques indépendants) continue de croître. Les micro-réseaux se caractérisent par deux principaux modes de fonctionnement : mode réseau et mode îlotage [5].

Un système de stockage est nécessaire pour installer un système intelligent de gestion de l'électricité (HEMS). Un système intelligent de gestion de l'énergie est un ensemble de technologies et de dispositifs qui surveillent, contrôlent et optimisent la production, la distribution et l'utilisation de l'électricité dans un réseau électrique. Il utilise des algorithmes avancés pour prévoir la demande d'énergie, maximiser l'efficacité énergétique et minimiser les coûts, tout en garantissant une qualité de service fiable aux utilisateurs. Les appareils électriques peuvent être alimentés directement à partir du réseau électrique ou par un onduleur à partir d'énergie stockée. La réalisation de ces deux modes de fonctionnement nécessite nécessairement un convertisseur DC (alimentation courant continu) - AC (alimentation à courant alternatif) bidirectionnel pour fonctionner. Dans ce contexte, ce document se concentre sur la mise en œuvre d'un tel convertisseur bidirectionnel, comme le montre la figure 1.

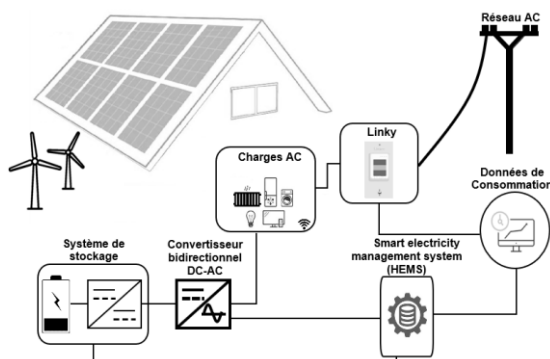


Figure 1 – Illustration du concept de HEMS

Il existe diverses topologies pour transférer de l'énergie électrique bidirectionnelle entre le réseau et une batterie, Cet article vise à prouver expérimentalement les mérites

d'un autre type de convertisseur DC-AC bidirectionnel plus adapté aux applications HEMS. Une topologie proposée, pas encore complètement explorée dans la littérature, consiste en une connexion en série d'un étage DC-DC et d'un étage DC-AC, et ces deux étages sont nécessairement bidirectionnels. En mode onduleur, l'étage DC-DC génère une demi-onde sinusoïdale à l'aide d'un contrôle de modulation de largeur d'impulsion (PWM). Ce signal est converti chaque demi-cycle par un étage DC-AC pour produire un signal sinusoïdal. En mode redresseur, l'étage DC-AC convertit l'électricité alternative en un signal toujours positif et la forme du courant du réseau électrique est contrôlée par l'étage DC-DC appelé étage de correction de facteur de puissance (PFC).

2 Topologie bidirectionnelle du convertisseur DC-AC et méthodologie de contrôle

La figure 2 montre la structure globale du convertisseur DC-AC bidirectionnel proposé. La base de cette structure est le transfert d'énergie entre les sources de tension continue et alternative et vice-versa. Un montage en série d'un étage DC-DC et d'un étage DC-AC assure ce principe de fonctionnement, et ces deux étages sont nécessairement bidirectionnels.

L'étage AC-DC doit générer une onde sinusoïdale positive à partir de la commande électronique appelée PWM (Pulse Wide Modulation) des interrupteurs de puissance (voir 2 Figure 2). Le système de gestion de l'électricité comprend un convertisseur AC-DC qui optimise la compacité en commutant à une fréquence élevée. L'inductance L1 (figure 2) a été conçue pour minimiser les ondulations de courant. Le convertisseur AC-DC agit comme une source de tension de sortie contrôlable.

Le courant de sortie peut être ajusté en modifiant la tension de sortie de l'étage AC-DC. Cette stratégie permet de contrôler la recharge de la batterie. En effet, si cette tension de sortie de l'étage AC/DC est supérieure à la tension de l'étage batterie, le courant de sortie va augmenter positivement, sinon le courant de sortie va diminuer pour devenir négatif.

Ainsi, deux modes de fonctionnement étaient possibles.

- Mode onduleur : Dans ce cas, l'énergie est transférée du système de stockage vers le réseau AC (flèches noires sur la Figure 2).

- Mode PFC : Dans ce mode de fonctionnement, l'énergie est transférée du réseau AC vers le système de stockage (flèches grises sur la Figure 2).

L'approche de conception choisie permet au convertisseur d'être utilisé à la fois en fonctionnement connecté au réseau et indépendant du réseau.

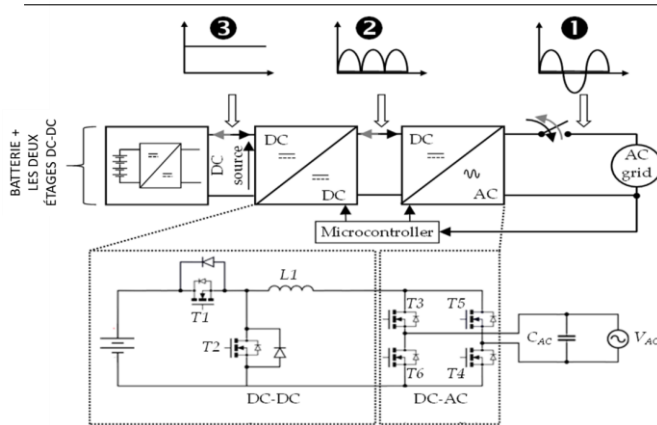


Figure 2 – Architecture électrique du convertisseur

L'étage DC-AC est chargé d'inverser une demi-onde sinusoïdale sur deux pour obtenir un signal de sortie sinusoïdal parfait (voir ❶ Figure 2).

3 Résultats et perspectives liées à l'enseignement

Une procédure de test complète a été définie et mise en œuvre pour confirmer les modes de fonctionnement du convertisseur DC-AC bidirectionnel, c'est-à-dire le mode onduleur et le mode redresseur, en particulier dans le cas d'une connexion au réseau. Le rendement énergétique de l'ensemble du convertisseur DC-AC fonctionnant en mode onduleur est évalué à une valeur supérieure à 90% et répond à l'objectif sur toute la plage de puissance étudiée, soit 50W à 500 W. La figure 3 montre la sortie de l'étage DC-AC (une sinusoïde de 50Hz) avec une tension efficace de 120V (pour un point de fonctionnement à 230W). La figure montre également le courant injecté dans le réseau AC. Ici, la valeur efficace est de 2 A.

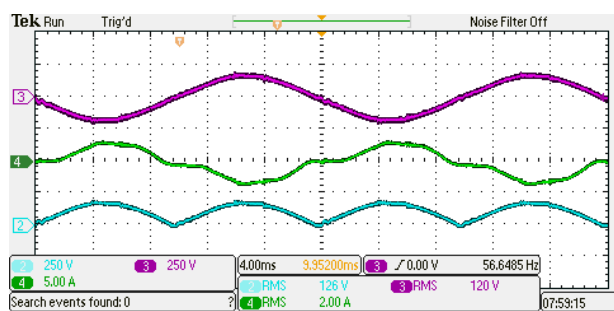


Figure 3 – Signaux générés par le convertisseur

La modularité de la structure proposée (Figure 4) a permis d'allier recherche et enseignement. Les étudiants ont la possibilité de travailler sur différents modules de la structure soit en les caractérisant soit en reproduisant leurs fonctions avec des composants différents. Cela peut inclure la possibilité pour les chercheurs et les étudiants de travailler sur des projets et des initiatives et la promotion d'un dialogue et d'un échange d'idées continus entre les deux groupes.

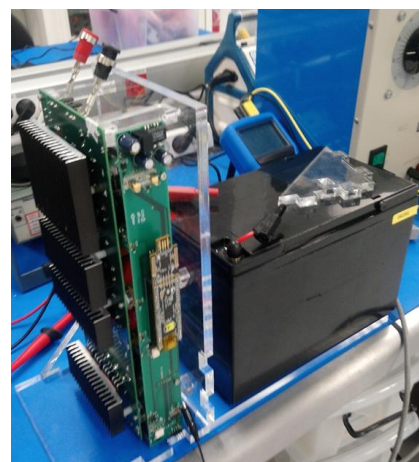


Figure 4 – Démonstrateur du convertisseur bidirectionnel

4 Conclusions

L'objectif principal de cet article était de présenter et de valider expérimentalement un convertisseur DC-AC bidirectionnel adapté aux applications HEMS lorsqu'il est connecté à un réseau AC et nécessitant un système de stockage d'énergie. La topologie proposée était basée sur deux étages bidirectionnels nécessairement connectés en série. Le premier est un étage DC-DC composé de deux interrupteur MOSFET de puissance en carbure de silicium pilotés à haute fréquence. Le second est composé de quatre MOSFET sur un substrat de silicium contrôlé par la fréquence du réseau AC.

Par conséquent, la structure proposée fournit d'excellentes formes d'onde AC, alors que cette dernière repose le contrôle d'un convertisseur DC-DC.

Références

- [1] Javaid, N.; Javaid, S.; et al. A Hybrid Genetic Wind Driven Heuristic Optimization Algorithm for Demand Side Management in Smart Grid. *Energies* 2017, 10, 319.
- [2] Torriti, J. The Risk of Residential Peak Electricity Demand: A Comparison of Five European Countries. *Energies* 2017, 10, 385.
- [3] Markkula, J.; Haapola, J. Shared LTE Network Performance on Smart Grid and Typical Traffic Schemes. *IEEE Access* 2020, 8, 39793–39808
- [4] Lu, H.H.-C.; Chu, C.-C.; Nwankpa, C.O.; Wu, C.W. Guest Editorial Complex Network for Modern Smart Grid Application. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.* 2017, 7, 345–348.
- [5] Iqbal, Z.; Javaid, N.; et al. A Domestic Microgrid with Optimized Home Energy Management System. *Energies* 2018, 11, 1002.

Planification de trajectoire d'un chariot autonome à fourche

Julien Pascal² Benoit Thuilot² Paul Checchin¹

julien.pascal@uca.fr benoit.thuilot@uca.fr paul.checchin@uca.fr

¹ IUT Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne
Institut Pascal, UMR 6602 UCA/CNRS

² Université Clermont Auvergne
Institut Pascal, UMR 6602 UCA/CNRS

THÈMES – Robotique

RÉSUMÉ – *Dans le cadre de l'usine du futur, automatiser les transports de produits au sein des ateliers permet à la fois d'accroître la compétitivité et de réduire la pénibilité et/ou la dangerosité de certaines tâches répétitives. Une piste est de rendre plus agiles et autonomes les chariots à fourche qui accostent, soulèvent et déplacent des objets dans les entrepôts existants. Afin d'améliorer sa manœuvrabilité, une configuration de véhicule à deux trains directeurs indépendants offre la possibilité de tout à la fois négocier des virages très serrés (trains avant et arrière braqués en sens opposé) et d'évoluer en crabe (trains avant et arrière braqués dans le même sens) pour se repositionner devant le produit à saisir. Mais le fait qu'une fourche prolonge le véhicule complexifie grandement les algorithmes de commande automatique. C'est l'objet de ces travaux qui sont menés dans le cadre du projet ACCROBOT (ACCostage haute précision ROBOTisé) financé par le Pack Ambition Recherche 2020 de la Région Auvergne-Rhône-Alpes (AURA).*

MOTS-CLÉS – *Usine du futur, Transitive, Chariot deux trains directeurs indépendants, Planification de trajectoire.*

1 Introduction

Pour envisager le déploiement de plateformes mobiles autonomes pour la manutention de charges lourdes au sein d'usines anciennes, non pensées initialement pour accueillir des robots, le choix technologique d'un chariot à deux trains directeurs indépendants a été fait pour une plus grande agilité (cf. Fig. 1). La planification de trajectoire du robot est rendue difficile car il faut exploiter le mieux possible les degrés de liberté apportés par les deux trains directeurs et gérer un encombrement constant à l'avant dû à une fourche utilisée pour effectuer la manutention. Ces caractéristiques particulières ne permettent pas l'utilisation directe de méthodes existantes. Celles-ci sont évoquées dans la section suivante avant d'introduire notre solution.

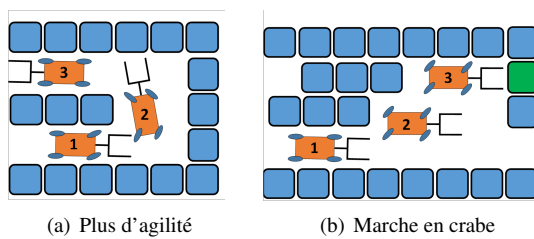


FIGURE 1 – Cinématique à deux trains directeurs

2 Planification de trajectoire en robotique mobile

Les algorithmes d'échantillonnage type *Rapidly Exploring Random Tree* (RRT) [1] ou *Probabilistic RoadMap* (PRM) [2], largement utilisés dans la littérature, ne sont pas retenus en raison de leur caractère non déterministe. Les méthodes fondées sur le *Machine Learning* sont performantes, mais nécessitent de grands jeux de données pour entraîner les modèles. Une revue détaillée de ces méthodes est donnée dans [3]. La décomposition en cellules [4] de la carte de l'environnement fournit un chemin qui est rarement réalisable par le robot (trop anguleux et nécessite des traitements supplémentaires pour le lisser). Il existe enfin les méthodes par champs de potentiel [5], dont le chemin s'obtient après une descente de gradient sur une carte de potentiels bien définis (répulsifs pour les obstacles, attractifs pour la solution). Parmi ces méthodes, le fast-marching a été privilégié. C'est un algorithme de recherche du plus court chemin dans un graphe, similaire à celui de Dijkstra [6]. En revanche, il utilise l'équation eikonale pour calculer les distances. Cette équation aux dérivées partielles, empruntée au monde de la physique, décrit le phénomène de propagation des ondes. Pour notre application, des chemins lisses sont naturellement obtenus (cf. Fig. 3(c)).

Dans notre variante de l'algorithme du fast-marching, l'espace de travail est discrétisé selon une grille. Chaque cellule se voit assigner un coût représentant la difficulté à

la traverser (infini pour les obstacles, puis décroissant à mesure que l'on s'en éloigne). Ce coût équivaut aux pondérations rencontrées dans un graphe sur lequel on applique un algorithme de plus court chemin. Le chemin final est obtenu en effectuant une descente de gradient. Pour garantir que le chemin soit réalisable par le robot, le gradient guide le modèle cinématique virtuel du véhicule (cf. Fig. 2) :

$$\begin{cases} dx = \tau \cos(\theta + \delta_R) \\ dy = \tau \sin(\theta + \delta_R) \\ d\theta = \tau \cos(\delta_R) \frac{\tan(\delta_F) - \tan(\delta_R)}{L} \end{cases}$$

avec δ_R et δ_F les angles de braquage arrière et avant des roues, L l'empattement et τ le pas de descente. La configuration du robot est caractérisée par le triplet (x, y, θ) avec (x, y) le centre de l'essieu arrière et θ son orientation par rapport au repère de référence de l'environnement.

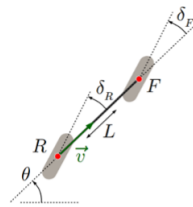


FIGURE 2 – Modèle de véhicule à deux trains directeurs

3 Cas d'un chariot à fourche

La gestion de l'encombrement du robot est problématique. En général, on inscrit le robot dans un cercle, puis les obstacles sont dilatés du rayon de ce cercle. Dans notre cas, avec une empreinte au sol fortement allongée par la fourche, cette approche serait bien trop conservatrice. Aussi, en plus des positions (x, y) , les orientations θ sont aussi discrétisées pour construire un espace 3D. La construction de l'environnement se fait en testant toutes les configurations (x, y, θ) échantillonnées et en déterminant celles qui présentent ou non une collision avec un obstacle. Cette méthode *a priori* coûteuse se parallélise très bien sur GPU (une carte de 50×100 positions (x, y) et 50 positions angulaires est traitée en 0,7 secondes sur GPU Nvidia T1200).

La méthode se décompose en trois grandes étapes (cf. Fig. 3) : partant d'une carte en deux dimensions avec la position des obstacles et des points de départ et d'arrivée, les positions angulaires sont ensuite échantillonnées pour effectuer le posé de robot et obtenir l'espace 3D navigable. La méthode du fast-marching est appliquée pour obtenir la carte des distances et la descente de gradient pour obtenir la trajectoire.

Différentes méthodes ont été testées pour identifier comment orienter les roues en fonction du gradient. Si on utilise l'essieu arrière pour optimiser la position (x, y) du robot

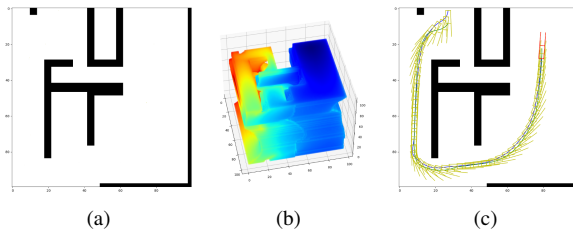


FIGURE 3 – Etapes de la méthode : (a) modélisation de l’environnement en grille binaire, (b) Posé de robot pour obtenir une carte en 3D et création d’un champ de potentiel (potentiel élevé loin de l’arrivée), (c) trajectoire finale obtenue par descente de gradient

et l’essieu avant pour optimiser son orientation, de nombreuses marches en crabe apparaissent ainsi que des oscillations lorsque l’on introduit les limites des angles de braquage. Du point de vue d’une application industrielle, ce comportement n’est pas envisageable. Pour remédier au problème, nous avons créé deux comportements. Le premier est identique au précédent lors de situations complexes, proches des obstacles ou pour manœuvrer en fin de parcours. Le second est un comportement plus proche de celui d’un véhicule à un train directeur lorsque l’on est loin des obstacles et de l’arrivée. Ce travail fait encore l’objet d’études complémentaires, mais le comportement général du robot est beaucoup plus proche de ce qu’un conducteur humain effectuerait.

L’ensemble des tests précédents sur la planification ont été effectués dans un environnement de simulation simple, développé pour l’occasion. Dans le but de valider notre solution au problème de planification et pour les futurs travaux, un test sur robot réel est prévu. L’INRAE a développé sur le site clermontois une plateforme robotique à deux trains directeurs : Adap2e (cf. Fig. 4). Cette plateforme a d’ores et déjà été mise en œuvre ce qui a conduit à adapter certaines parties de la méthode pour accepter un chemin sous la forme d’une suite de configurations (x, y, θ) et non pas une suite de positions (x, y) . Les lois de commandes ont de même été adaptées pour vérifier la bonne prise en compte de cette information supplémentaire. Avec ce développement dédié, il est possible de passer très facilement de la simulation au robot réel, c’est-à-dire du poste informatique du bureau à la plateforme expérimentale sur le terrain.

4 Conclusions

Une approche de planification de trajectoire d’un chariot à fourche à deux trains indépendants a été présentée. Il faudra la valider avec un suivi de trajectoire du robot réel nécessitant des lois de commande adaptées, mais qui restent à implémenter sur le robot. La suite des travaux concerne la partie liée à l’accostage. Il faudra déterminer la position



FIGURE 4 – Robot Adap2e

optimale que le robot doit atteindre pour effectuer la saisie. L’aspect perception de l’environnement du robot est une autre difficulté du projet. Il faudra coupler celui-ci à la commande pour réussir à stabiliser le robot sur la configuration cible. Les charges déplacées dans le cadre industriel visé sont lourdes et déportées à l’extrémité du chariot. Aussi, on ne peut pas ignorer les effets inertiels qui entrent en jeu. Il sera donc nécessaire de compléter les lois de commandes pour intégrer explicitement ces effets inertiels et les glissements.

5 Remerciements

Le projet ACCROBOT (ACCostage haute précision ROBOTisé - Chantier Transitique du laboratoire FACTOLAB) est financé par le Pack Ambition Recherche 2020 de la Région Auvergne-Rhône-Alpes (AURA). Les travaux sont effectués au sein de l’Institut Pascal dans le cadre de FACTOLAB, laboratoire commun issu de la collaboration avec le groupe Michelin dédié à l’industrie du futur.

Références

- [1] LaValle, S. M. (1998). *Rapidly-exploring random trees : A new tool for path planning*.
- [2] Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J. C., and Overmars, M. H. (1996). *Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12(4), 566-580
- [3] Zhou, Chengmin, Bingding Huang, and Pasi Fränti, *A review of motion planning algorithms for intelligent robots*, Journal of Intelligent Manufacturing (2021), p. 1-38
- [4] Gonzalez, Ramon, Marius Kloetzer, and Cristian Mahulea, *Comparative study of trajectories resulted from cell decomposition path planning approaches*, 2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), IEEE, 2017
- [5] Hwang, Yong Koo, and Narendra Ahuja, *A potential field approach to path planning*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 8.1 (1992), p. 23-32
- [6] Sethian, J. A., *A fast marching level set method for monotonically advancing fronts*, Proceedings of the National Academy of Sciences, Applied Mathematics, Vol. 93 (1996), p. 1591-1595

La perception multi-capteur : Un transfert recherche - enseignement pour les nouveaux métiers des véhicules à conduite automatisée

Sergio Rodríguez F.^{1,2}  Bastien Vincke^{1,2}  Bruno Darracq¹ Pascal Aubert³

sergio.rodriguez@universite-paris-saclay.fr bastien.vincke@ bruno.darracq@ pascal.aubert@

¹ IUT, Orsay - Université Paris-Saclay

² Laboratoire SATIE, UMR CNRS - Université Paris-Saclay 8029

³ Laboratoire C2N, UMR CNRS - Université Paris-Saclay 9001

THÈMES – Robotique - Instrumentation - Perception Multi-capteur

RÉSUMÉ – Ces dernières années, l'introduction accélérée des systèmes robotiques dans le domaine industriel des transports amène les secteurs socio-économiques à évoluer rapidement. Par exemple, le secteur automobile évolue vers le déploiement massif de systèmes d'aide à la conduite, l'introduction des véhicules à conduite automatisée et la transition énergétique des systèmes de transports multimodaux. L'innovation de ce transfert recherche - enseignement est centrée sur la perception comme étant une phase élémentaire et fondamentale dans la conception et le déploiement de véhicules intelligents. Une expérience pédagogique avec un groupe de 12 étudiants en BUT Mesures Physiques a permis aux élèves de s'approprier des technologies et des moyens de perception de dernière génération, de quantifier l'importance et l'impact de l'étalonnage des systèmes de perception dans la fusion de données et d'évaluer une fonction de détection d'objets pour la compréhension de la scène basée sur l'apprentissage profond. Ce travail a été validé à l'aide d'un véhicule démonstrateur à échelle réelle.

MOTS-CLÉS – perception, capteurs intelligents, instrumentation, automobile

1 Introduction

Les systèmes d'aide à la conduite (ADAS) et les voitures à conduite automatisée (VCA) ont pour objectif une amélioration drastique de la sécurité des usagers de la route. Dans le cadre de la formation des techniciens supérieurs en Mesures Physiques, nous nous intéressons aux systèmes de perception embarqués propres des ADAS et des VCA. Ces systèmes sont composés de multiples capteurs avec des modalités de mesure pouvant être complémentaires et/ou redondantes. Nombreuses sont les initiatives pour motiver et ouvrir les perspectives des élèves vers les métiers émergents des évolutions dans les systèmes de transports. Ces initiatives sont majoritairement orientées vers l'utilisation de modèles de véhicules à échelle réduite [1]. D'autres approches pédagogiques exploitent l'utilisation de bases de données publiques. Alternativement, on retrouve les approches pédagogiques basées sur l'utilisation de moyens de simulation.

L'innovation de ce transfert recherche - enseignement est centrée sur la perception comme étant une phase élémentaire et fondamentale dans la conception et le déploiement de véhicules intelligents. Une expérience pédagogique avec un groupe de 12 étudiants en BUT Mesures Physiques à permis aux élèves de s'approprier des technologies et des moyens de perception de dernière génération, de quantifier l'importance et l'impact de l'étalonnage des systèmes de perception dans la fusion de données et d'évaluer une fonction de détection d'objets pour la compréhension de la scène basée sur l'apprentissage profond. Ce travail a été validé à l'aide d'un véhicule démonstrateur à échelle réelle.

Dans la suite du document, le cadre pédagogique de cette expérience de transfert recherche-enseignement est présenté en Sec. 2. Elle est suivie, d'une description de la plateforme technologique associée en Sec. 3. En Sec. 4, le choix de concepts abordés et la démarche pédagogique sont présentés avec une suite de résultats obtenus en section 5. Enfin, le document est finalisé par quelques conclusions et perspectives du travail effectué.



FIGURE 1 – Plateforme technologique pour le transfert recherche-enseignement en perception multi-capteurs embarquée.

2 Le transfert recherche-enseignement

Au sein du laboratoire SATIE de l'ENS Paris-Saclay nous menons des activités de recherche dans le domaine de

la robotique et plus spécifiquement des Systèmes de Perception Multimodale Embarqués (SPME).

Fort de nos expériences dans la recherche appliquée au domaine des transports intelligents, nous avons entamé un transfert de connaissances bénéficiant principalement de la formation BUT Mesures Physiques de l'IUT d'Orsay à l'Université Paris-Saclay. Ce transfert a pour but de susciter l'intérêt et l'implication des étudiants vers les systèmes à fort composante technologique. Elle a également vocation à ouvrir les perspectives des étudiants vers les nouveaux métiers du domaine industriel de l'automobile et plus largement des transports intelligents.

Les actions faisant partie du transfert de connaissances sont décrites dans la suite du document et elles portent sur l'identification thématique et la formalisation d'un apprentissage par projet ainsi que dans la mise en place des outils et d'une plateforme technologique apte et adéquate aux activités pédagogiques.

3 Plateforme technologique proposée

La conception de la plateforme technologique proposée répond à deux objectifs pédagogiques : la capacité de la plateforme i) à effectuer des essais en condition d'usage réel et ii) à effectuer des mesures 3D de l'environnement. Le véhicule instrumenté et présenté dans la Fig. 1 est un véhicule électrique immatriculé de référence Renault Twizy série 90 Km/h. Il embarque sur le toit, une galerie de capteurs contenant deux caméras RGBD Intel Realsense D435i et un télémètre LiDAR à balayage Velodyne PUCK-16. Les capteurs sont reliés à un ordinateur à bord, où des traitements et/ou l'enregistrement des données temps réel sont effectués. Les systèmes de vision RGB-D associent de multiples imageurs projectifs afin d'estimer par stéréoscopie la profondeur associée à chaque pixel composant l'image. La télémétrie LiDAR est un moyen de perception éparses des mesures 3D effectuées par temps de vol suivant 16 angles variant en altitude (plans), couvrant 360° dans un rayon de 120 m. L'architecture basée sur ROS permet l'acquisition, l'horodatage, l'émulation du flot de données en temps-réel ainsi que l'exécution d'applications de démonstration. Cette dernière spécification est particulièrement pertinente pour le développement des preuves de concept par les étudiants.

4 Les concepts et la démarche pédagogique

Grâce à la plateforme technologique présentée en Sec.2 et en tenant compte du spectre pédagogique de la formation du BUT en Mesures Physiques, nous avons introduit dans un cadre d'apprentissage par projet l'étude et la vérification des spécifications des capteurs RGB-D et ceux des télémètres LiDAR en particulier la vérification de la fréquence d'échantillonnage. Nous nous sommes également intéressés à l'étalonnage intrinsèque des systèmes de vision et l'étalonnage extrinsèque d'un système multi-capteur vision-LiDAR par leur fort impact dans le fonc-

tionnement des systèmes de fusion de données.

Le groupe d'étudiants s'est consacré à l'analyse et la formalisation des protocoles adaptés aux objectifs thématiques identifiés. La gestion du projet a été structurée par 3 équipes coordonnées par un étudiant ayant le rôle de chef de projet.

En ce qui concerne la vérification de la fréquence d'échantillonnage, les étudiants se sont ainsi orientés vers l'utilisation de l'horodatage associé à chaque mesure dans un fichier contenant les données issues des capteurs en format ROSbag. Ces informations leur ont été nécessaires pour déterminer la fréquence (moyenne et instantanée) d'échantillonnage de chaque capteur en considérant le temps écoulé entre deux mesures successives.

Pour l'étalonnage intrinsèque du système de vision RGB-D, le groupe d'étudiants en charge de cet objectif ont développé un script python utilisant la bibliothèque OpenCV pour effectuer la détection du damier ainsi que l'estimation de paramètres intrinsèques du modèle sténopé (i.e. focal et centre projectif de l'image).

La fusion de données entre un système de vision RGB-D et un télémètre LiDAR nécessite d'estimer la transformation rigide (ici rotation et translation, six degrés de liberté) des repères de mesures de chaque capteur, transposant les données d'un capteur dans le repère de l'autre. Pour cet objectif, les étudiants ont développé d'un utilitaire logiciel permettant d'ajuster manuellement et d'observer le résultat du transfert de données (ex. projection de mesures LiDAR dans les images du système RGB-D).

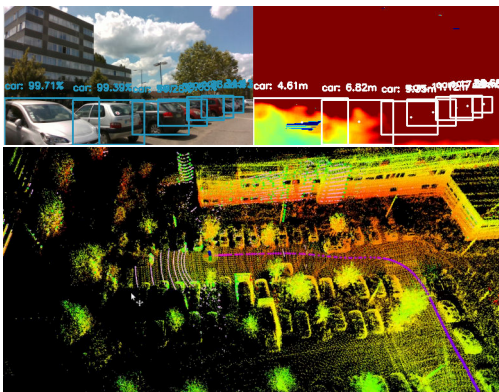


FIGURE 2 – Haut - Résultats d'une détection d'objets en utilisant le système de vision RGB-D. Bas - La reconstruction 3D en utilisant le télémètre LiDAR.

5 Résultats et retour d'expérience

Les premiers résultats obtenus à l'issue de cette initiative s'articulent sur deux volets. Le premier s'adresse essentiellement à la validation fonctionnelle de la plateforme technologique. Le deuxième porte sur les retombées et les réalisations à l'issue d'une expérience de pédagogie par projet avec un groupe d'étudiants du BUT Mesures Physiques fai-

sant usage de la plateforme.

En ce qui concerne la validation fonctionnelle de la plateforme, elle a été effectuée sur deux applications : la détection d'objets avec le système de vision RGB-D et la cartographie de l'environnement par télémétrie LiDAR (voir Fig. 2). Parmi les résultats obtenus avec le groupe d'étudiants, nous rapportons que la fréquence d'échantillonnage estimée est de 15 Hz pour l'ensemble des caméras et 10 Hz pour le LiDAR. Ces mesures mises dans le contexte applicatif sont équivalentes à scan LIDAR tous les 1,4 m et une image RGB-D tous les 2 m dans un véhicule se déplaçant à 50 km/h, compatible avec une utilisation en milieu urbain.



FIGURE 3 – L'application développée par les étudiants pour la mise au point des paramètres extrinsèques Vision RGB-D/LiDAR et la reprojexion de données de la télémétrie sur un flot d'images.

Enfin, la Fig. 3 illustre l'interface logiciel développé par les élèves pour un ajustement manuel des paramètres extrinsèques Vision RGB-D - LiDAR. Ce logiciel opère la projection de données de la télémétrie vers le flot d'images grâce aux paramètres extrinsèques et au modèle sténopé.

6 Conclusions et perspectives

Les efforts effectués pour opérer ce transfert nous ont conduits à consolider une plateforme technologique adaptée aux nouveaux métiers, ainsi qu'ils nous ont permis de mener une pédagogie par projet associée à une technologie innovante riche en concepts et en gestes techniques développés par les pratiques de la recherche. Ces expériences seront étendues aux interactions homme-machine. Par ailleurs, ces travaux ont été primés (1^{ère} place) dans l'épreuve libre du concours UTAC en avril 2022.

7 Remerciements

Nous remercions la direction de l'IUT d'Orsay et du dépt. Mesures Physiques pour l'accompagnement de cette initiative. Cette plateforme a été financée par un projet en 2021-22 par l'École Universitaire de Premier Cycle de l'Université Paris-Saclay.

Références

- [1] Vincke, B., Rodríguez F., S. and Aubert P. *An open-source scale model platform for teaching autonomous vehicle technologies*. MDPI Sensors, 2021.

Optimisation du Covoiturage entre Particuliers : étude du problème de covoiturage dynamique à sauts multiples

Corwin Fèvre^{1,3} Hayfa Zgaya-Biau² Philippe Mathieu¹ Slim Hammadi³
corwin.fevre@univ-lille.fr

¹ IUT, Université de Lille
Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille
Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 - CRISAL

² Université de Lille
Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille
Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 - CRISAL

³ Centrale Lille
Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille
Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 - CRISAL

THÈMES – Informatique

RÉSUMÉ – La crise écologique et énergétique actuelle mène à la nécessité de trouver des alternatives à l'autosolisme (conduite solitaire). Le covoiturage représente une solution prometteuse, notamment sous sa forme dynamique. Un système de covoiturage dynamique s'adapte en temps réel aux changements d'état de l'environnement afin de satisfaire les utilisateurs, à savoir les passagers et les conducteurs. Pour respecter ce caractère temps réel, il est nécessaire, d'une part, de maîtriser la complexité liée à l'optimisation des trajets, et d'autre part, de veiller à éviter la concentration de données sur un même système. Pour ce faire, nous proposons d'allier les systèmes multi-agents - dont la nature est intrinsèquement individu-centrée et décentralisée - à différents algorithmes d'optimisation dans le but de répondre aux problématiques énoncées. Le système proposé dans cet article permet de traiter dynamiquement des requêtes complexes de passagers tout en minimisant l'impact du partage de trajet pour les conducteurs, et ce, pour un large spectre de préférences et de comportements.

MOTS-CLÉS – Covoiturage, Simulation, Optimisation, Agents

1 Introduction

Sur nos routes, la majorité des voitures particulières (VP) sont occupées par un seul utilisateur, c'est ce que l'on appelle l'autosolisme. Ce phénomène induit une pollution importante, une plus grande occupation des routes donnant lieu à des embouteillages et un pouvoir d'achat réduit pour la population du fait de l'augmentation constante des coûts de l'énergie. Le covoiturage apparaît comme une solution efficace pour réduire ce phénomène, mais force est de constater qu'il n'est que peu pratiqué sur de courts et moyens trajets. Ce constat peut être expliqué par de nombreux facteurs : le manque d'automatisation et d'optimisation du covoiturage, la faible considération des préférences des utilisateurs ou encore l'absence de prise en compte du trafic en temps réel. En bref, les services de covoiturage existant aujourd'hui ne sont pas adaptés au contexte actuel et à la population.

C'est pourquoi, depuis de nombreuses années, la recherche s'articule autour de la compréhension et de la résolution des problématiques liées au covoiturage. De nombreux thèmes sont abordés tels que : la formalisation des contraintes liées à la réservation, aux détours et aux transferts des usagers ou encore la modélisation des utilisateurs et du réseau routier. Chacun de ces thèmes apporte une complexité importante, tant dans la modélisation du problème que dans sa résolution [1]. C'est dans ce cadre que se déroulent nos recherches. Notre objectif principal est de modéliser de façon réaliste et efficace des individus interagissant dans un système de covoiturage. Pour ce faire, nous proposons une approche individu-centrée, où chaque individu dispose de son propre objectif, qui est bien plus proche du monde réel que des approches plus globales où l'objectif est d'atteindre un but collectif. Nous détaillons cette méthodologie dans la suite de cet article.

2 La modélisation de notre système de covoiturage

Pour étudier le covoiturage, il faut pouvoir effectuer une simulation convaincante d'un trafic routier et des requêtes de passagers en temps réel. Notre système de covoiturage est ainsi principalement composé de trois éléments : un réseau routier, un ensemble de conducteurs et un ensemble de passagers. De nombreuses contraintes sont nécessaires afin de garantir l'exactitude de la simulation. C'est ce que nous détaillons dans cette section.

2.1 Le réseau routier : un graphe de route

Le réseau routier de notre système est modélisé par un graphe orienté et connexe $G = \langle V, E \rangle$ dans lequel V est l'ensemble des nœuds du graphe et E est l'ensemble des arêtes liant ces nœuds (voir Fig.1). Un nœud $v_i = (x, y)$ représente une intersection de routes ou une impasse. Il est référencé spatialement avec un couple de coordonnées : une longi-

tude x et une latitude y . Une arête $e(v_i, v_j)$ représente alors une route directe entre deux nœuds contigus v_i et v_j . Différents poids peuvent être attribués aux arêtes exprimant les informations routières disponibles : une distance de trajet, une vitesse maximale ou encore un temps de trajet théorique. Il est ainsi possible d'effectuer des calculs de plus court chemin entre deux nœuds du graphe.

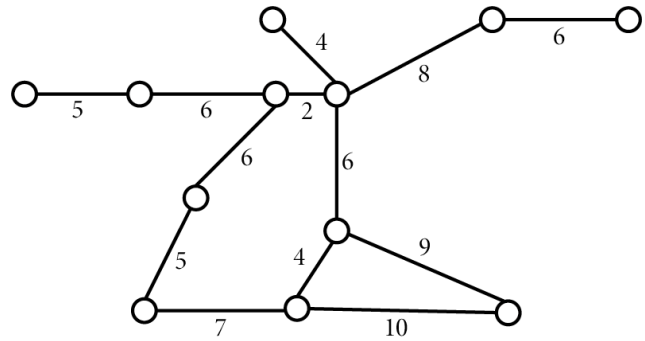


FIGURE 1 – Un exemple de graphe de route, les valeurs apposées aux arêtes représentent le coût d'un trajet entre deux nœuds.

Pour générer un graphe de route, nous transformons une carte du monde réel issue d'OpenStreetMap en graphe selon les règles énoncées dans le paragraphe précédent. Les distances sont ainsi réelles et parcourues par des véhicules disposant d'une vitesse donnée. Dans notre simulation, le temps évolue à intervalles constants (ex : de seconde en seconde). À chaque pas de simulation, tous les passagers et conducteurs présents dans le système peuvent effectuer une action en fonction de leur comportement.

2.2 Les utilisateurs du système de covoiturage : les passagers et les conducteurs

Les conducteurs et les passagers présents dans notre système de covoiturage sont autonomes. Ils prennent leurs propres décisions et communiquent pour partager des informations sur leur voyage, à la manière d'un système de covoiturage dans le monde réel. Un système multi-agents (SMA) permet d'organiser une telle population : il est composé d'agents autonomes qui ont un comportement, une perception et des caractéristiques propres et qui interagissent avec leur environnement.

La flexibilité d'un système de covoiturage peut être modélisée et quantifiée par deux opérations. D'une part, les conducteurs peuvent choisir de faire des détours pour prendre ou déposer des passagers et ainsi élargir l'offre de transport du système de covoiturage. C'est ce que l'on peut voir dans la figure 2 avec le conducteur du chemin rouge pouvant effectuer un détour en pointillé rouge. D'autre part, les passagers peuvent choisir de passer d'un véhicule à l'autre, et donc d'effectuer un transfert, afin d'arriver à leur destination en plusieurs étapes, si cela est plus

pratique pour eux (temps de trajet réduit, moins d'attente, etc.). Dans la figure 2, le passager peut effectuer un transfert entre les deux véhicules sur le noeud avec une croix verte.

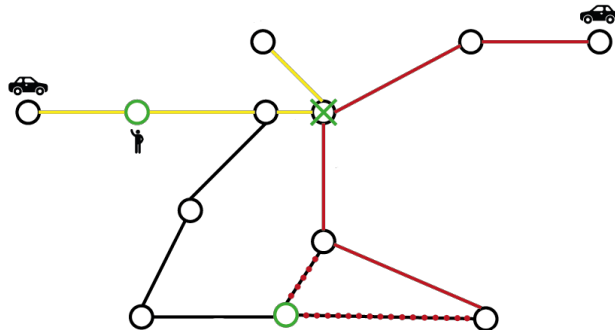


FIGURE 2 – Un exemple de covoiturage avec transfert et détour

Le problème est donc d'identifier pour chaque utilisateur du système, qu'il soit conducteur ou passager, le meilleur chemin vers sa destination. La difficulté est alors que ce meilleur chemin dépend d'une part, des préférences de chacun, et d'autre part, des conditions d'offre et de demande en temps réel.

3 Résolution du problème

Pour résoudre ce problème, nous utilisons diverses techniques d'optimisation combinatoire. Pour un passager, il faut trouver la meilleure séquence de covoiturage le menant à destination, ce qui implique d'identifier le meilleur nœud de transfert pour chaque transfert possible. Il n'est malheureusement pas possible de parcourir toutes les possibilités en effectuant une recherche exhaustive (force brute) par exemple. C'est dans ce contexte que nous proposons différentes techniques visant à réduire la complexité de la recherche de solution dans l'espace. Dans un premier article [2], nous avons proposé d'abstraire l'espace dynamiquement en l'indexant dans une structure nommée R-Arbre [3]. Puis dans un deuxième article [4], nous avons proposé de transformer le problème de covoiturage en un problème des plus proches voisins d'un groupe (GNN/ANN) disposant d'un algorithme puissant de référence pour sa résolution. Nous y avons par la suite associé une fonction multi-objectif permettant de prendre en compte les préférences des passagers sur le temps de trajet, d'attente, l'emprunte carbone ou encore le nombre de transfert.

Un exemple typique de résultat obtenu avec notre modèle est présenté dans la figure 3. D'une part, on remarque que plus les conducteurs acceptent d'effectuer des détours (en abscisse), plus la part des passagers arrivant à destination augmente (en ordonnée). D'autre part, on remarque

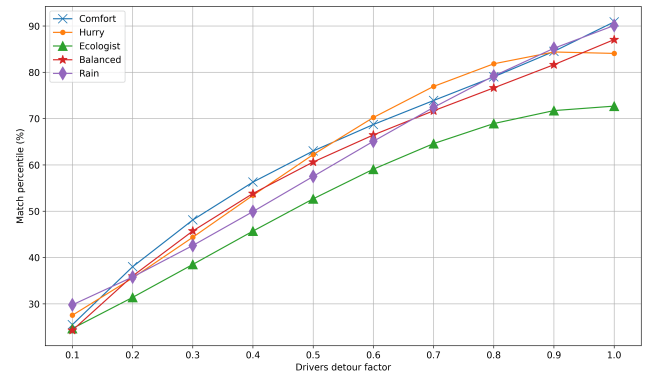


FIGURE 3 – Le taux de service en fonction du facteur de détour des conducteurs et du comportement des passagers

que si tous les passagers adoptent un comportement radicalement écologique (courbe verte avec des triangles), un plus faible pourcentage d'entre eux arrivent à destination comparé aux autres comportements. Il s'agit alors d'un paradoxe, car hypothétiquement, les passagers écologiques ne pouvant pas covoiturer vont être obligés de prendre leur véhicule et donc de polluer un peu plus.

4 Conclusion

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude démontrent l'intérêt de l'utilisation conjointe des systèmes multi-agents, de l'optimisation combinatoire et de l'indexation spatiale pour la résolution de problèmes complexes de mobilité. Ces travaux ont été menés lors d'une thèse co-encadrée par des professeurs de l'IUT de l'université de Lille et de Centrale Lille.

Références

- [1] Niels Agatz, Alan Erera, Martin Savelsbergh, and Xing Wang. Optimization for dynamic ride-sharing : A review. *European Journal of Operational Research*, 223(2) :295–303, December 2012.
- [2] Corwin Fevre, Hayfa Zgaya-Biau, Philippe Mathieu, and Slim Hammadi. Multi-agent Systems and R-Trees for Dynamic and Optimised Ridesharing. In *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pages 1352–1358, October 2021.
- [3] Antonin Guttman. R Trees : A Dynamic Index Structure for Spatial Searching. *ACM SIGMOD Record*, 14 :57, January 1984.
- [4] Corwin Fevre, Hayfa Zgaya-Biau, Philippe Mathieu, and Slim Hammadi. Preferential Optimization of Multi-hop Dynamic Ridesharing based on R-Trees and Multi-Agent Systems. *Transportation Research Record*, Under revision, 2022.

La compression des signaux, résultat d'une approche par objectif, dans un contexte de ressources limitées – Scilab, LAME, WAV, MP3

Pierre Maréchal

pierre.marechal@univ-lehavre.fr

Hugues Duflo

hugues.duflo@univ-lehavre.fr

IUT Le Havre, Université Le Havre Normandie
Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, LOMC UMR 6294 CNRS

Thèmes – Informatique - Électronique - Mathématiques - Communication - Signal

Résumé – *Les programmes mis en œuvre ici visent à soulever certains détails des signaux que nous utilisons au quotidien. La qualité des signaux que nous recevons via nos terminaux résultent d'un choix a priori par des experts compétents en la matière, mais dont l'utilisation est trop souvent relayée à des utilisateurs pressés par la simplicité et l'efficacité. Que ces préoccupations soient légitimes n'empêche pas, qui plus est dans une formation universitaire de s'intéresser au codage de l'information et d'en analyser les mécanismes et les limites. Les sons ont cette qualité de faire appel à nos sens, et nos perceptions de soulever la question de la qualité d'un signal. Parmi les outils à disposition, les logiciels libres permettent de faire des choix de compression audio (<https://lame.sourceforge.io/index.php>), et de constituer des éléments de décision et d'analyse quantitative (<https://www.scilab.org/>). La question de la compression est très souvent relayée à l'arrière plan bien que centrale dans nos usages, d'où l'intérêt de sensibiliser et former les étudiants à ces questions auxquelles ils sont implicitement confrontés, que ce soit dans leur vie personnelle, leur vie d'étudiant et leur vie professionnelle. Les signaux en question sont compressés pour des raisons historiques de limites de mémoire et de débit. S'intéresser au format MP3 (<https://en.wikipedia.org/wiki/MP3>), c'est s'intéresser aussi à l'histoire logicielle, celle des formats de fichiers et des motivations de diffusion (<https://museumofportablesound.com/mp325-timeline/>). Bien que de nombreuses limites matérielles aient été dépassées, le compromis compression/qualité demeure une préoccupation majeure pour les hébergeurs et diffuseurs de contenus. Les vertus d'un codage et d'une compression optimale constituent donc un sujet majeur pour la formation au choix de compromis techniques, économiques, mais aussi éthique au sens de l'amélioration continue de l'utilisation des ressources à disposition.*

Mots-Clés – Logiciel libre, compression audio, qualité du signal.

Introduction

Le traitement de données numériques constitue un enjeu de premier plan pour les étudiants, en particulier ceux nés après 2000. La multiplication des systèmes d'exploitation grand public, dont l'ergonomie a permis une large diffusion s'est faite au détriment de la maîtrise des codages associés. Que ce soit pour les formats vidéo, image ou audio, la multiplicité de l'offre par des codages propriétaires viennent confisquer la question de l'accessibilité aux ressources logicielles et aux choix attenants. La question des logiciels libres est souvent éludée par la culture d'un pragmatisme débridé. Et pourtant, la complémentarité de l'efficacité et la culture du partage des codes source n'est plus à démontrer [1], tant au niveau technique qu'économique, au sens d'outils communs à des nombreux acteurs. Pour preuve, les rachats de Android par Google en 2005 et GitHub par Microsoft en 2018, respectivement pour 5,4 et 7,5 milliards de dollars ont bousculé le monde de l'open source. Sur d'autres plans, de nombreux logiciels et formats libres démontrent que les usages, la mutualisation des besoins et des moyens produisent des alternatives ouvertes [2] au bénéfice de tous. Au-delà de l'aspect informatique, c'est le choix du logiciel libre et ouvert qui est illustré *via* la problématique de la compression des signaux audio et l'analyse de la quantification d'erreur du format MP3 avec les logiciels libres LAME pour la compression MP3 et Scilab pour l'analyse des signaux WAV.

1 Contexte et motivation

Bien qu'incontournable, la maîtrise de la numérisation des données et des données numériques n'est pas chose évidente, et est trop souvent contournée par des béquilles logicielles. Derrière l'ergonomie apparente se cache la délégation totale de problématiques complexes. En 1840, le code Morse fait référence avec un codage compressé permettant une transmission de l'information via un codage numérique. Cette approche empirique marque le début d'un essor qui ne cessera plus. La formalisation du codage de l'information numérique par Shannon en 1948 pose la question de l'optimisation du codage [3]. Par la suite les algorithmes de codage de Huffman [4], puis LZW (pour Lempel, Ziv et Welch) [5] permettront de compresser des données de tous types. Pour les images, viendront les algorithmes spécifiques au codage d'images dont les standards JPG (destructif) [ITU-T81, 1992] et PNG (non destructif) [ISO/CEI 15948:2004]. Les signaux audio verront apparaître les formats (destructifs) de compression FLAC (2000), MP3 (1992), OGG (2000). Enfin, pour les données vidéo, les formats (destructifs) DivX (Rota, 1999), Xvid (GNU GPL, 2001), H.264/MP4 (ISO/CEI 14496-10:2003).

Les formats de données visuelles, tout comme celles audio tirent avantage des limites de détection, traitement, et analyse de nos sens. La qualité des signaux obtenus peut s'évaluer *via* des *benchmarks*, mais aussi des panels d'utilisateurs qui évaluent en double aveugle la qualité des compressions réalisées. Dans le cas du travail présenté ici, on s'intéresse à la quantification numérique de l'erreur relative moyenne entre une source audio WAV et sa version compressée par une méthode destructive MP3.

2 Compression audio

La compression audio telle que réalisée par le format MP3 comporte différentes étapes, dont une compression destructive dite "psycho-acoustique" tirant avantage du masquage audio permettant d'effacer les données relatives à des sons rendus inaudibles par d'autres sur une fenêtre temporelle donnée. Cette approche a permis de remplir le cahier des charges initiales qui consistait à opérer une compression d'un taux supérieur à 10 relativement au standard WAV [6]. L'objectif s'est trouvé atteint avec le MP3 *via* le débit de données (*bitrate*) fixé en standard à 128 kbps (kilobits par seconde) contre le standard WAV avec une fréquence d'échantillonnage à 44,1 kHz, une quantification à 16 bits par échantillon, et 2 canaux pour la stéréo, soit $44100 \text{ ech/s} \times 16 \text{ bits/ech/canal} \times 2 \text{ canaux}$, *i.e.* un *bitrate* à 1440 kbps pour le WAV en stéréo.

2.1 Méthode

Un jeu de fichiers audio de référence est choisi puis les erreurs relatives de compression sont comparées pour ces différentes sources [7]. Dans l'objectif d'évaluer la performance de la compression destructive MP3, des signaux d'instruments connus pour leur richesse harmonique ont été choisis, avec un jeu de cinq fichiers source au format WAV. Pour l'analyse d'erreur relative, les fichiers ont été tronqués à 3 s soit $N = 132\,300$ échantillons. La méthodologie adoptée a donc été de compresser ces fichiers avec un *bitrate* constant fixé de 32 à 320 kbps, puis de les comparer au fichier source. Le logiciel libre LAME a été utilisé pour effectuer les compressions et conversions WAV à MP3, et réciproquement, puis le traitement des signaux temporels a été programmé avec Scilab.

2.2 Quantification de l'erreur

Afin de quantifier les modifications apportées par la compression MP3, un estimateur doit être choisi. Par souci de simplicité, l'erreur relative $\varepsilon(k)$ est évaluée pour chaque échantillon k (dont la source est non nulle) entre le fichier WAV source et le fichier compressé MP3 :

$$\varepsilon(k) = \frac{s_{\text{WAV}}(k) - s_{\text{MP3}}(k)}{s_{\text{WAV}}(k)} \quad (1)$$

Dans l'objectif de comparer les erreurs relatives obtenues pour chaque échantillon (eq. (1)) pour chaque fichier et pour chaque *bitrate*, l'erreur relative moyenne est calculée :

$$\varepsilon_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{s_{WAV}(k) - s_{MP3}(k)}{s_{WAV}(k)} \right| \quad (2)$$

3 Résultats

Pour illustration, l'erreur relative (eq. (1)) est évaluée à partir d'un fichier source au format WAV sur une compression MP3 à 128 kbps (Fig. 1).

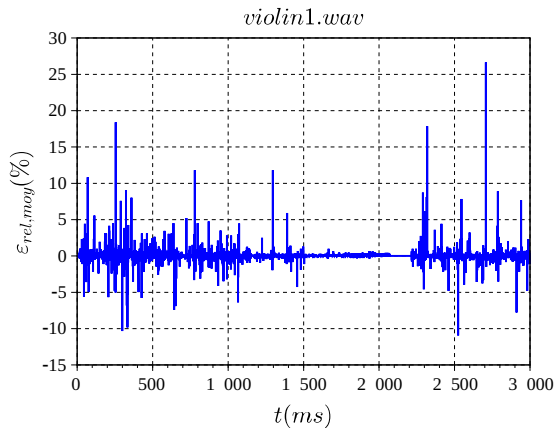


Figure 1 – Erreur relative MP3 vs WAV relevée pour un *bitrate* fixe de 128 kbps.

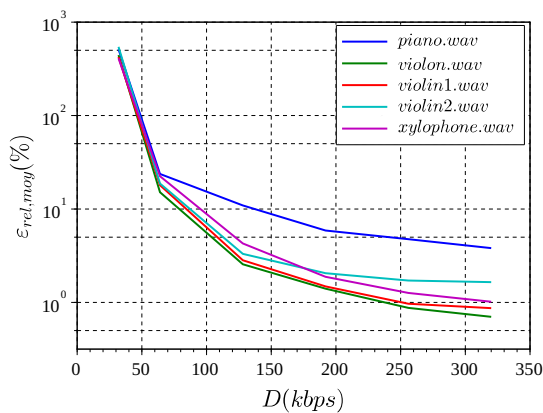


Figure 2 – Erreur relative moyenne liée au *bitrate* fixe de compression MP3.

Les erreurs relatives moyennes ont été calculées sur cinq fichiers et les résultats obtenus sont illustrés (Table 1) pour différentes compressions, dont un *bitrate* minimal à 32 kbps, standard à 128 kbps, et maximal à 320 kbps :

Table 1 – Erreur relative moyenne ε_{moy} (%)

<i>D</i> (kbps)	<i>piano</i>	<i>violon</i>	<i>violin1</i>	<i>violin2</i>	<i>xylo</i>
32	513	445	424	545	411
128	10,9	2,56	2,83	3,31	4,27
320	3,81	0,70	0,87	1,65	1,02

4 Discussion

Au-delà du résultat attendu de la réduction de l'erreur relative moyenne qui décroît avec le taux de compression (Fig. 2), les résultats diffèrent d'un fichier à l'autre. Dans le cas du piano, la dégradation liée à la compression MP3 reste conséquente, et même avec un *bitrate* de 320 kbps, on atteint l'erreur relative moyenne de 3,81 %. Pour cet instrument, des contributions harmoniques significatives ont été tronquées. Cette dégradation est nettement visible *via* une analyse temps-fréquence réalisée avec Scilab et fait bien ressortir le filtrage, inhérent à la méthode de compression MP3.

5 Conclusion

La programmation mise en œuvre *via* des logiciels libres tels que LAME et Scilab ont permis de traiter et d'analyser des signaux compressés au format audio MP3. La comparaison des résultats obtenus a mis en évidence les aspects destructifs liés à la compression MP3, en fonction du *bitrate*, mais aussi une quantification de l'erreur relative moyenne produite pour cinq échantillons de fichiers. Les outils développés gagneraient à être diffusés et repris pour des analyses étendues à de nouvelles études de cas.

Références

- [1] Williams, S., Stallman, R. and Masutti, C.: Richard Stallman et la révolution du logiciel libre. Framasoft; 2010.
- [2] Giesler, M.: "Conflict and Compromise: Drama in Marketplace Evolution", *Journal of Consumer Research*, vol.34, p.739-753, 2008, (doi.org/10.1086/522098).
- [3] Shannon, C.: "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, vol.27, p.379-423, 1948, (doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x).
- [4] Huffman, D.A.: "A method for the construction of minimum-redundancy codes", *Proc. IRE*, vol.40, p.1098-1101, 1952, (doi.org/10.1109/JRPROC.1952.273898).
- [5] Welch, T.: "A technique for high-performance data compression", *Computer*, vol.17, p.8-19, 1984, (doi.org/10.1109/MC.1984.1659158).
- [6] Le Guyader, A., Philippe, P. and Rault, J.B.: "A review of speech and audio coding standards (ITU-T, ETSI et ISO/MPEG)", *Annales Des Télécommunications*, vol.55, p.425-441, 2000, (doi.org/10.1007/BF02995200).
- [7] Papadakis, N.M., Aroni, I. and Stavroulakis, G.E.: "Effectiveness of MP3 coding depends on the music genre: Evaluation using semantics", *Acoustics*, vol.4, p.704-719, 2022, (doi.org/10.3390/acoustics4030042).

Proposition d'un agenda de recherche interdisciplinaire sur les innovations dans les véhicules autonomes en logistique

Christelle Camman^{1,2} Selma Khader^{1,2} Laurent Livolsi^{1,2}
David Duché^{1,3} Marcel Pasquinelli^{1,3},
Thomas Kronland-Martinet^{3,4}, Julien Serres^{4,5}, Stéphane Viollet⁴

Christelle.ledi@univ-amu.fr selma.khader@univ-amu.fr laurent.livolsi@univ-amu.fr
david.duche@univ-amu.fr marcel.pasquinelli@univ-amu.fr
thomas.kronland-martinet@univ-amu.fr julien.serres@univ-amu.fr stephane.viollet@univ-amu.fr

¹ IUT, Aix-Marseille Université

² Aix Marseille Univ, CRET-LOG, Aix-en-Provence, France
Centre de recherche sur le transport et la logistique, UR 881

³ Aix Marseille Univ, CNRS, IM2NP, Marseille, France
Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence, UMR 7334

⁴ Aix Marseille Univ, CNRS, ISM, Marseille, France
Institut des Sciences du Mouvement – Etienne-Jules Marey, UMR 7287

⁵ Institut Universitaire de France (IUF), Paris, France

Thèmes – *Gestion - Robotique - Électronique*

Résumé – Nous développons un système de géolocalisation bioinspiré adapté pour la navigation de véhicules autonomes évoluant en environnement intérieur ou mixte intérieur/extérieur tels que les magasins connectés. La technologie proposée s'inspire de la vision de la fourmi du désert *Cataglyphis* qui utilise la lumière polarisée du ciel pour trouver le chemin le plus court vers son nid. Dans une démarche d'intégration dès l'amont (prouesse disruptive ou *deep tech* en anglais), nous avons mis en place un programme de recherche pluridisciplinaire faisant intervenir des chercheurs en science fondamentale, spécialistes en neuroéthologie, en optoélectronique et en robotique, et des chercheurs en sciences humaines intéressés par les usages des innovations et leur impact sur les organisations logistiques. Le premier enjeu de ce projet est d'évaluer le potentiel de cette innovation pour le développement de véhicules autonomes et de drones de livraison mais également de regrouper les acteurs travaillant sur leur développement ou les utilisant en tant que prestataires de services logistiques. Enfin, le dernier enjeu de ce projet boussole/magasin connecté est d'utiliser des bâtiments universitaires comme lieux d'expérimentation en déployant des véhicules autonomes équipés de ce système de géolocalisation vecteur à la fois d'innovation mais aussi de souveraineté nationale.

Mots-Clés – *Logistique, véhicule autonome, géolocalisation sans GPS, systèmes optiques, lumière polarisée, boussole optique.*

1 Introduction

Le transport et la logistique font face à des défis qui relèvent aussi bien de la transition énergétique, de la numérisation des activités et, bien entendu, des enjeux sociaux avec 1 emploi sur 10 aujourd'hui en France. Depuis la crise sanitaire et la guerre en Ukraine, ces défis s'inscrivent simultanément dans un objectif de continuité des activités et d'efficacité pour maîtriser les coûts alors que l'inflation est élevée. L'enjeu de souveraineté est même évoqué en lien avec ces questions.

Innover est central pour faire face à ces défis. Les innovations sont organisationnelles et technologiques, et leur combinaison est source de performance. Les innovations technologiques appellent de nouveaux usages et contribuent ainsi à faire évoluer les organisations. L'objectif, pour les pouvoirs publics, est alors de faire émerger un écosystème contribuant à l'amélioration de la compétitivité des entreprises utilisatrices de ces technologies et à l'émergence d'un marché pour celles qui innoveront et les produisent.

Cependant, le temps et l'importance des budgets nécessaires segmentent les rôles et contribuent, si ce n'est à la non-transformation d'une invention en innovation, à un manque d'alignement entre innovation et usages. Cette question est au cœur du présent programme de recherche dont l'agenda est ici présenté. Dans le cadre de l'essor des véhicules autonomes de fret, nous postulons qu'une démarche interdisciplinaire depuis le départ doit améliorer l'appropriation par les acteurs et ainsi la diffusion des innovations réalisées. Deux parties structurent cette communication. Dans une première, nous présentons la doctrine du cadre institutionnel de financement des innovations et les écueils associés. Dans la seconde, nous expliquons le contexte de ce projet et l'agenda de recherche associé.

2 La doctrine du cadre institutionnel de financement des innovations

2.1 L'innovation, une démarche multi-acteurs

L'Etat, au travers des institutions ou programmes qu'il met en place (pôles de compétitivité, PIA...), souhaite jouer un rôle de facilitateur ou d'accélérateur dans l'émergence et la diffusion d'innovations. C'est la doctrine de la triple hélice initiée par Etzkowitz et Leydesdorff [1] qui considèrent trois phases. Dans la première, entreprises et recherche publique échangent sous l'égide de l'Etat, avec une distinction entre recherche fondamentale puis appliquée. Dans la deuxième, les interactions deux à deux entre chacun des acteurs (Etat, entreprises et recherche publique) sont prises en compte. Dans la troisième, les rôles de chacun finissent par se confondre (centres de recherche privés, universités

entrepreneuses, Etat stratège qui oriente et favorise les changements institutionnels...) au bénéfice d'une production de connaissances accélérée.

Le caractère « positif » des acteurs impliqués dans les processus d'innovation fait l'objet de critiques dans l'approche de la triple hélice. Il n'est question que d'acteurs souhaitant collaborer et n'ayant pas de comportement opportuniste alors que le financement de leurs recherches est en jeu et que les fonds publics se restreignent. Cela est d'autant plus perceptible que les processus sont segmentés dans la durée.

2.2 La segmentation temporelle des projets

L'échelle TRL (*Technology Readiness Level*), développée à la fin des années 1980 par la NASA, sert aujourd'hui de référence pour qualifier la maturité des projets d'innovation et les risques associés. Elle regroupe neuf niveaux: la recherche fondamentale ou *deep tech* pour les trois premiers (définition du principe de base, du concept technologique et 1ère preuve de concept), la recherche appliquée pour les deux suivants (réalisation d'un modèle fonctionnel puis représentatif), le développement expérimental avec trois niveaux (la démonstration de la performance du modèle, du 1er produit réalisé puis de son industrialisation) et enfin l'industrialisation (déploiement sur le marché). L'échelle TRL est aujourd'hui souvent utilisée par l'Etat pour financer les innovations et manager les écosystèmes liés.

Dans ce cadre, la question n'est pas tant de savoir si tel ou tel type de recherche bénéficie de plus d'aides publiques mais d'appréhender les logiques de passage d'un niveau à un autre. La quête de financements nouveaux tout comme la recherche de légitimité au moment de l'industrialisation engendrent des stratégies politiques, qualifiées de « hors marché », qui s'appuient sur un travail institutionnel destiné à orienter les décisions. Les modalités peuvent relever d'actions sur l'opinion publique prônant l'intérêt général de telle ou telle innovation dans la perspective de l'élargissement de la triple hélice à une quadruple ou quintuple hélice et/ou d'un travail institutionnel destiné à réglementer pour « forcer » les changements d'usages et l'appropriation contrainte des innovations.

Face à ces possibles écueils politiques liés au cadre institutionnel du financement des innovations, une approche intégrée et multidisciplinaire pourrait être synonyme d'une meilleure efficacité dans la quête des objectifs évoqués en introduction.

3 Les véhicules autonomes en logistique au cœur de multiples enjeux

3.1 Véhicules autonomes et drones

Parmi les innovations permettant de surmonter les défis

du secteur du transport et de la logistique, les véhicules autonomes et les drones occupent une place importante et participent de cette logistique 4.0. Ils apparaissent comme des solutions face aux problèmes de pénibilité et/ou de pénurie de main d'œuvre, sont synonymes de réduction des coûts et permettent d'envisager une transition énergétique accélérée. Leur usage peut s'envisager aussi bien au sein des entrepôts que dans le cadre des livraisons du dernier kilomètre ou de la logistique urbaine avec des effets, dans les deux derniers cas, sur le trafic. Compte tenu des anticipations de marché, ils revêtent également un enjeu industriel majeur pour les pays qui feront émerger des acteurs compétitifs dans le domaine.

Malgré les multiples communications, véhicules autonomes et drones restent encore essentiellement au stade de la recherche appliquée ou du développement expérimental pour reprendre l'échelle TRL. Il faut dire que les questions de recherches demeurent nombreuses (et même liées encore à la *deep tech*) que l'on soit dans des zones fermées soumises à la directive machines (directive 2006/42/CE) ou, a fortiori, sur des voies ouvertes à la circulation publique. Dans ce projet, nous développons de nouvelles modalités de localisation bio-inspirée pour apporter une solution supplémentaire de localisation aux robots mobiles autonomes en environnements complexes ou dépourvus de GPS. Le guidage au moyen d'un GPS nécessite d'avoir accès à des balises émettrices satellitaires, tout autant que le guidage au moyen d'antennes terrestres (réseaux RTK, 4G, ou 5G), tous étant sensibles à la configuration environnementale, au nombre d'antennes ou de satellites visibles, mais aussi aux conditions météo. Le projet s'inspire du système optique de localisation des insectes navigateurs, qui repose sur des techniques de positionnement peu connues. Ces insectes sont capables de naviguer avec précision malgré un système visuel parcimonieux et des ressources calculatoires frugales grâce à l'exploitation de la lumière polarisée naturellement diffusée par le ciel. La technologie de boussoles optiques proposée se situe à un niveau de TRL entre 3 et 4 [2]. Le but du présent projet est d'évaluer son potentiel pour une utilisation en environnement intérieur ou mixte intérieur/extérieur dans un magasin connecté et en exploitant des sources lumineuses polarisées disposées dans le magasin. Dans une seconde étape nous proposons de développer des systèmes mixtes fonctionnant à la fois en lumière artificielle et en lumière naturelle pour équiper des droïdes pouvant livrer/transporter certains produits ou des droïdes caddys pour aider les clients.

Les innovations dans ce domaine ont donc toutes les caractéristiques évoquées dans la première partie, et en subissent donc les mêmes risques. Elles mobilisent d'abord tous les acteurs de la quintuple hélice (entreprises – productrices et utilisatrices, centres de recherche, Etat et

collectivités territoriales, société civile et environnement) et posent les questions de leurs intérêts respectifs. Elles supposent aussi un travail institutionnel permanent pour convaincre de leur légitimité et envisager les passages d'une phase à l'autre.

3.2 Un agenda de recherche multi acteurs

Dans la perspective évoquée d'une intégration dès l'amont (*deep tech*), ce programme envisage de regrouper des acteurs très différents qui, souvent, interviennent à des stades différents de l'échelle TRL. Côté recherche, l'équipe est constituée aussi bien de chercheurs en sciences spécialisés sur des questions de recherche fondamentale liées aux véhicules autonomes et aux drones, que sur des chercheurs en sciences humaines intéressés par les usages de ces innovations et leur impact sur les organisations logistiques. Côté entreprises, la volonté est de regrouper des acteurs travaillant sur le développement de ces véhicules autonomes et ces drones mais aussi ceux qui pourraient les utiliser comme les prestataires de services logistiques. Notre projet boussole/magasin connecté s'inscrit également dans le cadre de la stratégie nationale sur les véhicules autonomes et la volonté est de renforcer la contribution de notre équipe pluridisciplinaire à cette politique publique.

L'autre enjeu de ce projet est d'utiliser des bâtiments universitaires comme lieux d'expérimentations et d'usages de ces innovations. Le premier est un magasin connecté¹ développé au sein du campus marseillais de l'IUT et permettra d'envisager un certain nombre d'innovations technologiques afférentes. Le deuxième est à l'état de projet encore mais consiste en un entrepôt-école connecté qui lui-aussi permettra d'envisager des expérimentations.

4 Conclusion

Cette communication a pour ambition de présenter un programme de recherche qui a la particularité de vouloir intégrer un consortium d'acteurs traditionnellement mobilisés à des stades différents dans les projets d'innovation concernant les véhicules autonomes et les drones en logistique.

Références

- [1] Henry Etzkowitz, Loet Leydesdorff, *The Triple Helix - University-Industry-Government Relations: A Laboratory for Knowledge Based Economic Development*, EASST Review, Vol. 14, No. 1, pp. 14-19, 1995
- [2] Dupeyroux, J., Serres, J. R., Viollet, S. (2019). AntBot: A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments. *Science Robotics*, 4(27), eaau0307.

¹ <https://iut.univ-amu.fr/actualites/inauguration-magasin-40>

PyScada : Logiciel de supervision libre et générique

Benoît Larroque¹

Camille Lavayssière²

Franck Luthon³

benoit.larroque@univ-pau.fr camille.lavayssiere@univ-pau.fr franck.luthon@univ-pau.fr

¹ IUT de Bayonne Pays Basque, Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA
Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur SIAME, Anglet, EA 4581

² Laboratoire Informatique LIUPPA, Anglet, EA 3000
Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur SIAME, Anglet, EA 4581

³ IUT de Bayonne Pays Basque, Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA
Laboratoire Informatique LIUPPA, Anglet, EA 3000

THÈMES – *Informatique - Électronique*

RÉSUMÉ – *Cet article présente un logiciel de supervision libre nommé PyScada permettant l'acquisition de données, la supervision et le contrôle distant de systèmes embarqués connectés (internet des objets IoT) en adoptant une approche pluridisciplinaire et interopérable. Cet outil générique, au regard des logiciels existants, prend en compte des notions d'interopérabilité afin d'être utilisés sur des systèmes informatiques abordant divers domaines d'application. PyScada repose sur une infrastructure logicielle dont l'architecture permet de faire évoluer, de modifier et d'adapter l'interface aux besoins de chaque utilisateur. Quelques cas d'application sont présentés et s'articulent autour des systèmes embarqués dans les domaines de l'éducation, du suivi énergétique du bâtiment et des manipulations de laboratoires de recherche .*

MOTS-CLÉS – *supervision, open-source, IoT*

1 Introduction

Depuis la fin du 20^{ème} siècle la présence de l'informatique dans l'enseignement supérieur, plus particulièrement dans les sciences et techniques de l'ingénieur, la recherche et l'industrie a permis aux travailleurs (étudiants, enseignants, chercheurs, techniciens et ingénieurs) d'avoir des outils d'acquisition de données (mesure, alarme, retour d'état de fonctionnement) et de paramétrage des processus (contrôle, configuration). Les logiciels ont été dans un premier temps conçus pour un type d'application, ils sont parfois dédiés à un domaine particulier et ne peuvent représenter qu'une partie d'une chaîne d'acquisition, le traitement des données étant parfois réalisé ultérieurement par l'homme. Afin de définir les lignes directrices de logiciels génériques dans le domaine de la supervision, de l'instrumentation et de l'expérimentation, il est nécessaire de définir de manière abstraite les besoins d'un utilisateur.

Afin de présenter une application capable de gérer les différents niveaux d'interopérabilité le logiciel **PyScada** développé à l'origine par Martin Schröder de l'Université Technique de Berlin, est utilisé. PyScada se définit comme : *Un système SCADA open source avec une IHM HTML5, construit à l'aide du framework Django.*

PyScada se présente donc sous la forme d'une page web utilisant les standards du web accessible sur tous les dispositifs récents. Le code source est disponible sur *GitHub*¹ et la documentation sur *ReadTheDocs*².

2 Logiciel PyScada

2.1 Présentation

PyScada est un logiciel *open source* et libre depuis sa création, sous licence GPL-3.0 et fonctionne sur toute plateforme UNIX et sur Windows à l'aide de conteneurs Docker. L'interopérabilité concernant les systèmes d'exploitations est ainsi assurée. Le dépôt officiel de PyScada contient le code source et les méta-données du logiciel. PyScada est également disponible sur le Python Package Index (PyPI)³. Un canal de discussion est disponible sur Matrix et les questions ou problèmes sont traités au fur et à mesure qu'ils se présentent. PyScada respecte donc l'ensemble des recommandations énoncées par [1].

L'architecture de PyScada est développée autour de Django, un *framework* Python, et vise à être simple à déployer. Django fournit deux interfaces web lui permettant de configurer et d'interagir avec des instruments utilisant l'un des protocoles suivants : Modbus, BACNet, VISA, OneWire, SMBus/I2C, GPIO, PT104, OPC-UA, SML, Serial, Webservice. L'ajout de nouveaux protocoles est facile grâce à l'architecture modulaire de PyScada. Pour générer les pages web, PyScada utilise le serveur web NGINX et la

passerelle Python WSGI Gunicorn.

Le matériel et les variables sont configurés dans PyScada par une couche abstraite et une couche spécifique du protocole utilisé. Cette interopérabilité protocolaire et matérielle de PyScada permet de traiter toutes les variables de manière uniforme en lecture ou en écriture. Ces données sont utilisées pour créer des événements, des alertes ou des scripts afin d'exécuter des algorithmes, d'interagir avec l'utilisateur et d'automatiser des processus.

2.2 Django

Django se définit lui-même comme un cadre web Python de haut niveau qui encourage le développement rapide et une conception propre et pragmatique. Il est gratuit, *open source*, rapide, sécurisé et évolutif. Sa grande communauté, ses mises à jour régulières et ses applications disponibles permettent de créer simplement une application web.

Les données et la configuration sont stockées dans une base de données. Django prend en charge une multitude de type de base de données : PostgreSQL, MySQL, MariaDB, Oracle, SQLite.

Django utilise trois couches d'abstractions : le modèle, la vue et le gabarit (MVT de l'anglais *Model-View-Template*) :

- Le **modèle** est utilisé pour structurer et manipuler les données.
- La **vue** traite les demandes des utilisateurs (via un distributeur d'URL) et renvoie une réponse après avoir organisé les données à l'aide de gabarits.
- Les **gabarits** sont utilisés pour générer des pages web HTML de manière dynamique.

L'architecture MVT, séparant la logique de création de site web en trois parties, rend facilement évolutif le site web, les développeurs pouvant travailler simultanément sur les différentes parties de l'application. Un modèle peut avoir différentes représentations (vues) et leur maintenance est facilitée. A l'aide de cette architecture, PyScada peut répondre aux besoins de supervision et d'instrumentation pour des applications variées via l'abstraction de l'expérimentation.

Les modules de PyScada sont définis dans l'application par défaut ou ajoutés via un *plugin*. Ils peuvent communiquer avec des instruments, des capteurs, des actionneurs ou le système hôte en implémentant des bibliothèques *open source* utilisant un protocole de communication. La création de l'interface utilisateur est générée via le module d'IHM de PyScada et par l'intermédiaire de Gunicorn et NGINX. Un *plugin* peut proposer de nouveaux composants en ajoutant de nouvelles **vues** et de nouveaux **gabarits**, comme par exemple un thème pour l'interface utilisateur ou des types de graphiques à l'aide des bibliothèques.

1. <https://github.com/pyscada/PyScada>

2. <http://pyscada.rtfid.io>

3. <https://pypi.org/project/PyScada/>

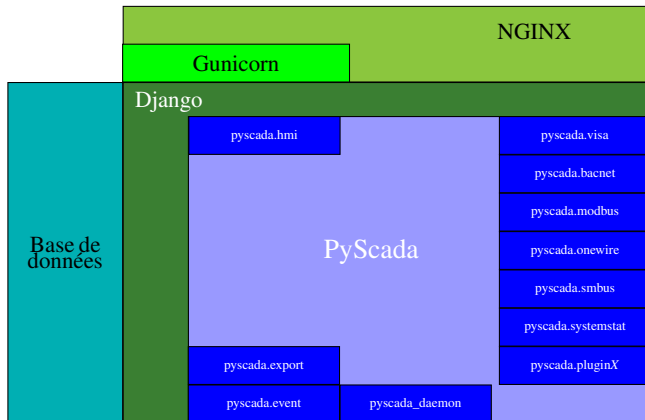


FIGURE 1 – Schéma de la structure de PyScada dans l’environnement Django.

3 Exemples d’application

3.1 LaboRem : Travaux pratiques à distance

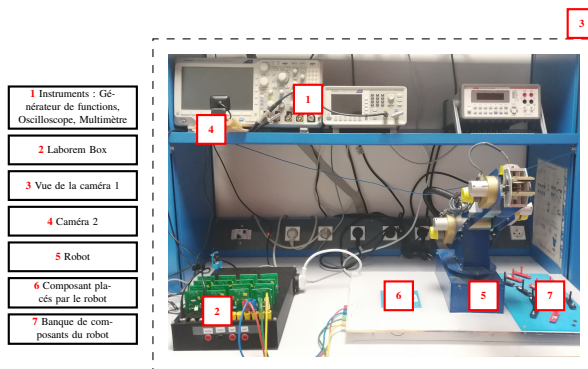


FIGURE 2 – Vue d’ensemble du banc d’essai Laborem.

PyScada est utilisé pour gérer l’interaction entre l’apprenant et une plate-forme de travaux pratiques à distance permettant à l’étudiant de réaliser des travaux d’électronique à distance. Les instruments de mesures connectés à la Laborem-box [2], le robot et le système de vision fournissent les outils nécessaires à la réalisation de ce type de manipulation.

3.2 Suivi énergétique de bâtiment

Les différents objets connectés dans le bâtiment tels que des compteurs énergétiques ou une station météo sont connectés et archivés sur la box via PyScada. Un accès temps réel aux données ou un accès aux archives fournissent des données exploitables pour optimiser les consommations énergétiques dans le bâtiment. Déployé sur le bâtiment de l’IUT de Bayonne le plan de comptage du systèmes permet d’accéder à 200 variables.

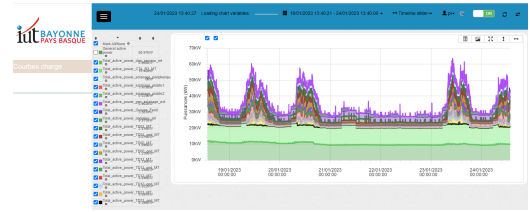


FIGURE 3 – Courbes de charge de l’IUT de Bayonne.

3.3 Expérimentation in-situ - digue de l’Artha

Une réseau de 16 capteurs de pression et un système de vision ont été implémenté sur la digue de l’Artha dans la baie de Saint-Jean de Luz. PyScada contribue à l’étude de l’impact des vagues sur une structure de défense côtière en alliant une captation vidéo avec une prise de mesure des pressions d’impact.



FIGURE 4 – Vue de la digue de l’Artha.

4 Conclusion

PyScada est un logiciel organisé autour d’une architecture permettant de présenter l’ensemble d’une expérimentation distante dans une interface web accessible depuis tout terminal informatique récent. L’approche abstraite autorise l’échange d’informations avec des capteurs et actionneurs de systèmes physiques quel que soit le domaine d’application. La possibilité d’implémenter des scripts pour traiter des données en leur donnant du sens et de la valeur. PyScada permet de s’adapter aux différents types d’utilisateurs en proposant différents niveaux techniques d’accès à une instrumentation.

Références

- [1] Jiménez RC, Kuzak M, Alhamdoosh M et al., *Four simple recommendations to encourage best practices in research software*, F1000Research 2017, 6 :876
- [2] C. Lavayssière, B. Larroque, F. Luthon, *Laborem Box : A scalable and open source platform to design remote lab experiments in electronics*, HardwareX, Volume 11, 2022, e00301, ISSN 2468-0672

Gouvernance des données basée sur le web sémantique

Nouha Laamech¹ Manuel Munier² Congduc Pham³

laamech.nouha@univ-pau.fr manuel.munier@univ-pau.fr congduc.pham@univ-pau.fr

^{1,2} IUT des Pays de l'Adour
Universite de Pau et des Pays de l'Adour
E2S UPPA, LIUPPA, Mont-de-Marsan, France

³ Universite de Pau et des Pays de l'Adour
E2S UPPA, LIUPPA, Pau, France

THÈMES – *Informatique - Droit*

RÉSUMÉ –

MOTS-CLÉS – *Le présent article décrit notre approche pour la gestion du partage des données dans les environnements connectés. L'exploitation des données générées par les ressources de l'internet des objets ou IoT soulève des risques de sécurité en raison du manque de transparence entre les différents acteurs de l'environnement. Ainsi, nous proposons une nouvelle solution de gestion du partage des données appelée IdSM (IoT data sharing management) basée sur le web sémantique, le modèle de contrôle d'usage OrBAC (Organization-Based Access Control) et les techniques de provenance, afin de répondre aux préoccupations de sécurité de l'information dans les environnements IoT.*

1 Introduction

Nos travaux de recherche se focalisent principalement sur trois questions complémentaires (i) la définition d'une couche sémantique qui décrit les exigences en matière de sécurité de l'information pour la gestion de partage des données (ii) l'application d'une politique de sécurité qui prend en compte à la fois les préférences d'utilisation du propriétaire des données, mais également les conditions de service du consommateur de données (iii) la construction d'une solution de provenance de données IoT dans une architecture décentralisée en éliminant le besoin de faire confiance à des tierces parties.

Afin de répondre à ces problématiques nous avons proposé dans un premier lieu une ontologie appelée IdSM-o [4] qui modélise les métadonnées ainsi que les contraintes d'utilisation des données dans les environnements IoT. Ensuite, afin d'aligner sémantiquement les exigences en matière de gestion du partage entre les producteurs des données et les consommateurs des données, nous avons étendu l'ontologie par des règles sémantiques d'inférence qui génèrent un package contenant une observation, ses métadonnées et sa licence. Cette licence décrit comment les données doivent être manipulées une fois partagées avec un consommateur donné. Afin de garantir le respect de cette politique, nous introduisons l'utilisation des techniques de provenance de données afin de prendre en compte d'où vient la donnée, dans quelle contexte est-elle utilisée, ainsi que sa qualité.

Dans cet article, nous présentons une approche qui fusionne à la fois la représentation sémantique d'un environnement IoT, les politiques de contrôle d'usage et les solutions de traçabilité.

2 Exigences de sécurité pour le partage de l'information

Sur la base des préoccupations actuelles en matière de gestion des données, nous pouvons identifier les concepts clé suivants de notre système de sécurité de l'information :

- Génération de la licence : une licence est générée sur la base des exigences des producteurs des données, établies en suivant un modèle OrBAC [1] et est attribuée aux données IoT, de sorte que la licence restera attachée aux données, peu importe où elles seront diffusées.
- Gouvernance des données : notre travail rejoint le " Data Governance Act" (DGA) [2] de la Commission européenne, qui vise à promouvoir le partage des données en créant un environnement numérique de confiance entre les différents acteurs. Cette vision peut s'appliquer à différents domaines : agriculture, énergie, villes intelligentes, etc.
- Bien commun : notre solution favorise un environnement IoT où différentes ressources peuvent être

partagées au sein de la communauté au profit d'un intérêt général.

3 Solution proposée : système de gestion du partage des données

3.1 Scénario motivant

Nous illustrons nos idées dans le contexte de l'agriculture connectée, mais notre solution est agnostique en termes d'applications et peut être appliquée dans d'autres contextes IoT. Nous définissons Sam comme un individu de la classe "Producteur de données" possédant un capteur de météo pour son champ de blé, qui est une instance de la classe `sosa:Sensor`. Ce capteur a deux sorties : le taux d'humidité et la température. Une règle de préférence d'utilisation est définie par Sam pour chacune des deux observations du dispositif. En effet, Sam accorde aux agriculteurs la permission d'utiliser l'observation "température" comme ils le désirent. Pour l'observation "humidité", il souhaiterait cette fois-ci que seules les personnes ayant le rôle "chercheur" puissent avoir le droit de la "consulter".

Alice, Aline, Bob et Ben sont des "consommateurs de données" qui souhaiteraient utiliser les observations partagées. Aline a le rôle "Farmer". Alice a le rôle de "Nursery_wroker", qui est un sous-rôle du rôle "Farmer". Bob a le rôle "Professor" et Ben a le rôle "Researcher", les deux sont des sous-rôles de "Academy". Nous définissons quatre types de requêtes qui impliquent la création d'instances de la classe `Operation`.

- Opération 1 : Bob demande l'accès à l'observation "humidité"
- Opération 2 : Ben souhaiterait apporter des modifications à l'observation "Humidité"
- Opération 3 : Aline souhaiterait lire et modifier l'observation "Temperature"
- Opération 4 : Alice souhaiterait rediffuser l'observation "Temperature"

3.2 Politique de contrôle d'usage et provenance de données

Notre approche est divisée en deux parties :

(1) D'abord, nous utilisons OrBAC comme outil de modélisation du contrôle d'usage pour aider les producteurs de données à définir des règles d'utilisation. En utilisant ce modèle, chaque utilisateur peut définir des règles de sécurité pour spécifier si certains rôles sont autorisés, interdits ou requis pour effectuer certaines activités sur certaines vues. L'avantage d'OrBAC est que ses règles ne sont pas statiques mais dépendent également de conditions contextuelles permettant d'activer ou de désactiver certaines règles. Une fois ce modèle défini, en utilisant l'ontologie IdSM-o, nous pouvons traduire ces exigences d'usage en matière de sécurité de l'information énoncées par les producteurs de données en règles SWRL (Semantic

Web Rule Language) [3], et ainsi exploiter toute la puissance du web sémantique.

(2) Une fois les exigences de l'utilisateur définies, nous utilisons la provenance des données pour vérifier que ces conditions sont effectivement bien respectées. Plus simplement, la provenance des données permet de répondre à des questions telles que "comment ont-elles été produites", "où sont elles distribuées", et "par qui ont-elles été produites". La provenance des données est une métadonnée associée aux observations, qui détaille l'origine, les modifications et les détails permettant de confirmer la crédibilité ou la validité des données. Cette démarche est importante pour repérer les utilisations inhabituelles et les attribuer aux sources. En outre, la provenance des données peut être utile pour la création de rapports de recherche ou des processus d'audit.

Exemple de figure

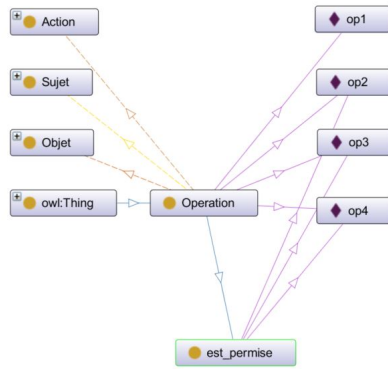


FIGURE 1 – Résultat après le lancement du moteur d'inférence

Après avoir lancé le moteur d'inférence, les politiques d'utilisation appropriées sont dérivées et l'une des dérivations obtenues est illustrée à la figure 1. Le système a déduit, à partir des règles de Sam, que opération 2, opération 3 et opération 4 sont des opérations permises. Ce résultat prouve que notre processus de raisonnement réussit à déduire une politique de sécurité en cas de correspondance entre les règles de préférences et les requêtes des consommateurs de données.

4 Architecture de notre solution

La figure ci-dessous montre l'architecture que nous proposons et qui permet de gérer le partage des données en utilisant l'approche définie précédemment. L'architecture implique deux acteurs principaux, à savoir le consommateur de données et le producteur de données. D'abord, le producteur de données précise les règles de partage qui concernent chacune de ses observations. Sur la base de ces exigences, une licence est générée et restera attachée à l'observation où qu'elle soit partagée.

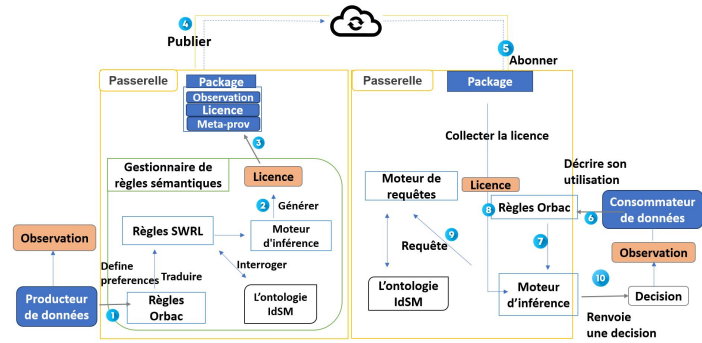


FIGURE 2 – Architecture de notre solution

Une fois que le consommateur de données a défini à son tour son usage, il reçoit le package verrouillé qui contient l'observation, sa licence, ainsi qu'un certain nombre de meta données ajoutées au fur et à mesure de l'acheminement de l'information. Le moteur d'inférence décide à partir de la licence et du descriptif d'utilisation du consommateur de données d'accorder ou non l'autorisation d'accès à l'observation contenue dans le package.

5 Conclusions et perspectives

Nos travaux de recherches sont en cours de développement, et nous sommes actuellement engagés dans la réalisation d'un système de provenance des données comme mécanisme de vérification de la sécurité. Ainsi, lorsqu'un producteur de données partage une observation avec sa licence d'utilisation, il peut contrôler depuis sa propre passerelle si les conditions d'utilisation qu'il a définies sont effectivement respectées par les consommateurs de données.

6 Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants pour le soutien financier du Conseil Départemental des Landes.

Références

- [1] Cuppens Frédéric and Miège Alexandre, *OrBAC, Organization Based Access Control*, The Review of Politics, Journées Druides (2004)
- [2] European Commission, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on European data governance (Data Governance Act)*, 2020.Vol. 55. COM/2020/767 final. Brussels, Belgium :.
- [3] I. Horrocks, P.F. Patel-Schneider, H. Boley, Said Tabet, Benjamin Grosf, and Mike Dean, *SWRL : A semantic web rule language combining oWL and ruleML*, W3C Member submission 21 (01 2007).

Le Cartable Distant : une plateforme dédiée aux enseignements pratiques à distance, un outil pour l'hybridation des formations technologiques

Bruno Darracq¹ Bastien Vincke^{1,2} Sergio Rodriguez^{1,2} Pascal Aubert³

bruno.darracq@universite-paris-saclay.fr bastien.vincke@ sergio.rodriguez@ pascal.aubert@

¹ IUT, Orsay – Université Paris-Saclay

² Laboratoire SATIE, UMR CNRS – Université Paris-Saclay 8029

³ Laboratoire C2N, UMR CNRS – Université Paris-Saclay 9001

Thèmes – Informatique – Instrumentation – Physique Appliquée

Résumé – *Le développement d'outils permettant d'effectuer des activités pratiques à distance ouvre le champ à des stratégies pédagogiques d'hybridation des formations technologiques favorisant la réussite des étudiants. Pour répondre à ce besoin d'hybridation, nous avons créé à l'IUT d'Orsay une plateforme technologique, le Cartable Distant, dédiée aux enseignements pratiques à distance en Physique Appliquée. Les architectures physiques et logicielles de cette plateforme ont été conçues pour pouvoir accéder facilement au matériel des travaux pratiques ainsi qu'aux ressources et services numériques accompagnant les activités pratiques. Pour rendre les activités distantes le plus proche possible de celles effectuées en présentiel, nous avons développé la télé-opération d'actions techniques, comme par exemple le télé-câblage de circuits électroniques présenté dans cet article. Un retour visuel sur les manipulations est assuré par un jeu de webcams. La plateforme offre de nombreux cas d'utilisation, listés dans cet article, et s'avère être un puissant complément aux activités présentiels. Elle peut également constituer un outil facilitant les collaborations entre équipes d'enseignement et/ou de recherche.*

Mots-Clés – travaux pratiques distants, télé-opération

1 Introduction

Durant la pandémie du COVID, l'essor de l'enseignement à distance s'est fortement accéléré dans le milieu universitaire, poussé par la nécessité d'assurer une continuité pédagogique, notamment lors des périodes de confinement. Les stratégies mises en œuvre par les établissements, ont consisté principalement à recycler des technologies informatiques issues des domaines industriels ou de la recherche, en les adaptant au contexte local.

Concernant les enseignements à caractère expérimental, de multiples outils ont émergés : TP simulés, TP numérisés, TP déportés ou TP distant [1][2]. Avec le retour de l'enseignement en présentiel, ces outils s'ancrent dans de nouveaux usages pédagogiques, qualifiés d'hybrides, mixant enseignements à distance et en présentiel. Pour répondre à ce besoin d'hybridation des formations technologiques, le département de Mesures Physiques de l'IUT d'Orsay a mis au point une plateforme (Cartable Distant) dédiée à l'enseignement des travaux pratiques à distance.

Dans les paragraphes qui suivent, nous détaillerons les architectures matérielle et logicielle du Cartable Distant (Sec. 2), montreront sur un exemple de TP Distant comment répondre à une problématique de télé-opération (Sec. 3) et expliciteront les cas d'usage de la plateforme (Sec. 4). Nous finirons par conclure et énoncer quelques perspectives (Sec. 5).

2 Plateforme Cartable Distant

2.1 Architecture matérielle

L'architecture matérielle est construite autour d'un réseau Ethernet local dédié (Fig.1).

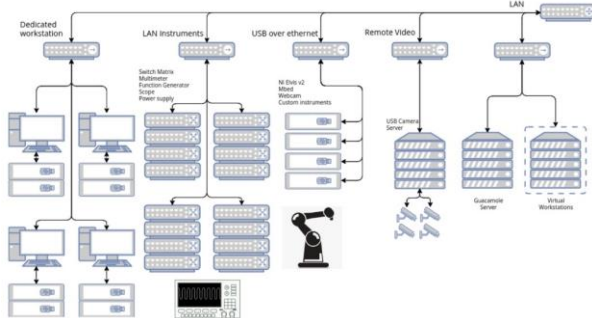


Figure 1 – Architecture matérielle du cartable distant.

Le cœur de ce réseau est constitué de 34 stations de travail, 18 machines physiques et 16 machines virtuelles accessibles à distance. Les équipements de TP (oscilloscopes, générateurs de fonctions, multimètres, alimentations...) sont connectés au réseau local soit via une liaison Ethernet (LXI), soit via une liaison USB à travers un switch USB/Ethernet.

De façon à pouvoir visualiser les TP, les utilisateurs accèdent à un serveur vidéo pouvant gérer une cinquantaine de webcams. Ce retour visuel est très important pour que l'utilisateur prenne bien conscience qu'il s'agit de TP réels et non simulés.

2.2 Architecture logicielle

L'architecture logicielle de la plateforme (Fig. 2) doit permettre aux utilisateurs d'accéder le plus simplement possible aux ressources physiques ainsi qu'aux services numériques qui accompagnent les activités pratiques.

L'accès aux ressources physiques est rendu possible grâce à un serveur Apache/Guacamole qui permet aux utilisateurs de se connecter à l'une des 34 stations de travail en utilisant leur compte universitaire. Notons que les utilisateurs y retrouvent le même environnement de travail qu'à l'IUT. Le serveur Guacamole offre aussi une fonctionnalité de partage de session qui permet à plusieurs utilisateurs de travailler dans la même session. Cette fonctionnalité facilite le travail en groupe (par ex. en binôme) et rend aussi possible l'intervention de l'enseignant pour aider les étudiants à distance.

Les services numériques sont intégrés à un serveur Moodle. On y retrouve notamment une classe virtuelle (BigBlueButton) dont l'utilisation combinée à Guacamole permet de reconstituer virtuellement un environnement de travail assez proche de la salle de TP.

Pour guider les utilisateurs dans l'utilisation de la plateforme, nous avons rassemblé l'ensemble des informations utiles dans un Wiki [3].



Figure 2 – Architecture logicielle du cartable distant.

3 Exemple de TP Distant en électronique

Pour réaliser une activité pratique, il est nécessaire d'interagir avec le matériel. Par exemple, si l'on souhaite mettre au point un montage électronique, il faut réaliser un circuit en câblant des composants entre eux. Pour effectuer ces opérations de télé-câblage, nous avons conçu une matrice de 512 relais structurée en 16 lignes et 32 colonnes, contrôlable par liaison Ethernet ou USB (Fig. 3).

Comme illustré sur l'interface logicielle du TP (Fig. 4), les composants électroniques (résistances, condensateurs, diodes, AOP) sont connectés aux colonnes de la matrice et les instruments aux lignes de sorte que l'activation à

distance d'un jeu de relais permet la réalisation d'un montage électronique instrumenté. L'interface un mode de câblage manuel où tous les relais peuvent être activés par l'utilisateur et un mode de câblage automatique permettant de télécharger un montage prédéfini.

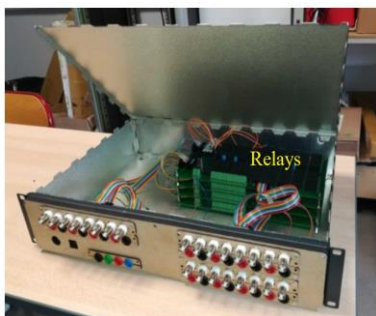


Figure 3 – Matrice de relais pour les TP d'électronique.

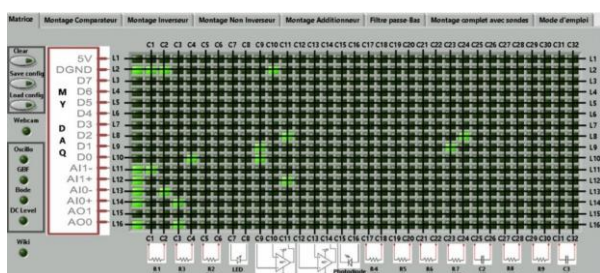


Figure 4 – Interface logicielle d'un TP d'électronique. Exemple de télé-câblage d'un montage.

La prise de contrôle des instruments pour générer des signaux et réaliser des mesures s'effectue en se connectant au serveur de face-avant intégré aux instruments. Notons que ces faces-avant virtuelles reproduisent de façon souvent très réaliste les vraies faces-avant des instruments (Fig. 5.).



Figure 5 – Face-avant virtuelle (gauche) et réelle (droite) d'un oscilloscope.

De façon plus générale, d'autres types de téléopérations peuvent être nécessaires pour que l'activité pratique distante conserve une valeur ajoutée sur le plan pédagogique (comparativement aux autres approches mentionnées en introduction). Le Cartable Distant propose par exemple des solutions pour télé-déplacer des objets en utilisant des axes ou des bras articulés motorisés. Enfin, la télé-opération est aussi une façon d'assurer la sécurité du matériel en interdisant les manipulations risquant de dégrader le matériel.

4 Cas d'utilisation du Cartable Distant

La plateforme a été conçue pour permettre une multitude de cas d'utilisation. La table 1 en donne une liste non-exhaustive répondant à des besoins pédagogiques très diverses.

	Formateur	Apprenant
Accéder à ses documents de travail	✓	✓
Utiliser de logiciels métier (sans avoir à les installer sur sa machine)	✓	✓
Refaire un TP ou une partie d'un TP	✓	✓
Faire un TP malgré un handicap	✓	✓
Réviser pour les partiels de TP		✓
Faire des expériences en cours magistral ou en travaux dirigés	✓	
Former les nouveaux collègues ou les industriels	✓	
Partager les ressources (ex. collab. Internationales, réseau IUT...)	✓	

Table 1 – Cas d'utilisation du cartable distant

Depuis que la plateforme est pleinement opérationnelle (début 2022), nous avons recensé (via les logs du serveur Guacamole) une vingtaine de connexions quotidiennes et une durée moyenne de 30 minutes par connexion. La plupart de ces connexions ont lieu durant la nuit ou le week-end, ce qui confirme la complémentarité de la plateforme avec l'enseignement en présentiel.

Les enquêtes auprès des étudiants du BUT Mesures Physiques indiquent une utilisation de la plateforme dans un large éventail de matières : électronique, acoustique, mécanique, matériaux, informatique, DAO...

5 Conclusions et perspectives

Le Cartable Distant est aujourd'hui un outil pleinement intégré au cursus des étudiants et formateurs du BUT Mesures Physiques. Une dissémination de la plateforme à l'échelle de l'Université Paris-Saclay est envisagée via la mise en place de formations à destination de tous les enseignants de l'Université. Le concept de cartable distant peut être aussi transposé à des plateformes de laboratoires de recherche pour faciliter le transfert de connaissances.

Parallèlement, des développements techniques sont prévus pour mieux superviser l'allocation des ressources matérielles ainsi que les activités pédagogiques distantes.

6 Remerciements

Nous remercions pour leur soutien financier : l'IUT d'Orsay, l'Ecole Universitaire Paris-Saclay via le projet « Hycare » (20-NCU-0014), et le réseau Polytech via le projet AVOSTTI.

Ce travail doit aussi beaucoup au soutien de nos collègues du service informatique de l'IUT, Benoît Tonnerre et Olivier Guillemot.

Références

- [1] <https://www.ripostecreativepedagogique.xyz/?TPHybrides>
- [2] Vincke, B., Darracq, B., Rodriguez, S., Reynaud, R., Tonnerre, B. : Cartable Distant : Un environnement numérique complet pour l'enseignement pratique à distance. In : La Revue 3EI, no. 100, pp. 1-6 (2020)
- [3] <https://webapps.iut-orsay.fr/cartable-distant>

Plate-forme nano-robotique radar à 60 GHz

Nawal Alsaleh^{1,2}

nawal.alsaleh.etu@univ-lille.fr

Denis Pomorski²

denis.pomorski@univ-lille.fr

Mohamed Sebbache¹

mohamed.sebbache@univ-lille.fr

Clément Lenoir¹

clement.lenoir.etu@univ-lille.fr

Kamel Haddadi¹

kamel.haddadi@univ-lille.fr

¹ IUT de Lille, Université de Lille

CRIStAL – Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille, UMR CNRS 9189

² IUT de Lille, Université de Lille

IEMN – Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, UMR CNRS 8520

Thèmes – Robotique –Électronique

Résumé – *Ce travail, à l'interface entre les domaines de la robotique et de l'électronique haute fréquence, adresse le développement d'outils de caractérisation hyperfréquence pour le contrôle non destructif (CND) à haute précision. Les outils de caractérisation électromagnétique basés sur des rayonnements non ionisants et faible puissance permettent des mesures sans contact et à très haute sensibilité électrique. Ce type de caractérisation engendre néanmoins des imprécisions de mesure liées à la difficulté de contrôler précisément la distance entre le capteur hyperfréquence et le matériau sous test. Une approche originale basée sur l'association d'un système de nano-positionnement piézo-électrique automatisé dans l'environnement LabVIEW® et de capteurs hyperfréquences est proposée afin d'offrir des solutions de CND hyperfréquences à haute traçabilité.*

Mots-Clés – Contrôle non destructif (CND), Nano-robotique, Hyperfréquences, Caractérisation électromagnétique.

1 Introduction

Les techniques de caractérisation hyperfréquence ont été largement décrites dans la littérature [1]-[2]. En particulier, les solutions radar en régime millimétrique (30 GHz – 300 GHz) offrent des mesures sans contact pour la mesure des propriétés diélectriques du matériau sous test. Néanmoins, ces méthodes engendrent des imprécisions de mesure liées notamment à la difficulté de contrôler précisément les positions respectives de l'antenne et du matériau sous test.

La solution proposée dans ce travail repose sur le développement d'une plate-forme de nano-positionnement nano-robotisée et automatisée sous LabVIEW® permettant de déplacer le matériau sous test dans l'espace XYZ sur des courses centimétriques avec une résolution de déplacement nanométrique. Le radar hyperfréquence opérant autour de 60 GHz est conçue et réalisée en technologie guide d'onde métallique WR15 insensible aux variations de l'environnement couramment rencontrées en technologie planaire.

2 Plate-forme radar

La plateforme de test se compose de deux éléments principaux, une platine de balayage de l'échantillon sous test et une instrumentation micro-onde dédiée. La platine de balayage de l'échantillon est composée de trois actionneurs linéaires piézoélectriques commercialisées par Smaract® GmbH avec des plages de balayage de 16 mm dans les directions X et Y et de 21 mm dans la direction Z. Les positions XYZ sont contrôlées en boucle fermée avec une résolution nanométrique et une répétabilité de $\pm 30\text{nm}$.

Le radar hyperfréquence repose sur le développement d'un démodulateur IQ en technologie six-port opérant autour de 60 GHz (Figure 1) [3]. Ce système permet de mesurer le rapport complexe entre deux ondes sinusoïdales A (référence) et B (test). Le signal hyperfréquence de référence A alimente le réseau six ports par le port 1 (signal A). Le signal B (à déterminer) est appliqué au port 2 (signal B) [Fig. 1(a)]. Les quatre voies restantes sont connectées à des détecteurs de puissance [Fig. 1(b)]. Le circuit six-ports (SP) comprend un diviseur de puissance, trois coupleurs hybrides 3dB/90° et quatre détecteurs de puissance dont la sensibilité vidéo typique est de $\gamma = 500 \text{ mV/mW}$. Ces blocs de circuits fonctionnant dans la bande de fréquences 55-75 GHz peuvent être facilement connectés les uns aux autres. Supposons que les deux signaux d'entrée d'amplitude respectives A et B présentent un déphasage $\Delta\phi$, les relations suivantes décrivent les tensions détectées sur les ports de sortie [3] :

$$V_1 = \frac{\gamma}{4} [A^2 + B^2 - 2AB \cos(\Delta\phi)] \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{\gamma}{4} [A^2 + B^2 + 2AB \cos(\Delta\phi)] \quad (2)$$

$$V_3 = \frac{\gamma}{4} [A^2 + B^2 - 2AB \sin(\Delta\phi)] \quad (3)$$

$$V_4 = \frac{\gamma}{4} [A^2 + B^2 + 2AB \sin(\Delta\phi)] \quad (4)$$

Ainsi, la mesure des tensions détectées permet de retrouver le déphasage entre les signaux d'entrée par la relation suivante :

$$\Delta\phi = \text{atan} \left(\frac{V_4 - V_3}{V_2 - V_1} \right) \quad (5)$$

Signalons également que la mesure des quatre tensions V_i ($i = 1, \dots, 4$) permet également de déterminer le module du rapport complexe entre les deux signaux [1].

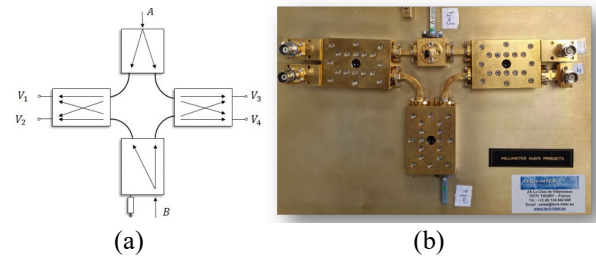


Figure 1 – Démodulateur IQ six-port en technologie guide d'onde WR15.

Le radar hyperfréquence est conçue à l'aide du démodulateur IQ associé à une source hyperfréquence monochromatique, un coupleur hybride, un circulateur et une antenne cornet (Figure 2).

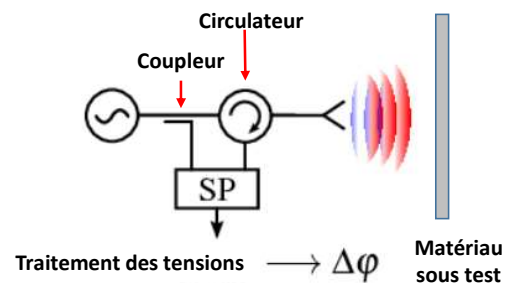


Figure 2 – Principe du radar à ondes continue basée sur un démodulateur six-ports (SP).

Dans cette configuration de mesure, une partie du signal hyperfréquence est prélevée par le coupleur pour alimenter la voie de référence du démodulateur IQ. L'autre partie du signal est transmise à l'antenne au travers d'un circulateur. Le signal réfléchi par la cible alimente la deuxième voie du démodulateur IQ au travers du

circulateur. Ainsi, le circulateur est un dispositif de séparation des signaux émis et réfléchi. La plate-forme est illustrée en Figure 3.

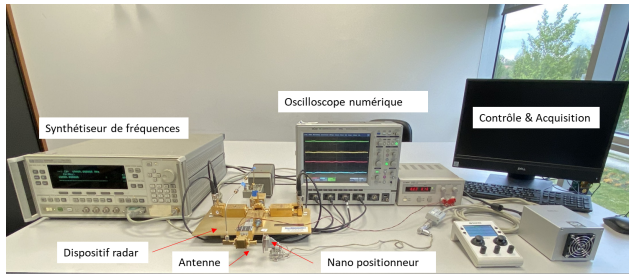


Figure 3 – Plate-forme nano-robotique pour la caractérisation électromagnétique en espace libre à 60 GHz.

Le dispositif est complété par un oscilloscope numérique également automatisé dans l'environnement LabVIEW® afin de recueillir les tensions détectées en fonction de la position XYZ de l'échantillon sous test.

3 Mesures expérimentales

Une campagne exhaustive considérant une multitude de scénarios de mesure a été mise en œuvre. A titre d'illustration, nous nous focalisons sur un scénario. La cible est une plaque métallique (réflexion totale) positionnée initialement à une distance de 5 mm de l'ouverture de l'antenne. La plaque métallique est montée sur le nano-positionneur pour être déplacée de la position absolue -5 mm à -6 mm avec un pas de déplacement fixée à 500 nm. L'environnement de travail s'affranchit volontairement de système anti-vibration afin de se placer dans des conditions réelles d'opération. Afin de limiter les incertitudes de mesure, une série de tensions sont acquises pour chaque position afin d'évaluer les valeurs minimale, maximale et moyenne. La Figure 4 représente les données mesurées ainsi que la phase extraite des tensions mesurées.

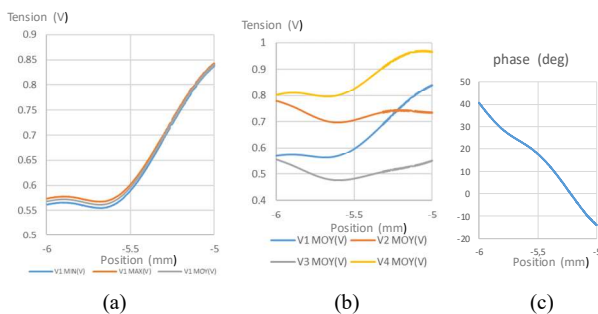


Figure 4 – (a) tension V_1 détectée en fonction de la distance entre l'ouverture de l'antenne et une cible métallique planaire. (b) Tensions V_1 à V_4 . (c) Phase du signal reconstituée à partir des tensions. La distance est exprimée en mm et la fréquence de travail est fixée à 60 GHz.

Ces mesures démontrent la pertinence de la solution

proposée avec une phase extraite qui est fonction de la distance à la cible. Signalons que la phase n'évolue pas de manière quasi-linéaire en raison des réflexions multiples en espace libre (entre l'antenne et la cible). Une modélisation en espace libre (non discutée ici) permet de s'affranchir de ces effets.

Finalement, nous donnons en Figure 5 un 'zoom' de la phase détectée sur une plage de distance de 10 microns.

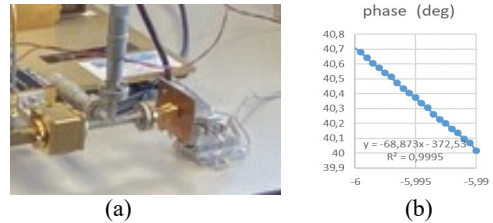


Figure 5 – (a) Interaction antenne cornet – plaque métallique. (b) Phase en fonction de la distance sur une plage de 10 microns.

Une évolution quasi-linéaire est observée, les réflexions multiples étant atténuées en s'éloignant de l'antenne. L'interpolation au premier ordre démontre une sensibilité de mesure de 68,87 deg/mm avec une excellente résolution de phase. En effet, les déplacements de 500 nm sont facilement détectables.

4 Conclusions

La combinaison des o hyperfréquence a permis de lever les limitations des technique radar hyperfréquence champ-proche en régime millimétrique. La technique proposée s'avère une solution viable pour adresser des problématiques de caractérisation aux petites échelles en milieu industriel et sévère pour lesquelles les systèmes conventionnels (optique) sont exclus.

Remerciements

Le projet LINKED (Linking Sensing & Driving - n° 214754, AAP DSR 2018-2020) est financé par la Délégation à la Sécurité routière (DSR).

Références

- [1] A. Koelpin, et al., "Six-Port technology for precise geometrical measurement applications - An overview," 2013 European Radar Conference, 275-278, 2013.
- [2] K. Haddadi, et al. "Status of six-port technology for wireless sensing applications," 2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). IEEE, 2018. p. 269-271.
- [3] K. Haddadi, et al. "Formulation for complete and accurate calibration of six-port reflectometer." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 60.3 (2012): 574-581.

Plate-forme médicale intégrée à un simulateur immersif de conduite

Kamel Haddadi¹

kamel.haddadi@univ-lille.fr

Mohamed Sebbache¹

mohamed.sebbache@univ-lille.fr

Stéphane Caro²

stephane.caro@univ-eiffel.fr

Ludovic Desplanque¹

ludovic.desplanque@univ-lille.fr

David Glay¹

david.glay@univ-lille.fr

Christophe Loyez¹

christophe.loyez@univ-lille.fr

¹ IUT de Lille, Université de Lille

IEMN - Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie, UMR CNRS 8520

²Université Gustave Eiffel

PICS-L - Laboratoire sur la Perception, les Interactions, les Comportements et la Simulation des usagers de la route

Thèmes – *Électronique, Informatique*

Résumé – *L'objectif de ce projet réside dans la mise en œuvre de solutions matérielles et logicielles pour l'établissement d'une base de données entre (i) les signaux physiologiques de conducteurs de véhicules, (ii) les données de conduite et (iii) des scénarios test de conduite préalablement établis. En particulier, ce travail repose sur le développement d'une plate-forme de capteurs médicaux afin d'extraire les valeurs extra-physiologiques en fonction du temps. Cette plate-forme est intégrée à un simulateur de conduite pour pouvoir évaluer différents scénarios avec plusieurs conducteurs test.*

Mots-Clés – *Conduite automobile, Simulateur de conduite, Plate-forme de capteurs médicaux.*

Introduction

En 2018, selon les résultats définitifs de l'ONISR, 3 488 personnes ont perdu la vie sur les routes de France. Selon la même source, la vitesse excessive ou inadaptée demeure la cause première de la mortalité sur les routes de France [1]. Elle intervient dans un accident mortel sur trois. Le deuxième facteur est le manque de vigilance. En effet, la complexité de la conduite demande au conducteur un niveau optimal de vigilance. Pour progresser dans la lutte contre l'accidentalité et atteindre les objectifs gouvernementaux, la recherche en sécurité routière est un élément essentiel. L'enjeu est de comprendre les mécanismes complexes des accidents notamment ceux liés à l'état du conducteur.

Le travail proposé intègre une série de capteurs afin d'analyser l'état et le comportement du conducteur. Bien que des systèmes de surveillance aient été introduits par certains constructeurs automobiles, notre objectif se veut plus ambitieux en proposant une cartographie complète de l'état extra-physiologique du conducteur en temps-réel et dans son environnement de conduite. Ces données associées au comportement du conducteur constituent une source d'informations précieuse pour entrevoir de manière réaliste et optimale les décisions à adopter en conséquence.

Conception de la plate-forme médicale

La première étape de ce travail vise à étudier les différents systèmes existants et les évaluer en fonction d'un facteur de mérite défini en fonction des besoins :

- Les signaux extra-physiologiques : La fréquence respiratoire, la fréquence cardiaque et la température corporelle demeurent les grandeurs d'intérêt pour nous renseigner sur l'état de vigilance du conducteur.
- L'encombrement : Le volume et le poids des capteurs doivent être compatibles avec l'application visée.
- Le caractère invasif : La solution ne doit pas perturber pas le comportement ou entraver les mouvements du conducteur. Le caractère invasif évalue donc la gêne que peut apporter chaque capteur, tant par son encombrement que par sa localisation sur le patient.
- La disponibilité : Chaque capteur doit être accessible sur le marché et remplaçable facilement en cas de panne.
- L'interfaçage : Le système doit permettre la récupération et de la synchronisation des données mesurées.
- La synchronisation temporelle : Le système doit être capable de réaliser une mesure synchronisée avec les données issues du simulateur de conduite, idéalement de la transmettre en temps réel. Ce paramètre est crucial dans la conception d'un système performant. S'il existe un décalage de synchronisation temporelle notable entre la mesure et la transmission, l'écart entre les données physiologiques et les données de conduite pourrait conduire à des erreurs d'interprétation. Il est aussi important que la fréquence d'échantillonnage soit suffisamment élevée pour représenter fidèlement les

évolutions des signaux extra-physiologiques.

Sur les bases de ces critères, nous avons retenu la plate-forme e-Health Sensor Shield V1, commercialisée par Libelium® [2] (Figure 1).

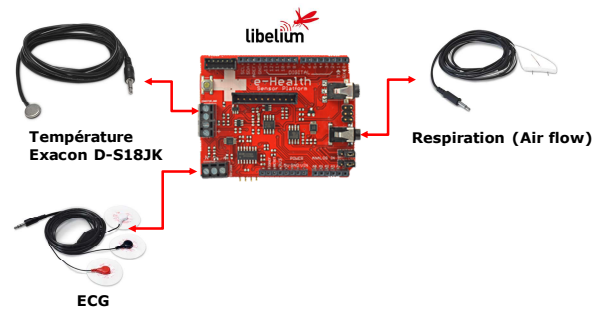
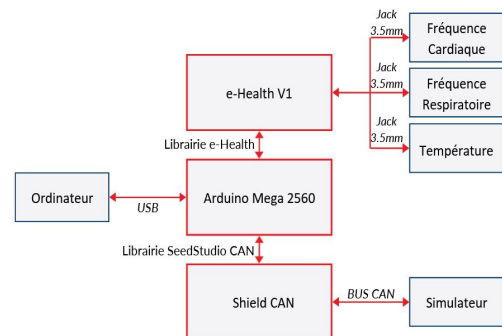
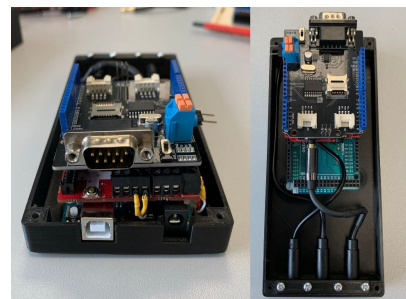


Figure 1 – Plate-forme de capteurs extra-physiologiques développée par Libelium®. La plate-forme de compose d'un 'shield' pour le conditionnement des signaux analogiques issus des capteurs et l'interfaçage sur un microcontrôleur de type Arduino® pour la conversion analogique / numérique et le traitement des données.

Le conditionnement des signaux analogiques comprend principalement des fonctions d'élimination de niveaux continus, de filtrage et d'amplification. Néanmoins, cette solution requière des développements matériels et logiciels afin de la rendre compatible avec l'application visée. La plate-forme a été modifiée afin de répondre au cahier des charges préalablement établie (Figure 2).



(a) Schéma de principe de la plate-forme proposée.



(b) Photographie de la plate-forme.

Figure 2 – Développement d'une plate-forme médicale pour interfaçage avec un simulateur de conduite.

La plate-forme pèse environ 150 grammes et mesure

170 mm de longueur, 80 mm de largeur et 52 mm de hauteur. Le packaging a été conçu dans l'environnement SolidWorks® et réalisé par impression 3D afin d'être intégré au simulateur de conduite. Le 'Shield' bus CAN de Sseed Studio® est un module basé sur le contrôleur CAN MCP2515 et l'émetteur-récepteur MCP2551. Ce module de carte peut être simplement connecté à un module Arduino afin de communiquer via le bus CAN ou OBD-II. Le port de type DB9 permet la connexion sur un bus CAN suivant la norme automobile OBD-II (12 volts). Le port USB type B femelle sert d'alimentation 5V et d'accès pour une surveillance des trames envoyées sur le bus CAN. Le port DC permet une alimentation 7V via une alimentation 230V/7V. Un interrupteur permet de commuter entre une alimentation 12V du bus CAN en OBD-II et une alimentation 5V pour le bornier de communication BUS-CAN. Des ports jack 3.5mm permettent les connexions aux capteurs.

Intégration et Tests

Un simulateur immersif de déplacement développé par le laboratoire PICS-L est considéré dans cette étude (Figure 3). Le simulateur de conduite à plateforme mobile (également appelé simulateur lacet) a été mis en service en 2009. Il dispose de deux degrés de liberté. Le premier degré de liberté est un mouvement de translation longitudinale qui permet de restituer une partie des accélérations liées à l'accélération du véhicule et à son freinage. Le second degré de liberté est un mouvement de rotation en lacet. Il vise à fournir les informations sensorielles utiles au contrôle directionnel du véhicule, typiquement pour la prise de virage. Le dispositif d'affichage se compose de trois écrans 4K (haute résolution) de 55 pouces embarqués sur la plateforme et offre un champ de vision de 180°. Avec une résolution spatiale d'environ 1 minute d'arc par pixel, il se rapproche des capacités de discrimination de l'œil humain. Cette finesse permet d'afficher correctement les petits objets et les objets lointains. Le simulateur permet de simuler le déplacement en environnement urbain, routier et autoroutier avec des interactions avec les autres usagers de la route (piétons, cyclistes et automobilistes) et de contrôler les événements par scénario. Les tests préliminaires d'une durée de 5 minutes ont été configurés avec une fréquence d'échantillonnage de 40 Hz (variable jusqu'au kHz) pour fournir 11875 données par capteur (Figure 4). Une analyse fine des données a permis de valider la solution proposée.

Conclusion

Une plate-forme de mesure de signes vitaux a été développée pour l'intégration au simulateur de conduite du laboratoire PICS-L. Ces deux systèmes combinés doivent permettre de répondre prochainement au besoin

de données extra-physiologiques et de conduite afin de les confronter dans des scénarios de conduite établis. De plus, une SAE a été mise en œuvre au sein du département GEII dans le cadre du parcours Electronique et Systèmes embarqués du BUT2 afin de développer une solution complète matérielle et logicielle.



Figure 3 – Tests de la plate-forme médicale intégrée au simulateur de véhicule.

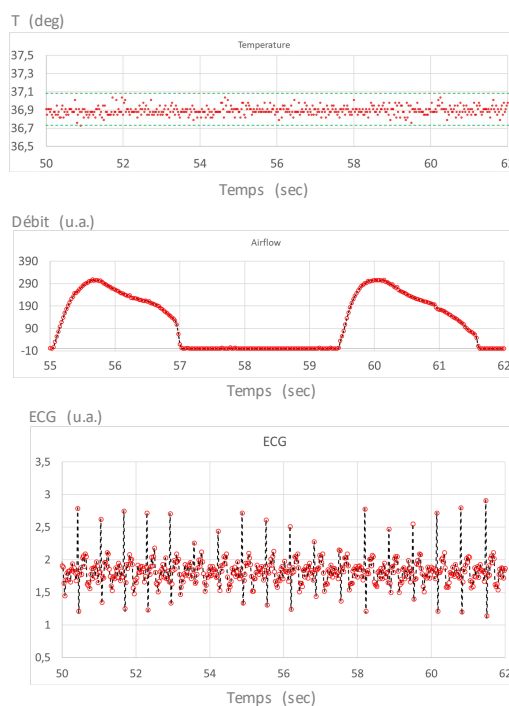


Figure 4 – Mesures issues des capteurs de température, respiratoire (Airflow) et cardiaque (ECG).

Remerciements

Le projet LINKED (Linking Sensing & Driving - n° 214754, AAP DSR 2018-2020) est financé par la Délégation à la Sécurité routière (DSR).

Références

- [1] Observatoire national Interministériel de la sécurité routière, Accidentalité routière 2018 – résultats définitifs, 2028. En ligne : <https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/>
- [2] Dior, Masrané Reoukadj, et al. "Smart Medical Devices to Help Patients and Health Workers: A Survey." 2022 IEEE 3rd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS). IEEE, 2022.

Assistance d'un robot collaboratif pour le versement du thé à la menthe

Laurence Nouaille¹ Raphaël Gougeon¹ Léa Poisson¹

Lucas Gauthier¹ Pierre Vieyres¹

laurence.nouaille@univ-orleans.fr raphael.gougeon@etu.univ-orleans.fr lea.poisson@etu.univ-orleans.fr
Lucas.gauthier@etu.univ-orleans.fr pierre.vieyres@univ-orleans.fr

¹ IUT de Bourges, Orléans Université
Laboratoire PRISME,

Thèmes – Robotique, Imagerie.

Résumé – L'article présente la démarche suivie pour robotiser une tâche de versement du thé avec la présence d'un opérateur dans l'espace de travail. Cette tâche de collaboration homme-robot demande de respecter de la précision et de la sécurité. La première étape de ce travail pour reproduire fidèlement le geste de versement a été l'analyse du geste expert en s'appuyant sur un système de caméras Vicon. Cette étude a permis de déterminer une trajectoire de référence à suivre par le bec de la théière. La deuxième phase de ce travail a consisté à robotiser cette opération de service à l'aide d'un robot collaboratif UR5 et d'un système de vision pour détecter la cible (ici la tasse). Une expérimentation respectant le geste de versement en évitant les positions de singularité dans l'espace de travail a permis de valider le concept de versement robotisé du thé suivant la tradition marocaine.

Mots-Clés – analyse de geste, espace de travail, interaction humain-robot, robotique collaborative.

1 Introduction

Les robots ont été largement adoptés dans de nombreuses industries, et maintenant, ils s'installent dans la maison. Ces robots de service sont de plus en plus avancés dans la complexité des tâches réalisées. La préparation de boissons ou de recettes alimentaires passe par l'étude du geste de l'expert. La présence de personne dans l'espace de travail du robot nécessite l'utilisation d'un système robotisé collaboratif afin de réagir à un environnement inconnu et dynamique. Des projets industriels de robots de service existent dans ce domaine : le robot KNEXT qui manipule et sert les tasses de café ou de thé, le Robotic Coffee Master de la société OrionStar [1] est un robot humanoïde qui a appris le mouvement de préparation du café sur la base de 3000 heures d'apprentissage et des outils de l'intelligence artificielle. Deux robots collaboratifs, ABB Yumi et Adam de Richetech Robotics [2], utilisent deux bras manipulateurs pour la manipulation d'objets (tasses et capsules) pour préparer des boissons sans présence d'humain dans leur espace de travail. Nous présentons ici, un système robotisé, qui à partir d'une analyse de geste expert est capable de verser un thé selon différents scénarios où l'humain et le robot peuvent collaborer dans un même espace.

2 Analyse du geste expert

2.1 Observation du versement du thé par l'expert.

La première analyse du geste de versement du thé a été réalisée par l'observation de l'opération effectuée par l'expert de la société Maison Nana1807. Elle a pour objet de déterminer les étapes associées à la préparation de la boisson. Le dispositif de préparation est constitué d'un plateau circulaire de diamètre 50 cm où sont disposés des tasses d'un diamètre de 5cm et d'une hauteur de 8.5cm. Le serveur procède à deux actions simultanées, l'une correspond à la rotation de la théière pour le versement de la boisson et l'autre à une translation verticale tout en s'éloignant de la tasse posée sur le plateau. Ce dernier mouvement typique de la préparation du thé vert à la marocaine sert à oxygéner le thé. Ce geste peut être répété à volonté par l'expert afin de s'assurer d'une oxygénation parfaite.

2.2 Analyse du versement du thé

Afin de déterminer la trajectoire précise de la théière lors de l'opération de versement, nous avons utilisé le système de capture de mouvements Vicon équipé de 8 caméras. L'expert effectue trois services dans trois tasses (Figure 2) ce qui permet d'identifier l'adaptation de son

geste par rapport à la position de chaque tasse. Pour le suivi du geste par les caméras, l'expert est équipé de 4 marqueurs disposés sur son épaule, son bras, son coude et sa main et un marqueur sur la table officiant comme référence. Nous avons considéré que le marqueur positionné sur la main caractérisait le mouvement de la théière.



Figure 2 – Positionnement des marqueurs pour le suivi du geste expert

2.3 Trajectoire de la théière

L'analyse de mouvements du professionnel montre une trajectoire du poignet et de la main en 3 dimensions (Figure 3). On observe deux phases combinées : l'une observée dans le plan transversal (x,y) correspondant à la distance entre la main et le centre de la tasse et la seconde identifiant la phase de montée z(t).

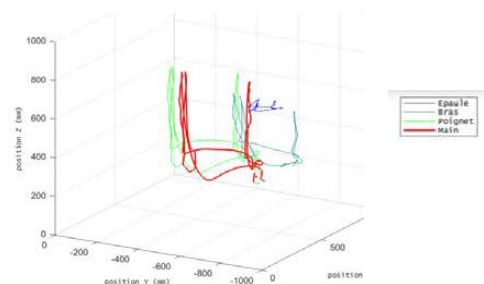


Figure 3 – Trajectoires des 4 marqueurs positionnés sur l'expert.

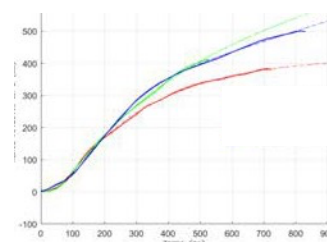


Figure 4 – Translation selon z du bec de la théière en fonction du temps.

La Figure 4 montre le déplacement suivant z de la théière pour trois versements différents. La Figure 5 donne la distance d'éloignement dans le plan (x,y) du bec verseur au centre de la tasse. On a un déplacement maximum de 55 mm dans le plan (x,y) pour un déplacement vertical de 400 mm.

Sur l'ensemble des trois gestes répétés, on observe une variation de 150mm selon $z(t)$ et une variation de 20 mm de décalage dans le plan (x,y) .

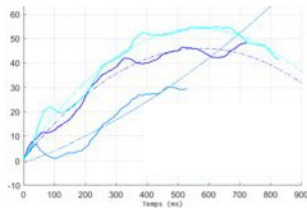


Figure 5 – Variation de la distance entre le bec de la théière et le centre de la tasse observée dans le plan (x,y) en fonction du temps.

2.4 Angle de rotation de la théière

Une autre analyse du geste nous a permis d'identifier l'angle d'inclinaison de la théière (Figure 6-a) qui correspond à l'angle entre le marqueur sur le poignet et celui sur la main dans le plan (x,z) . Il varie également pour les trois versements entre 30 et 38 degrés ce qui signifie que l'expert adapte son geste en fonction de la disposition du verre sur le plateau.

3 Robotisation du versement du thé

3.1 Dispositif robotique

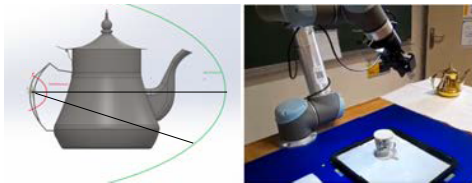


Figure 6 – a) Angle d'inclinaison de la théière et b) dispositif robotique expérimental.

Afin de réaliser le versement robotisé, nous avons utilisé un cobot UR5 [3], muni d'une caméra embarquée autorisant la visualisation de l'espace de travail et d'une pince parallèle Robotnic pour la préhension de l'anse de la théière (Figure 6 b). Ce robot collaboratif peut supporter une charge de 5 kg et a une portée de 850 mm. Nous avons utilisé une théière de masse 433g à vide et une tasse de 67 mm de diamètre et de hauteur 85 mm.

3.2 Description des étapes du geste robotisé

Les observations et analyses du geste, nous ont permis de définir un scénario pour l'assistance robotique en quatre phases. Après une étape de calibration de la caméra, la première phase consiste à la détection de la position du centre de la tasse sur le plateau. La deuxième phase correspond à la préhension de la théière disposée à un endroit prédéfini de l'espace de travail du robot. Lors de la troisième phase (Figure 7), le robot déplace la théière pour que le bec verseur soit positionné, relativement au centre du cercle de la tasse, au point zéro

de la trajectoire de versement. Pour la quatrième phase, le robot suit la trajectoire optimale identifiée lors de l'étude du geste de l'expert (Figure 4). Pour éviter le passage par des singularités, la théière a été alignée avec la base du robot et décalée sur l'axe x de 700 mm.

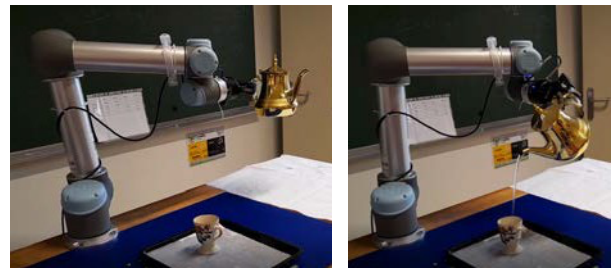


Figure 7 – Préhension (gauche) et versement du thé (droite)

Les points de passage de la trajectoire modélisée ont été implémentés en programmation directe sur le robot UR5. La courbe suivie par la théière est proche de celle générée par l'expert. La caméra identifie le centre de la tasse et le robot remplit celle-ci quelle que soit sa position initiale sur le plateau.

4 Conclusions

Après avoir analysé le geste expert à l'aide d'un système de capture de mouvements, la trajectoire caractéristique de l'extrémité de la théière a été déterminée. Celle-ci a plus être implémenté sur un robot collaboratif équipé d'une caméra visualisant l'espace de travail. Le concept de versement du thé dans la tasse a été validé, celle-ci étant posée aléatoirement sur un plateau.

Les prochaines étapes de notre étude vont porter sur la précision et la répétabilité du geste tout en prenant en compte la sécurité des personnes pouvant entrer dans l'espace de travail du robot.

5 Remerciements

Les auteurs remercient la société Maison-Nana1807 spécialiste du thé à la menthe, pour le financement de cette recherche.

Références

- [1] H. Sung, H. Jeon, 'Untact: Customer's acceptance intention toward robot barista in coffee shop', Sustainability 12, 8598, 2020.
- [2] ADAM | Robot Bartender | The Exciting Robotic Worker (www.richtechrobotics.com) 23/01/2022.
- [3] K. P. Hawkins, 'Analytic inverse kinematics for the universal robots', 2013.
- [4] J. Diab., Commande robotique hybride par téléopération et co-manipulation : Application au positionnement d'une sonde échographique en milieu contraint, thèse université d'Orléans, déc. 2021.

Synthèse de films de diamant par CVD: développement et optimisation du procédé pour des applications dans le domaine des technologies quantiques

Jocelyn Achard

Riadh Issaoui

Viannet Mille

Audrey Valentin

Jocelyn.achard@univ-paris13.fr riadh.issaoui@univ-paris13.fr viannet.mille@univ-paris13.fr
audrey.valentin@univ-paris13.fr

IUT de Saint Denis, Université Sorbonne Paris Nord
Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, UPR 3407

Thèmes – Matériaux

Résumé – *Le diamant est connu pour être l'un des matériaux présentant quasiment le plus large spectre de propriétés exceptionnelles. Sa dureté, sa transparence, sa grande conductivité thermique, son inertie chimique en font un matériau de choix dans de nombreuses applications dans le domaine de la mécanique, de l'optique et de la détection de rayonnements. Plus récemment, il a été démontré comme pouvant être l'hôte d'une grande variété de centres colorés qui présentent des propriétés optiques et de spin exceptionnelles. Parmi eux, le centre azote-lacune (NV) est de loin le plus étudié en raison de ses caractéristiques supérieures, qui promettent le développement de dispositifs quantiques très sophistiqués, notamment pour des applications de magnétométrie. Néanmoins, l'exploitation du potentiel de ces centres dépend principalement de la disponibilité de monocristaux de diamant de haute qualité et pureté qui doivent être spécialement conçus et fabriqués à cette fin. Nous présentons ici les différentes techniques permettant de produire un tel matériau et les techniques permettant son dopage et la création contrôlée de centres NV.*

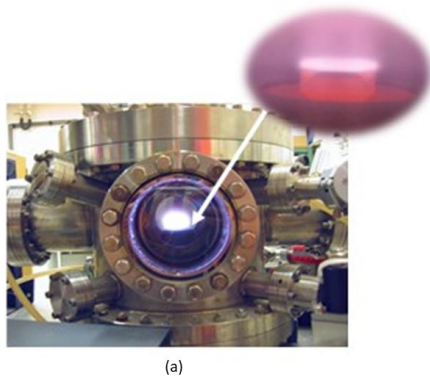
Mots-Clés – *Diamant, Dépôt Chimique en Phase Vapeur, Technologies Quantiques, Centres NV.*

1 Introduction

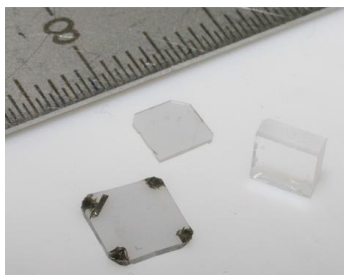
Le développement d'applications dans le domaine de la détection quantique nécessite des plateformes de matériaux à l'état solide dédiées, avec un contrôle sans précédent de la qualité, de la pureté et du dopage. En effet, les technologies quantiques (QT) nécessitent de contrôler de manière cohérente les propriétés particulières des systèmes quantiques à l'échelle nanométrique. Parmi ces plateformes potentielles, le diamant de haute qualité dans lequel un défaut spécifique formé d'un atome d'azote associé à une lacune constitue un matériau de choix [1]. Nous présentons ici les différentes étapes nécessaires à la production d'une telle plateforme.

2 La Synthèse du diamant par dépôt chimique en phase vapeur

Les procédés d'élaboration de diamant permettent maintenant de synthétiser des cristaux dont les propriétés sont proches voire supérieures à celle des meilleurs diamants naturels. L'un des plus performants et développé depuis une vingtaine d'années au LSPM est le dépôt chimique en phase vapeur, désigné par l'acronyme anglais CVD (Chemical Vapour Deposition), assisté par plasma micro-onde (Figure 1a).



(a)



(b)

Figure 1 – (a) Réacteur de croissance de diamant par dépôt chimique en phase vapeur du LSPM. (b) Cristaux de diamant synthétiques fabriqués au LSPM

Le principe général de ce procédé repose sur la mise en présence de méthane CH_4 et d'hydrogène moléculaire H_2 dans des conditions de pression bien spécifiques (quelques centaines de millibars) au-dessus d'une surface

maintenue à une température comprise entre 800 et 900°C (Insert Figure 1a). Sous l'action d'une source énergétique (un rayonnement micro-onde dans notre cas), l'hydrogène et le méthane se dissocient pour former les espèces clés conduisant à la croissance du diamant. Des diamants d'une pureté extrême ont ainsi été produits au LSPM (Figure 1c) [2].

3 Les centres colorés dans le diamant

Il peut parfois être souhaitable de créer dans l'empilement parfait d'atomes de carbone du diamant, des défauts dont la nature et la position sont bien contrôlées. Ainsi un centre coloré qui suscite un très fort intérêt en raison de ses propriétés physiques remarquables se compose d'un atome d'azote et d'un atome manquant (voir Figure 2a) communément appelé N-V pour Nitrogen-Vacancy en anglais.

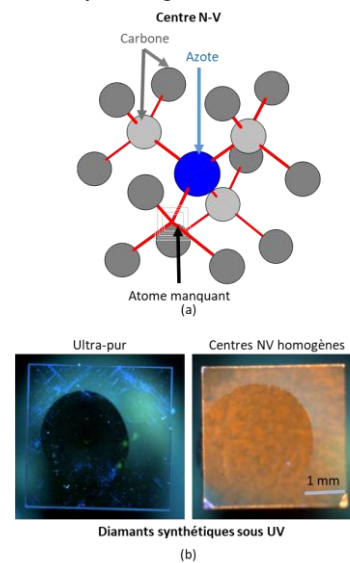


Figure 2 – (a) Centre azote-lacune (dit N-V), (b) Luminescence de diamants synthétiques sous éclairage ultra-violet montrant, ou non, la présence de centres colorés rouges.

L'intérêt vient de son émission lumineuse très intense dans le rouge (Figure 2b) qui peut dépendre de son environnement proche comme de la présence d'un champ magnétique, électrique ou d'une contrainte extérieure même extrêmement faible. Les chercheurs ont pu exploiter cette propriété pour créer des détecteurs compacts présentant une sensibilité inégalée pour des mesures à l'échelle nanométrique. Ceux-ci ouvrent des perspectives extraordinaires en médecine (biomarqueurs, IRM), en physique (imagerie magnétique), en stockage d'information (disques durs) ou encore en informatique (ordinateur quantique).

4 Les centres colorés dans le diamant

La technique de synthèse du diamant maîtrisée au LSPM est donc devenue incontournable car elle permet de

créer, à façon, un diamant qu'il serait impossible de trouver dans la nature. Ces centres peuvent en effet être générés *in situ* par ajout d'azote moléculaire (N_2) pendant la croissance ou *a posteriori* par implantation d'ions azote (N^+) dans le cristal.

4.1 Création de centres NV par implantation ionique

L'approche largement utilisée consiste à implanter localement des ions azote (N^+) ou une molécule contenant de l'azote (N_2^+ , CN^+ , etc.) dans des diamants CVD dits de "qualité électronique" (c'est-à-dire de haute pureté et non luminescents). En général, trois étapes sont nécessaires : (i) l'introduction d'impuretés, (ii) la création de lacunes (qui peuvent être co-implantées avec l'impureté ou après), (iii) le recuit pour guérir les défauts et permettre aux lacunes de diffuser afin que le défaut puisse être formé. Les ions à implanter peuvent être accélérés dans une large gamme d'énergies allant généralement de 2 keV à 20 MeV, ce qui conduit à des profondeurs d'implantation de 3 nm à environ 5 μm respectivement. Cela nécessite évidemment des installations d'implantation assez différentes, allant de petites sources de table pour les basses énergies à de grands accélérateurs pour atteindre le régime MeV. Il faut noter que l'énergie des ions n'influence pas seulement la profondeur de pénétration des ions mais aussi le rendement de création des centres NV par rapport à chaque atome N entrant dans le réseau du diamant [124]. En effet, plus l'énergie est élevée, plus le nombre de lacunes co-crées est important, ce qui conduit à des rendements plus élevés. Généralement, les valeurs vont de 0,1 % à 2 keV à environ 45 % à 18 MeV. Cependant, à des énergies d'accélération élevées, il est difficile de positionner avec précision les ions implantés dans l'espace en raison de la distribution statistique des collisions avec les atomes du réseau, qui entraîne une dispersion latérale et en profondeur appelée "straggling". Pour obtenir une précision spatiale inférieure à 5 nm par exemple, il faut que les ions soient accélérés à une énergie inférieure à 10 keV, ce qui limite la pénétration à 10 nm seulement (c'est-à-dire aux centres NV proches de la surface).

4.2 Création de centres NV par dopage in situ

Si la création ex-situ de centres NV est une approche flexible permettant notamment un positionnement précis de ces défauts, elle ne permet généralement pas d'obtenir des défauts aux propriétés aussi bonnes que celles des défauts naturels issus du dopage in-situ et ne permet pas non plus la production de films de diamant dopé de manière uniforme sur des épaisseurs de quelques centaines de micromètres. Le dopage intentionnel pendant la croissance CVD peut être réalisé en injectant dans le plasma un gaz précurseur contenant l'élément à doper. N_2 est le dopant le plus utilisé pour le dopage NV. Cette

molécule possède une énergie de liaison très forte (9,8 eV) qui nécessite des densités de puissance de plasma élevées pour la dissocier efficacement. Le dopage à l'azote dans le réseau très dense du diamant n'est pas non plus énergétiquement favorable. Ces deux problèmes conduisent à de faibles efficacités de dopage en azote d'environ 10^{-5} à 10^{-3} . Une limitation supplémentaire est que seule une petite fraction de l'azote total sera incorporée sous forme de complexe associé à une lacune, la majeure partie étant substituée à un seul atome de carbone (Ns). Un rendement typique (NV/N_{total}) pour les diamants CVD bruts non traités est de l'ordre de 1/300 ou moins. Il convient néanmoins de souligner que le rendement de création pour le dopage in situ est similaire à celui obtenu pour l'azote implanté à des énergies moyennes.

5 Conclusions

La synthèse de diamant monocristallin par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est devenue aujourd'hui une technologie mature. Des efforts considérables ont été consacrés au développement de films de diamant de haute pureté et des monocristaux de haute qualité sont fabriqués de manière reproductible avec des épaisseurs allant de quelques μm à quelques mm. Les technologies quantiques qui utilisent les centres colorés ont ainsi pu émerger grâce à ce contrôle qui a permis ainsi de mettre en avant le potentiel de ce système matériel. Il est ainsi possible d'exploiter ce potentiel dans un large éventail de domaines, notamment la santé, les communications, la sécurité et l'environnement. En particulier, il est prévu à relativement court terme la mise au point de capteurs et de dispositifs dont les performances permettront d'accéder à des mesures encore inaccessibles avec les dispositifs de mesures actuels. Enfin, l'exigence imposée en terme de maîtrise des procédés de synthèse du diamant et de sa fonctionnalisation vis-à-vis des applications quantiques a permis au LSPM de développer une startup (HiQuTe Diamond) spécialisée dans la production de films de diamant de qualité quantique, domaine dans lequel jusqu'à présent, quasiment aucun acteur industriel n'existe malgré une communauté d'utilisateurs de plus en plus étendue.

Références

- [1] J. Achard, V. Jacques, A. Tallaire, *Chemical vapour deposition diamond single crystals with nitrogen-vacancy centres: a review of material synthesis and technology for quantum sensing applications*, J. Phys. D 53, 2020, p. 313001
- [2] A. Tallaire, J. Achard, F. Silva, O. Brinza, A. Gicquel, *Growth of large size diamond single crystals by plasma assisted chemical vapour deposition: Recent achievements and remaining challenges*, Comptes Rendus Physique 14, 2013, p. 169-184.

Adjuvantation Biosourcée pour Ecomatériaux Isolants

Kawther Aguibi^{1, 2}

Kawther.aguibi@univ-artois.fr

Patrick Martin¹

Patrick.martin@univ-artois.fr

Vincent Dubois²

vincent.dubois1@univ-artois.fr

Ludovic Chaveriat¹

ludovic.chaveriat@univ-artois.fr

Eric Wirquin²

eric.wirquin@univ-artois.fr

¹ Unité Transformations & Agroressources, Université d'Artois - UniLaSalle, ULR7519, F-62408 Béthune, France

^{1,2} Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France

Thèmes : *Chimie – Génie-Civil - Environnement*

Résumé – *L'évolution du contexte réglementaire visant à réduire la consommation énergétique du secteur du bâtiment pousse les chercheurs à accroître leurs efforts de recherche et à développer des matériaux d'isolation plus respectueux de l'environnement, en s'appuyant notamment sur l'utilisation de la biomasse et en employant des alternatives aux ressources fossiles. Dans ce contexte, notre travail de recherche vise à créer une mousse isolante minérale à faible impact environnemental, possédant des propriétés multiphysiques comparables aux matériaux isolants ou à caractère isolant du domaine de la construction.*

L'objectif est d'optimiser l'élaboration d'une mousse minérale à base d'anas de lin, développée par le Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement [1], en développant un agent moussant issu d'une biomasse régionale. Cet agent moussant sera conçu au sein de l'Unité Transformations et Agroressources (UTA) site Artois dans le cadre d'une chimie écoresponsable. Un comparatif du moussage induit par deux dérivés obtenus à partir de la biomasse végétale et un adjuvant pétrosourcé ainsi que leur conception est présentée dans cet article

Mots-Clés – *Isolation, mousse isolante, agents moussants, bioressources, éco-matériaux.*

1 Introduction

La mousse de béton est un type de béton de ciment composé notamment d'un liant (ciment ou gypse), d'eau et de mousse minérale[2] qui représente une alternative intéressante au béton ordinaire. Il est de plus en plus utilisé dans les bâtiments respectueux de l'environnement, en raison de ses caractéristiques intéressantes telles que sa faible densité (400-1850 kg/m³), sa faible teneur en ciment et en agrégats, et son excellente isolation thermique[3].

La réalisation de ce type de béton nécessite l'introduction d'un agent moussant ; additif qui confère un caractère poreux à ce type de matériau, induisant des performances thermiques et acoustiques intéressantes. Cependant, la plupart des agents moussants actuellement utilisés dans l'industrie sont obtenus à partir de ressources fossiles non renouvelables.

Dans ce cadre, six agents moussants dérivés d'un monosaccharide, le D-xylose, ou de la bétaine ont été développés au laboratoire à partir de ressources issues de la Région Hauts-de-France. Leur pouvoir moussant a été comparé à celui d'un agent moussant pétrosourcé commercial le Betomouss®, pris comme référence.

2 Synthèse et caractérisation des agents moussants

Dans le cadre d'une chimie éco-compatible, les différents agents moussants synthétisés sont biosourcés. La partie hydrophile obtenue à partir de biomasse végétale est ici de la bétaine ou du xylose. La partie hydrophobe quant à elle, consiste en des chaînes carbonées de différentes longueurs (C₈, C₁₀, C₁₂, C₁₄) apportées par des alcools gras ou des amines grasses.

2.1 Synthèse des amides de bétaine

La synthèse des dérivés de bétaine est réalisée en 2 étapes. Dans un premier temps, on réalise une halogénéation de la glycine bétaine par le chlorure de thionyle puis on procède au greffage de l'amine grasse (C₈, C₁₀, C₁₂, et C₁₄) sur la bétaine chlorée (Schéma 1).

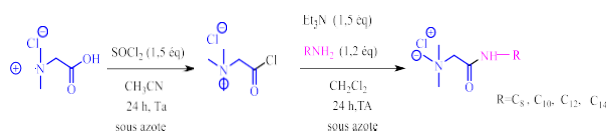


Schéma 1 - Synthèse des amides de bétaine [4]

2.2 Synthèse des alkyl-xylosides

Les alkyl-xylosides ont été obtenus en une seule étape, par réaction entre le xylose et un alcool gras dont la longueur de chaîne varie de 8 à 12 atomes de carbone.

Les alkyl-xylosides ont été obtenus en une seule étape,

par réaction entre le xylose et un alcool gras dont la longueur de chaîne varie de 8 à 12 atomes de carbone. Cette synthèse est réalisée sans solvant et en présence d'acide p-toluènesulfonique (ApTS) comme catalyseur (Schéma 2).

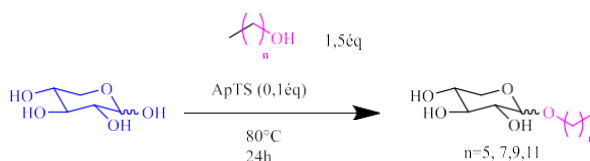


Schéma 2 - Synthèse des alkyl-xylosides [5]

Les propriétés physico-chimiques, notamment la tension de surface et la concentration micellaire critique (CMC) de l'agent moussant pétrosourcé (la référence) et des agents moussants synthétisés, ont été mesurés afin de pouvoir comparer le pouvoir moussant des molécules. Il est à mentionner que la CMC est une propriété importante indiquant l'efficacité du tensioactif en termes de la réduction de la tension de surface. En effet, quand cette concentration est atteinte, la valeur de la tension de surface ne varie plus avec l'ajout de tensioactif dans la solution. C'est à dire qu'il n'y a plus d'activité de surface au-delà de la CMC. Donc un tensioactif avec une faible CMC est préférable (une concentration minimale pour une efficacité maximale).

La CMC de quelques agents moussants sont résumés dans le tableau suivant (Table 2).

Table 2 – Tension de surface et CMC

Agent moussant	CMC (g/l)	Tension de surface (mN/m)
Betomouss®	1,45	30
Xylose C6	8,57	27
Xylose C10	0,13	25
Bétaine C10	7,27	27
Bétaine C14	0,69	26

3 Test d'agents moussants à l'échelle de la mousse

La mousse étudiée se compose de liant hydraulique (plâtre + terre), d'anas de lin, d'agent moussant (à base de bétaine ou de xylose) et d'eau. (Figure 1).

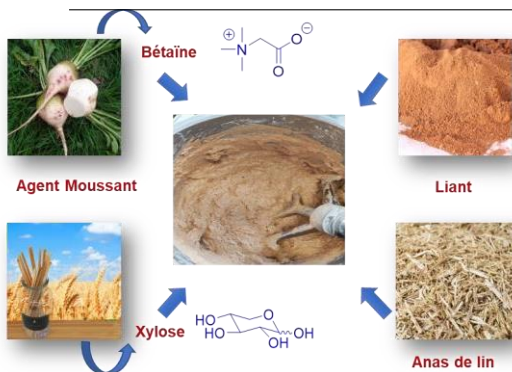


Figure 1-Formulation de la mousse minérale

L'ensemble est mélangé à l'aide d'un malaxeur de paillasse de type Perrier, selon un procédé de malaxage mis en place au laboratoire [6] (moussage direct sans pré-moussage).

Les masses volumiques à l'état frais et à l'état durci des mousses sont mesurées par remplissage d'un moule de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm.

Les valeurs de masses volumiques obtenues ont été comparées avec celles des bétons fabriqués par un agent moussant pétrosourcé (Betomouss®), afin de pouvoir évaluer le pouvoir moussant de chaque composé développé.

L'objectif est d'atteindre une valeur de masse volumique la plus faible possible, significative d'un moussage plus efficace (Table 1).

Table 1 – masse volumique des échantillons à l'état frais

Agent moussant	Densité (g/cm ³)
Betomouss®	0,59
Bétaïne C ₁₀	0,61
Bétaïne C ₁₄	1,17
Xylose C ₁₀	0,65

4 Conclusions

Ce travail présente une collaboration entre le Laboratoire Unité Transformations et Agroressources (UTA) site Artois sur les aspects développement de produits biosourcés et le Laboratoire Génie Civil et géo Environnement (LGCgE) sur les aspects formulations et mesure des propriétés rhéologiques, mécaniques et thermophysiques de la mousse développée.

Les premiers résultats montrent un caractère moussant comparable à l'agent moussant de référence.

Une étude complète des propriétés mécaniques, et

thermophysiques du matériau développé sera effectuée. La stabilité de la mousse est un critère important ; une optimisation des différents paramètres influençant ce critère est envisageable.

Références

- [1] V. Dubois, A. Leblanc, O. Carpentier, G. Alhaik, et E. Wirquin, « Performances of flax shive-based lightweight composites with rapid hardening », *Construction and Building Materials*, vol. 165, p. 17-27, mars 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.239.
- [2] Y. Fu, X. Wang, L. Wang, et Y. Li, « Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review », *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, p. e6153602, mars 2020, doi: 10.1155/2020/6153602.
- [3] Y. H. M. Amran, N. Farzadnia, et A. A. Abang Ali, « Properties and applications of foamed concrete; a review », *Construction and Building Materials*, vol. 101, p.990-1005, déc. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.
- [4] Z. F. Nsimba, M. Paquot, L. G. Mvumbi, et M. Deleu, « Les dérivés tensioactifs de la glycine bétaïne : méthodes de synthèse et potentialités d'utilisation », *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 2010.
- [5] M. Robineau *et al.*, « Synthetic Mono-Rhamnolipids Display Direct Antifungal Effects and Trigger an Innate Immune Response in Tomato against Botrytis Cinerea », *Molecules*, vol. 25, n° 14, p. 3108, 2020, doi: 10.3390/molecules25143108.
- [6] B. Mazian, E. Wirquin, K. Aguib, P. Martin, L. Chaveriat, et V. Dubois, « Effect of mixing conditions on the density, morphology, thermal and mechanical properties of mineral foam », *Journal of Building Engineering*, vol. 52, p. 104410, juill. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104410.

Etude et développement d'une résine biosourcée à base de colophane de pin maritime (*Pinus Pinaster*)

Quentin Gouty¹
quentin.gouty@univ-pau.fr

Léo Leroyer¹
leo.leroyer@univ-pau.fr

Bertrand Charrier^{1, 2}
bertrand.charrier@univ-pau.fr

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS
Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux
(IPREM-UMR 5254), 403 rue de Saint Pierre, 40000 Mont de Marsan, France

² IUT, Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS
Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux
(IPREM-UMR 5254), 403 rue de Saint Pierre, 40000 Mont de Marsan, France

Thèmes – Chimie – Economie – Environnement - Matériaux

Résumé – Cette communication présente le projet de recherche doctoral débuté en octobre 2022, et ses enjeux. Celui-ci est axé autour du développement d'une nouvelle génération de résines biosourcées à base de colophane de pin maritime. Ces résines doivent être utilisables pour la fabrication de vernis, de patines, ou encore de peintures. Appuyées sur les travaux antérieurs réalisés au sein du laboratoire, les recherches permettront d'étudier les paramètres qui influent sur la qualité des formulations de résine (viscosité apparente, vitesse de séchage, dureté, résistances mécanique, physico-chimiques et biologiques...). L'approche scientifique de cette recherche est accompagnée par un contexte économique appuyant sa faisabilité pour un transfert technologique à l'échelle industrielle.

Mots-Clés – Biosourcé, Colophane, Résine, Réticulation

1 Introduction

Les résines sont des matériaux polymères majoritairement synthétisées avec des matières premières fossiles issues du pétrole et de ses dérivés. La demande sociétale liée à la responsabilisation des procédés de synthèse chimique et de l'utilisation des matières premières renouvelables est en forte croissance, par l'accélération du changement climatique. Elle pousse la communauté scientifique internationale à axer ses recherches de plus en plus autour d'une chimie plus verte et durable, notamment dans les résines biosourcées (cf. figure 1).

Cette implication grandissante permet de jouir d'une base solide sur laquelle se reposer pour développer des solutions scientifiques et économiques pertinentes.

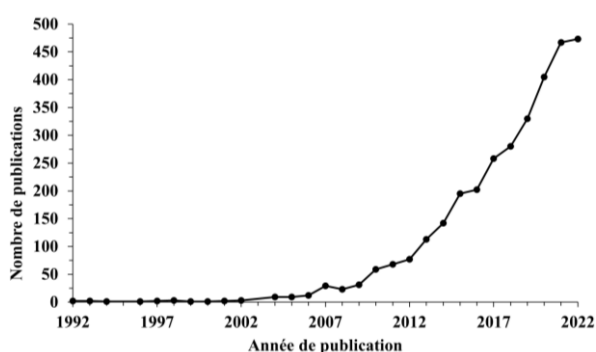


Figure 1 – Évolution du nombre de publications dont le titre contient les mots clés 'biosourced' ou 'biobased' (ainsi que leurs dérivés orthographiques 'bio-based', 'bio-sourced' etc.) et 'resin' [1].

2 Contexte du projet

Pinus pinaster, ou communément appelé pin maritime, est une espèce de pin évoluant principalement en Europe de l'Ouest, notamment en France, dont il représente 10% de la surface boisée [2,3]. De cette espèce peut être extraite l'oléorésine qui, après distillation, offre un résidu solide appelé colophane. En France, une technique non destructive d'extraction d'oléorésine était anciennement employée : le gemmage. La filière française de gemmage de pin maritime pour obtenir la colophane a progressivement disparu entre 1980 et 1990 sous la pression de la production chinoise, aujourd'hui le premier producteur de colophane de gemmage (63% de la production mondiale) [4].

La colophane de pin maritime est ciblée comme matière première principale (car anciennement utilisée par le célèbre Antonio Stradivari pour le vernissage de ses violons [5]). Ce projet s'inscrit donc dans un objectif de revalorisation de la filière française de gemmage en y intégrant des applications concrètes et pertinentes dans le cadre des résines.

3 Fonctionnement des résines

Pour qu'une résine durcisse et obtienne ses propriétés physico-chimiques et mécaniques souhaitée, celle-ci doit souvent subir une réticulation. Une résine réticulée avec réussite doit voir ses molécules former un réseau qui peut être bi ou tridimensionnel. Pour qu'un tel arrangement survienne, il est nécessaire de lier chimiquement des polymères entre eux, ou de faire réagir des molécules présentant au moins 3 fonctions chimiques chacune. La réaction peut nécessiter de la chaleur, des UV, de l'air ou simplement du temps. Il est généralement convenu d'utiliser un catalyseur pour accélérer la réaction.

Les résines peuvent être distinguées selon le mode de séchage (chaleur, UV, air...), mais aussi selon la nature de la liaison chimique impliquée lors de la réticulation. Les propriétés physico-chimiques et mécaniques du matériau varient selon ces caractères, et ainsi doivent être pris en compte en fonction l'application qui lui est destinée (décoration, revêtements de protection, composite structurel...).

4 Défis technologiques

La colophane est une matière solide et cassante, ramollissant autour de 50°C. Elle est composée à 90% d'acides diterpéniques (AD), isomères de l'acide abiétique (cf. figure 2, [6]).

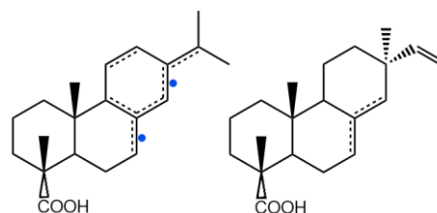


Figure 2 – Isomères de l'acide abiétique présents dans la colophane. Toute molécule comporte 2 double liaisons uniquement, dont la position varie d'un isomère à l'autre. L'acide abiétique dispose de ses doubles liaisons aux positionnements indiqué par les points bleus.

Premièrement, l'état physique solide de cette matière impose d'utiliser un autre constituant dans lequel la colophane doit se solubiliser. Celui-ci doit être préférentiellement biosourcé et non toxique. Les huiles siccatives semblent être de bons candidats. En effet, les luthiers utilisent une recette à base de colophane et d'huile de lin pour confectionner leur vernis pour violons [5]. Ce genre de système est intéressant puisque le solvant que représente l'huile réagit également lors de la réticulation pour former la résine. Cependant, les phénomènes de réticulation par voie siccative présentent des limites. En effet, une huile est dite siccative si elle sèche, se rigidifie spontanément à l'air par l'intermédiaire

de réactions radicalaires entre l'oxygène de l'air et les doubles liaisons carbonées de ses molécules. Ce séchage a tendance à se passer principalement en surface. De ce fait, une couche solide se forme en surface, et l'intérieur qui n'est pas en contact avec l'air reste liquide. Différents essais ont été réalisés, dont les résultats confirment ce propos en figure 3 ci-dessous. En outre, l'ajout de catalyseurs ne peut diminuer cet effet que partiellement. De plus, ceux-ci sont à base de métaux de transition, qui ne sont pas biosourcés et présentent une certaine toxicité [7]. Enfin, l'utilisation d'huiles siccatives conduit à exploiter une réticulation par réaction entre molécules polyfonctionnelles et non par réactions entre chaînes de polymères.



Figure 3 – Photographie d'une résine à base de colophane et huile de lin, avec un catalyseur de siccativité. L'aspect craquelé de la résine apparaît lors du séchage, et trahit un séchage en surface uniquement. A l'intérieur de la résine, le mélange reste d'une viscosité qualitativement semblable.

Deuxièmement, d'après la structure moléculaire des AD, une modification chimique semble nécessaire puisqu'elle ne présente qu'une fonction acide relativement encombrée, ainsi que deux doubles liaisons. Il est important que ces modifications soient les plus vertes, simples et efficaces possibles, car l'objectif est de permettre un transfert technologique viable.

Par exemple, il pourrait être intéressant d'exploiter la fonction acide en estérifiant ces molécules d'AD avec un polyol. De ce fait, plusieurs AD se voient "greffés" sur le polyol, donnant une macromolécule avec plusieurs doubles liaisons disponibles pour la réticulation. Cela devient intéressant si la réticulation par voie siccative est utilisée. Cependant, le problème du séchage en surface reste existant.

Une réaction de Diels-Alder pourrait être envisageable entre une molécule d'AD et un diacide insaturé. Cela conduirait à une molécule présentant 3 fonctions acides. La résine réticulerait avec un polyol liquide, comme le glycérol. L'inconvénient majeur de ce genre de résine est qu'il s'agit de polyesters, et certains organismes, comme les lichens, sont capables de les détériorer [8]. Ceci réduit significativement l'éventail d'utilisation possible pour ces résines.

5 Conclusions

Le développement de résines biosourcées rentre dans un cadre socio-économique de valorisation d'une filière française locale, de responsabilisation des procédés chimique et de réduction des utilisations des matières premières pétrolières.

Les défis scientifiques liés à un tel développement sont nombreux, mais le contexte scientifique et l'activité de recherche dans le domaine permet de jouir d'une base conséquente pour répondre aux problématiques actuelles.

6 Remerciements

Nous remercions le conseil départemental des Landes pour son soutien financier et le financement de ce programme de recherche.

Références

- [1] Web Of Science, Site internet de Web of Science, <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/33ca8743-5145-4ee9-b294-89c3f572a229-677e249c/relevance/1>, Date de consultation : 30/12/2022
- [2] Office National Des Forêts, Site internet de l'ONF, http://www1.onf.fr/activites_nature/sommaire/decouvrir/arbres/resineux/20071025-083844-82532/@@index.html, Date de consultation : 30/12/2022
- [3] Inventaire National du Patrimoine Naturel, Site internet de l'INPN, https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/113689, Date de consultation : 30/12/2022
- [4] Future Market Insights, Site internet de l'IMF, <https://www.futuremarketinsights.com/reports/gum-rosin-market>, Date de consultation : 30/12/2022
- [5] Rovetta, T., Invernizzi, C., Fiocco, G., Albano, M., Licchelli, M., Gulmini, M., Alf, G., Fabbri, D., Rombolà, A.G., Malagodi, M., *The case of Antonio Stradivari 1718 ex-San Lorenzo violin: History, restorations and conservation perspectives*, Journal of Archaeological Science: Reports 23, 443–450 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.11.010>
- [6] Baldwin, D., Loeblich, V., Lawrence, R., *Acidic Composition of Oleoresins and Rosins*, Ind. Eng. Chem. Chem. Eng. Data Series 1958, 3, 2, 342–346 (1958).
<https://doi.org/10.1021/i460004a036>
- [7] Juita, Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M. et al, *Low temperature oxidation of linseed oil: a review*, Fire Sci Rev 1, 3 (2012).
<https://doi.org/10.1186/2193-0414-1-3>
- [8] Francesca Cappitelli, Claudia Sorlini, *Microorganisms Attack Synthetic Polymers in Items Representing Our Cultural Heritage*, Applied and Environmental Microbiology 74 (3): 564–9 (2008).
<https://doi.org/10.1128%2FAEM.01768-07>

Suivi de la cuisson d'un composite fibres de carbone / matrice polymère à l'aide d'une méthode d'impédancemétrie spécifique.

Philippe Olivier¹

Philippe.olivier@iut-tlse3.fr

Philippe Margueres¹

philippe.margueres@iut-tlse3.fr

Huikangyue Bao¹

huikangyue.bao@univ-tlse3.fr

¹ IUT Paul Sabatier, Dépt. GMP, MFJA
Institut Clément Ader, UMR 5312

Thèmes – Matériaux - Mécanique – Impédancemétrie

Résumé – *Les matériaux composites, en particulier les polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP, carbon fibres reinforced plastic), sont de plus en plus employés dans l'industrie aéronautique en raison de leurs hautes performances. Lors de la fabrication de structures de cellules (structures aéronautiques) en matériaux composites, un protocole de surveillance de la cuisson (cycle de polymérisation réunissant des conditions de température, de pression et de vide) est essentiel pour assurer la sécurité de la production et la qualité du produit. Dans ce travail, une méthode de surveillance de la cuisson basée sur des mesures d'impédance électrique (Z) est présentée.*

Mots-Clés – Matériaux composites, santé matière, suivi de fabrication.

1 Introduction

La méthode de suivi de l'état d'un matériau composite en cours de cuisson que nous avons développée est basée non seulement sur la corrélation des propriétés rhéologiques et diélectriques de la matrice therm durcissable (comme la résine époxy) pendant la polymérisation, mais aussi sur la corrélation des propriétés géométriques et électriques des fibres de carbone pendant la cuisson. Sur la base de cette approche, un protocole fiable et reproductible utilisant la mesure de l'impédance électrique Z pour la surveillance de la polymérisation des composites therm durcissables a été élaboré [1]. Cette méthode nous permet non seulement de surveiller le degré d'avancement de la réaction α en temps réel, mais aussi de détecter les éventuels défauts lors de l'assemblage des plis (couches), du pré-compactage sous vide et du durcissement de ces plis pour former la pièce stratifiée [2]. Sur la base des signatures de référence d'impédance, les processus de durcissement des polymères therm durcissables employés comme matrices (liant des fibres dans composite) pourraient être suivis, ce qui permettrait de réaliser des économies en évitant les rebuts de pièces de grandes dimensions et coûteuses car renforcées de fibres de carbone, mais aussi d'améliorer la qualité des composites pour les structures aéronautiques. L'objectif final de nos travaux est d'assurer l'optimisation des matériaux et du cycle thermique (dit cycle de polymérisation) conduisant le matériau composite de son état initial (matrice visqueuse plus ou moins fluide) vers son état final de pièce mécanique rigide (matrice vitreuse solide).

2 Approche expérimentale

Un banc original à bas coût et portable fait maison a été développé pour mesurer les changements de l'impédance électrique Z des stratifiés matrice époxy/fibres de carbone (ou CFRP), non seulement pendant le cycle de polymérisation, mais aussi pendant les essais mécaniques de caractérisation des matériaux ou encore durant la vie en service d'une pièce. Le banc conçu (Figure 1-a) est équipé de 8 canaux dédiés aux mesures d'impédances Z et 2 canaux thermiques pour assurer des mesures de température T en temps réel. Un tissu en maille de cuivre (copper-mesh habituellement utilisé en protection foudre des structures composites aéronautiques) d'une épaisseur de 20 microns est utilisé comme électrode pour assurer le flux de courant entre la pièce composite soumise à l'essai et le banc de mesure (Figure 1-b). Ces électrodes sont insérées dans le stratifié au tout début de sa fabrication pendant le processus de pré-compression sous vide avant la cuisson (cycle de polymérisation). Selon les directions de mesure (Figure 1-b), la configuration à 2 ou 4 points peut être utilisée pour correspondre à différentes plages de

mesures d'impédance. L'analyse électrique est basée sur les changements d'impédance en termes de module $|Z|$ et d'argument θ pour mettre en évidence l'évolution résistive et capacitive du stratifié composite pendant un cycle de polymérisation. Les principaux points de transitions physicochimiques que subit une matrice therm durcissable (tel le système époxy utilisé dans cette étude) durant un cycle de polymérisation comme le minimum de viscosité, la gélification (état de gel) et la vitrification (état vitreux) de la matrice peuvent être détectés par les techniques conventionnelles de calorimétrie à balayage différentiel (DSC, mesure de flux de chaleur) et de rhéométrie à plateaux parallèles (mesure de viscosité). Avec des mesures d'impédance électrique, ces points critiques peuvent être identifiés par la zone de changement d'impédance maximale pour une fréquence à 10kHz (Figure 3).

3 Bases de modélisation

En ce qui concerne la modélisation électrique, la structure stratifiée 3D CFRP peut être décrite comme un simple réseau de percolation. Les distances de percolation et les nombres de points de contact entre les fibres de carbone conductrices peuvent être estimés par une analyse microscopique pour tenir compte des paramètres géométriques composites. La méthode Monte-Carlo a été utilisée à cet effet [3]. Cette modélisation nous permet de définir le positionnement précis des électrodes noyées entre les plis (ou couches) de la pièce stratifiée en tenant compte de différents types de conduction (surface ou masse) et de différentes directions de courant longitudinales, transversales intraplis ou à travers l'épaisseur du stratifié interplis (Figure 1-b). De plus, cette modélisation révèle la dépendance de la zone conductrice par rapport à la configuration de l'électrode. Ainsi, la résistivité électrique d'un stratifié CFRP peut être déduite de l'analyse d'impédance si les fractions volumiques de fibres ($V_f\%$) et les épaisseurs effectives de conduction et le nombre correspondant de couches de fibres impliquées sont connus.

4 Principaux résultats

Une campagne de caractérisation rhéométrique de la matrice therm durcissable M21 a été menée pour suivre les évolutions des ses modules de conservation (élastique G') et de perte (visqueux G'') en cisaillement, sa viscosité μ et le facteur d'amortissement $\tan(\delta)$ (figure 2).

Un stratifié de 8 plis unidirectionnels (épaisseur 2 mm) est équipé d'électrodes d'amenée et de sortie du courant a été polymérisé en autoclave. Les résultats en termes d'impédance et de phase pour des fréquences comprises entre 10 et 100kHz sont présentés respectivement sur la figure 3a et 3b. Comme le montre la figure 3, les

changements de phase de la matrice M21 peuvent parfaitement être détectés tant sur la mesure de l'impédance que sur celle de la phase pour peu que la fréquence du courant transitant dans le composite soit adéquate.

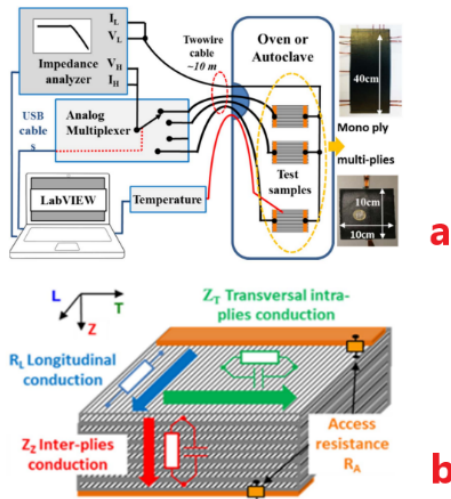


Figure 1 : a) Connexion entre le banc d'impédancemétrie et le composite à l'essai ; b) stratifié CFRP avec électrodes en configuration diagonale et schématisation des passages de courant.

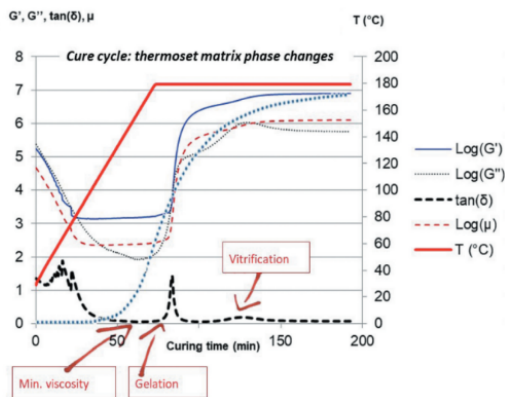


Figure 2 : Changements rhéologiques principaux de la matrice époxy M21 pendant sa cuisson : minimum de viscosité (μ), gélification et vitrification identifiés par rhéométrie sur la courbe de $\tan(\delta) = G''/G'$ tangente l'angle de perte.

5 Conclusions

L'approche proposée ne nécessite pas de capteur dédié puisque c'est le composite CFRP qui est utilisé comme capteur de son propre état [4]. Si la combinaison d'instruments embarqués et de matériaux auto-sensibles pourrait être d'un grand intérêt pour le développement de matériaux intelligents, il n'en reste pas moins, qu'au stade actuel, nous avons fait la démonstration de la faisabilité

du suivi de cuisson (changements de phases durant un cycle de polymérisation) par mesure de l'impédance électrique du stratifié.

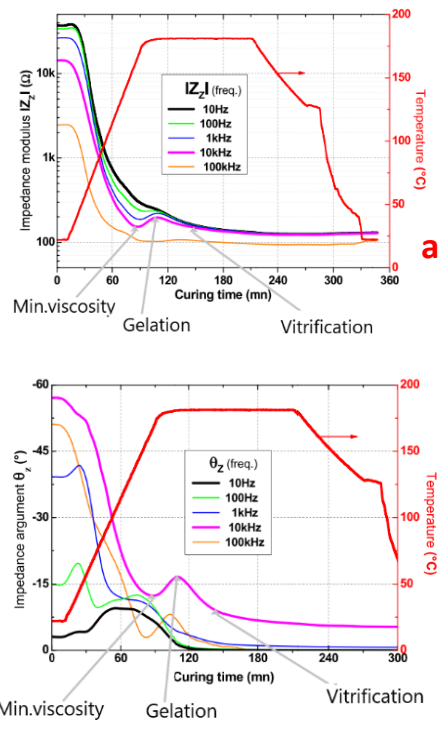


Figure 3 : Changements d'impédance dans l'épaisseur Zz (a amplitude ; b argument) du stratifié T700/M21 pendant le durcissement pour différentes fréquence. Identification sur Zz et θ_z du minimum de viscosité, de la gélification et de la vitrification.

Références

- [1] P. Marguerès, T. Camps, and P. Olivier, "Impédancemétrie électrique pour le monitoring de composites carbone/époxy," *Revue des composites et des matériaux avancés*, vol. 24, no. 2, pp. 207-220, 2014.
- [2] M. Mounkaila *et al.*, "Modelling the electrical behaviour of carbon/epoxy composites and monitoring changes in their microstructure during oven and autoclave curing using electrical impedancemetry," *Smart Materials and Structures*, vol. 27, no. 8, 2018.
- [3] M. Mahamadou, "Analyse impédancemétrie pour le suivi de cuisson ou de santé des structures composites carbone/époxyde : Vers des matériaux intelligents pour le PHM des structures composites," Thèse, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2016.
- [4] P. Margueres, P. Olivier, M. Mounkaila, S. Sassi, and T. Camps, "Carbon fibres reinforced composites. Electrical impedance analysis: a gateway to smartness," *International Journal of Smart and Nano Materials*, vol. 11, no. 4, pp. 417-430, 2020.

Propriétés élastiques effectives d'éprouvettes issues d'une impression 3D, dans un contexte d'optimisation des propriétés – FreeCAD, PrusaSlicer, Scilab

Pierre Maréchal, Simon Bernard, Hugues Duflo

pierre.marechal@univ-lehavre.fr, simon.bernard@univ-lehavre.fr, hugues.duflo@univ-lehavre.fr

IUT Le Havre, Université Le Havre Normandie
Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, LOMC UMR 6294 CNRS

Thèmes – Matériaux - Mécanique

Résumé – *Les programmes mis en œuvre ici visent à soulever la problématique de la résistance des matériaux de pièces issues de fabrication additive, plus précisément par fusion de filament en acide poly-lactique, communément dénommé PLA (poly-lactic acid). La fabrication additive ouvre de nouvelles perspectives pour la réalisation de pièces sur-mesure. Les propriétés élastiques effectives obtenues par la pièce in fine dépendent des multiples paramètres d'impression, et de la reproductibilité de l'impression 3D. Le choix du logiciel libre, dont celui de découpage en tranches (slicer), s'est porté sur Prusa Slicer (<https://github.com/prusa3d/PrusaSlicer>). L'étude présentée ici vise à concevoir et imprimer des éprouvettes normalisées en PLA, de les solliciter jusqu'à la rupture via des essais de traction, et enfin d'en évaluer les propriétés élastiques effectives via une analyse des données numériques (<https://www.scilab.org/>) issues des essais mécaniques réalisés. La question des conditions de fabrication est très souvent relayée à l'arrière plan bien que cruciale pour la tenue mécanique, d'où l'intérêt de sensibiliser et former les étudiants sur ce sujet, et d'en faire un lien entre l'environnement pédagogique et de recherche universitaire et celui plus informel et émancipateur des fablabs, propice au partage des connaissances et de l'expérience. Bien que des paramètres d'impression par défaut soient proposés (finition, température, vitesse, orientation, densité), le compromis qualité / matière / temps d'impression demeure une préoccupation première pour les usagers des pièces réalisées. Ces paramètres constituent donc un sujet majeur pour la formation au choix de compromis techniques, économiques, mais aussi éthique au sens de l'amélioration continue de l'utilisation des ressources à disposition.*

Mots-Clés – Logiciel libre, fabrication additive, analyse des données.

Introduction

La fabrication additive par dépôt de filament fondu dite FFF (*Fused Filament Fabrication*), de filament de polymère s'est largement diffusée et popularisée depuis les années 2008 avec le projet RepRap (pour *replicating rapid prototyper*) [1]. De nombreux polymères ont été testés: le PCL (*poly-capro-lactone*), l'ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), jusqu'au PLA (*poly-lactic acid*), largement utilisé aujourd'hui. La large diffusion de cette technologie et son appropriation par des communautés d'utilisateurs au sein de tiers-lieux tels que les *FabLabs* [2] ont été des moteurs d'amélioration continue. Plus particulièrement, les logiciels libres ont été des vecteurs accélérateurs de diffusion de cette technologie, en favorisant le partage des expériences [3]. Ce choix du logiciel libre pour la fabrication additive par FFF s'illustre par : la conception par CAD (*computer aided design*) via FreeCAD (<https://www.freecadweb.org/>) ; la conversion et le découpage en tranches (*slicer*) via Prusa Slicer (<https://github.com/prusa3d/PrusaSlicer>) ; le traitement et l'analyse des données issues des essais de traction via Scilab (<https://www.scilab.org/>). Ainsi, une imprimante 3D Prusa a été choisie et mise en œuvre pour la fabrication d'éprouvettes normalisées en PLA. Une étude paramétrique sur le type de remplissage a montré la variabilité des propriétés mécaniques effectives obtenues *in fine*, via des essais de traction jusqu'à la rupture.

1 Contexte et motivation

Bien que d'usage répandu, les imprimantes 3D sont souvent utilisées de façon empirique, et la maîtrise des paramètres d'impression nécessite souvent un compagnonnage ou une longue période d'apprentissage. Les nombreuses expériences d'utilisateurs expérimentés, partagées via les réseaux permettent une appropriation rapide de l'outil, au dépend de liens avec des acquis, apprentissages, connaissances techniques et scientifiques, car parfois ressentis trop théoriques par les étudiants. Derrière l'ergonomie apparente, les choix de paramètres d'impression proposés par défaut sont cruciaux. Parmi les principaux phénomènes physiques abordées par des étudiants en sciences et techniques, on peut évoquer les transferts thermiques (conduction, convection) et les diffusions et temps de refroidissement associés ; les changements de phase (fusion, solidification) et les adhésions associées ; les effets de dilatation (coefficient d'expansion) et les contraintes et déformations associées.

L'étude des paramètres d'impression fait appel à des connaissances pluridisciplinaires et montre les limites de reproductibilité des résultats. Ce cadre d'étude, bien que limité, permet d'illustrer une application multiphysique en sciences et techniques de matériaux.

2 Fabrication additive

La fabrication additive d'échantillon comporte de nombreux paramètres de réglage, dont le taux de remplissage, les angles d'impression, le motif de remplissage, l'épaisseur des couches, la température d'impression, la température du plateau, la vitesse d'impression... Chacun de ces paramètres ont une influence sur les propriétés effectives de l'éprouvette réalisée *in fine* [4-5]. La caractérisation d'éprouvettes normalisées est mise en œuvre via des essais de traction, et à l'extraction de leurs propriétés effectives mécaniques.

2.1 Méthode

Afin de dégager des grandeurs mesurables et d'en évaluer l'amplitude, seuls deux paramètres d'influence ont été étudiés : le taux de remplissage et les angles d'impression. Un jeu d'éprouvettes de traction a ainsi été fabriqué selon la norme ISO 527-2 [6], en conservant les autres paramètres constants : motif de remplissage rectiligne, épaisseur des couches de 0,3 mm, température d'extrusion à 215°C, température de plateau à 60°C, vitesse d'impression à 50 mm/s.

Table 1 – Configurations d'impression étudiées.

Éprouvette	Remplissage	Angles d'impression
P100_45	100 %	+45°/-45°
P100_90	100 %	+90°/0°
P60_45	60 %	+45°/-45°
P60_90	60 %	+90°/0°

Deux échantillons de chaque configuration (Table 1) ont été fabriqués. Un protocole expérimental a été développé : éprouvette normalisée conçue par CAD (format STL) ; conversion par Prusa Slicer (format GCODE) ; réalisation d'essais de traction selon la norme ISO 527-1 [7] sur une machine de traction Instron 5800, pilotée par BlueHill 2 ; traitement des données (format CSV) et tracé de courbes avec Scilab ; extraction des propriétés mécaniques : module d'Young et coefficient de Poisson $\{E, \nu\}$.

3 Résultats

Les valeurs moyennes des paramètres $\{E_{moy}, \nu_{moy}\}$, respectivement des modules d'Young et des coefficients de Poisson (eq. (1) et (2)), ont été évaluées :

$$E_{moy} = \frac{1}{\varepsilon_{l,max} - \varepsilon_{l,min}} \int_{\varepsilon_{l,min}}^{\varepsilon_{l,max}} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_l} d\varepsilon_l \quad (1)$$

$$\nu_{moy} = \frac{1}{\varepsilon_{l,max} - \varepsilon_{l,min}} \int_{\varepsilon_{l,min}}^{\varepsilon_{l,max}} \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial \varepsilon_l} d\varepsilon_l \quad (2)$$

avec $\{\varepsilon_{l,min}, \varepsilon_{l,max}\} = \{0,05 \%, 0,25 \%\}$

Les courbes de traction sont illustrées (Fig. 1) pour les éprouvettes Px_a (Table 1) avec un remplissage $x = \{100\%; 60\%\}$ et des plis orientés avec des angles $a = \{+45^\circ/-45^\circ; +90^\circ/0^\circ\}$. Elles montrent les zones de déformation élastiques de pente quasi-constante pour $\varepsilon < 1\%$, et les zones de déformation plastique au-delà.

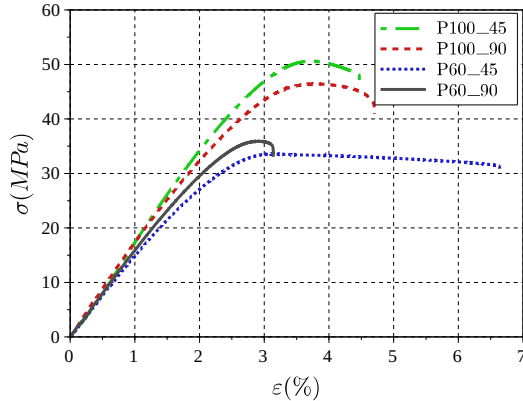


Figure 1 – Courbes de traction $\sigma(\varepsilon)$.

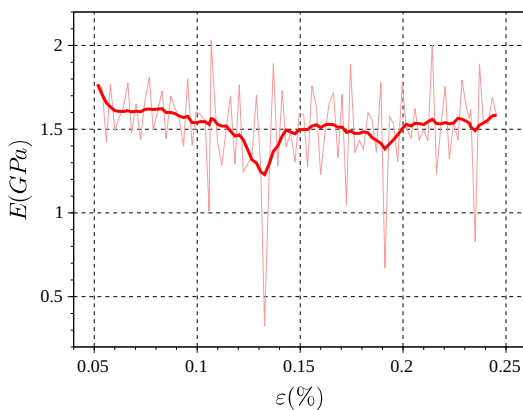


Figure 2 – Pente de la courbe de traction $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ (GPa) pour une éprouvette P60_90.

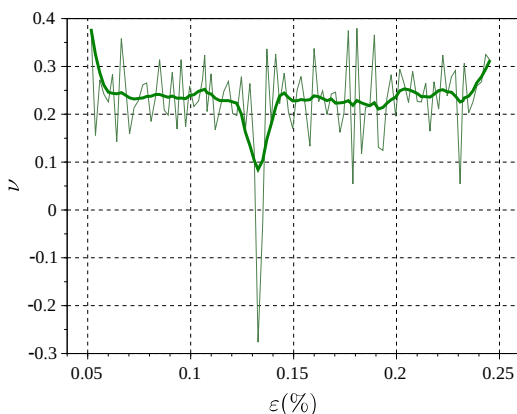


Figure 3 – Coefficient de Poisson ν pour une éprouvette P60_90.

Les variations de E (Fig. 2) et ν (Fig. 3) illustrent les erreurs absolues et les variations obtenues (Eq. (1) et (2)), autour des moyennes obtenues deux essais (Table 2).

Table 2 – Résultats des essais de traction.

Éprouvette	E_{moy} (GPa)	ν_{moy}	p (%)
P100_45	$2,05 \pm 0,05$	$0,32 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,25$
P100_90	$1,90 \pm 0,07$	$0,30 \pm 0,01$	$3,30 \pm 0,05$
P60_45	$1,50 \pm 0,30$	$0,30 \pm 0,01$	$13,4 \pm 0,4$
P60_90	$1,55 \pm 0,05$	$0,24 \pm 0,01$	$14,0 \pm 0,4$

E_{moy} (GPa) : module d'Young ; ν_{moy} : coefficient de Poisson ; p (%) : taux de porosité.

4 Conclusion

Un protocole expérimental a été mis au point pour caractériser des éprouvettes issues de fabrication additive. Les résultats obtenus, reproductibles, montrent que les propriétés élastiques effectives $\{E, \nu\}$ sont directement liées à des paramètres d'impression tels que le taux de remplissage et les angles d'impression. La méthodologie développée peut s'appliquer à de nouvelles études de cas.

Références

- [1] Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C. and Bowyer, A.: "RepRap – the replicating rapid prototyper", *Robotica*, vol.29, p.177-191, 2011, (doi.org/10.1017/S026357471000069X).
- [2] Lhoste, É.F. and Barbier, M.: "FabLabs. L'institutionnalisation de Tiers-Lieux du « soft hacking »", *Revue d'anthropologie des connaissances*, vol.10, p.43-69, 2016, (doi.org/10.3917/rac.030.0043).
- [3] Rumpala, Y.: "Dynamiques de la production matérielle entre pairs sur la base de communs. Vers une réappropriation des conditions de vie?", *Sociologie*, vol.10, p.303-320, 2019, (doi.org/10.3917/socio.103.0303).
- [4] Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F. and Marinescu, R.: "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review", *Polymer Testing*, vol.69, p.157-166, 2018, (doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020).
- [5] Verbeeten, W.M., Lorenzo-Bañuelos, M. and Arribas-Subiñas, P.J.: "Anisotropic rate-dependent mechanical behavior of Poly(Lactic Acid) processed by Material Extrusion Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing*, vol.31, p.100968, 2020, (doi.org/10.1016/j.addma.2019.100968).
- [6] ISO 527-2: "ISO 527-2, Plastics-Determination of Tensile Properties, Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics", 2012.
- [7] ISO 527-1: "ISO 527-1, Plastics-Determination of Tensile Properties, Part 1: General principles", 2012.

Détermination rapide des propriétés de fatigue des structures en composites stratifiés multidirectionnels basée sur la thermographie infrarouge

Xiaojing Gong¹

xiaojing.gong@iut-tarbes.fr

Marie-Laetitia Pastor¹

marie-laetitia.pastor@iut-tarbes.fr

Christian Garnier²

christian.garnier@enit.fr

Zijiao Jia¹

zijiao.jia@iut-tarbes.fr

Jia Huang³

jiahuang@nwpu.edu.cn

¹ IUT Tarbes, Université de Toulouse III
Institut Clément Ader (ICA), CNRS, UMR 5312

² Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT)
Laboratoire génie de production (LGP)

³ School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China

Thèmes – Matériaux - Mécanique

Résumé – *Le présent travail vise à développer des méthodologies permettant d'évaluer les propriétés en fatigue des composites stratifiés multidirectionnel (MD) en un temps court à partir de l'analyse des données thermographiques mesurées par une caméra infrarouge. Une nouvelle méthode de détermination de la limite de fatigue a été proposée pour surmonter les limites des méthodes graphiques proposées par Risitano et al. [1] et Luong et al. [2]. Un modèle de prédiction de la durée de vie a été développé afin de tracer les courbes S-N avec une précision satisfaisante. La méthode a été appliquée avec succès non seulement aux MD composites stratifiés sollicités en traction, mais également en compression et en compression après impact. La méthode développée est intéressante d'un point de vue industriel car elle permet de gagner un gain de temps considérable (au moins 50 fois) sur la durée des essais de fatigue d'un matériau. Elle peut appliquer à un MD composites stratifié quels que soient sa séquence d'empilement et son type de chargement.*

Mots-Clés – Thermographie Infrarouge, Limite de Fatigue, Prédiction de la Durée de Vie, Composite Stratifié Multidirectionnel

1 Introduction

Sous une sollicitation répétée, la résistance mécanique d'un matériau diminue avec l'augmentation du nombre de cycles effectués. C'est le phénomène de la fatigue des matériaux, qui est en général caractérisée par une courbe S-N (Stress-Cycle). La détermination d'une courbe S-N par des essais conventionnels peut durer plusieurs mois, donc très long et coûteux. L'approche thermographique, qui corrèle l'augmentation de la température mesurée sur une fenêtre de la surface des éprouvettes avec les paramètres de fatigue [1][2], permet la détermination d'une courbe S-N en une dizaine heures. Cette méthode a été proposée d'abord pour des matériaux métalliques et appliquée récemment sur des matériaux composites à renforts de fibres longues [3-7].

Dans ce travail, nous voulons développer cette méthode pour appliquer à un stratifié multidirectionnel quelconque sous une sollicitation en traction et en compression cyclique.

2 Expérimentation

Différents stratifiés MD CFRP ont été préparés à partir d'un préimprégné de fibre de carbone unidirectionnelle et de l'époxy (38%/UD150/CHS, HexPly®M79). Un stratifié [(0/90)₂/0/(90/0)₂] est destiné aux essais de traction et trois stratifiés quasi-isotropes et quasi-homogènes (QIQH) (voir Tableau1) sont destinés aux essais de compression ou de compression après impact. Ces trois stratifiés sont non-couplés et ils ont tous les mêmes rigidités dans le plan et hors plan. Les éprouvettes ont été découpées au jet d'eau abrasif aux dimensions respectant les normes.

Tableau 1 Séquences d'empilement des stratifiés quasi-isotropes et quasi-homogènes (QIQH)

Éprouvettes	Séquences d'empilement
QIQH-1	[0/45/90/-45/90/-45/45/-45/0/90/0/45/0/45/-45/45/90/0/90/-45/90/-45/0/45]
QIQH-2	[0/45/-45/90/-45/90/45/90/0/-45/0/45/0/45/90/45/-45/0/-45/90/-45/90/0/45]
QIQH-3	[0/90/45/-45/45/-45/90/-45/0/45/0/90/0/90/-45/90/45/0/45/-45/45/-45/0/90]

Dans un premier temps, le stratifié [(0/90)₂/0/(90/0)₂] a été testé en traction statique pour déterminer sa contrainte ultime. Il a ensuite été soumis à des essais de fatigue conventionnels et aussi à des essais de fatigue par block de chargement en utilisant la méthode de la thermographie infrarouge avec R=0.1, f=5Hz afin de valider les méthodologies proposées. Dans un second temps, cette méthode de la thermographie infrarouge validée a été appliquée aux trois stratifiés QIQH sous compression cyclique et aussi sous compression après impact avec R=10 et f=5Hz.

3 Modèles proposés

3.1 Limite de fatigue [8]

D'habitude, la limite de fatigue, peut être définie par un niveau de contrainte en % par rapport à la contrainte ultime statique pour un nombre de cycles conventionné entre 10⁶-10⁷. Dans cette étude, le changement d'angle normalisé (θ_i^c), déterminé à partir de la courbe de la variation de température stabilisée (ΔT) en fonction du niveau de contrainte (Figure 1), est utilisé pour déterminer la limite de fatigue. Ce paramètre θ_i^c s'exprime par

$$\theta_i^c = \left| \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\max(\theta_{2,3,4..}) - \min(\theta_{2,3,4..})} \right| (i \geq 2)$$

Où l'indice $i(i \geq 2)$ désigne le numéro du point dans la séquence. θ_i et θ_{i+1} sont les angles entre la ligne déterminée par l'ensemble de points $\{P_{i-1}, P_i\}$, $\{P_i, P_{i+1}\}$ et l'axe des x, respectivement. Le terme $\max(\theta_{2,3,4..}) - \min(\theta_{2,3,4..})$ est utilisé pour la normalisation du changement d'angle.

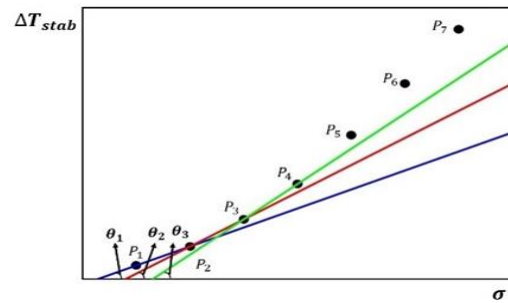


Figure 1 – Définition de l'angle θ_i

Nous avons proposé d'identifier la limite de fatigue par le point qui correspond à la valeur maximale du changement d'angle normalisé. Cette idée a été validée par les données issues de la littérature.

3.2 Durée de vie en termes de « Courbe S-N » [9]

Concernant la courbe S-N, un modèle empirique a été proposé et puis adapté à des MD stratifiés. La courbe S-N peut être tracer à partir du modèle exprimé par les équations suivantes :

$$k(N) = 1 - p \Delta T_{stab}^r N^{1/q}$$

$$N_f = \left(\frac{1 - k_f}{p \Delta T_{stab}(\sigma)^r} \right)^q$$

Où N est le nombre de cycle de chargement, $k(N)$ et k_f sont la rigidité résiduelle correspondant au Nième cycle et au cycle final avant la rupture N_f , respectivement. Trois paramètres p, q et r sont à déterminer empiriquement. La valeur de ces trois paramètres peut être calibrée en ajustant les données expérimentales à l'aide de MATLAB.

4 Résultats et discussions

La figure 2 présente la courbe S-N prédite par le modèle proposé avec les résultats des essais de fatigue traditionnels. On voit clairement que la courbe S-N

prédite à $N_f=10^6$ cycles est relativement conservatrice, tandis que la courbe S-N à $N_f=10^7$ cycles se situe totalement dans l'intervalle de confiance à 95 %.

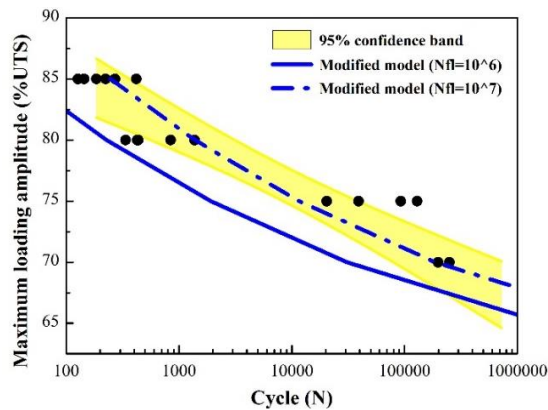


Figure 2- Comparaison de la courbe S-N prédite par le modèle proposé avec les résultats des essais de fatigue traditionnels

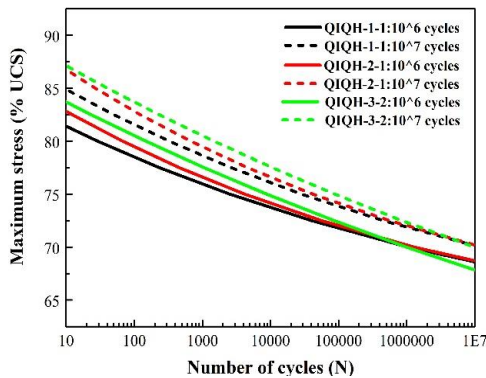


Figure 3- Les courbes S-N prédites par le modèle proposé pour les stratifiés QIQH non impactés

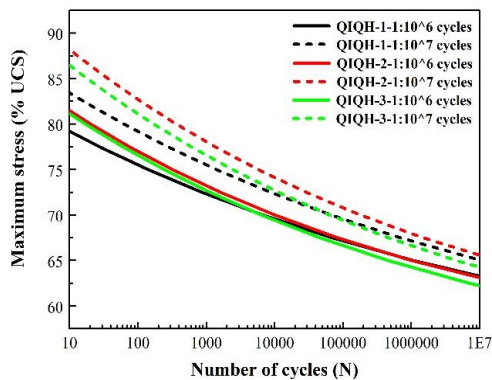


Figure 4 - Les courbes S-N prédites par le modèle proposé pour les stratifiés QIQH impactés

L'application de cette méthode sur les essais de fatigue en compression et en compression après impact sur les trois QIQH stratifiés donne également des résultats intéressants (Figure 3-4). Il est montré que malgré les processus d'endommagement différents d'un stratifié à l'autre, la limite de fatigue ainsi que la courbe S-N des trois séquences d'empilement s'avèrent proches les unes des autres pour les éprouvettes vierges (Figure 3) et aussi

pour elles impactées (Figure 4).

5 Conclusions

La détermination rapide des propriétés en fatigue des composites est primordiale, car le comportement en fatigue d'un composite stratifié n'est pas seulement influencé par les paramètres de chargement, mais également par divers facteurs matériaux tels que : fibre et matrice, architecture de renforcement, géométrie, séquence d'empilement, etc.

Une nouvelle méthode de détermination de la limite de fatigue a été proposée pour surmonter la limite des méthodes graphiques de la littérature lorsque les données thermographiques impliquent une fluctuation ou ne satisfont pas l'hypothèse de ces méthodes. Concernant la détermination de la courbes S-N, le modèle proposé intègre trois constantes empiriques permet de traduire mieux les mécanismes d'endommagement compliqués dans les MD stratifiés. Ces modèles proposés, qui combine la dégradation de la rigidité avec des données thermographiques, ont été appliqués avec succès à des MD stratifiés sous sollicitations cycliques en traction, en compression et en compression post-impact. Les résultats obtenus sont convaincants et prometteurs. En utilisant la méthode proposée, une courbe S-N peut être obtenue en une dizaine heures au lieu de plusieurs mois selon la méthode d'essais classiques.

Références

- [1] Risitano A, Risitano G. Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2010, 54(2): 82-90.
- [2] Luong M P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear engineering and design*, 1995, 158(2-3): 363-376.
- [3] Jia Z. Determination of fatigue properties of MultiDirectional composite laminates (MD) based on thermography measurements. *Doctoral dissertation, Toulouse 3*, 2022.
- [4] Colombo C, Libonati F, Pezzani F, Salerno A, Vergani L. Fatigue behaviour of a GFRP laminate by thermographic measurements. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 3518-3527.
- [5] Huang J, Pastor M L, Garnier C, Gong X. Rapid evaluation of fatigue limit on thermographic data analysis. *International Journal of Fatigue*, 2017, 104: 293-301.
- [6] Huang J, Pastor M L, Garnier C, Gong X. A new model for fatigue life prediction based on infrared thermography and degradation process for CFRP composite laminates. *International Journal of Fatigue*, 2019, 120: 87-95.
- [7] Huang J, Garnier C, Pastor M L, Gong X. Investigation of self-heating and life prediction in CFRP laminates under cyclic shear loading condition based on the infrared thermographic data. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 229: 106971.
- [8] Zijiao Jia, Marie-Laetitia Pastor, Christian Garnier, Xiaojing Gong. A new method for determination of fatigue limit of composite laminates based on thermographic data. *International Journal of Fatigue*, 2022: 107445.
- [9] Zijiao Jia, Marie-Laetitia Pastor, Christian Garnier, Xiaojing Gong. Fatigue life prediction based on infrared thermographic data for CFRP composite laminates. (Submitted)

Caractérisation mécanique par indentation instrumentée des matériaux métalliques

Gérard MAUVOISIN¹
gerard.mauvoisin@univ-rennes1.fr

Olivier BARTIER¹
olivier.bartier@univ-rennes1.fr

Xavier HERNOT¹
xavier.hernot@univ-rennes1.fr

Mathieu FONTAINE²
Mathieu.Fontaine@insa-rennes.fr

Marion PARISE³
marion.parise@edf.fr

1: IUT, Université de Rennes, Lab. Génie Civil et Génie Mécanique, 3 Rue du Clos Courtel 35704 RENNES

2: INSA, Lab. Génie Civil et Génie Mécanique, 20 Av. des Buttes de Coesmes 35000 RENNES

3: EDF Hydro - DTG, 134 Rue de l'étang, 38950 SAINT MARTIN LE VINOUX

Thèmes — *Mécanique-Matériaux*

Résumé – *La modélisation du comportement des structures et des pièces mécaniques nécessite la connaissance de loi de comportement des matériaux constitutifs, obtenue de manière classique par des tests de traction, ou plus récemment par l'essai d'indentation instrumentée.*

L'indentation instrumentée consiste à imposer l'enfoncement d'un indenteur dans le matériau testé et à mesurer l'évolution de l'effort appliqué, F , en fonction de l'enfoncement, h . Le test peut être réalisé aux échelles macro, micro et nanométrique. En macro indentation, l'exploitation de la courbe $F(h)$ peut conduire à la connaissance du module d'élasticité, de la limite d'élasticité et de l'exposant d'écrouissage, permettant ainsi le tracé de la loi d'écrouissage de Hollomon du matériau.

Les algorithmes développés au LGCGM durant ces 10 dernières années pour l'identification des propriétés mécaniques, à partir de l'indentation instrumentée, ont permis de développer le logiciel CaMMatI (Caractérisation Mécanique de Matériaux par Indentation). Ce logiciel associé à un dispositif d'indentation de laboratoire ou un dispositif portatif (DIPo, sur batterie, brevet WO 2011/064517-A1) constitue un système expert qui peut être utilisé en laboratoire, en atelier de production ou même sur chantier.

Mots-Clés – *caractérisation mécanique, matériaux métalliques, indentation instrumentée.*

1 Introduction

La caractérisation mécanique des matériaux a pour objectif de connaître le comportement mécanique des matériaux, qui est essentiel tout au long du cycle de vie des produits mais plus particulièrement au moment de la conception afin de réaliser le dimensionnement répondant aux critères de résistance pour des conditions d'utilisation données et également pour prévoir le comportement mécanique des matériaux durant la phase de mise en forme, quel qu'en soit le procédé.

Il existe différentes techniques de caractérisation mécanique mais l'essai de traction uniaxiale, normalisé, est le plus simple à interpréter et le plus répandu. En revanche, il nécessite la réalisation préalable d'éprouvettes normalisées qui demandent un certain volume de matériau initial qui n'est pas toujours disponible par exemple lorsque le matériau constitue des couches minces ou lorsque le matériau, ou son procédé d'élaboration, est assez coûteux comme dans le cas des techniques de fabrications additives.

Depuis plusieurs dizaines d'années, le test d'indentation instrumentée est utilisé à différentes échelles pour déterminer principalement la dureté et le module de Young de matériaux, mais il est également pressenti comme une potentielle alternative aux essais de traction pour déterminer la loi d'érouissage des matériaux métalliques.

Dans ce travail nous présentons le principe du test d'indentation ainsi que la méthode d'interprétation des grandeurs mesurables que nous avons développée ainsi que quelques résultats obtenus.

2 L'indentation instrumentée

L'indentation instrumentée consiste à imposer l'enfoncement d'un indenteur de géométrie connue dans le matériau et à enregistrer, durant l'opération, l'évolution de l'effort et de l'enfoncement en fonction du temps (figure 1). Ceci nous permet de tracer la courbe d'indentation (figure 2) donnant l'évolution de l'effort F en fonction l'enfoncement h .

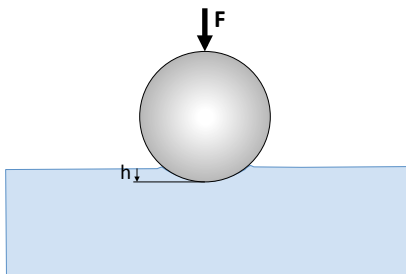


Figure 1: Principe de l'indentation sphérique

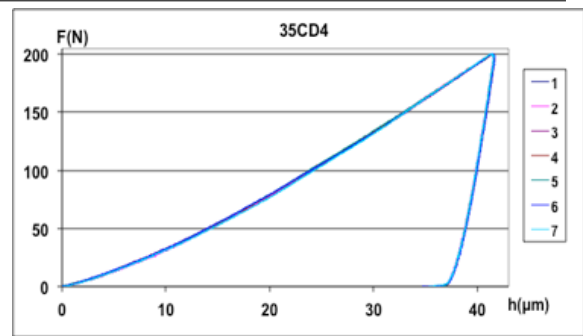


Figure 2: exemple de courbes d'indentation obtenues sur un acier 35CD4

L'indentation peut être pratiquée avec différentes géométries d'indenteur (sphériques, coniques, cube-corner, Berkovitch,...) et à différentes échelles (nano, micro et macroscopique).

L'exploitation de la courbe d'indentation peut conduire à l'évaluation de la dureté H , du module d'élasticité E et de paramètres de la loi d'érouissage de certains matériaux.

Au LGCGM de Rennes nous travaillons notamment avec des indenteurs sphériques de rayon 0,25mm ou 0,5mm et à l'échelle macroscopique dans le but d'obtenir la loi d'érouissage de matériaux métalliques.

3 Obtention d'une loi d'érouissage

Différentes techniques d'analyse des courbes d'indentation sont proposées dans la littérature pour obtenir les paramètres σ_y (limite d'élasticité) et n (exposant d'érouissage) de la loi de Hollomon qui interpole assez bien la loi d'érouissage de la plupart des matériaux métalliques.

On peut citer les techniques inverses consistant à déterminer le jeu de paramètres mécaniques du matériau qui permet d'obtenir, à l'aide d'un modèle [1, 2] ou des simulations numériques par éléments finis [3], une courbe d'indentation similaire à celle obtenue expérimentalement. D'autres techniques consistent à reconstruire la courbe d'érouissage point par point en déterminant une valeur de déformation représentative, et la contrainte représentative correspondante, pour plusieurs niveaux de chargement.

Nos travaux exploitent une base de données issue de nombreuses simulations par la méthode des éléments finis de l'indentation de matériaux métalliques avec un indenteur sphérique. Un calcul d'écart, au sens des moindres carrés, entre la courbe d'indentation expérimentale, obtenue à partir d'un essai d'indentation réalisé sur le matériau à caractériser, et chacune des courbes de la base de données conduit à une cartographie de l'écart [4], telle que celle représentée sur la figure 3.

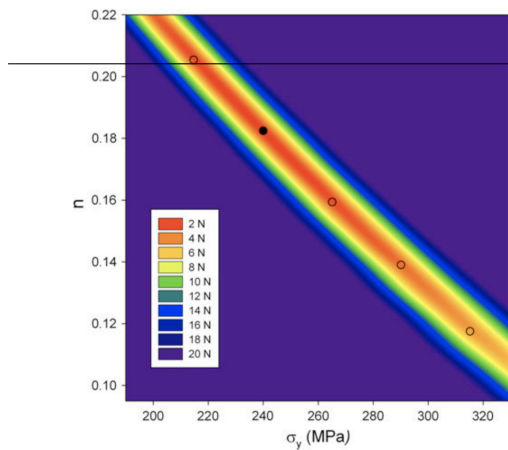


Figure 3: Cartographie de l'écart entre une courbe d'indentation expérimentale et chacune des courbes d'une base de données

La cartographie de l'écart présente une vallée dont le fond correspond aux couples de paramètres (σ_y et n) donnant une courbe d'indentation très proches de la courbe expérimentale. Plus précisément, les jeux de paramètres (σ_y et n) correspondant aux points situés sur le grand axe de la vallée correspondent à des loi d'érouissage qui se coupent toutes en un seul point dont l'abscisse constitue la déformation représentative moyenne [4]. La contrainte correspondante est ensuite obtenue à partir du modèle de Hollomon.

Plusieurs "points représentatifs" peuvent ainsi être obtenus en considérant différentes portions de la courbe expérimentale. L'interpolation de ces points représentatifs par une loi de Hollomon, conduit à une loi d'érouissage très proche de celle obtenue par un essai de traction.

4 Logiciel CaMMatI

Sur la base de la technique d'exploitation des courbes d'indentation brièvement décrite ci-dessus, nous avons réalisé le logiciel CaMMatI, Caractérisation Mécanique des Matériaux par Indentation, (figure 4). Il permet d'enregistrer la courbe d'indentation au cours d'un essai d'indentation réalisé sur un matériau à caractériser et de déterminer le jeu de paramètres (σ_y et n) de la loi de Hollomon le plus probable pour le matériau testé.

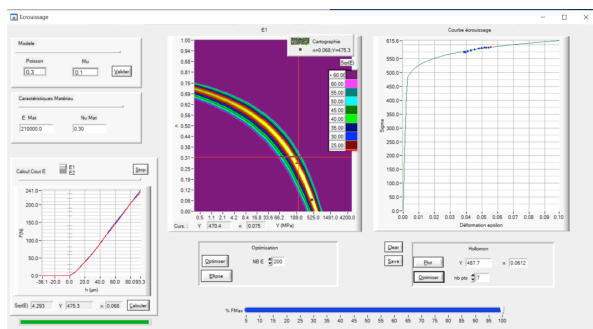


Figure 4: vue du logiciel CaMMatI

5 Dispositif d'indentation portable DIPO

Afin de pouvoir réaliser des tests d'indentation in-situ, c'est à dire directement sur les grosses structures sans la nécessité d'extraire des échantillons à tester en laboratoire, nous avons proposé le dispositif d'indentation portable (DIPO) [5] dont quelques vues sont données sur la figure 5 ci-dessous.

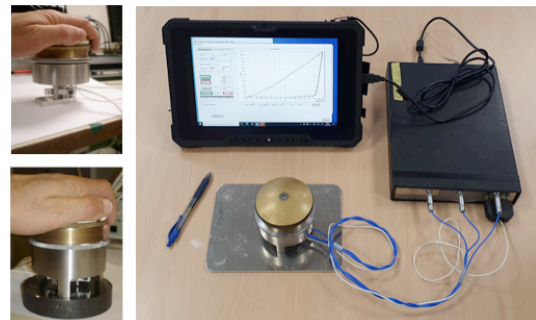


Figure 5: Dispositif portable d'indentation

L'ensemble DIPO + CaMMatI a par exemple été utilisé avec succès pour la caractérisation mécanique de conduites forcées d'un barrage alimentant une unité de production hydroélectrique EDF.



Figure 6: Caractérisation par indentation de conduites forcées

6 Conclusions

Le travail d'une équipe de l'IUT de Rennes a permis de développer un système expert, basé sur l'indentation instrumentée, pouvant être utilisé en laboratoire ou sur chantier pour la caractérisation mécanique de matériaux métalliques.

Références

- [1]: A. Nayebi, R. El Abdi, O. Bartier and G. Mauvoisin, J. Mech. Mat. (MSA 15485), 34 4, pp. 243-254 (2002).
- [2]: J.-M. Collin, G. Mauvoisin, O. Bartier, R. El Abdi, P. Pilvin. Mat. Sci. and Eng. - A . 501, pp.140–145, 2009.
- [3]: J.-M. Collin, G. Mauvoisin, P. Pilvin. Materials and Design. 31 (2010) 636–640.
- [4]: C. Moussa, X. Hernot, O. Bartier, G. Delattre, G. Mauvoisin. Journal of Materials Science, 49 (2), 592-603. (2013)
- [5]: G. Mauvoisin. "Dispositif d'indentation instrumentée portable". FR 2953291 (A1) /WO 2011/064517 (A1).

Caractérisation mécanique des matériaux des mécanismes de siège automobile

Olivier Bartier¹

olivier.bartier@univ-rennes1.fr

Xavier Hernot¹

xavier.hernot@univ-rennes1.fr

Gérard Mauvoisin¹

gerard.mauvoisin@univ-rennes1.fr

Charbel Moussa²

charbel.moussa@minesparis.psl.eu

Guillaume Delattre³

guillaume.delattre@faurecia.com

¹ IUT, Université de Rennes, Lab. Génie Civil et Génie Mécanique, 3 Rue du Clos Courtel 35704 Rennes

² IUT, MINES ParisTech, PSL Research University, CEMEF - Centre de mise en forme des matériaux, CNRS UMR 7635, CS 10207 rue Claude Daunesse, 06904 Sophia Antipolis Cedex, France

³FAURECIA sièges automobiles, Le pont de Vère, 61100 Caligny, France

Thèmes – Matériaux - Mécanique

Résumé – Cette étude porte sur la détermination du comportement mécanique des mécanismes de sièges développés et produits par la société FAURECIA pour le secteur automobile. Cette détermination est primordiale car tout dysfonctionnement de ces mécanismes peut engendrer un risque sérieux sur la vie du passager présent sur le siège lors d'un accident. Les mécanismes de sièges, soumis à des contraintes très élevées, en statique et en dynamique, nécessitent l'emploi d'acier durcis superficiellement. La détermination des propriétés mécaniques des matériaux constituant ces mécanismes ne pouvant être que locale, celle-ci s'effectue au moyen d'une technique de caractérisation locale instrumentée développée au sein du laboratoire LGCGM de l'Université de Rennes : l'essai d'indentation instrumentée. Une procédure expérimentale innovante associée à l'application de modèles théoriques et numériques développés au sein de notre laboratoire ont permis de caractériser mécaniquement les différentes couches du matériau utilisé pour les mécanismes de sièges automobiles. Deux tests de validation, dont le principe est assez proche de celui du mécanisme utilisé industriellement, ont permis de valider les propriétés mécaniques identifiées par notre technique.

Mots-Clés – caractérisation mécanique, matériaux métalliques, test d'indentation instrumenté, matériaux durcis superficiellement.

1 Introduction

La société FAURECIA de Caligny (61) s'est spécialisée depuis plusieurs dizaines d'années dans l'étude, le développement et la production des mécanismes de sièges pour le secteur automobile (Figure 1). L'optimisation des facteurs poids/résistance/coût de ces mécanismes conduit cette entreprise à utiliser des aciers traités thermiquement présentant une surface très dure, capable de résister aux pressions de contact importantes, et un cœur suffisamment ductile pour résister aux chocs (Figure 2). Cette optimisation conduit aussi cette entreprise à effectuer des simulations numériques sur les mécanismes des sièges, ce qui nécessite la connaissance des lois de comportement des aciers durcis superficiellement. Pour des matériaux homogènes et isotropes, les paramètres d'une loi de comportement peuvent généralement être obtenus grâce à l'essai normalisé de traction (norme NF EN ISO 6892-1). Dans le cas d'un matériau durci superficiellement, l'essai de traction ne permet pas d'obtenir ces paramètres en raison de l'évolution des propriétés du matériau en fonction de la distance à la surface. Le laboratoire LGCGM de Rennes a pu démontrer ces dernières années la capacité de l'indentation instrumentée à conduire à l'identification des paramètres mécaniques de matériaux homogènes et hétérogènes [1-4]. Ce test, dérivé d'un essai de dureté classique, consiste à imposer l'enfoncement d'un pénétrateur de forme sphérique dans le matériau testé et à mesurer l'évolution de l'effort appliqué, F , en fonction de l'enfoncement, h . Afin de répondre à la problématique de la société FAURECIA, un partenariat a donc été mis en place entre cette société et l'équipe « indentation » du laboratoire LGCGM composée d'enseignants chercheurs de l'IUT de Rennes1. Le but de ce partenariat a été de développer une démarche s'appuyant sur le test mécanique d'indentation des matériaux pour obtenir l'évolution des propriétés mécaniques en profondeur des aciers durcis superficiellement.

2 Caractérisation du cœur du matériau

La démarche proposée par notre laboratoire nécessite au préalable la caractérisation du cœur de l'acier traité superficiellement. Celui-ci pouvant être considéré comme homogène, la caractérisation du cœur revient à déterminer par indentation 2 paramètres : la limite d'élasticité, σ_y et l'exposant d'écrouissage, n . La connaissance de ces deux paramètres est essentielle pour prédire le comportement du matériau lorsque celui-ci est sollicité par des efforts. La connaissance de la limite d'élasticité permet de connaître le seuil à partir duquel le matériau se déforme plastiquement de manière irréversible. L'exposant d'écrouissage indique, une fois le matériau déformé de manière irréversible, la faculté de

durcissement de celui-ci lors de la plastification. Les résultats obtenus montrent que le test d'indentation couplée à une procédure d'optimisation de paramètres conduit, pour chaque matériau testé, à une solution unique $[\sigma_y, n]$. La comparaison des résultats obtenus par notre technique et par traction montre la capacité de l'essai d'indentation à identifier ces paramètres dans le cas d'aciers homogènes.

3 Caractérisation de la surface des aciers durcis superficiellement.

Concernant les aciers traités superficiellement étudiés, nous avons pu distinguer, une couche en extrême surface dans laquelle les propriétés mécaniques sont constantes et une zone intermédiaire, entre la couche de surface et le substrat, dans laquelle les propriétés mécaniques évoluent (Figure 2). Nous montrons que l'évolution de la résistance dans la zone intermédiaire est quasi linéaire. En se basant sur cette hypothèse, la démarche proposée s'effectue en 3 étapes. Dans une première étape, les propriétés mécaniques du cœur sont identifiées à partir d'un essai d'indentation instrumenté réalisé dans le cœur de l'échantillon, après coupe et polissage. Dans une deuxième étape, les épaisseurs caractéristiques des couches durcies sont déterminées à partir d'essais de micro-dureté. Enfin, les propriétés mécaniques des couches durcies sont déterminées par analyse inverse à partir d'un essai d'indentation effectué sur la surface du matériau traité superficiellement, en s'appuyant sur la connaissance des épaisseurs de couches et des propriétés mécaniques du cœur déterminées précédemment. Cette méthode a été appliquée avec succès sur différents aciers durcis superficiellement.

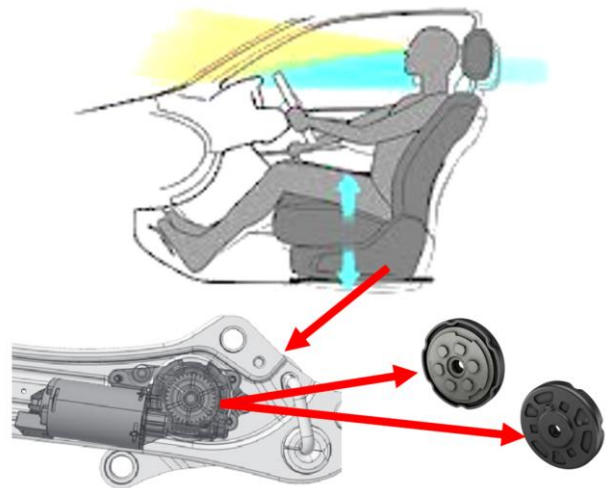


Figure 1 – Mécanisme des sièges automobiles.

4 Validation des résultats

Deux tests de validation, dont le principe est assez proche de celui d'un mécanisme de sièges développé par

FAURECIA, ont été conçus et instrumentés dans notre laboratoire. Le premier consiste à effectuer une indentation avec un cylindre afin de reproduire l'action du galet du mécanisme sur l'alésage du mécanisme de réglage des sièges automobiles (Figure 2). Le deuxième consiste à reproduire l'action d'un couple sur la poignée de pompage du mécanisme. Pour ce test, la validation expérimentale a consisté à mesurer l'angle de rotation de l'arbre de la poignée en fonction du couple appliqué. La Figure 2 montre que l'évolution de l'angle en fonction du couple appliqué est similaire à celle obtenue numériquement à partir des lois de comportement identifiées par indentation instrumentée. L'application des différents tests sur différents aciers durcis superficiellement permettent de valider les résultats obtenus par indentation sphérique et de montrer l'intérêt de la démarche de caractérisation par indentation des aciers traités en surface développée dans le cadre de cette étude.

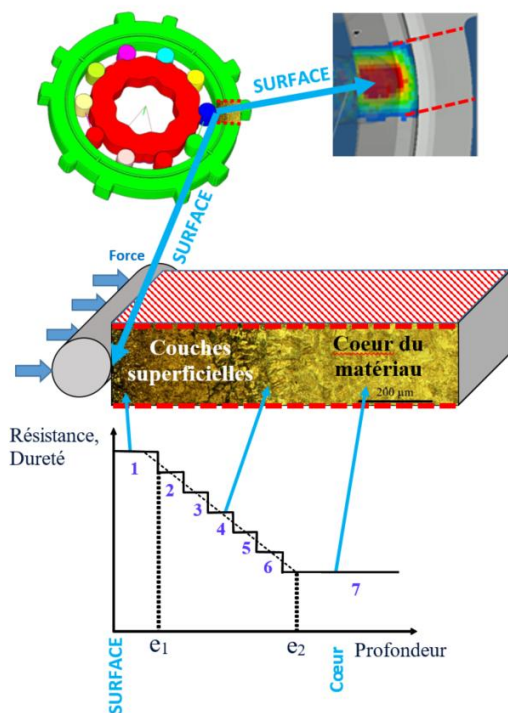


Figure 1 –Microstructure et résistance des couches superficielles des aciers traités thermiquement.

5 Conclusions

Dans ce travail, nous avons répondu à la problématique de FAURECIA en proposant une méthode de caractérisation par indentation instrumentée des aciers durcis superficiellement qui s'appuie sur l'outil d'analyse inverse. Les résultats obtenus montrent la validité du système expert développé par une équipe de recherche de l'IUT de Rennes pour la caractérisation mécanique de

matériaux métalliques durcis superficiellement.

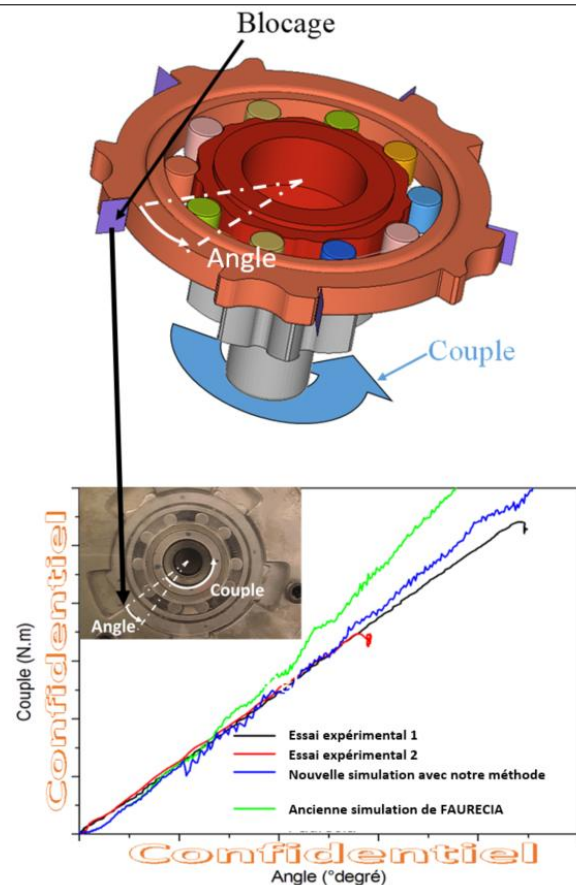


Figure 2 –Validation de la caractérisation mécanique par indentation à l'aide d'un test expérimental reproduisant l'action d'un couple sur la poignée de pompage du mécanisme de réglage des sièges automobiles.

Références

- [1] Charbel Moussa, Xavier Hernot, Olivier Bartier, Guillaume Delattre, Gerard Mauvoisin, *Identification of the hardening law of materials with spherical indentation using the average representative strain for several penetration depths*. Material Science and Engineering A., 2014, 606, p. 409-416.
- [2] Charbel Moussa, Olivier Bartier, Xavier Hernot, Gerard Mauvoisin, Jean Marc Collin, Guillaume Delattre. *Experimental and numerical investigation on carbonitrided steel characterization with spherical indentation*. Surface and coating technology, 258, 2014, p. 782-789.
- [3] Charbel Moussa, Olivier Bartier, Xavier Hernot, Gerard Mauvoisin, Jean Marc Collin, Guillaume Delattre. *Mechanical characterization of carbonitrided steel with spherical indentation using the average representative strain*. Materials and Design, 89, 2016, p. 1191-1198.
- [4] Christine Schneider-Maunoury, A. Albayda, Olivier Bartier, Laurent Weiss, Gerard Mauvoisin, Xavier Hernot, Pascal Laheurte. *On the use of instrumented indentation to characterize the mechanical properties of functionally graded binary alloys manufactured by additive manufacturing*. Materials Today Communications, 25, 101451, 2020, p. 1-12.

Valorisation des cendres volantes de biomasse dans des blocs bétons :

Projet ADEME BIMGC

Chafika Djelal¹

chafika.dantec@univ-artois.fr

Jonathan Page¹

jonathan.page@univ-artois.fr

Laurent Libessart¹

laurent.libessart@univ-artois.fr

¹ IUT Béthune, Université d'Artois
Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, ULR 4515

Thèmes – Matériaux - Mécanique

Résumé – *En France, la filière bois énergie génère annuellement des centaines de milliers de tonnes de cendres de biomasse. Dans la plupart des chaufferies biomasse, des quantités importantes de cendres volantes sont produites. Du fait de leurs caractéristiques, ces cendres de biomasse pourraient être potentiellement valorisables dans les matériaux de construction. Ce qui permettra d'avoir un nouveau débouché à ces déchets industriels, tout en diminuant la consommation de ciment et/ou de granulats naturels non renouvelables qui se raréfient. Ainsi, un projet ADEME Graine a été proposé pour évaluer la possibilité de valoriser les cendres de biomasse dans des blocs de construction, en substitution ou addition cimentaire. Le critère prépondérant pour ce produit est la résistance caractéristique minimale à la compression de 6 MPa à 7 jours. La demande en eau de ces cendres est importante (22%) du fait de leur surface spécifique élevée. Au vu de leurs propriétés et des résultats obtenus lors de l'étude de faisabilité sur les mortiers menés en laboratoire, il a été décidé de limiter les taux de substitution du ciment à un taux de 25% sans correction d'eau. Une étude sur blocs de béton creux a été réalisée directement en production industrielle à des taux de substitution de 10% et 20% de CVB.*

Mots-Clés – Blocs béton, substitution, mortier, caractérisation physico-mécanique

1 Introduction

Ces dernières années, la filière bois-énergie s'est considérablement accrue en France et va bientôt représenter plus du tiers de la production des énergies renouvelables en France. Toutefois chaque année, ces installations biomasse produisent plus de 200 kT de cendres. Cet important volume de déchets est valorisé ou éliminé par les exploitants des centrales biomasse selon la typologie des cendres, la technologie de combustion utilisée et les filières de traitements existantes. Les cendres produites sont parfois valorisées sous forme d'épandage dans l'agriculture, mélangées à du compost ou du lisier, mais cela reste insuffisant. Pourtant, les volumes croissants de cendres ne peuvent plus être supportés par le seul épandage forestier. L'étude de nouvelles voies de valorisation est indispensable, avec comme piste l'incorporation de ces cendres dans des éco-matériaux pour la construction. Dans la plupart des chaufferies biomasse, des quantités importantes de cendres volantes sont produites. Ces cendres se caractérisent par une grande finesse et de caractéristiques chimiques proches des cendres volantes de charbon, déjà utilisées dans les bétons.

Les cendres volantes, du fait de leur propriétés physico-chimiques, ont des propriétés similaires aux additions minérales couramment utilisées dans les matériaux cimentaires, tels que les cendres volantes de charbon, les laitiers de haut fourneau, etc. Par ailleurs, ces cendres étant pulvérulentes, leur mise en décharge représente un coût non négligeable pour les chaufferies biomasse.

Ainsi, un projet ADEME Graine a été proposé pour évaluer la possibilité de valoriser les cendres de biomasse dans des matériaux de construction, en substitution ou addition cimentaire. Ce projet s'intitule : « Valorisation des cendres de chaudière **BI**omasse dans l'élaboration de **Matériaux** composites pour le **Gé**nie **Ci**vil » (BIMGC).

2 Présentation du projet BIMGC

2.1 Objectifs

Le projet ADEME Graine BIMGC (2018-2021) visait à évaluer la faisabilité d'utiliser les cendres volantes de biomasse en substitution du ciment ou en addition pour la fabrication de blocs de béton creux B60 (50x20x20cm) à démoulage rapide, destinés à la construction avec des propriétés thermo-physiques conformes aux normes en vigueur (NF EN 771-3/CN) et présentant une résistance à la compression de 6 MPa à 7 jours. Cette première étude a été axée sur les cendres volantes en raison de leur éventuelle activité pouzzolanique telle que spécifiée par la norme NF EN 450-1.

2.2 Partenaires et rôles

Le projet BIMGC a regroupé différents partenaires, à la fois industriels, techniques et académiques, permettant une synergie des compétences :

- **Dalkia** : Société de services énergétiques exploitant plusieurs centaines de chaufferies biomasse en France. Dalkia était le fournisseur des cendres à valoriser dans le cadre du projet.

- **Institut Matériaux** de l'**UMons** : Laboratoire de recherche de l'UMons. Les activités de recherche sont focalisées sur deux grands domaines : les matériaux polymères et hybrides, et les revêtements et traitements de surface.

- **LGCgE – IUT Béthune (Univ. Artois)** : Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement, porteur du projet. Les activités principales du LGCgE vont des géo-matériaux (socle incontournable pour les ouvrages) aux bâtiments. L'ensemble conduit à la ville de demain et prend en compte les aspects environnementaux associés. Dans ce projet c'est l'équipe ER3 « Matériaux béton et Composites » qui est intervenu, apportant ces compétences en formulation et caractérisation des bétons et matériaux de construction.

- **CERIB** : Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton. Le CERIB a apporté ses compétences pour la certification et la normalisation des produits (blocs bétons) qui pourront être commercialisés.

- **Biallais Ind.** : Producteur de blocs bétons préfabriqués, qui a mis à disposition sa chaîne de fabrication industrielle.

- **UniLaSalle-EME** : École des Métiers de l'Environnement. Le pôle de recherche et ingénierie Cyclann se focalise sur le génie et la science de l'environnement, la qualité des eaux et des effluents, le traitement des effluents et des déchets et l'évaluation environnementale. Ce partenaire s'est notamment chargé des annales environnementales et de l'ACV des matériaux du projet BIMGC.

3 Méthodologie et résultats

3.1 Méthodologie

- **Phase 1** : Mise en place et validation d'une méthodologie analytique pour la caractérisation environnementale des biomasses ont été effectuées en phase 1 par Unilasalle-EME.

- **Phase 2** : Les cendres volantes de biomasse (CVB) de la chaufferie de Calais ont été caractérisées par des analyses chimique, physico-chimique et minéralogique à l'Univ. Mons et par des analyses physiques par les déterminations de la surface spécifique Blaine, de la masse volumique des cendres. L'étude s'est poursuivie sur pâte de ciment à base de CVB par l'analyse de l'hydratation par des essais calorimétriques et par la détermination de la demande en eau à la sonde Vicat (IUT de Béthune – LGCgE).

- **Phase 3** : Etude des formulations de mortiers à base de CVB. Les essais ont été effectués l'IUT Béthune (LGCgE). Les mortiers ont été caractérisés à l'état frais (mesure de l'ouvrabilité) et à l'état durci par des mesures de résistances à la compression à 7 jours, 28 jours et 90 jours.

- **Phase 4** : Les résultats obtenus en phase 2 et 3 ont permis une optimisation des formulations à démoulage immédiat (béton sec) en laboratoire par vibro-compactage en phase 4 à l'IUT de Béthune (LGCgE). Les formulations des éprouvettes de béton ont été faites en se basant sur la formulation de blocs de béton creux B60 de l'entreprise Biallais. Deux types d'incorporation de cendres ont été étudiés : la substitution et l'addition de cendres volantes. Six formulations ont été mises au point avec des taux d'incorporation de CVB de 10% et 20%, puis testées en compression à 7, 28 et 90 jours.

- **Phase 5** : La production industrielle de blocs creux B60 a ensuite été réalisée chez Biallais Ind. sur les formulations élaborées en phase 4. Les blocs ont été pesés et testés en résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours. Puis, les blocs obtenus ont été analysés par le CERIB pour les mesures de variations dimensionnelles dans différentes conditions de températures et d'hygrométrie.

- **Phase 6** : L'évaluation environnementale de la valorisation des cendres volantes dans la filière béton a été réalisée par UniLaSalle-EME. Une analyse par lixiviation a été réalisée sur des CVB afin d'en déterminer les éléments trace métallique (ETM). La recherche de COV a été faite sur le bloc de béton le plus performant au vu des résultats des phases 4 et 5, ainsi qu'une analyse ACV.

3.2 Principaux résultats

Cette étude a été axée sur les cendres volantes de biomasse (CVB) en raison de leur éventuelle activité telle que spécifiée par la norme NF EN 450-1, relative aux spécifications pour les cendres volantes (de charbon) pour les bétons. La demande en eau des cendres volantes est importante (22 %). Toutefois, les analyses physico-chimiques et minéralogiques ont montré qu'elles sont de nature calcique, puisqu'elles possèdent une forte teneur en CaO (43,3 %). Elles ne présentent pas d'effet pouzzolanique, ni d'hydraulicité latente. Les CVB ont une masse volumique de 2,54 g/cm³ et une finesse Blaine de 6290 cm²/g, valeurs proches de celles observées pour les cendres volantes de charbon. Par ailleurs, les CVB se caractérisent par une forte demande en eau, qui a été estimée à 22% via la méthode d'essai de consistance Vicat sur mortier (NF EN 196-3).

Une étude de substitution (de 0 à 50%) du ciment par des CVB dans un mortier a été réalisée, avec et sans correction d'eau (prenant en compte la demande en eau des CVB). Il a notamment été montré que l'ajout d'eau était préjudiciable pour la résistance en compression. Par ailleurs, l'augmentation du taux de CVB a conduit à une

baisse de cette résistance. Ainsi, il a été préconisé de limiter le taux de substitution du ciment à 25 %.

Suite à cette campagne à l'échelle mortier, des études sur blocs béton à des taux de substitution de 10 % et de 20 % de CVB en laboratoire puis en production industrielle à Biallais Ind. ont été réalisées. Les comparaisons entre les blocs témoins et les blocs CVB ont indiqué que la substitution du ciment par les cendres engendre une baisse de la résistance en compression. Il a été proposé en parallèle d'étudier la possibilité de valoriser ces cendres, non plus en tant que substitut du ciment, mais en tant qu'addition minérale. Cependant, l'incorporation par addition de CVB n'a pas apporté pas d'effet bénéfique significatif sur les résistances. Cependant, mis à part la formulation avec une substitution de 20 %, tous les blocs élaborés ont une résistance en compression supérieure de 6 MPa à 7 jours, valeur recommandée par la norme NF EN 771-3 relative aux blocs de construction.

Du point de vue durabilité, les blocs contenant des cendres ont présenté un gonflement légèrement supérieur à celui des blocs témoins mais toutes les variations dimensionnelles mesurées restent inférieures à la limite de 0,45 mm/m.

L'analyse environnementale a montré l'absence de trace de COV dans les blocs produits. La substitution du ciment par les cendres est le plus intéressant du point de vue environnemental (ACV).

4 Conclusion

Le projet BIMGC visait à évaluer la faisabilité d'utiliser les cendres volantes en substitution du ciment ou en addition pour la fabrication de blocs de béton creux B60 (50x20x20cm) à démoulage immédiat, destinés à la construction avec des propriétés thermo-physiques conformes aux normes en vigueur. Au vu des résultats sur mortier, il a été décidé de limiter le taux de substitution du ciment à 25 % et de ne pas corriger l'eau. Les comparaisons entre les blocs témoins et les blocs CVB montrent que la substitution du ciment par les cendres induit une perte de résistance en compression. L'incorporation par addition de CVB n'apporte pas d'effets bénéfiques sur les résistances. Cependant, à part pour une substitution de 20 %, tous les blocs conçus affichent une résistance caractéristique en compression supérieure de 6 MPa à 7 jours.

5 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ADEME pour le support financier du projet BIMGC ainsi que les partenaires de ces projets (UMons, Dalkia, l'EME-UniLaSalle, le CERIB et Biallais Ind.).

RILEM TC 266-MRP : Essais rhéologiques interlaboratoires à l'IUT de Béthune

Yannick Vanhove Chafika Djelal

yannick.vanhove@univ-artois.fr chafika.dantec@univ-artois.fr

IUT de Béthune, Université d'Artois
Laboratoire génie Civil et GeoEnvironnement, ULR 4515

Thèmes – Matériaux

Résumé – *Il existe plusieurs rhéomètres à béton utilisés dans le monde qui présentent des différences de conceptions importantes, mais aucune méthode standard avec laquelle comparer leurs résultats. Comme l'ont démontré deux campagnes d'essais interlaboratoires réalisées au LCPC à Nantes (octobre 2001) et au NIST à Cleveland (avril 2003), différents rhéomètres à béton peuvent donner des résultats différents. Une nouvelle campagne a donc été réalisée à l'IUT de Béthune en 2018, axée sur des mélanges de béton plus fluides et différents procédés. De nouveaux dispositifs rhéologiques ont été utilisés, tels que les rhéomètres ICAR, Viskomat XL, eBT-V, Rheocad, BML 4 SCC, ainsi que des instruments spécifiques tels que le, Sliper, rhéomètre d'interface et tribomètre. Les mesures ont été effectuées sur trois bétons autoplaçants, deux bétons très fluides et trois mélanges de mortier. Les essais ont permis d'évaluer des courbes d'écoulement, le comportement thixotropique, les propriétés d'interface et leur évolution dans le temps.*

Ces nouveaux essais interlaboratoires ont permis de mettre en évidence des sources d'erreurs systématiques et ont donné lieu aux actions correctives nécessaires. Tous les rhéomètres ne mesurent pas les mêmes valeurs, ce qui peut être dû au matériel (capteurs, recalage, calibration) et aux profils d'écoulement imparfaits induits dans chaque rhéomètre.

Mots-Clés – *Rhéologie, Béton frais, Essais interlaboratoires, Rhéomètre*

1 Introduction

Mesurer les propriétés rhéologiques des mélanges de béton fluide n'est pas une tâche simple. Il n'y a pas de procédure unique qui fonctionne pour tous les rhéomètres et il n'y a pas de réglage de rhéomètre qui fonctionne pour tous les matériaux. Il est donc important de s'assurer que toutes les procédures sont capables de saisir les données dont a besoin l'expérimentateur. Les essais interlaboratoires (*Round Robin Test (RRT)*) sont désormais considérés comme une méthode importante à la fois pour améliorer la procédure d'essai définie conjointement, mais aussi pour communiquer des informations sur la variabilité de l'équipement, la reproductibilité et la répétabilité de la méthode d'essai. Cet exercice doit être mené régulièrement en raison des progrès considérables de la recherche et de l'application par l'élargissement des gammes de nouveaux types de bétons et des progrès réalisés dans le domaine de l'instrumentation.

Comme l'ont démontré deux campagnes d'essais interlaboratoires (RRT) réalisées au LCPC à Nantes (octobre 2001) et au NIST à Cleveland (avril 2003), différents rhéomètres à béton peuvent donner des résultats différents. Une nouvelle campagne a donc été réalisée à l'IUT de Béthune en 2018, axée sur des mélanges de béton plus fluides et différents procédés. Ces nouveaux essais interlaboratoires ont réuni sur deux jours 23 participants (Figure 1) de différents pays autour de nouveaux dispositifs rhéologiques, tels que les rhéomètres ICAR, Viskomat XL, eBT-V, Rheocad, BML 4 SCC, ainsi que des instruments spécifiques tels que le Sliper, rhéomètre d'interface et tribomètre. Cinq Bétons fluides et trois mortiers ont été livrés par toupie (Société EQIOM) jusqu'au laboratoire de recherche (LGCgE) de l'IUT de Béthune.



Figure 1 – Participants aux essais du RRT

Ces essais interlaboratoires ont été suivis d'un workshop (31 mai 2018 à Arras, France) et ont permis de rassembler 78 participants dont 54 du monde académique et 24 industriels de 13 pays différents (Allemagne, Belgique, Brésil, Chili, Chine, Grande Bretagne, Inde, Irlande, Italie, USA, etc.) [1]. Les participants ont pu échanger autour des travaux récents sur la rhéologie des bétons. Il est à noter la participation de plusieurs industriels tels que Botte Fondations, Roquette SA,

EQIOM, Soletanche Bachy, Holcim-Lafarge, Saint Gobain, Léon Grosse, Schleibinger, etc.

Les mesures ont été effectuées sur trois bétons autoplaçants, deux bétons très fluides et trois mélanges de mortier. Les essais ont impliqué l'évaluation des courbes d'écoulement, du comportement thixotropique et des propriétés d'interface et de leur évolution dans le temps.

2 Plan d'expérience pour des essais interlaboratoires

La première étape a consisté, sur la base des connaissances concernant les risques de mesures incorrectes ou invalides, à formuler des mélanges sans teneur élevée en granulats (frottement intergranulaire excessif) et d'éviter la migration des particules (éviter les faibles viscosités et des granulats supérieur à 20 mm de diamètre. Aucun béton vibré conventionnel n'a été testé. Trois mortiers (M) ont été évalués dans l'intention de réduire de possibles fluctuations de couple pendant les mesures et afin de minimiser la migration des particules induite par le cisaillement (formulation utilisée pour la réalisation de chape). Trois bétons autoplaçants (SCC) ont été confectionnés, complétés par deux bétons de classe de consistance S4 utilisés dans le domaine des fondations (FC). Ces différents mélanges ont la particularité d'être mis en œuvre sur chantier sans avoir recours à la vibration (action mécanique pour favoriser l'arrangement optimal des constituants du béton). Ces mélanges ont été formulés dans le but de présenter une large gamme de seuil de cisaillement et de viscosité plastique. Des essais d'étalement au cône d'Abrams (SF) et de temps d'écoulement au V-funnel (VF) ont été réalisés à la réception des toupies à l'IUT de Béthune (Tableau 1).

Tableau 1 – Propriétés rhéologiques des mélanges

Mélange	Propriétés rhéologiques	SF (mm)	VF (s)
SCC1	Référence	600	20
SCC2	Faible seuil de cisaillement	700	5
SCC3	Viscosité plastique élevée	550	30
FC4	Réduction teneur en fines	600	20
FC5	Seuil de cisaillement élevé	400	-
M1	Référence	750	3
M2	Viscosité plastique élevée	650	5
M3	Seuil de cisaillement élevé	550	3

Tous les mélanges ont été préparés dans une centrale à béton voisine et livrés sur place en camion toupie (pas de variabilité d'un lot sur l'autre). Pour certains mélanges, des ajustements sur place avec des adjuvants ont été réalisés pour modifier la maniabilité vers la cible visée.

Pour l'ensemble des rhéomètres (Figure 2), la courbe d'écoulement a été obtenue en réalisant un pré-

cisaillement de 20 s au couple maximum retenu pour l'essai pour les bétons et de 30 s pour les mortiers afin d'assurer un état d'équilibre avant d'appliquer une rampe décroissante en vitesse.

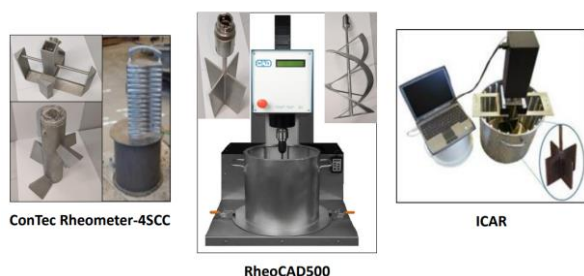


Figure 2 – Rhéomètres à béton

La rampe décroissante a été réalisée en 7 paliers de 5 s (exemple donné en Figure 3). La vitesse de cisaillement imposée (maximale et minimale) dépend du type de rhéomètre (Tableau 2). A partir de la figure 3, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des bétons peuvent être déterminés.

Tableau 2 – Plage de vitesse de cisaillement

Appareil	Max. (rps)	Min. (rps)
ICAR	0,50	0,025
Rheocad500	0,57	0,028
4SCC	0,21	0,010

rps : révolution par seconde

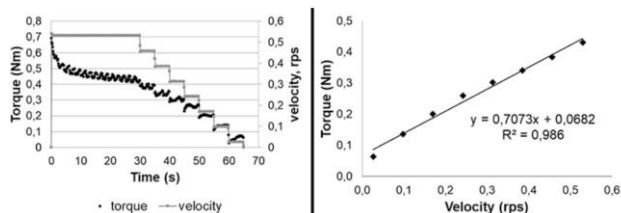


Figure 3 – Exemple de mesure au rhéomètre

3 Recommandations pour réaliser des essais interlaboratoires sur des rhéomètres à bétons

Dans la sélection des mélanges de béton, l'équipe RRT a préféré avoir des mesures réussies sur une variété de mélanges. Dans le cadre des restrictions imposées par le producteur de béton, un certain nombre de mélanges ont été sélectionnés avec une gamme suffisamment large de propriétés. Un aspect important pour mener à bien des tests est de s'assurer que tous les équipements imposent les mêmes paramètres de test. L'équipe RRT s'est réunie la veille des mesures pour discuter de la stratégie à suivre pour imposer les mêmes paramètres de test, et il a été décidé d'imposer le même taux de cisaillement maximal pour chaque appareil. Cela implique que différents protocoles de test en termes de vitesse de rotation sont nécessaires pour chaque rhéomètre. Bien que les différences soient mineures, la différence de vitesse de rotation imposée peut atteindre 15 %. De plus, pour tout

essai interlaboratoire, l'équipe du RRT recommande que les certificats d'étalonnage soient réalisés. Une tentative d'étalonnage a été faite avec le matériau de référence NIST pour le béton, mais la quantité limitée était insuffisante pour vérifier tous les appareils. L'équipe du RRT soupçonne que certaines différences entre les rhéomètres peuvent être attribuées à un souci d'étalonnage, d'autant que certains rhéomètres mesuraient systématiquement des valeurs supérieures ou inférieures.

Une dernière recommandation pour exécuter un test Round-Robin est une communication adéquate avant, pendant et après les expériences, pour s'assurer que chaque membre de l'équipe est sur la même longueur d'onde et connaît le programme exact, les procédures de test, la séquence de test, la conservation des matériaux, etc. Pour un groupe de plus de 30 personnes travaillant vers un objectif commun, la communication est essentielle pour une bonne préparation et exécution des expériences, ainsi qu'une analyse et une diffusion adéquate des résultats.

4 Conclusions

L'organisation d'essais interlaboratoires sur des rhéomètres à béton est une entreprise importante, nécessitant beaucoup d'attention aux détails (homogénéité des lots, procédures uniformes, ajustement des mélanges, calendrier des tests, etc.). Cinq mélanges de béton et trois mélanges de mortier ont été évalués pour maximiser la production des résultats sur les différents essais. Les contributions des partenaires industriels ont été primordiales pour le succès de ce projet. Une autre observation importante notée au cours de cette expérience est l'écart de mesure qui dépend plus du matériau que des types de rhéomètres. En particulier, la teneur en granulats, le seuil de cisaillement et la viscosité ont affecté les variations autour des valeurs attendues. Nous avons besoin de plus d'essais interlaboratoires, notamment pour les nouvelles propriétés recherchées, par exemple, pour les mélanges de béton à raidissement rapide ou pour les matériaux à haut seuil de cisaillement, ce qui permettra certainement l'émergence de nouveaux rhéomètres.

Remerciements

Les auteurs qui sont aussi les organisateurs de ce RRT, remercient la direction de l'IUT pour le support financier de cette manifestation, les participants qui sont venus de nombreux pays (Etats-Unis, Irlande, Belgique, Allemagne, Chili, Brésil, etc.) et les nombreux sponsors (EQIOM, Groupe Français de Rhéologie, l'AUGC, Artois Com, la FNTP, l'Ecole Française du Béton, le LGCgE Lille, l'Université d'Artois, Structure & Réhabilitation, Botte Fondations).

Références

[1] Proceedings of the International RILEM Workshop on Rheological Measurements of Cement-based Materials, IRWRMC'18, Edited by C. Djelal & Y. Vanhove, RILEM Publications, s.a.r.l., 110 p., 2019.

Apports de calculs atomistiques pour identifier les corrélations entre propriétés structurales et élastiques d'alliages de couches minces de verres métalliques Zn(Zr,Mg)

Cristiano Poltronieri^{1,2} Fatiha Challali² Florent Tétard^{1,2}

Valérie Bockelée² Philippe Djemia^{1,2}

crisiano.poltronieri@lspm.cnrs.fr fatiha.challali@lspm.cnrs.fr florent.tetard@univ-paris13.fr
valerie.bockelee@lspm.cnrs.fr djemia@univ-paris13.fr

¹ IUT de Saint Denis, Université Sorbonne Paris Nord,
Département Science et Génie des Matériaux

² Institut Galilée, Université Sorbonne Paris Nord
Laboratoire des Sciences des Procédés des Matériaux, CNRS 3407

Thèmes – Matériaux - Mécanique

Résumé – Les couches minces de verre métallique des systèmes binaires Zn_xZr_{1-x} et Zn_xMg_{1-x} ont été déposées par co-pulvérisation magnétron dans la salle blanche de l'université Sorbonne Paris Nord. La capacité de formation d'un verre (GFA) a été évaluée et les compositions des phases amorphes ont été identifiées à partir des diagrammes de diffraction des rayons X qui montrent un pic principal de diffraction large, typique des matériaux amorphes, pour les compositions entre 30 et 92 % at. Zn pour ZnZr et 46-69 % at. Zn pour ZnMg. La distance interatomique moyenne diminue continuellement avec l'addition de Zn dans les deux systèmes, comme prévu théoriquement par nos calculs de dynamique moléculaire *ab initio*. Les modules élastiques des verres métalliques en couches minces d'environ 300 nm d'épaisseur ont été mesurés par diffusion inélastique (Brillouin) de la lumière. Pour ZnZr, un grand adoucissement du module d'Young 150-100 GPa (-30%) et du module de cisaillement 40-30 GPa (-20%) sont observés pour la transition de phase cristalline vers amorphe, suivi d'un raidissement par augmentation de la concentration en Zn de manière similaire à ZnMg. C'est en accord avec la réduction de la distance interatomique moyenne et des rigidités des liaisons atomiques. Nous rendons compte de ces évolutions grâce à nos calculs de premiers principes qui utilisent la théorie de la fonctionnelle de la densité électronique.

Mots-Clés – Verres métalliques, Couches minces, Propriétés mécaniques, calculs atomistiques

Introduction

Les stents vasculaires traditionnels sont généralement constitués de métaux résistants à la corrosion tels que les aciers inoxydables, les alliages Co-Cr et Ti en raison de leur haute résistance et de leur résistance à la corrosion [1]. Ce dispositif médical a pour objectif d'ouvrir une voie vasculaire qui a été obstruée ou endommagée et de maintenir son intégrité mécanique jusqu'à ce qu'elle guérisse complètement, typiquement plus de six mois. L'intérêt de développer de nouveaux matériaux biorésorbables est principalement d'éviter une nouvelle intervention pour retirer le dispositif. D'autres avantages par rapport aux matériaux permanents sont le transfert progressif de la charge mécanique vers le tissu cicatrisant (ou l'os) et très souvent leur radiotransparence. De plus, un stent biodégradable réduit le besoin de traitements anticoagulants à long terme. Cependant, des recherches approfondies ont été menées sur les stents dégradables comprenant des polymères et d'autres matériaux métalliques [1, 2]. Néanmoins, la recherche de métaux biodégradables présentant des vitesses de corrosion uniformes et contrôlées ainsi que des propriétés mécaniques comparables aux métaux traditionnels reste un défi ouvert. Les alliages cristallins à base de Zn représentent des candidats prometteurs en raison de leur biodégradabilité, de leur biocompatibilité et de leur résistance aux sollicitations mécaniques [3]. Cependant, la recherche d'un meilleur contrôle de la biocorrosion et d'une plus grande solidité, implique le développement de matériaux amorphes à base de Zn (massif et film) qui n'ont pas de défauts cristallins et qui induisent une amélioration de la biocorrosion, des propriétés mécaniques et aussi de leurs biocompatibilités. Dans cette présentation, nous nous focaliserons sur les relations entre propriétés structurales et élastiques des films minces élaborés, en comparant les résultats expérimentaux à ceux que l'on peut prédire par des méthodes de calculs atomistiques *ab initio*.

Matériels et méthodes

Des verres métalliques en couches minces Zn_xZr_{1-x} et Zn_xMg_{1-x} ont été déposés sur un substrat de silicium par co-pulvérisation magnétron RF à partir de cibles métalliques pures de Zn, Zr et Mg. La distance cible-substrat était de 9,4 cm, la pression totale de 0,5 Pa, le débit de gaz argon de 40 s.c.c.m. et la rotation du substrat de 10 trs/min. L'épaisseur des échantillons a été mesurée par profilométrie mécanique et analyse de sections transverses par microscopie électronique MEB. Les propriétés structurales et chimiques ont été étudiées par diffraction des rayons X (XRD) dans une

géométrie ω -2 θ en utilisant un Equinox 5000 (INEL) équipé d'une anode de cobalt ($\lambda_{Co} = 0,1789$ nm) et la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX), respectivement. Les modules d'élasticité ont été évalués à partir des vitesses du son d'ondes acoustique de surface (SAW) observées par diffusion inélastique (Brillouin) de la lumière [4]. Cette technique permet de fixer le module du vecteur d'onde, $Q=4\pi/\lambda_L \sin(\theta)$ de l'onde acoustique observée, λ_L et θ sont la longueur d'onde du faisceau laser incident et l'angle d'incidence de la lumière, respectivement. La vitesse du son est alors définie par $V_{SAW} = f_B \lambda_L \sin(\theta)/2$, f_B étant le déplacement en fréquence de la lumière diffusée par rapport à la lumière incidente.

Les calculs atomistiques ont été réalisés avec le logiciel VASP (The Vienna Ab initio Simulation Package: atomic scale materials modelling from first principles) [5]. Une supercellule (une boîte cubique) contenant 256 atomes est chauffée jusque 2500K au delà de la température de fusion, en utilisant un ensemble NVT : N(nombre d'atomes constant), V (volume constant) et T (température constante établie avec le thermostat de Nosé [6]), un pas de 0,3 fs et 1000 pas de temps. Le liquide est relaxé pendant plus d'une dizaine de picosecondes, avec un pas de 1,5 fs. Après refroidissement à 300K, avec 1000 pas de temps de 0,3 fs, le verre est relaxé dans un ensemble NPT, avec un thermostat de Langevin [7], pendant plus d'une dizaine de picosecondes, avec un pas de 1,5 fs. Le volume atomique V_{at} à 300K est alors obtenu, ainsi que la fonction de distribution des paires atomiques $g(r)$. La position du premier pic de cette fonction est la distance interatomique moyenne.

Résultats

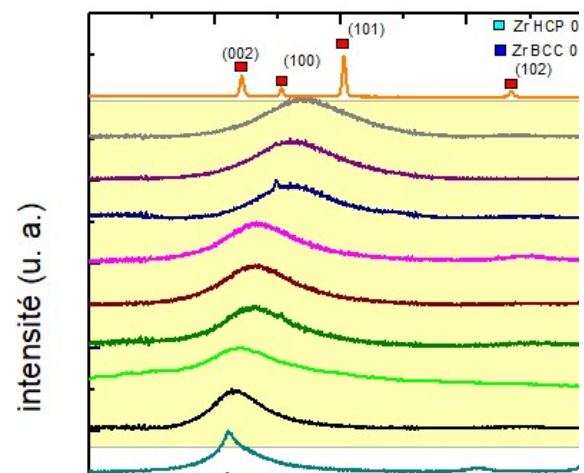


Figure 1 – Diagramme XRD de couches minces de ZnZr avec différentes teneurs en Zn.

Plusieurs compositions d'alliages binaires Zn_xZr_{1-x} et

Zn_xMg_{1-x} ont été élaborées avec une épaisseur ~ 400-600 nm. Les analyses XRD (Fig. 1) montrent une large gamme d'amorphisation entre 30-92 at. % Zn pour ZnZr et 46-69 at.% Zn pour ZnMg. Le pic principal de diffraction se décale vers des angles plus élevés lorsque la concentration en Zn augmente. Ceci se traduit par une diminution des distances interatomiques moyennes (Fig. 2c et 3c).

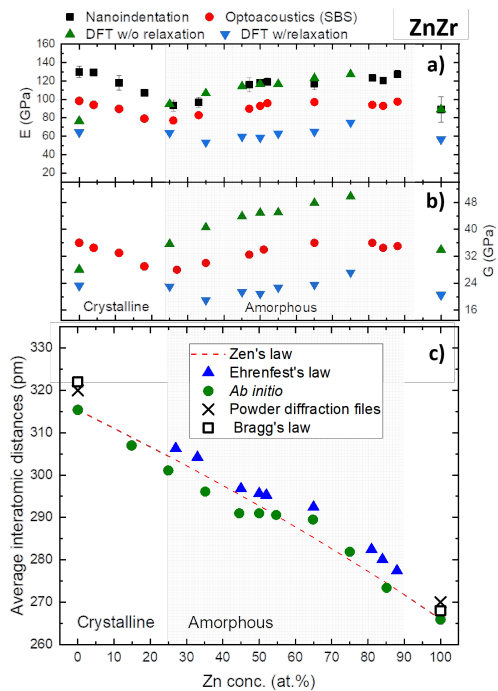


Figure 2 – Module d'Young, de cisaillement et distance interatomique moyenne de films ZnZr mesurés et calculés

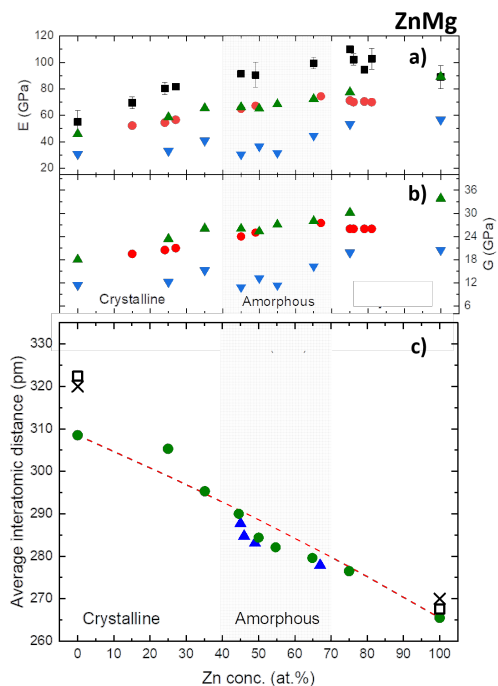


Figure 3 – Module d'Young, de cisaillement et distance interatomique moyenne de films ZnMg mesurés et calculés.

Dans la région amorphe, nous observons une augmentation du module d'Young et du module de cisaillement avec l'ajout de Zn (Figure 2a-b et 3a-b). Cela est dû à la formation de liaisons Zn-Mg, Zn-Zr et Zn-Zn au détriment des liaisons ZrZr ou MgMg.

La variation des modules élastiques est un peu plus complexe dans le cas du ZnZr, car au-delà de ~60 at. % Zn, nous observons un palier pour $E \sim 80$ GPa et $G \sim 32$ GPa.

Conclusions

Des films minces de ZnZr et ZnMg ont été déposés par co-pulvérisation magnétron. Leurs propriétés structurales et élastiques ont été évaluées. Le module d'Young des alliages ZnZr varie de 90 à 130 GPa tandis que pour le ZnMg, il varie de 80 à 100 GPa. Ces larges gammes de rigidité rendent ce type de matériau plus adapté aux différentes applications en ajustant la composition chimique de l'alliage. Il y a un bon accord sur les évolutions de ces modules élastiques, avec des calculs atomistiques ab initio. Afin de rechercher une accordabilité plus large des propriétés, nous avons commencé à étudier les systèmes ternaires Zn-Zr-Mg.

Dans l'ensemble, nos résultats ouvrent la voie à l'élaboration de nouveaux films minces amorphes avec une meilleure compréhension des relations structures-propriétés.

Références

- [1] Z. Zhang et al. *Bioactive Materials*, 6:4729-4757 (2021).
- [2] N. Bink et al., *International J. of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 70(1) 54-74 (2021).
- [3] E Mostaed et al., *Acta Biomaterialia*, 71 1-23 (2018).
- [4] J-C. Beugnot, P. Djemia, J. Margueritat, *Photoniques* 114, 26-29 (2022)
- [5] <https://www.vasp.at/>
- [6] D. J. Evans and B. L. Holian, *J. Chem. Phys.* 83, 4069 (1985)
- [7] R-L. Davidchack *et al.*, *J. Chem. Phys.* 130, 234101 (2009)

Transition énergétique : les matériaux métalliques pour la filière hydrogène. Genèse d'un projet de club étudiants / chercheurs du programme ORION

Thierry Grosdidier^{1,2}

thierry.grosdidier@univ-lorraine.fr

Antoine Guitton^{1,2}

antoine.guitton@univ-lorraine.fr

Thomas Gries^{2,3}

thomas.gries@univ-lorraine.fr

¹ IUT, GMP – Metz, Université de Lorraine
Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3)
UMR CNRS 7239

² DAMAS - Université de Lorraine
Laboratoire d'Excellence Design des Alliages Métalliques pour l'Allègement des Structures

³ CNRS - Université de Lorraine
Institut Jean Lamour (IJL), UMR CNRS 7198

Thèmes – *Science des Matériaux, Métallurgie, Hydrogène, Décarbonation, Fragilité, Stockage solide.*

Résumé – *Le présent article traite des besoins de la filière hydrogène. Après une présentation globale de la problématique, des exemples illustrent des recherches ayant pour objectif de produire de l'hydrogène « vert », ainsi que de nouvelles méthodes permettant de le transporter et de le stocker proprement. L'article traite aussi d'un exemple de projet concernant la mise en place d'un club étudiants / chercheurs dans le cadre du programme ORION (Oser la Recherche durant la formatION) de Lorraine Université d'Excellence. Le club étudiants / chercheurs « Matériaux métalliques pour la filière hydrogène » (Met'Hy) est né de consortiums de recherche développés dans le cadre du projet FRCR HyPE¹, au niveau de la région Grand-Est, de l'Axe 1 (procédés métallurgiques innovants) du Labex DAMAS² et du projet LUE Impact ULHyS³ de l'Université de Lorraine.*

Mots-Clés – *Pédagogie BAC+2 à BAC+5, BUT, filière hydrogène, métallurgie.*

¹ HyPE = Production et stockage d'Hydrogène décarboné et son utilisation pour la Production d'Energie dans des dispositifs sans métaux nobles

² DAMAS = Design des Alliages Métalliques pour l'Allègement des Structures

³ ULHyS = Université de Lorraine Hydrogène Sciences et Technologies

1 Introduction

Le réchauffement climatique est sans équivoque et est bien d'origine humaine (Figure 1). Ainsi, il est nécessaire et urgent de recourir à de nouvelles technologies pour limiter les émissions de gaz à effet de serre.

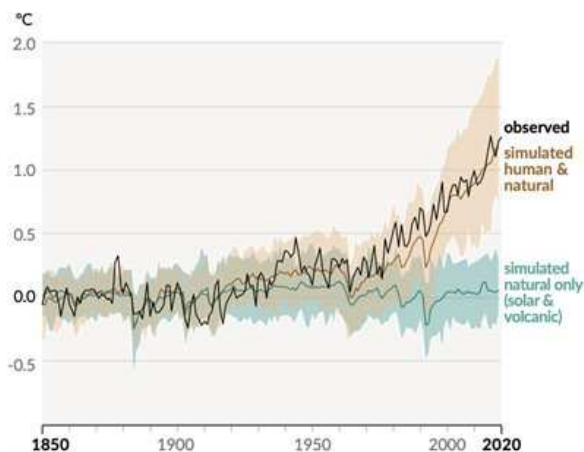


Figure 1 – Evolution de la température en surface de la terre
[Rapport du GIEC, 2021]

L'hydrogène apparaît comme un maillon essentiel de la transition énergétique à condition d'avoir une production décarbonée (moins de 5% actuellement). Il s'agit d'un vecteur énergétique très versatile qui peut permettre de stocker massivement les énergies renouvelables intermittentes. Les applications de l'hydrogène « vert » sont multiples et vont de la substitution de l'hydrogène issu du gaz naturel dans le secteur industriel jusqu'au transport, y compris lourd (bus, trains, camions). A titre d'exemple, 24 kg d'essence sont nécessaires pour qu'une voiture à moteur thermique moderne parcourt 400 km, alors que la même distance peut être parcourue avec seulement 8 kg d'hydrogène. De plus, le moteur ne rejette que de la vapeur d'eau. Les gouvernements du monde entier appellent à investir dans l'hydrogène dans le cadre de leurs plans de relance post COVID-19. En effet, les technologies de l'hydrogène peuvent renforcer notre économie pour être plus robuste, plus résiliente et plus durable.

Une application prometteuse de l'hydrogène repose dans l'utilisation d'hydrogène dans les processus industriels de transformation des matériaux. De plus, les défis dans l'utilisation de l'hydrogène concernent aussi son stockage et son transport. Le projet de club étudiants - chercheurs « Matériaux métalliques pour la filière hydrogène » du programme ORION (Oser la Recherche durant la FormatION) de Lorraine Université d'Excellence s'inscrit directement dans ce contexte. Trois piliers seront traités :

- (i) les métaux pour le stockage de l'hydrogène ;
- (ii) le transport et la protection contre la fragilisation induite par l'hydrogène ;
- (iii) l'utilisation de l'hydrogène pour l'élaboration propre des métaux.

2 Aspects pédagogiques et clubs étudiants / chercheurs du programme ORION

Le dispositif ORION a été retenu le 1er juillet 2020 dans le cadre de l'appel à projets « Structuration de la formation par la recherche dans les initiatives d'excellence » (SFRI) du Programme d'Investissement d'Avenir (France 2030). Il doit permettre de mieux sensibiliser et former les étudiants à la recherche en leur offrant un environnement plus diversifié. L'exposition à la recherche prend différentes formes : cours dédiés, travaux pratiques, écoles thématiques de recherche, ateliers d'innovation, clubs multidisciplinaires étudiants-chercheurs, stages en laboratoires à l'université, immersion à l'international dans les structures de recherche de nos partenaires académiques.

Le club de sciences « Matériaux métalliques pour la filière hydrogène » s'appuiera sur une partie du consortium déjà établi dans le cadre du projet IMPACT ULHyS. En effet, au sein de l'Université de Lorraine, la communauté scientifique travaillant dans le domaine de l'hydrogène a commencé à se fédérer à partir de 2017 pour proposer une approche systémique de la filière. Ce club s'appuiera également sur le projet FRCR HyPE qui vise le déploiement de plateformes techniques communes autour de cette thématique.

Le dispositif ORION est construit dans une logique de progression allant de la découverte de la recherche (BUT2), puis sa pratique (de BUT3 à BAC+5) pour devenir des chercheurs (PhD). Mais les originalités principales d'ORION sont d'une part l'accent mis sur la pratique de la recherche et d'autre part la volonté de mixer les publics (Facultés et Ecoles d'ingénieurs), les niveaux (du BAC+2 au doctorat), les disciplines et les nationalités pour créer une communauté d'étudiants inscrite dans une trajectoire recherche. Le projet « Matériaux métalliques pour la filière hydrogène » s'appuiera sur plusieurs formations où sont impliqués les enseignants chercheurs travaillant sur différents aspects de cette thématique. Ouvert en pratique à l'ensemble des étudiants de l'université de Lorraine, il impliquera en particulier les étudiants du BUT (parcours « Innovation pour l'industrie » et « Conception et production durable », IUT de Metz), les étudiants du master Science et Génie des Matériaux (Faculté des Sciences et Techniques, Nancy) ainsi que des élèves des écoles d'ingénieurs : (i) ENIM, Metz, pour le parcours MAPI « Matériaux Avancés Procédés Innovants » et (ii) EEIGM, Nancy, pour les options « Matériaux pour l'énergie » et « Matériaux pour les mobilités ».

L'animation sera structurée autour de plusieurs axes :

- Séminaires invités par des intervenants nationaux et Internationaux.
- Projets tuteurés qui seront proposés aux étudiants en début d'année. Ils seront pilotés par les chercheurs doctorants.
- Séminaires qui seront proposés par les étudiants de la cohorte ORION (version courte) et des chercheurs doctorants (version longue) dans le but de développer une culture générale scientifique.
- Vulgarisation scientifique par des visites dans des lycées et collèges lorrains seront organisées afin de présenter le monde universitaire et le monde de la recherche aux élèves mais aussi pour échanger autour de ces sujets sociétaux.

3 Quelques aspects de la problématique scientifique

Certains aspects de la « filière hydrogène » liés aux matériaux métalliques font partis de l'axes de recherche « procédés métallurgiques innovants » soutenus par le Laboratoire d'Excellence DAMAS (Design des Alliages Métalliques pour l'Allègement des Structures).

3.1 Stockage de l'hydrogène solide sous forme d'hydrures métalliques

Outre sa production « verte », un des freins au déploiement massif de l'hydrogène comme vecteur énergétique est lié à son stockage. Sous forme gazeuse, le stockage hyperbare (700 bar) nécessite des réservoirs à haute résistance mécanique. Sous forme liquide, il faut refroidir l'hydrogène en dessous de - 252 °C dans des réservoirs super-isolés thermiquement. Ces méthodes hyperbares et cryogéniques ont donc un coût énergétique important et posent, en cas de fuite, des contraintes de sécurité majeures. Moyennant une aptitude à former des hydrures métalliques à la stabilité adéquate, plusieurs métaux et composés intermétalliques doivent pouvoir être utilisés pour un stockage solide à forte capacité volumique dans des réservoirs très sûrs et peu consommateurs d'énergie. Plusieurs orientations de la recherche sur le stockage solide sont nécessaires et concernent par exemple : la nature et la mise en forme des matériaux de stockage, « l'activation » de ces matériaux et la conception associée des réservoirs [1].

3.2 Transport de l'hydrogène et protection contre la fragilisation

L'hydrogène, du fait de sa petite taille, peut être facilement absorbé dans un métal, y diffuser et également y rester piégé. Si ces mécanismes peuvent être exploités pour le stockage en phase solide, il n'en reste pas moins que ce piégeage conduit à de la fissuration très

problématique pour la conception de systèmes utilisant des métaux. Un autre enjeu stratégique concerne le transport de l'hydrogène. En effet, l'Europe envisage la mise en place et/ou la conversion de plus de 11000 km de pipelines transportant de l'hydrogène à l'horizon 2030. Par conséquent, plusieurs approches sont proposées pour limiter cette fragilisation ou protéger par des revêtements les pièces sensibles.

3.3 Utilisation de l'hydrogène pour l'élaboration propre des métaux

L'efficacité énergétique des process de combustion à très haute température est un enjeu primordial pour un certain nombre de secteurs : métallurgie, cimenterie, papeterie, etc. Depuis la révolution industrielle, ces industries se sont tournées vers des carburants fossiles, dans un premier temps solide avec le charbon, puis liquides et gazeux avec les gisements pétroliers et gaziers ... tous fort générateurs de CO₂. Ainsi, la sidérurgie est responsable d'environ 7% des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Une application bien moins répandue mais tout aussi prometteuse de l'hydrogène repose dans l'utilisation d'hydrogène dans ces processus industriels, en particulier pour la réduction des minerais [2].

4 Conclusions

L'hydrogène moléculaire H₂, qui n'existe pratiquement pas dans la nature et dont l'énergie de combustion est trois fois supérieure à un litre d'essence, est considéré comme un possible vecteur d'énergie, notamment pour la valorisation des énergies renouvelables non émettrices de CO₂. Encore faut-il que l'on sache le produire, le transporter et le stocker proprement. La filière hydrogène présente un fort potentiel de création d'emplois : de 4000 emplois aujourd'hui à plus de 100 000 à l'horizon 2030. Cette filière en plein essor doit faire l'objet d'une attention particulière notamment pour former les talents et ressources nécessaires à son bon développement.

Références

- [1] K. Edalati, E. Akiba, W. J. Botta, Y. Estrin, R. Floriano, D. Fruchart, T. Grosdidier, Z.J. Horita, J. Huot, H.W. Li, H.J. Lin, Á. Révész and M. J. Zehetbauer, *Impact of Severe Plastic Deformation on Kinetics and Thermodynamics of Hydrogen Storage in Magnesium and Its Alloys*, J. Mater. Sci. Technol. 146, 2023, p. 221-239.
- [2] J.P. Birat, F. Patisson, O. Mirgaux, *Hydrogen Steelmaking. Part 2 : competition with other zero-carbon steelmaking solutions - geopolitical issues*, Matériaux & Techniques, 109, 2021, p. 307-311.

“Mener l’enquête” : Les Saé comme espace d’accueil des méthodologies de recherche en SHS : Cas particulier de l’étude des pratiques de lecture de jeunes sur plateformes numériques.

Romain Orioli¹ Florence Rio²

romain.orioli@univ-lille.fr florence.rio@univ-lille.fr

¹ IUT, Université de Lille

² IUT, Université de Lille

Laboratoire Geriico (Groupe d’études et de Recherche Interdisciplinaire en Information et Communication), UR 4073

Thèmes – SHS - Communication

Résumé – *Cet article présente le protocole et les résultats d’une méthodologie pédagogique appliquée à partir d’un projet de recherche. Envisageant les SAé comme une opportunité pour renforcer la pédagogie par la recherche, notre travail a consisté à intégrer les étudiants de BUT Information et Communication à un projet de recherche (« Lecture adolescente et plateformes numériques ») porté par le laboratoire Geriico et financé par l’Inspé des Hauts de France. Ce cadre pédagogique nous a permis de favoriser l’acquisition des compétences structurant le diplôme. Ainsi, les étudiants ont pu construire un protocole méthodologique d’enquête, administrer des questionnaires et analyser les données recueillies dans une perspective scientifique. Plus largement, cet article présente la façon dont les étudiants ont été sensibilisés à l’exigence méthodologique de tout travail de recherche, et comment ils ont pu s’investir dans un travail concret et précis menés dans les conditions réelles de la recherche, ce qui a joué comme un facteur motivationnel certain.*

Mots-Clés – *Pédagogie par la recherche, Plateformes numériques, Pratiques de Lecture, Adolescents et jeunes adultes.*

1 Introduction

Conformément aux enjeux de professionnalisation des étudiants inscrits en IUT, nous avons toujours, au département Information et Communication de l'IUT de Lille, souhaité créer des liens et des partenariats avec le monde socio-économique afin de permettre aux étudiants de mettre en application leurs compétences dans des situations concrètes du monde professionnel.

La formation à l'étude de publics et aux techniques d'enquête, qui constitue une partie de notre programme national, a toujours été un terrain privilégié de ces mises en situation professionnelle. Nous travaillons par exemple actuellement avec les étudiants de 2^{ème} année à la réponse à une commande réelle de l'association nationale des éditeurs indépendants portant sur l'étude des relations libraires-éditeurs indépendants. Les résultats de cette enquête seront présentés par les étudiants lors des assises de l'édition indépendante en février 2023. Nous avons de même, par le passé, répondu à la commande de l'association des libraires indépendants des Hauts de France concernant les programmes de fidélisation de la clientèle, ou encore interrogeant les rapports de proximité des clients avec leur librairie, etc.

Forts de ces expériences, nous avons saisi la réforme du BUT comme une réelle opportunité et un accélérateur de nos pratiques. En effet, en déployant une structuration par projet et en intégrant des heures d'encadrement et de travail en autonomie, les Saé offrent désormais un cadre de travail propice au développement de partenariats plus ambitieux et en particulier liée à la recherche. Nous avons ainsi cette année intégré nos étudiants de première année au protocole d'un projet de recherche financé par l'Inspé des Hauts de France.

2 Genèse du projet

Le projet de recherche "Lecture adolescente et plateformes numériques" est un projet de recherche porté par le laboratoire Geriico (UR 4073) et financé par l'appel "Recherche 2022-2024" de l'Inspé de l'académie de Lille - Hauts de France. Il trouve son origine dans un travail de recherche (Rio, Tadier, 2022) et s'appuie sur l'étude 2022 du CNL (Centre National du Livre) qui montre que les « jeunes » sont de plus en plus nombreux à lire en numérique grâce à leurs smartphones. Ce projet souhaite ainsi questionner l'espace de lecture du « lire numérique » au sein d'une « économie de plateformes » basée sur des modes de production industrialisés et des stratégies de valorisation des contenus (Bullich, 2019 : 33, 20). Il a pour objectif d'interroger l'efficience de ces plateformes numériques en tant que nouvel espace de l'offre de littérature jeunesse dont les instances éducatives pourraient se saisir. Par sa "diversité" et son "accessibilité", cette "littérature en ligne" semble en effet

séduire de plus en plus de « jeunes » qui y trouvent un espace intime autant qu'un espace de développement de leurs relations sociales. Il s'agit, par ce projet, de travailler à la construction d'un état des lieux quantitatif et qualitatif, au sein des Hauts-de-France, de cette pratique culturelle en développement.

3 De la recherche à la Saé "enquête" : Objectifs et Implication des étudiants dans le projet

Travailler dans un cadre pédagogique inséré dans un projet de recherche financé offre un double intérêt : d'une part cela est vecteur d'une forte motivation pour les étudiants qui y trouvent un moteur d'implication plus important que dans le cas d'une pratique uniquement pédagogique ; d'autre part, cela offre l'opportunité de sensibiliser les étudiants à l'importance d'un cadre scientifique et à l'exigence de la construction d'hypothèses de recherche. La SAé « Enquête sur un objet infocommunicationnel » du BUT 1 Information et Communication a ainsi été le lieu d'accueil d'une réflexion théorique aussi bien que celui de la mise en œuvre d'une méthodologie scientifique. Les différents moments de la recherche ont été reproduits avec les étudiants afin de les sensibiliser au travail méthodique du chercheur et aux difficultés afférentes à la mise en place d'un protocole de recherche :

- (1) Après une phase d'analyse (en particulier du concept de plateforme), de recherche bibliographique et d'étude de terrain,
- (2) Il a été demandé aux étudiants de construire un protocole d'enquête en justifiant le choix des outils quantitatifs et qualitatifs les plus adaptés à la récolte de l'information nécessaire (questionnaire, entretiens, observation) mais aussi la construction de ceux-ci et l'architecture du plan d'administration (notamment les choix d'échantillonnage). Cette étape permet notamment aux étudiants d'explorer les multiples possibilités d'usage conjoint des méthodes qualitatives et quantitatives (Dietrich, Loison, Roupnel, 2010).
- (3) Les enseignants impliqués dans ce projet ont uniformisé et validé les protocoles soumis par les étudiants. Ces derniers ont ensuite été répartis en deux sous-groupes (groupe d'étude de l'échantillon « lycéens et groupe d'étude de l'échantillon « étudiants ») et ont commencé à « mener l'enquête » : rédaction et administration du questionnaires, et réalisation des grilles d'entretiens et passation des entretiens. Il est intéressant de constater que durant cette phase, les étudiants se sont pris au jeu de la recherche, cherchant les meilleures formulations pour interroger les futurs répondants. Ils ont su développer un regard critique sur le protocole de recherche initial et puiser dans leurs propres

pratiques pour alimenter cette recherche, développant de ce fait une forme de réflexivité et d'auto-ethnographie très riche pour le projet en cours.

- (4) La dernière phase correspond à l'exploitation des données quantitatives et qualitatives récoltées afin de répondre à la problématique de recherche posée à l'issue de la première phase. L'analyse en cours menée par les étudiants devra permettre de mesurer le taux de pénétration de ces nouveaux espaces de lecture, de favoriser la connaissance de ces pratiques de lecture et de leur diversité, de conduire (ou non) à une ou des typologie(s) des usagers de ces plateformes et enfin d'identifier des facteurs transversaux qui permettraient d'établir une ou des typologies de ces « lecteurs numériques ». Dans ce cadre, les étudiants sont initiés à l'utilisation d'un logiciel de traitement d'enquête (*Sphinx*). L'utilisation d'un tel logiciel favorise l'apprentissage par essai et erreur concernant le choix des variables à analyser et à croiser pour répondre aux interrogations posées par l'étude. Elle permet également de renforcer la sensibilisation des étudiants à l'interprétation et à la généralisation de données obtenues à partir d'un échantillon et à l'importance de l'utilisation de tests statistiques.

Ce travail très exigeant en rigueur pour les étudiants permet de mettre en œuvre et d'acquérir des objectifs structurant du BUT Information et Communication parmi lesquels figurent les apprentissages critiques suivants : *Réaliser une veille informationnelle en vue de préparer un dispositif d'information-communication ; Appréhender le rôle essentiel des technologies numériques dans les médiations sociales et culturelles ; Identifier et sélectionner les types de ressources et de contraintes pour un projet ; Analyser les besoins des parties prenantes pour adapter les solutions proposées.*

4 Apport pour la recherche

Il est à noter que pour que la recherche dans le cadre de la SAÉ puisse se dérouler dans une temporalité dépendante du calendrier universitaire, nous avons fait le choix de circonscrire la participation des étudiants du BUT information et Communication à un public particulier de ces plateformes. En effet, alors que le projet de recherche partenaire considère les « jeunes » dans une acception large allant de l'adolescence à l'adulthood (soit de 11 à 25 ans environ, du collège aux études supérieures), les étudiants ont, eux, travaillé uniquement sur le public étudiant et sur le public lycéen soit sur les 15-25 ans en études secondaires ou supérieures.

Parallèlement à ce travail des étudiants, une équipe de recherche du laboratoire travaille de façon concomitante sur un échantillon d'élèves âgés de 10 à 15 ans et

scolarisés au niveau collège dans les Hauts de France.

Le protocole méthodologique entre ces différentes études ayant été uniformisé, les données recueillies par les étudiants vont pouvoir enrichir efficacement les données du travail de recherche financé.

Elles permettront en particulier d'affiner les hypothèses posées par la recherche quant à l'installation progressive et massive des pratiques de lecture sur plateformes chez ce public jeune. En effet, ces plateformes déploient des stratégies qui « consiste[nt] à la fois à construire des marchés de niche relativement étanches, en ciblant des tranches d'âge de plus en plus précises, et à stimuler l'imitation des jeunes par les autres catégories de la population » (Jehel, 2022 : 21). Observer conjointement dans un temps court, le spectre de la jeunesse (de 10 à 25 ans) permettra de mesurer cet effet d'imitation et les conditions de l'installation de ces pratiques.

5 Conclusions

La pédagogie par la recherche telle que nous l'avons mise en place au sein du département Information et Communication dans le cadre de cette étude répond à un double enjeu :

Celui de la recherche qui réfléchit à l'industrialisation de la lecture par le numérique devenant un possible espace pédagogique pour l'enseignement de la littérature dans le secondaire,

Celui de l'introduction à la recherche en IUT qui au-delà de l'acquisition des compétences liées au diplôme, cherche à développer, le plus tôt possible, une capacité d'analyse et de réflexion des étudiants d'autant plus pertinente qu'elle répond en partie à l'objectif de poursuite d'études de 50% des étudiants à l'issue du BUT.

6 Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à l'INSPE des Hauts de France pour ce financement. Ils adressent également leur remerciement à Elsa Tadier, chercheuse en sciences de l'information et de la communication (Université de Paris, Laboratoire Cerilac) qui contribue au volet recherche de ce projet.

Références

- Barbagelata, Pierre, Inaudi, Aude et Pelissier, Maud. « Le numérique vecteur d'un renouveau des pratiques de lecture : leurre ou opportunité ? », *Études de communication*, 4, 2014.
- Bullich, V. (2019). *Industrialisation, marchandisation et médiatisation des expressions : le modèle des plateformes numériques* (HDR). Université de Grenoble Alpes.
- Centre National du Livre. (2022). *Les Jeunes français et la lecture*, Étude Ipsos.
- Dietrich-Ragon, Pascale, Loison-Leruste, Marie, Roupnel-Fuentes, Manuella. « Articuler les approches quantitative et qualitative. », In Paugam Serge (dir.). *L'enquête sociologique*, Presses universitaires de France, Coll. Quadrige, pp. 207-222, 2010.

Grimault-Leprince, A. & Mell, L. (2022). Lire est-il rentable scolairement ? Lectures traditionnelles, lectures numériques et réussite scolaire. *Sociologie*, 13, 243-259. <https://www.cairn.info/revue--2022-3-page-243.htm>.

Jehel, S. (2022), *L'adolescence au cœur de l'économie numérique. Travail émotionnel et risques sociaux*. Bry sur Marne, INA Éditions.

Rabot, Cécile. « Ce que le numérique fait à la lecture », *Biens Symboliques / Symbolic Goods* [En ligne], 7 | 2020, mis en ligne le 20 novembre 2020, consulté le 19 janvier

Rio, Florence et Tadier, Elsa. (2022) « Pratiques adolescentes et smartphone : quand les plateformes éditoriales interrogent la culture du livre et de la lecture », *MEI : Livre, Numérique et Communication*, #52, à paraître.

Raccrocher les futurs décrocheurs : Appropriation, compréhension et mise en œuvre des dispositifs « oui-si »

Sonia Lefeuvre¹

Sonia.lefeuvre@univ-lyon2.fr

¹ IUT, Lumière Lyon 2

Laboratoire Education, Cultures et Politiques, université Lyon 2

Thèmes – *Sciences Humaines et Sociales*

Résumé – *A travers les dispositifs "oui-si" présentés comme des "aides à la réussite", nous questionnons la manière dont les acteurs et actrices universitaires se les approprient, les font exister ou ce qu'ils en pensent. Au-delà, nous tentons d'analyser les raisons de leur investissement qui n'est pas sans répercussions sur la transformation de l'université aujourd'hui. En effet, l'acceptation de ce dispositif par les composantes, pourrait donner l'illusion d'œuvrer pour l'égalité sociale et la réussite des étudiants, alors même qu'elles participent à un mécanisme de dépolitisation de la question de l'inégalité dans l'enseignement supérieur.*

Mots-Clés – *réussite des étudiants, politiques de l'enseignement supérieur, pédagogie universitaire*

1 Introduction

Au sein de l'enseignement supérieur français, des dispositifs d'aide à la réussite sont mis en place. Mais depuis la loi ORE, ces derniers sont corrélés à l'attribution de places au sein de dispositifs couramment nommés « oui-si ». L'université française devenue sélective, permet aux commissions d'examen des vœux d'attribuer quelques places à des candidats dont les capacités de réussite « semblent » moins assurées. La proposition d'acceptation sur Parcoursup est conditionnée à l'engagement des candidats dans un dispositif d'aide à la réussite. Les candidats reçoivent la réponse : « oui-si » via Parcoursup.

Dans cette communication¹ nous essaierons de montrer la manière dont les acteurs universitaires s'approprient les dispositifs « oui-si » et comment leur compréhension du dispositif transforme la politique universitaire. Ici, la « réussite » de ces dispositifs n'est pas l'objet de la proposition, même si nous savons par ailleurs que leur effet global sur la présence aux examens et la moindre propension au décrochage, n'est pas significatif².

Méthodologie : Dans le cadre de cette étude nous avons notamment mobilisé des méthodologies reposant sur des entretiens menés auprès de différents acteurs engagés dans les programmes « oui, si » de nombreux établissements d'enseignement supérieur. Selon le type d'organisation universitaire, et selon le degré de centralisation du dispositif « oui, si », il a fallu parfois trouver un interlocuteur unique, et parfois descendre au niveau des filières et des formations et multiplier les échanges. Au final, nous avons réalisé puis analysé vingt-quatre entretiens semi-directifs d'acteurs et actrices de la gouvernance d'universités mais aussi d'enseignants et enseignantes chercheurs et d'ingénieurs pédagogiques plus ou moins impliqués dans les processus de mise en place du dispositif « oui-si » de neuf universités. Leurs discours ont été soumis à une analyse à partir du cadre de la théorie des conventions (Boltanski et Thévenot, 1991), qui nous a permis d'identifier trois idéaux-types.

Ces idéaux-types aident à penser les modes de justification du discours des acteurs quand nous questionnons les perceptions et les actions autour des dispositifs « oui-si ». Après la présentation de ces trois

¹ Cette proposition de communication s'inscrit dans le cadre d'une recherche collective financée par le MESRI sur les dispositifs oui-si. Choix, Orientation, Motivation, Parcours, Accompagnement, Réussite des Étudiant.es : Les Étudiant.es « Oui-si » (COMPARE).

² Cf. rapport Compare.

idéaux-types, la seconde partie de cette communication propose une réflexion sur la manière dont la mise en œuvre du dispositif « oui-si » fait évoluer les représentations du rôle de l'université.

2 La description des idéaux-types

2.1 Les innovateurs : des dispositifs pour améliorer l'efficacité universitaire.

Une première catégorie rassemble des acteurs et des actrices investis dans les dispositifs « oui-si » y voyant l'opportunité de mettre en place ce qui est aujourd'hui couramment qualifié d'innovation pédagogique. Cette catégorie que l'on a nommée les « innovateurs » reprend les termes de la cité industrielle : l'efficacité, la performance, l'innovation, le pari sur l'avenir, la réponse utile aux besoins (Thevenot et Boltanski, 1991). Ici, on retrouve plus souvent des personnes dont les missions sont justement d'installer ces dispositifs. Plus souvent, il s'agit de contractuels recrutés au sein de services transverses comme les services universitaires de pédagogie ou bien d'acteurs de la gouvernance de l'université. Enfin, ce qui est important pour ce premier groupe n'est pas tant la réussite des étudiants et des étudiantes (même s'il leur paraît important de pouvoir mesurer l'efficacité des dispositifs) que de donner l'image d'une université efficace et allant de l'avant.

2.2 Les critiques : des dispositifs pour « enrôler » les universitaires à la politique de sélection.

Les acteurs et actrices qui se retrouvent dans la deuxième catégorie sont critiques à l'égard des dispositifs « oui-si » non pas parce qu'ils ou elles seraient opposées à la réussite des étudiants ou dans une conception élitiste de l'université française, mais parce qu'ils se méfient d'un dispositif qui va les obliger à accepter le principe général de sélection à l'université. C'est le refus de la sélection à l'université comme principe au nom de l'égalité des chances qui prime dans les discours de cet idéal type. Leur logique d'action relève de la cité civique où on accède à la grandeur en sacrifiant les intérêts particuliers au nom de l'intérêt général et de l'égalité entre les êtres (Boltanski et Thévenot, 1991).

2.3 Les bienfaiteurs : des dispositifs pour aider les étudiants méritants.

Dans ce dernier groupe, les acteurs et actrices accordent de l'importance à la relation de proximité qui va se tisser entre eux et les étudiants bénéficiant des dispositifs. On a ici des discours sur une relation quasiment parentale qui se construirait entre les étudiants et les enseignants investis dans ces dispositifs. Pour ce groupe, il est important d'aider celles et ceux qui en ont besoin et qui le méritent. On retrouve les items du monde domestique où

l'attention aux autres, surtout aux « plus petits », les relations de proche à proche sont valorisées (Boltanski et Thévenot, 1991). Cette catégorie réunit plus souvent les enseignants ou les responsables investis au plus près des dispositifs d'aide. Leur engagement incarne l'accomplissement de la promesse universitaire : l'ouverture sociale de l'enseignement supérieur. Toutefois cette ouverture sociale ne se réalise pas sans condition. Doivent bénéficier de ces dispositifs celles et ceux qui, à leurs yeux, sont « méritants ».

3 Les dispositifs « oui-si » : l'illustration du changement de politique universitaire

L'appartenance à telle ou telle cité dans les idéaux-types décrits précédemment permet de comprendre la perception et les logiques d'action des acteurs vis-à-vis des dispositifs « oui-si ». On identifie les arguments qui risquent de créer des tensions. Les innovateurs pensent la mise en place du dispositif comme un moyen de rendre l'université efficace, selon les critiques, le dispositif est un procédé pour enrôler les universitaires dans le système de la sélection à l'entrée et, pour les bienfaiteurs, le dispositif permettrait à l'université de jouer son rôle d'ascenseur social.

Ces dispositifs laissent croire aux étudiants que la réussite universitaire ne tient qu'au mérite scolaire (avec des remises à niveau, des tutorats et des outils pédagogiques adéquats les étudiants compenseront leurs handicaps académiques antérieurs) et aux universitaires que l'université n'abandonne pas sa mission de démocratisation³.

Cette dimension idéologique s'accompagne d'une responsabilisation et individualisation des parcours. On donne seulement aux plus « méritants ». En adoptant cette conception du rapport aux étudiants les acteurs et actrices de l'enseignement supérieur adoptent et transmettent, sans doute, sans en avoir complètement conscience une conception libérale de la conduite de ses études et du rôle de l'université *in fine*. La question qui au fond nous anime réellement dans cette étude est le constat du changement de paradigme politique et philosophique dans l'université française. Comment à partir de descriptions individuelles des manières de faire et de penser un dispositif, est-t-il possible de comprendre un phénomène structurel, un changement historique ?

4 Conclusion

Si les discours de nos enquêtés font état d'une grande hétérogénéité dans les interprétations et les pratiques de

mise en œuvre des dispositifs « oui-si », au final ils se rejoignent fréquemment dans une même conception méritocratique de l'université d'aujourd'hui. Ces dispositifs d'aide renforcent la responsabilité individuelle de la réussite ou de l'échec aux étudiants et laissent croire que ces mesures locales et ponctuelles vont pouvoir gommer les inégalités scolaires de départ qui s'avèrent pourtant les plus prédictives de la réussite dans l'enseignement supérieur (Morlaix et Suchaut, 2012).

Bibliographie

- Annot, E. (2020). « Un enseignement supérieur juste est-il possible ? », *Éducation et socialisation*, 58 2020.
- ASES. (2015). *Des Etats-Unis à l'Europe, Universités en régime néolibéral*. Bulletin de l'ASES, 42
- Beaud, S. et Millet, M. (2021). *L'université, pour quoi faire ?* La vie des idées-PUF.
- Bodin, R., Mengneau, J. et Orange, S. (2020). Adhésion enchantée et aléas universitaires : les effets ambivalents de la sélection à l'Université. *L'Année sociologique*, 70(2), 443-467.
- Boltanski L. et Thévenot L. (1991). *De la justification, les économies de la grandeur*. Gallimard.
- Cour des comptes, (2020) *Un premier bilan de l'accès à l'enseignement supérieur dans le cadre de la loi Orientation et Réussite des Etudiants*.
- Chauvel S. et Huguée C., (2019) « Enseignement supérieur : l'art et les manières de sélectionner », *Sociologie* n°2, vol. 10.
- Dutercq, Y. & Masy, J. (2018). Les classes préparatoires aux grandes écoles : comment concilier compétitivité internationale et proximité démocratique ? *Éducation et sociétés*, 41, 27-42.
- Dutercq, Y. Michaut, C., Troger, V. (2018). *Éducation à l'orientation : comment construire un parcours d'orientation tout au long de la scolarité ? rapport CNECSO*, décembre 2018.
- Frouillou, L., Pin, C. et van Zanten, A. (2019). « Le rôle des instruments dans la sélection des bacheliers dans l'enseignement supérieur. La nouvelle gouvernance des affectations par les algorithmes ». *Sociologie*, 10(2), 209-215.
- Huguée C., et Poullaouec T. (2022) *L'université qui vient. Un nouveau régime de sélection scolaire*, Paris, Raisons d'agir, 184 p., ISBN : 9791097084172.
- Kennel, S. (2020). Les cordées de la réussite, intentions et effets d'un dispositif pour l'égalité des chances, *Éducation et socialisation*, 58

³ Comme la médiatisation des politiques d'ouverture sociale des CPGE peut laisser croire qu'elles ont répondu au « projet républicain de l'égalité des chances ». (Dutercq et Masy, 2018).

Les candidats et les conseillers municipaux européens aux élections municipales françaises

David Gouard

david.gouard@univ-tlse2.fr

IUT de Figeac, Université Toulouse Jean Jaurès
CERTOP, UMR 5044

Thèmes –SHS –

Résumé –

Rares sont les citoyens européens résidant dans un pays de l'Union européenne dont ils ne portent pas la nationalité à faire usage du droit d'éligibilité aux élections locales accordé par le Traité de Maastricht de 1993. Si la France ne fait pas exception, elle constitue néanmoins un terrain de recherche idéal pour mener une investigation de grande ampleur sur la diversité avec laquelle les résidents européens se saisissent de ce droit. Cette recherche se donne pour objectif d'identifier les principaux facteurs sociaux et motivations individuelles favorisant la candidature des citoyens européens lors des dernières élections municipales françaises. Elle repose sur une diversité de méthodes (analyse statistique de la base de données nominative de l'ensemble des candidats et des élus, entretiens semi-directifs auprès de candidats européens lors des dernières élections municipales). Les premiers résultats montrent une importante inégalité dans la propension à candidater et à être élu selon les groupes nationaux considérés, mais aussi un effet propre au contexte local. Ils montrent également que les européens les plus investis dans leur fonction de conseillers municipaux témoignent d'une proximité avec la citoyenneté française.

Mots-Clés : citoyenneté européenne, élections municipales, candidats

1 La France : pays d'immigration européenne et vivier de candidats et d'élus européens

La transnationalisation des droits électoraux constitue un phénomène majeur affectant le fonctionnement des démocraties contemporaines (Bauböck [1]). De ce point de vue, l'espace politique européen offre un excellent terrain d'observation. En effet, dans la partie du Traité de Maastricht de 1993 consacrée à la « citoyenneté de l'Union », plusieurs droits politiques ont été accordés aux citoyens des États membres, parmi lesquels le droit d'éligibilité aux élections européennes et aux élections locales dans l'État membre où ces ressortissants européens résident, et ce dans les mêmes conditions que les ressortissants de cet État (Shaw [2] ; Strudel [3]).

En France, ces nouveaux droits politiques accordés à une partie des étrangers ont profondément remis en cause l'association historique entre citoyenneté et nationalité (Duchesne [4]). C'est d'ailleurs ce qui explique le caractère tardif de leur mise en application et le fait que la France ait opté pour une définition restrictive de l'éligibilité des citoyens européens aux élections municipales (Strudel [5]). Si ces derniers peuvent en effet être élus en tant que conseillers municipaux, ils ne peuvent en revanche pas exercer de mandats exécutifs, tels que celui de maire ou d'adjoint-au-maire.

Depuis les élections municipales de 2001, on note une augmentation régulière de nombre de candidats et d'élus européens aux élections municipales françaises. Pour autant, lors des dernières élections municipales, les ressortissants européens résidant en France avaient 3,5 fois moins de probabilités d'être candidats que les citoyens français, et cinq fois moins de chances d'être effectivement élus.

À l'heure actuelle, aucune étude d'envergure n'a encore été menée en France sur les candidats et conseillers municipaux européens. Le terrain français présente pourtant un intérêt scientifique majeur. Cela tient d'abord à la grande diversité des populations européennes résidentes, tant sur le plan des origines nationales que des conditions historiques et contemporaines d'intégration à la société française. Deuxièmement, en raison du très grand nombre de conseillers municipaux en France (510 392), on recense un nombre relativement important de candidats et de conseillers municipaux européens. En 2020, 5 854 s'étaient portés candidats. Parmi eux, 2 642 occupent aujourd'hui un poste de conseiller municipal. Ces effectifs importants offrent la possibilité de procéder à des analyses statistiques permettant de tester dans un même modèle plusieurs variables explicatives. Enfin, l'administration électorale française met à disposition des matériaux d'études particulièrement riches qui n'ont pratiquement pas d'égal en Europe pour étudier le profil social et politique des candidats et des élus.

2 Saisir la citoyenneté européenne en actes

L'objectif de cette recherche est de dépasser la seule approche institutionnaliste, pour observer empiriquement les conditions à partir desquelles ces citoyens européens se saisissent du droit d'éligibilité qui leur est offert (Brändle, [6])¹. Qu'il s'agisse des facteurs explicatifs et des motivations individuelles concourant à l'engagement politique ou des mécanismes formels et informels d'apprentissage du rôle d'élus, on peut en effet penser qu'il existe des similitudes avec ce qui caractérisent les citoyens français, mais également certaines spécificités. Cette recherche s'organise autour de trois principaux volets : (1) établir le profil social et politique des candidats et des conseillers municipaux européens en France ; (2) sonder les motivations présidant à leur candidature ; (3) renseigner leurs conditions d'apprentissage au rôle de conseiller municipal.

Pour répondre à ces questions, quatre principaux dispositifs d'investigation sont proposés. Il s'agit tout d'abord de procéder à une analyse statistique des informations individuelles figurant sur le Registre National des Élus (RNE) et sur la liste nominative des candidats aux élections municipales de 2020 mis en ligne par le Ministère de l'Intérieur. Au cours du printemps 2023, il s'agira également de diffuser un questionnaire en ligne à l'ensemble des candidats européens lors des dernières élections municipales, qu'ils aient ou non été effectivement élus. Ce questionnaire permettra de compléter les informations relatives à leurs caractéristiques biographiques (durée de résidence en France, niveau de diplôme, formes et degré de leur intégration en France, etc.) et de sonder les motivations à leur candidature en 2020. Par ailleurs, une centaine d'entretiens semi-directifs seront réalisés auprès de conseillers municipaux européens et de candidats non élus à l'issue des élections municipales de 2020, en ciblant prioritairement quatre nationalités contrastées sur le plan de leur intégration et de leur niveau de participation politique en France : les Belges, les Espagnols, les Portugais et les Roumains. Enfin, à l'occasion des élections municipales de 2026, un suivi ethnographique sera réalisé dans quelques communes significatives de la présence et de l'engagement politique de certains citoyens ou groupes de citoyens européens.

3 Résultats préliminaires : hiérarchie européenne et ressorts à l'engagement politique local

À ce stade de l'étude, certains résultats peuvent d'ores et déjà être avancés. Tout d'abord, sur le plan de la propension à candidater, on peut schématiquement distinguer trois sous-ensembles d'européens selon leur région européenne d'origine : d'abord, les ressortissants des pays d'Europe du Nord, lesquels présentent des taux de candidature relativement importants, puis les citoyens issus des pays méditerranéens, et enfin les citoyens des pays

d'Europe centrale et orientale. Cette hiérarchie des propensions à candidater se trouve par ailleurs corroborée par une inégalité dans la réussite électorale. Finalement, en prenant les nationalités situées aux pôles les plus extrêmes, en 2020, un Néerlandais avait 13 fois plus de chances de se porter candidat qu'un Roumain, et 45 fois plus de chances de siéger effectivement dans un conseil municipal.

Cette inégalité d'engagement et de réussite politiques selon les différentes nationalités considérées est surtout le résultat d'importants contrastes tant sur le plan des ressources socioéconomiques que des parcours migratoires. C'est ainsi qu'à côté d'un effet proprement lié à la nationalité, plusieurs variables conditionnent la propension à candidater et à être élus, qu'il s'agisse, par exemple, de l'âge, de la catégorie socioprofessionnelle ou encore de la taille de la commune de résidence. Le questionnaire permettra prochainement de tester d'autres facteurs explicatifs, telle que la durée de résidence en France, le niveau de politisation ou encore le degré d'acculturation à la vie politique française.

De plus, la trentaine d'entretiens réalisés dans le cadre de la phase exploratoire menée en 2022 auprès de conseillers municipaux européens a permis de mieux comprendre certains ressorts de leur engagement politique. Ainsi, bien que l'on observe toute une série de phénomènes classiques que l'on retrouve également pour les citoyens français (gratifications symboliques à l'engagement et à la prise de responsabilités politiques, liens réciproques entre engagement politique et engagement associatif, etc.), apparaissent certains phénomènes qui sont propres à ces citoyens étrangers. Il en va d'abord du lien entre leur engagement politique et leur rapport à la citoyenneté française. On note par exemple que la place occupée sur la liste (position éligible ou non-éligible) est souvent tributaire de leur familiarité avec la culture française (maîtrise de la langue française, connaissance du fonctionnement de la vie politique municipale, etc.). Aussi, certains d'entre eux ont d'ores et déjà engagé, ou envisagent d'engager, des démarches pour acquérir prochainement la citoyenneté française, notamment afin de poursuivre une carrière d'élu local autorisant plus de responsabilités politiques (postes d'adjoints au maire ou de maires).

Aussi, l'engagement politique de ces citoyens européens est souvent le produit d'une sollicitation de la part des têtes de listes, et en particulier du maire sortant, lesquelles cherchent à présenter une liste de candidats donnant un signal d'ouverture, notamment lorsque ces européens forment un groupe national relativement important sur le territoire communal. Pour les communes des départements frontaliers, ces conseillers municipaux européens servent souvent, une fois élus, de facilitateurs pour les relations transfrontalières.

Au final, les premiers résultats nous invitent à entreprendre une première typologie explicative de leur engagement et de l'exercice de leurs mandats. Schématiquement, une partie d'entre eux sont, en quelque sorte, des « étrangers de papier » dans la mesure où ils sont parfaitement socialisés et familiarisés à la culture française,

y compris dans ses dimensions politiques, ce qui correspond le plus souvent à ceux, parmi eux, qui sont nés en France ou qui s'y sont installés très jeunes. À l'autre pôle, on retrouverait les candidats et élus qui endossent plus volontiers le rôle de courtiers en faveur de leur communauté nationale d'origine.

Conclusions

Cette recherche, dont les principaux dispositifs d'investigation sont toujours en cours, montre que, loin d'être uniquement motivée par des idéaux de citoyenneté supranationale, l'exercice de la citoyenneté européenne gagne à être appréhendée au travers des variables sociales classiques explicatives de la participation politique. Elle montre également la persistance des cadres d'identification nationaux plus qu'europeens.

Remerciements

Cette recherche vient de bénéficier du financement de l'Agence Nationale de la Recherche en catégorie JCJC pour la période 2023-2026 sous l'acronyme ECREMEE (Étude sur les Candidatures des Ressortissants Européens aux Municipales et sur les Élus Européens). Elle a précédemment bénéficié du financement du Labex *Structuration des Mondes Sociaux* de l'Université Fédérale de Toulouse.

Références

- [1] Rayner Bauböck, *Migration and citizenship: legal status, rights and political participation*, Amsterdam, Amsterdam University Press, 2006.
- [2] Jo Shaw, *The Transformation of Citizenship in the European Union. Electoral Rights and the Restructuring of Political*, Cambridge University Press, 2007.
- [3] Sylvie Strudel, «L'Europe, un nouvel espace de citoyenneté ? Le vote des non-nationaux », *Revue internationale de politique comparée*, 16, 2009, p. 559-568.
- [4] Sophie Duchesne, «Citoyenneté, nationalité et vote : une association perturbée», *Pouvoirs*, 120, 2007, p.71-81.
- [5] Sylvie Strudel, « Polyrythmie européenne : le droit de suffrage municipal des étrangers au sein de l'Union, une règle électorale entre détournements et retardements », *Revue française de science politique*, 53(1), 2003, p. 3-34.
- [6] Verena K. Brändle, «Reality bites: EU mobiles' experiences of citizenship on the local level», *Journal of Ethnic and Migration Studies*, 46:13, 2020, p. 2800-2817.

Comportement d'achat et durabilité : les nouveaux enjeux liés aux usages des applications et des services mobiles

Jean-Michel Ledjou¹

Jean-michel.ledjou@universite-paris-saclay.fr

¹ IUT d'Orsay, Université Paris-Saclay
Amétis / Idest

Thèmes – *Communication*

Résumé – Le dynamisme du marché mondial des technologies numériques, et singulièrement celui de l'Internet mobile, se trouve souligné dans de nombreuses études internationales. Dans ce contexte, deux éléments nous ont amenés à axer notre communication sur un nouveau type de comportement d'achat que l'on peut relier à l'explosion des réseaux mobiles. Ceux-ci ont notamment trait aux formes d'engagement et de participation en ligne dans les pays développés qui, dans un premier temps, ont bénéficié à des producteurs des pays en développement, et depuis 2016, concernent des petits producteurs des pays développés, notamment, français.

Mots-Clés – *Applications numériques, comportement des consommateurs, commerce équitable, durabilité, engagement des consommateurs, information, innovation sociale inversée, justice sociale, prix équitable, producteurs, responsabilité.*

1 Introduction

Notre communication cherche à mettre en évidence l'émergence d'un nouveau type de comportement d'achat lié à l'usage massif des smartphones. Celle-ci s'attache également à montrer comment les applications et les services mobiles peuvent contribuer à réduire la « distance sociale » entre producteurs et consommateurs, dans un objectif de durabilité.

2 De la prise de conscience à la lutte contre les inégalités

La globalisation de l'économie et la croissance mondiale ont soulevé bien des espoirs sur le plan de l'amélioration durable des conditions de vie et du bien-être, pour l'ensemble de l'humanité, mais surtout pour les millions d'individus parmi les plus pauvres. Dans le domaine social, on assiste à une réduction de l'extrême pauvreté de long terme, cependant on constate en parallèle, un creusement des inégalités qui décuple la vulnérabilité face aux risques d'un monde interconnecté. Certaines populations, notamment en Afrique subsaharienne ne tirent pas profit de la mondialisation. Pire, elles se trouvent encore plus vulnérables.

La commission sur la croissance et le développement, pilotée par la banque mondiale, souligne que tous les pays en développement qui ont connu des périodes durables de croissance économique soutenue ont prospéré en s'ouvrant aux marchés mondiaux. Considéré comme un instrument capable d'aider les pays à tirer parti de la mondialisation, le système commercial est au centre de recherches, d'opérations et de financements.

Avec comme objectif prioritaire l'amélioration des conditions de vie de producteurs marginalisés, le commerce équitable attend du consommateur des pays développés qu'il fasse le choix d'acheter un paquet de chocolat, de café ou de tout autre produit, non seulement pour les caractéristiques propres à ce bien mais aussi, en acceptant de payer plus cher pour une caractéristique supplémentaire d'ordre social, celle de « pouvoir faire du bien ». Toute la démarche de sensibilisation vise, par conséquent, à transformer la propension à acheter une qualité sociale en un acte d'achat qui mobilisera généralement le paiement d'un surcoût. Pour le producteur au Sud, cet acte d'achat solidaire permettra de choisir de rester producteur et de ne pas avoir à quitter sa terre pour améliorer son revenu et sa qualité de vie (Randrianasolo, Dahmani, Dubois, 2014).

Depuis les années 1990, la mondialisation de la production et les inégalités criantes qu'elle a engendrées, couplées à la démocratisation des technologies numériques, ont permis de propager cette connaissance de la pauvreté rurale et agricole, notamment des pays de

l'Afrique subsaharienne, de l'Amérique latine, au-delà des cercles militants.

Mais la pauvreté n'est pas l'attribut des seuls producteurs des pays en développement. Tous les ans, le salon de l'agriculture, vitrine institutionnelle s'il en est, remet sous le feu des projecteurs la situation dramatique de certains agriculteurs français. « Près de 18 % d'entre eux vivraient en effet avec moins de 13 000 € par an pour une personne seule en 2018 ». Pour Dubigeon (2009), la conscience d'un danger planétaire progresse au sein de nos sociétés interdépendantes.

Ainsi, selon Requier-Desjardins (2019), la consommation de ce que nous désignons par « qualité sociale » traduit l'attachement à des valeurs collectives, à la lutte contre la pauvreté, au renforcement de la sécurité alimentaire, etc., principes qui relèvent des différentes dimensions de la durabilité.

3 Les technologies numériques au service du bien-être des petits producteurs du Sud ... et du Nord !

Par la recherche de solutions novatrices, l'économie solidaire, s'efforce de combattre les grands problèmes sociaux et environnementaux actuels, qui menacent la durabilité de nos sociétés. « L'information, la diffusion de la connaissance devenant totalement ubiquitaire, non seulement les utilisateurs peuvent bénéficier de conseils appropriés, mais peuvent aussi devenir des contributeurs très significatifs de la création d'un bien-être collectif » (Babinet, 2014, P79). À cet égard, les concepteurs d'applications pour terminaux numériques ont montré qu'il était possible d'informer chaque consommateur, chaque citoyen sur les conséquences de son acte de consommation. Une application comme Noteo, un site comme Mesgouts.fr ont été pionniers dans l'éducation à la consommation de la qualité « équitable ».

De fait, la consommation d'un bien en fonction de sa qualité sociale, ne correspond plus seulement à un comportement militant qui implique une connaissance de la filière ou l'appartenance à une association. À un moment où les grandes enseignes de distribution cherchent à tirer profit de cette tendance des sociétés du Nord à la consommation équitable, le numérique resserre les liens entre les consommateurs et les différents acteurs du commerce équitable.

En 2016, quelque 7000 consommateurs français ont activement participé à la co-construction d'une filière laitière guidée par un objectif social. Il s'est agi d'améliorer les conditions de vie des producteurs français à travers la première marque du consommateur : « C'est qui le patron ? ».

La principale innovation repose sur une nouvelle méthode de fixation du prix de vente du lait conditionné.

En tout état de cause, l'innovation sociale inversée

décrite ici porte en elle-même les ferments d'une économie plus solidaire fondée sur les besoins de producteurs vulnérables.

Dès lors, si l'on associe les faits observés au Sud comme au Nord, il semble que la forme de l'engagement du consommateur, à travers les réseaux numériques mobiles, mette en avant une responsabilité *ex-ante*.

4 La responsabilité ex-ante une opportunité pour les petits producteurs

À partir des travaux de plusieurs chercheurs dont ceux d'Hans Jonas, nous constatons que la forme de responsabilité utilisée jusqu'à présent – essentiellement rétroactive – ne rend pas compte des particularités de l'innovation inversée permise par les technologies numériques, dans le domaine du commerce équitable. L'éthique de la responsabilité classique stipule que la responsabilité est engagée une fois que l'action est faite. C'est une responsabilité que nous devons assumer en fonction de nos actes passés et des conséquences qu'ils ont entraînées. Or, dans le cadre de l'explosion des réseaux numériques, l'action peut être interprétée comme le fruit d'une prise de conscience et de responsabilité. Une telle éthique de la responsabilité a été conceptualisée par Hans Jonas depuis 1979. Ce dernier met en exergue une responsabilité¹, qui n'est pas consécutive à un acte passé, mais qui préexiste à cet acte et peut même être à la source de celui-ci. Ramenée au commerce équitable, cette approche de la responsabilité conduit à arguer que la vulnérabilité et la fragilité des producteurs marginalisés en Afrique concernent la responsabilité du consommateur : une fois informé des conséquences de son achat via une application de notations, celui-ci engage une dépense.

Source d'action, la responsabilité *ex-ante* est à la base d'un nouveau comportement, désigné par Michelleti sous le vocable « boycott ». Ce néologisme fabriqué à partir de l'anglais *to buy* (acheter), consiste à acheter des produits répondant à des critères sociaux et environnementaux dont il faut organiser la production (De Ravignan, 2004).

Quant au dispositif numérique, il occupe une place déterminante car c'est à travers lui que s'exercent de nouvelles pratiques, de nouvelles formes de participation qui, en l'espèce, ne se limitent plus au commerce équitable Nord/Sud.

5 Conclusion

La technologie numérique contribue à la lutte contre la pauvreté en permettant l'émergence d'une « révolution du

comportement d'achat ». Cette dernière est constitutive du XXI^e siècle. Reste que la récupération de la démarche pour asseoir le pouvoir de marché des grands acteurs est une question qui se pose dans un contexte de développement sociétal. Par ailleurs, l'asymétrie d'information, les réseaux lâches et diffus sont des terrains propices à l'opportunisme, dans une ère où l'intelligence économique intègre la « réputation ».

6 Références

- [1] Babinet, G., *L'ère numérique, un nouvel âge de l'humanité*. Paris, Le passeur, 2014
- [2] Banque mondiale, *Comprendre la pauvreté. Vue d'ensemble*, 2019, consulté le 30 décembre 2022, [<https://www.banquemondiale.org/fr/topic/poverty/overview#1>].
- [3] Bécheur A. & Toulouse N. *Le commerce équitable. Entre utopie et marché*. Paris, Vuibert, 2008
- [4] Dubigeon, O. *Piloter un développement responsable*. Paris : Pearson Education, 2009
- [5] De Ravignan A. Carrefour, la tactique de l'éthique. *Alternatives Internationales*, n°18, 2004, p.34-35
- Jonas H. *Le principe responsabilité*. Paris, Editions du Cerf, 1990.
- [6] Kiyindou A. *Quand l'Afrique réinvente la téléphonie mobile*. Paris, L'Harmattan, 2015
- [7] Métayer M. *La philosophie éthique, enjeux et débats actuels*. Québec, Édition ERPI, 1997
- [8] Micheletti M. Shopping with and for Virtues. *Political virtue and shopping- individuals, consumerism, and collective action*. New York, Palgrave MacMillan, 2003, p.149-168.
- [9] Mouzon C. *Consommer autrement*. Paris, Alternatives économiques Scop-SA, 2014
- [10] Randrianasolo-Rakotobe H. & Ledjou J.-M., Appuyer le développement de l'économie numérique. *Rapport sur l'état de la francophonie numérique*, OIF/IDEST, 2018, p.55-73
- [11] Randrianasolo-Rakotobe H., Dahmani A., Dubois J.-L. De la nécessité d'étendre les références éthiques de l'approche par les capacités. Enseignements tirés des pratiques du commerce équitable. *Mondes en développement*, n° 168, 2014, p. 59-76
- [12] Requier-Desjardins, D., « La consommation "éthique" est-elle un marqueur de classe ? Qualification, enrichissement et "classe ambitieuse" », 2019, Working paper, Hal, Université de Toulouse Jean Jaurès, consulté le 30 décembre 2022, [<https://hal-univ-tlse2.archives-ouvertes.fr/hal-02307391>].

Approche par compétences ou approche expérientielle : comment penser l'alternance au sein du Bachelor Universitaire de Technologie ?

Stéphanie Tralongo¹

Stephanie.tralongo@univ-lyon2.fr

¹ IUT Lumière Lyon 2, Pôle RTI IUT Lumière et Equipe MEPS, Centre Max Weber, UMR 5283

Thèmes – *Sociologie de l'éducation, du curriculum et de la relation formation-emploi ; sciences de l'éducation ; approches éducatives*

Résumé – *L'Approche Par Compétence (APC) a fait une entrée dans tous les programmes de Bachelor Universitaire de Technologie (BUT) à la rentrée 2021. Elle promeut une rupture positive avec un mode ancien par de nouvelles manières de penser et d'organiser les apprentissages, la progression, les contenus des cours, et les formes d'évaluation. Dans le même temps, le Diplôme Universitaire de Technologie (DUT) se transforme et bascule en BUT : passant de deux à trois années, il est notamment prévu un déploiement massif de parcours en alternance sur les deuxièmes et troisièmes années. L'une des questions que l'on peut poser est celle de savoir si l'APC permet de bien accompagner chez l'étudiant la préparation, le déroulement et l'intégration des acquis de l'alternance. Ceux-ci sont en effet loin de ne se résumer qu'à des compétences à différents stades de maîtrise. En s'appuyant sur l'expérience de trente ans de déploiement de parcours uniquement en alternance pour tous les apprenants des cinq DUT/BUT de l'IUT Lumière, on discute dans cette communication des différences, convergences et articulations entre d'une part l'APC et d'autre part ce qui a été au fondement du projet éducatif de cet IUT et de son efficacité, c'est-à-dire l'approche expérientielle.*

Mots-Clés – *Approche Par Compétence ; Approche Expérientielle ; Sociologie du Curriculum*

Introduction

L'APC mise en œuvre au sein des IUT à partir de la rentrée 2021 s'appuie sur un ensemble de propositions volontairement réduit. Il vise à produire une matrice jouant le rôle d'un cadre de définitions et de notions partagées qui pourront ensuite se décliner dans des formations variées (partie 1). De son côté, l'approche expérientielle développe une philosophie de la prise en compte assez large dans les enseignements et apprentissages, de différents pans de l'expérience de l'apprenant. Elle a été mobilisée avec succès depuis une trentaine d'années au sein d'un IUT ne fonctionnant qu'en alternance pour ses quelques sept cent cinquante apprenants annuels (partie 2). L'occasion de la mise en place de l'APC au sein de toutes les spécialités de BUT, et donc y compris au sein de cet IUT fournit alors autant un espace théorique de confrontation qu'un terrain d'observation entre les deux approches. La conclusion argumente en faveur d'une mise en dialogue des deux approches au regard de la complexité et de la densité des formations professionnalisantes.

1 L'APC en synthèse

Le fondement théorique de cet article s'appuie sur la sociologie du curriculum et plus spécifiquement les travaux de Bernstein [1]. Ils permettent de mettre en discussion différents niveaux - macro, méso ou micro - du social. Ils rappellent que chaque courant, approche et mise en œuvre est toujours le fruit de luttes et de compromis de groupes sociaux, pris dans les préoccupations d'une époque. Même les choix apparemment les plus neutres, comme par exemple les instruments et outils mobilisés pour un projet éducatif, s'inscrivent, non sans ambivalence, dans des rapports de force et des visions politiques. Déconstruire cet ensemble permet alors de se donner les moyens de discuter rationnellement des différents ingrédients au regard des finalités poursuivies, afin de prendre des décisions éclairées.

L'APC qui se met en place à la rentrée 2021 a plusieurs caractéristiques. Elle s'appuie exclusivement sur les propositions d'un laboratoire, le Labset, qui a travaillé de façon contractuelle avec l'Assemblée des Directeurs d'IUT. De la notion de compétence, largement objet de luttes, il est proposée la définition d'un « savoir-agir en situation complexe reposant sur la mobilisation et la combinaison efficaces d'une variété de ressources internes et externes à l'intérieur d'une famille de situations. », selon Tardiff, Poumay et Georges [2, ici et suite du paragraphe]. Tout l'enjeu d'un programme est alors de bâtir un « référentiel de compétences », en basculant d'une vision de l'enseignement à une vision

centrée sur les apprentissages des étudiants. L'objectif est d'organiser des situations « authentiques » d'apprentissage et d'évaluation. Au sein de ce programme, des savoirs, savoir-faire et savoir-être seront nécessaires : ils sont considérés comme des « ressources » internes et externes, faits « d'apprentissages critiques » plus indispensables que d'autres pour la bonne mobilisation de compétences en situation professionnelle. Les intervenants de la formation deviennent alors les fournisseurs et animateurs de ces ressources et situations d'apprentissage. Ils doivent en conséquence largement transformer leurs manières d'évaluer les étudiants, car l'évaluation d'une compétence n'est pas la même chose que celle d'une connaissance. Des outils tels que le portfolio sont recommandés : rédigé par chaque étudiant, il comporte une série de « traces » de ses acquis. Le « référentiel de compétences » doit être élaboré en étroite collaboration avec les milieux professionnels et ne pas proposer un trop long catalogue de compétences. Enfin, les stages et situations d'alternance sont considérés comme particulièrement propices au déploiement de l'APC.

2 L'approche expérientielle et ses déclinaisons avec l'alternance

L'approche expérientielle génère une littérature scientifique croissante à partir des années 1980, selon Mandeville [3]. Elle met en avant la complexité des apprentissages, la dimension plurielle et avant tout expérientielle de ceux-ci. Une expérience comporte différentes dimensions, toutes importantes, dont il convient de ne pas en oublier la portée lors de la fabrication de programmes : elle est affective, cognitive, significative, riche d'enseignements pour les apprenants, - allant largement au-delà des objectifs du programme -, à partir du moment où ils s'impliquent et engagent une réflexivité, tout en développant des métacompétences.

C'est avec ce programme que l'IUT Lumière Lyon 2 a développé dès sa création en 1992, un projet original s'appuyant sur une déclinaison pratique de l'approche expérientielle : toutes ses formations ne se déroulent qu'en alternance, et tous les programmes des DUT/BUT, puis de Licence professionnelle par la suite, s'appuient sur cet ensemble de principes.

Cette approche expérientielle se décline dans le temps de la formation. La perspective de faire vivre aux apprenants des expériences significatives est explicitée et prise en charge par le programme, convoquée dans les cours, à la fois dans les contenus et par la méthode d'enseignement. L'originalité est de penser l'ensemble comme un processus dont les différents éléments doivent peu à peu constituer une expérience pour l'étudiant. Ce processus commence ainsi avant même l'arrivée des étudiants. Lors de la phase de recrutement, l'organisation

et le contenu des questions sont pensés de manière à permettre aux candidats de réfléchir à leurs projets et à s'engager dans une démarche active pour candidater dans cet établissement. Il se poursuit par une première année qui se scinde en deux temps. Les six mois de démarrages sont consacrés à l'acquisition de notions de base de la spécialité choisie et à la préparation aux projets et à la vie professionnelle. Cette préparation passe par des cours de Projet Personnel et Professionnel mis en place dès les années 1990. Lors des six mois suivants, la concrétisation de ce travail s'opère par la réalisation d'un stage en entreprise, considéré comme un « essai mutuel » devant déboucher si tout se déroule bien par la signature d'un contrat d'apprentissage pour les années suivantes. Sur les secondes et troisièmes années, l'expérience centrale est celle d'une alternance qui sera rythmée par des retours d'expérience lors des temps de cours. Durant tout le temps de la formation, des séquences de cours sont ainsi réservées, avec des formes d'animation particulières, à la préparation, au traitement et à l'intégration de l'expérience des apprenants. Ces derniers reviennent toujours à l'IUT après chaque temps passé en entreprise, qu'il s'agisse du stage ou de l'alternance, et ont à produire collectivement et individuellement des productions qui participeront de la consolidation de leurs acquis.

Cette approche suppose aussi une manière particulière d'envisager l'enseignement et les savoir-faire des équipes enseignantes : faire vivre aux étudiants des expériences significatives et les aider à en prendre conscience s'apprend et fabrique une professionnalité particulière, selon Tralongo [4]. L'une des conditions est d'être assez familiarisé avec ce que peuvent vivre les étudiants en entreprise. Ainsi, une règle dans cet IUT est que chaque intervenant est invité à participer au recrutement des étudiants ; à devenir tuteur d'étudiants en entreprise ; à accompagner la réalisation du mémoire ; et à mobiliser dans ses enseignements cette expérience. Une autre des conditions est que les enseignants soient formés aux techniques d'animation particulières qu'est l'accompagnement de l'expérience des apprenants, qu'il s'agisse de séance de Projet Personnel et Professionnel, ou de suivi en entreprise. Des formations sont ainsi assurées, en partenariat avec l'association Trouver/Créer, partenaire historique et à l'origine de l'approche éducative en orientation en France [5].

3 Conclusion

Actuellement en vogue et fortement plébiscitée par les pouvoirs publics, l'APC prête le flanc à une série de critiques dans le champ scientifique selon Tanguy ou Monchatre, [6] [7]. Son adoption massive au sein des IUT ne doit surtout pas les laisser de côté, sous peine de ne rien comprendre à ce qui va se jouer au quotidien dans les années à venir. L'objet de cet article était toutefois de

questionner les relations entre l'APC et une autre manière de penser la structuration et le contenu des programmes. L'approche expérientielle se présente comme particulièrement professionnalisante. Elle est tout à fait en capacité d'organiser une progression pensée comme un processus graduel, amenant l'étudiant à recombinaison dans la pratique des savoirs, savoir-faire et compétences nécessaires à la résolution de problèmes complexes. Dès lors quels sont les points communs et liens entre les deux ? Les deux se centrent sur la question des apprentissages et envisagent l'ensemble du parcours comme processuel. Cependant, si l'approche expérientielle s'appuie aussi sur les compétences, elle n'en fait pas le seul objectif de la formation. Celles-ci apparaissent donc comme la partie immergée de l'iceberg que constitue la tâche de former des jeunes générations. Ce qui n'est pas très étonnant au regard de la complexité que représente la formation d'humains pour apprendre, comprendre et agir dans un monde lui-même de plus en plus dense, technicisé et hyperspécialisé. Il s'agit donc ici de rappeler qu'aucune approche n'est une panacée et que s'appuyer sur l'expérience acquise peut aussi éclairer les choix de demain. C'est d'ailleurs ce que promet avant tout l'approche expérientielle...

4 Remerciements

Je remercie Aïcha Sekhari, directrice du Pôle Recherche, Technologie et Transfert de l'IUT Lumière, lieu très riche et ouvert de questionnements sur les pratiques d'enseignement, d'apprentissage au sein des IUT.

5 Bibliographie

[1] Bernstein Basil, 2007, *Pédagogie, contrôle symbolique et identité : théorie, recherche, critique*, Québec, Presses de l'université Laval.

[2] Poumay, Marianne, Jacques Tardif, et François Georges, 2017, *Organiser la formation à partir des compétences. Un pari gagnant pour l'apprentissage dans le supérieur*, Louvain La Neuve, De Boeck Supérieur.

[3] Mandeville Lucie, 2009, « Chapitre 7. Une expérience d'apprentissage significatif pour l'étudiant. Dans : Denis Bédard éd., *Innover dans l'enseignement supérieur* (pp. 123-138). Paris, Presses Universitaires de France.

[4] Tralongo Stéphanie, 2017, « Fabriquer/devenir un enseignant du supérieur professionnalisant. Le tutorat en IUT », *Formation-Emploi*, n°138.

[5] Association Trouver/Créer : <https://www.trouver-creer.org/>

[6] Tanguy Lucie, 2014, « Des aptitudes aux compétences », in Jacky Beillerot éd., *Traité des sciences et des pratiques de l'éducation*. Paris, Dunod.

[7] Monchatre Sylvie, 2007, « D'une pratique à son instrumentation », *Formation Emploi*, n°99

Le sport dans la presse écrite jeunesse : ce que *Le Petit Quotidien* fait au genre

Carine Guérandel¹

Carine.guerandel@univ-lille.fr

¹ IUT, Université de Lille
CeRIES, EA 3589

Pour le collectif **MediSJeu** (Université d'Artois, Lille, Montpellier, Reims Champagne Ardenne et Paris-Saclay)

Thèmes –SHS

Résumé – *Des enquêtes portant sur les médias qui traitent du sport mettent en évidence la persistance des inégalités entre les sexes : sous-médiatisation des femmes, discours essentialistes, mise en scène stéréotypée des corps et des performances. Mais quand est-il du côté de la presse écrite « jeunesse » ? Pour répondre à cette question, la focale est mise sur le Petit Quotidien, seul journal quotidien français pour les 6-10 ans, reconnu et diffusé au sein de l'Education Nationale. A partir d'une analyse quantitative menée via un logiciel de traitement statistique, cette communication étudie la manière dont le journal (re)produit les inégalités de représentations entre les sexes dans les articles faisant référence au sport. Les résultats révèlent que le Petit Quotidien tend à invisibiliser les pratiquantes et à associer le sport à un loisir masculin dès le plus jeune âge, notamment en reléguant littéralement au second plan les sportives ou en ayant recours au « sujet neutre ».*

Mots-Clés – Sport, presse jeunesse, genre

1 Introduction

Les recherches scientifiques qui étudient la manière dont les médias sélectionnent et orientent leurs contenus au prisme du genre mettent au jour la sous-médiatisation des femmes, une mise en scène stéréotypée et des discours essentialistes [1]. Ces inégalités de traitement médiatique se creusent encore davantage quand on s'intéresse au monde du sport. En effet, la couverture médiatique du sport dit « féminin » est globalement moins développée que celle du sport dit « masculin » tant en nombre d'articles, de photographies, que de présence en Une et de volume [2]. Les enquêtes qualitatives montrent également que la médiatisation des athlètes femmes passe par un processus de trivialisat[i]on en se concentrant davantage sur leur vie privée que sur leur performance [3], par un processus de sexualisation voire d'érotisation en valorisant moins leur résultat que leur apparence [4] et en faisant la promotion de l'image hétérosexuelle des sportives, avec pour pendant le dénigrement des lesbiennes présentant un défaut de « féminité » [5]. La référence permanente aux hommes et à leur jeu dans les commentaires médiatiques portant sur les sportives renforce également la hiérarchie des sexes, des sports de tradition « masculine » ou « féminine » et des modes de pratique [6].

2. Problématique et méthodologie

Mais alors, quand est-il du côté de la presse écrite « jeunesse » ? Quelle place cette presse accorde-t-elle aux sportives et aux sportifs ? Pour répondre à ces questions, nous avons placé la focale sur le *Petit Quotidien*, seul quotidien français pour la catégorie des 6-10 ans reconnu et diffusé au sein de l'Éducation Nationale, qui comptabilise plus de 60 000 exemplaires édités par numéro. La reconstitution de l'intégralité d'un corpus (n=1440 numéros), pour une période étalée de 2009 à 2019, nous a permis de répertorier et de traiter, au total, 916 articles et images traitant du sport.

L'analyse quantitative menée *via* un logiciel de traitement statistique, met en évidence la manière dont ce journal tend à reproduire les inégalités de représentations entre les sexes dans les articles faisant référence au sport.

3. Les femmes sportives : les grandes oubliées du *Petit Quotidien* ?

Le sport représente 7% du volume total des articles dans le journal. Parmi ces 7%, les sports collectifs sont largement majoritaires et le football correspond à 97,7% des activités collectives identifiées dans les articles et photographies étudiés. On le sait, le football constitue

encore aujourd'hui un sport populaire et attractif auprès des jeunes.

Par ailleurs, les hommes apparaissent dans 51,90% des cas, c'est-à-dire des 7 % de la surface rédactionnelle, *a contrario* les femmes ne représentent que 10% des athlètes photographiées et mises en mots. Elles sont donc cinq fois moins mises en évidence que leurs homologues « masculins ». Ces inégalités de traitement s'intensifient encore lorsque la focale est déplacée sur les autres catégories de ces rubriques : c'est-à-dire lorsque sont évoqués « *les deux sexes* », ou que le « *sexe est indistinct* » ou non évoqué. Premièrement, les sportives ont autant de probabilité d'être montrées seules (10%) qu'avec un homme (11,90%). Cette mise sous tutelle masculine des sportives rappelle « la ritualisation de la féminité » [7] en cours dans la publicité. Deuxièmement, le quotidien semble préférer les articles accompagnés d'images ne permettant pas de distinguer l'appartenance de sexe des personnages représentés (22,60%), laissant ainsi deux fois moins d'éventualité aux femmes d'être mises en avant dans celui-ci. Ces résultats vont dans le sens des analyses de Sylvie Cromer [8] portant sur l'invisibilité des femmes et des filles dans la littérature jeunesse par le recours au « sujet neutre ». Dans *Le Petit Quotidien*, les personnages, les illustrations ou les textes rédigés de manière neutre renvoient, en creux, aux sportifs ou à la pratique des hommes.

4. Un traitement genré des activités : les hommes au football, les femmes à la gymnastique !

Quantitativement moins représentées, les sportives sont ensuite distribuées différemment dans les activités traitées par *Le Petit Quotidien*. Les activités gymniques sont mises en avant par le biais des sportives dans 55,6% des cas contre 22,2% d'hommes. *A contrario*, les activités collectives de grands terrains, comme le rugby et le football sont, quant à elles, représentées à hauteur de 77,4% par des sportifs contre 7,3% de sportives. Ce traitement genré de la pratique se vérifie également dans d'autres activités. Ces différences de traitement interpellent surtout lorsqu'on les compare avec la sexuation actuelle des pratiques sportives françaises. Cette comparaison fait apparaître une couverture bien particulière de l'actualité sportive par *Le Petit Quotidien*, qui ne correspond pas à la réalité sociale des pratiques. Pour les activités dans lesquelles les femmes tiennent une place prépondérante, dont le taux de féminisation dépasse les 80%, (activités gymniques, activités d'expression), comme pour les activités dites mixtes (activités de raquette, activités athlétiques), le fait d'« euphémiser » la place des sportives tout en « spectacularisant » celle des sportifs soumet les sportives à un double processus d'invisibilisation [9]. Cela participe aussi à la sexuation

du sport en conjuguant les activités footballistique et rugbyistique (pour autre exemple), comme dans la réalité sociale, essentiellement au « masculin ».

5. Des espaces de publication restreints ou partagés : les sportives sur le banc

S'agissant enfin de la place réservée aux sportives dans les différents espaces de publication du journal, nous constatons que les couvertures du journal promeuvent, dans 71,2% des cas, un sportif, contre 11,4% des cas, une sportive. Les mêmes constats peuvent être effectués pour les histoires du jour ou encore les photos. Par ailleurs plus l'espace de publication est petit, plus les femmes seront exposées. Plus l'espace de publication est grand, plus il sera occupé par des hommes, par des duos ou même des trios mixtes de sportifs et sportives. Lorsque les sportives ont l'occasion d'être mises en avant, ce sera principalement par le biais d'illustrations ou d'articles courts et sans traitement de fond. En préférant des articles de plus petites tailles pour les sportives, *Le Petit Quotidien* participe donc à invisibiliser les femmes, à renforcer les inégalités de traitement médiatique et à confirmer l'hégémonie masculine du monde sportif [11]. Il en est de même pour les visuels du journal. *Dans Le Petit Quotidien*, la sportive semble souvent réduite à l'« être perçu » [12].

6- Conclusion

Au final, si l'appropriation des messages médiatiques n'est ni immédiate, ni systématique mais relève d'une socialisation complexe et continue, il n'en demeure pas moins que le journal semble construire le sport comme un loisir majoritairement « masculin » en dépit du fait que les jeunes lectrices sont tenues de s'investir en éducation physique à l'école, sont particulièrement nombreuses à être licenciées dans un club entre 6 et 12 ans [13] et considèrent les jeux sportifs comme l'un de leurs loisirs préférés.

Références

- [1] Damian-Gaillard, B., Montañola, S. et Saitta, E. (2021). *Genre et journalisme. Des salles de rédaction aux discours médiatiques*. Louvain-la-Neuve : De Boeck.
- [2] Montañola, S. (2011). La complexe médiatisation des sportives de haut niveau. *Sciences de la société*, 83, 82-103.
- [3] Vincent, J. (2004). « Game, sex, and match: The construction of gender in British newspaper coverage of the 2000 Wimbledon Championships », *Sociology of Sport Journal*, 21, 435-456.
- [4] Fraysse, M. & Mennesson, C. (2009). « Masculinités

hégémoniques et féminités : les modèles de genre dans une revue de VTT », *Sciences sociales et sport*, 2/1, 25-53.

[5] Le Pogam, Y., Liotard, P., Ferez, S., Marie Moles, J-B, Pouliquen, G. (2004). « Homophobie et structuration des jeux sportifs homosexuels », *Corps et culture* [En ligne], n°6/7 : <http://journals.openedition.org/corpsculture/823>

[6] Mennesson, C. (2005)°. *Être une femme dans le monde des hommes : socialisation sportive et construction du genre*, Paris, L'Harmattan.

[7] Goffman, E. (1977). « La ritualisation de la féminité », *Actes de la Recherche en Sciences Sociales*, 14, 34-50.

[8] Cromer, S. (2010). Le masculin n'est pas un sexe : prémices du sujet neutre dans la presse et le théâtre pour enfants. *Cahiers du Genre*, 49, 97-115.

[9] Renault, E. (2009). « *L'invisibilisation du travail et ses échos philosophiques* ». Conférence au Colloque « Le travail ou l'expérience de la nécessité », Université de Nantes, les 9 et 10 octobre.

[10] Messner, M. & Sabo D. (1990) *Sport, Men and the gender order: critical feminist perspectives*. Champaign, IL, Human Kinetics.

[11] Bourdieu, P. (1998). *La domination masculine*. Paris, Seuil.

[12] Données INJEP, 2018.

Migrations environnementales et déplacés climatiques : quelle prise en charge par les médias d'information en continu ? L'exemple de BFM TV.

Présentation lors de la Conférence Nationale sur la Recherche en IUT

Raphaëlle Vimbert¹

Sous la direction de Brigitte Sebbah² et Franck Bousquet³

raphaelle.vimbert@iut-tlse3.fr brigitte.sebbah@iut-tlse3.fr franck.bousquet@iut-tlse3.fr

¹ IUT Paul Sabatier, Université Toulouse 3, Campus d'Auch

Doctorante rattachée au Laboratoire d'Etudes et de Recherches Appliquées en Sciences Sociales (LERASS)

^{2,3} Université et IUT Paul Sabatier, Toulouse 3

Laboratoire d'Etudes et de Recherches Appliquées en Sciences Sociales (LERASS)

Thèmes – *Communication - Environnement – SHS - Droit*

Résumé – *Ce travail de doctorat en Science de l'Information et de la Communication propose d'étudier la manière dont une chaîne d'information en continu, BFM TV, prend en charge les actualités liées aux migrations environnementales, dans un contexte de politique internationale qui leur confère une place de premier ordre. En 2018, un rapport de la Banque mondiale estimait à 143 millions le nombre de personnes qui pourraient être forcées, par le dérèglement climatique, à se déplacer d'ici 2050 à l'intérieur de leur pays, impactant les orientations et flux migratoires en Europe et dans le monde. La multi-causalité des déplacements de population complique néanmoins les estimations de la migration environnementale et les chiffres de l'OIM (Organisation Internationale pour les Migrations) varient entre 25 millions et un milliard de migrants environnementaux d'ici trente ans, en fonction des méthodes de calculs. Quoiqu'il en soit, cette thématique environnementale est plus que jamais d'actualité et représente un enjeu majeur contemporain. Pourtant, il reste abordé à la marge par les chaînes d'information en continu telles que BFM TV, qui semble privilégier d'autres sujets dans leur ligne éditoriale, scrutant les résultats d'audience sous la pression des annonceurs.*

Mots-Clés – *Migrations, environnement, information télévisée en continu, dérèglement climatique.*

Attention, toute communication ne doit pas excéder trois pages, incluant la présente page de garde.

1 Contextualisation

Ce travail de recherche propose d'étudier la question des migrations dites environnementales sous le prisme des médias d'informations télévisées en continu, en prenant l'exemple de BFM TV.

Les migrations environnementales recourent un spectre de situations extrêmement large, désignant à la fois les migrations provoquées par une catastrophe naturelle, géologique comme un tremblement de terre ou hydroclimatique (typhons, sécheresses), mais aussi les déplacements dus à des processus à évolution lente comme l'élévation du niveau de la mer et la dégradation des terres.

Première chaîne d'information en termes d'audience, BFM se définit comme « La première sur l'info », c'est-à-dire le média télévisé le plus à même de traiter de l'actualité de façon quasi simultanée avec l'évènement en cours, offrant également la possibilité à ses téléspectateurs d'accéder à « un état du monde et de la France », à n'importe quelle heure de la journée. Le choix de ce média a été motivé par les résultats d'audimat, la chaîne s'étant progressivement imposée, creusant depuis 2008 l'écart avec sa principale concurrente CNews (anciennement I>Télé).

Comment la première chaîne d'information en continu traite-t-elle des phénomènes migratoires liés au dérèglement climatique ? Priorité en termes de politique internationale si l'on reprend les propos du Secrétaire général des Nations Unies Antonio Guterres à la Conférence de Marrakech en 2018, la migration environnementale concernait 26 millions de personnes en 2019, dont 22 millions qui auraient été obligés de se déplacer suite à des inondations ou des cyclones.

En termes de méthodologie, deux temps forts organisent cette recherche, avec dans un premier temps une analyse discursive des émissions, journaux télévisés et programmes de la chaîne entre 2011 et 2021. Il s'agit de collecter, sélectionner et trier les différents sujets diffusés qui traitent plus ou moins directement de la migration environnementale afin d'obtenir une première série de résultats relatifs à la quantification et aux angles retenus concernant la médiatisation de ces phénomènes migratoires. Cette analyse discursive sera ensuite complétée par une série d'entretiens et enquêtes qualitatives, à réaliser auprès des journalistes et responsables d'édition afin d'obtenir des résultats relatifs aux pratiques et aux représentations du corps professionnel.

2 Une définition qui interroge les méthodes de quantification et le droit international

Une des principales difficultés à laquelle se heurte le début de ce travail de recherche relève du problème de la

quantification des phénomènes migratoires. L'absence de normes en matière de collecte des données rend difficile la quantification : il existe des données quantitatives sur les déplacements de population relatifs aux aléas climatiques à l'intérieur d'un pays et, dans une moindre mesure, entre pays transfrontaliers.

En revanche, en ce qui concerne les migrations résultant de phénomènes environnementaux à évolution lente, tels que la sécheresse ou l'élévation du niveau de la mer, la plupart des données existantes restent qualitatives et fondées sur des études de cas, avec peu d'études comparatives.

De cette difficulté liée à la quantification, dépend en partie celle du statut et des dispositifs d'aide aux populations.

Les changements environnementaux et climatiques interrogent le statut et les instruments juridiques, par-delà des frontières, qui devraient accompagner et encadrer ces phénomènes. En France, les chercheurs mettent en avant l'inadaptation des protections juridiques existantes et un débat est en cours, concernant l'opportunité d'instruments juridiques nouveaux.

La question du statut juridique interroge également les termes et les définitions appropriées pour désigner les populations confrontées aux dégradations de l'environnement. En 2005, le colloque de Limoges [1] mettait en évidence la nécessité d'un statut international pour les « réfugiés écologiques ». Trois ans plus tard, un groupe d'universitaires de Limoges rédigeaient un projet de Convention sur le statut international des « déplacés environnementaux ». La plupart des médias utilisent quant à eux le terme de « réfugié », qui serait selon François Gemenne [2] un abus de langage. Du point de vue juridique, un réfugié est une personne qui a franchi une frontière. Or, les migrations pour cause climatique concernent essentiellement des migrations internes. De plus, le terme de « réfugié » renvoie à la définition de la Convention de Genève des réfugiés politiques, qui ne mentionne pas de cause environnementale de déplacement, faisant référence à la notion de persécution manifestement inadaptée au cas des déplacements environnementaux. Christel Cournil [3] rappelle que « *le HCR s'est clairement positionné sur l'utilisation erronée des expressions de réfugiés climatiques ou environnementaux qui, selon lui, conduit à une confusion grave avec le droit international existant* ».

3 Information télévisée et « évènement médiatique »

Si le sujet mobilise les spécialistes du droit international et les dirigeants des grandes organisations internationales, la thématique des déplacés environnementaux semble rester sous les radars médiatiques.

Suite à une première phase d'observation des

programmes de la chaîne grâce aux outils de l'Institut national de l'audiovisuel (INA), il ressort que les « déplacés environnementaux » ne font l'objet que d'un traitement médiatique ponctuel, sous le prisme de l'évènement des catastrophes naturelles.

Dans les journaux télévisés des chaînes d'information en continu, il semblerait que les migrations sont abordées suite à la naissance d'un conflit ou d'une catastrophe naturelle par exemple, où de nouveaux noms de personnes, de lieux apparaissent.

On peut s'interroger sur les motivations qui précèdent l'exercice journalistique : à partir de quel moment un journaliste estime-t-il qu'il est important d'en parler ? Faisant référence aux travaux de recherche de Brigitte Sebbah [4], cette interrogation renvoie à la notion d'évènement. À partir de quel moment une « info » fait évènement et ne le fait plus ? Lorsque l'aspect nouveauté, originalité est épuisé ? Lorsqu'une nouvelle actualité « chasse » la précédente ?

En 2015, la photographie d'Aylan Kurdi, trois ans, mort sur une plage de Turquie, avait « choqué l'Europe », provoquant une « déferlante médiatique ». La famille du petit garçon avait fui la Syrie, pays confronté aux exactions du groupe Etat islamique et frappé par une intense sécheresse entre 2006 et 2010. Certaines théories ont fait le lien entre la sécheresse, l'exode rural et la guerre, pointant du doigt le rôle du climat au même titre que les facteurs politiques et socio-économiques.

À l'époque, toutes les chaînes d'information se sont emparées du sujet. Manuel Valls, alors Premier ministre, tweeta son émotion, de nombreux élus se joignant à lui. En une semaine, la part des Français se disant favorables à l'accueil de réfugiés syriens passe selon les sondages de 44 à 54%. Les artistes se mobilisent et cosignent une tribune appelant à venir en aide aux réfugiés.

Deux mois plus tard, les attentats du 13 novembre 2015 rabattent les cartes, l'Union européenne et la Turquie passant un accord pour stopper les vagues de réfugiés syriens vers la Grèce, au grand damne des milieux humanitaires et associatifs. En 2021, ce sont plus de 2000 migrants qui meurent en mer Méditerranée. À l'autre extrémité de la France, des centaines de migrants tentent de traverser la Manche quotidiennement, au péril de leur vie.

D'après les premiers résultats de l'observation et de l'analyse des programmes, il n'est jamais question dans les journaux de BFM TV des raisons et des causes qui ont poussé ces personnes à migrer.

Pour François Gemme [4], spécialiste des migrations environnementales, « le motif environnemental n'est pas pris en compte et la différence entre migration économique et politique est artificielle. [...] la « crise des réfugiés » fait ressurgir la dichotomie, qu'on pensait avoir dépassée, entre migration politique et migration

économique. Notamment avec l'accord entre l'Union européenne et la Turquie au sujet des réfugiés, qui repose sur une logique de tri entre réfugiés politiques et migrants économiques. La réalité des migrations est infiniment plus complexe. »

Comment s'organise la production et la hiérarchisation de l'information sur BFM TV ? Pourquoi n'est-il jamais question des raisons et des origines des migrations ? Quels mécanismes sont à l'œuvre au sein de la chaîne d'information en continu ? La nature et la complexité des processus migratoires seraient-elles en cause ou bien s'agit-il d'un problème de représentation ou d'engagement de la part des journalistes et chefs d'édition ? Est-ce une pression de la chaîne et des annonceurs ou une volonté assumée des responsables d'édition de suivre les actualités « qui font évènement », au détriment de celles, plus complexes, qui se montrent moins ?

4 Conclusions

L'objet de cette recherche consiste donc à interroger les processus migratoires environnementaux et les pratiques journalistiques des chaînes d'information en continu, en prenant l'exemple de BFM TV. Il s'agira de questionner à la fois les conditions de production des informations et les représentations du corps professionnel. « Parce qu'elles sont plus soumises aux contraintes économiques et temporelles que les grandes chaînes généralistes, les télévisions d'information en continu doivent produire des news avec peu de moyens matériels et humains », expliquent Dominique Marchetti et Olivier Baisnée [5]. Le modèle économique des rédactions télévisuelles en continu, « premières sur l'info » permet-il de garantir une couverture médiatique pertinente des phénomènes migratoires, en adéquation avec les enjeux socio-économiques contemporains ? L'idéal professionnel étant de « faire coïncider l'action, l'énonciation et la diffusion », que cela signifie-t-il en termes de conception et de représentation d'une « bonne » information ?

Références

- [1] BETAILLE J., 2010, Des « réfugiés écologiques » à la protection des « déplacés environnementaux », éléments du débat juridique en France, *Hommes et migrations*, n°1284, p.144 à 155.
- [2] GEMENNE F., 2022, *On a tous un ami noir : pour en finir avec les polémiques stériles sur les migrations*, Paris, Fayard/Pluriel, p. 203.
- [3] COURNIL C., 2011, *The Question of the Protection of Environmental Refugees within the Light of International Law, Migration and Climate Change*, UNESCO, Cambridge University Press.
- [4] SEBBAH B., (2017). L'évènement politique en ligne. *Sciences de la société*, (102), 3-15.
- [5] MARCHETTI D., BAISNEE O., L'économie de l'information en continu, *Réseaux*, 2002/4, n°114, p. 181 à 214.

Les liaisons dangereuses de l'écologie avec l'économie

De la théorie des écosystèmes à la théorie des services écosystémiques

Thierry Rolland¹

thierry.rolland@univ-amu.fr

¹ IUT, Aix-Marseille Université
Centre Gilles Gaston Granger, UMR 7304

Thèmes – *Écologie – économie - Épistémologie - SHS*

Résumé – *Le présent article expose la généalogie de l'émergence du concept d'écosystème et de l'influence sous-jacente de la dimension économique dans son élaboration. Ce que nous voulons montrer, c'est que la Théorie des services écosystémiques en vigueur à l'échelle internationale, employée comme outil d'aide à la décision par des décideurs dans leurs politiques d'aménagement et de développement, est l'héritière en ligne directe de la théorie des écosystèmes. Cette inspiration tirée de l'économie n'est pas sans conséquence dans les orientations actuelles de lutte contre l'érosion massive de la biodiversité et les réponses qui y sont apportées. L'écologie, cependant, n'est pas qu'affaires de bilans et de résultats d'exploitation. Et la biodiversité n'est pas sécable en indispensable ou rare d'un côté, et plus ordinaire de l'autre, qui elle pourrait passer pour quantité négligeable et servir de monnaie d'échanges. Si économie et biodiversité doivent faire bon ménage, car notre survie en dépend, c'est dans la prise en compte d'une valeur intrinsèque du vivant dans la complexité des liens qu'il tisse avec son milieu, loin de l'anthropocentrisme qui caractérise les politiques de préservation en vigueur aujourd'hui.*

Mots-Clés – *écosystème, services écosystémiques, monétisation, biodiversité.*

1 Introduction

L'écologie s'est développée autour de trois approches qui correspondent aux différentes orientations prises par la discipline ; c'est ainsi que s'est dessinée l'émergence du concept d'écosystème au carrefour de plusieurs courants scientifiques [1] : réflexions sur la répartition des organismes vivants, réflexions sur les interactions entre facteurs biotiques et abiotiques, et réflexions sur la dynamique des populations. Ces approches sont le reflet de conceptions épistémologiques qui traduisent à leur manière des moments de l'histoire des relations entre les sciences naturelles, les autres sciences biologiques et les sciences physiques en écologie depuis plus d'un siècle. C'est la démarche systémique qui associe des phénomènes physiques et biologiques dans une théorie scientifique générale commune que nous souhaitons interroger dans ses rapports et son inspiration relevant de l'économie, questionnement pour le moins iconoclaste sur une science considérée comme un modèle par excellence d'intégration et d'interdisciplinarité. L'objectif de cet article est de montrer néanmoins que la structure théorique du concept d'écosystème s'est construite dans le champ sémantique de l'économie, relayée en cela par une méthode analytico-réductive basée sur des bilans quantitatifs, à partir d'une grille de pensée économiste et productiviste qui préconise de penser le vivant en fonction des services économiques que rendent les écosystèmes. D'où l'intérêt de les optimiser comme le notait Deléage [2], pour qui l'écologie globale « anticipe la demande d'une société soucieuse d'efficacité dans l'exploitation de la nature. » La monétisation de l'environnement via la théorie des services écosystémiques en vogue aujourd'hui, en est donc un prolongement logique.

2 Le concept d'écosystème : un paradigme au cœur de la discipline écologique

Si le terme d'écosystème a été énoncé pour la première fois dans un article de Tansley [3] consacré à l'écologie en 1935, c'est le limnologue Lindemann [4] qui en 1942 lui donne le statut de concept. Les études écosystémiques deviennent des analyses de flux d'énergie et de matériaux au travers d'unités composées de communautés biotiques arbitrairement définies.

La généralisation de ce type d'approche est assurée par l'édition d'ouvrages de synthèse, comme le *Fundamentals of Ecology* d'E. P. Odum [5] en 1953 véritable bible des écologistes, qui officialise l'utilisation du terme écosystème en exposant les méthodes quantitatives énergétiques et en proposant différents modèles [6], [7]. L'analyse des systèmes est sous-jacente à la définition d'un écosystème donnée par E. P. Odum en 1953 « comme unité naturelle qui comprend des parties vivantes et non vivantes interagissant pour produire un système stable dans lequel l'échange de matériaux entre

les parties vivantes et non vivantes suit des chemins circulaires. [5] » Elle aborde en effet les systèmes complexes comme des composants interconnectés avec des boucles de rétroaction qui stabilisent le système à un point d'équilibre relativement constant [8]. Inhérente à l'analyse des systèmes, l'analogie de la machine et le rôle grandissant de l'ordinateur dans les modèles écosystémiques ont favorisé l'intégration des lois de la thermodynamique et de la conservation de masses dans la science moderne des écosystèmes [9]. Néanmoins, le recours systématique à un réductionnisme quantitatif, décliné dans des méthodologies analytico-réductives, s'est fait au détriment de la dimension intégrative et holiste de l'écologie. L'écosystème se trouve ainsi « réduit » à des bilans d'énergie et de matière calculés sur la base des échanges entre les organismes et le biotope dans lequel ils évoluent. L'analogie avec la science économique paraît évidente, c'est ce qui va être développé dans le paragraphe suivant.

3 La notion d'utilité, un pont avec l'économie

Tansley à l'origine du concept d'écosystème, défend la thèse d'une inclusion de la dimension anthropique dans l'écologie. Selon lui, « l'analyse scientifique doit aller au-delà des apparences formelles des entités naturelles et [...] s'adapter aux conditions créées par les activités humaines. [3] » Cette analyse est confortée par P. Acot [10] pour qui naît alors une « pensée écosystémique » induisant « l'apparition d'une idéologie écologiste systémiste qui transformera les représentations sociales des relations nature-société, dans les sociétés industrielles » mais qui est également le reflet, voire le produit de représentations inspirées de l'économie capitaliste. L'écologie odumienne veut voir les écosystèmes comme des fonctions à optimiser, comme Hayek voyait les entreprises avec une fonction à optimiser [11].

L'économisation de l'environnement en effet consiste à le considérer comme une ressource et une externalité, parce que limitée, donc susceptible d'être tarifée en fonction de l'intérêt que les agents lui portent [11]. La quantification de la biodiversité, quant à elle, proposée par le *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA) repose sur le partage en deux catégories d'espèces, les remarquables et menacées, qui font l'objet d'un calcul du coût de maintenance et d'entretien, et les autres, les « ordinaires » pour lesquelles on calcule les services qu'elles rendent par les méthodes classiques de l'analyse coûts-bénéfices.

L'application des critères de la théorie économique autorise donc des destructions irréversibles, et ce n'est pas la valeur de la rareté qui constitue une limite efficace à la préservation de la biodiversité, parce qu'elle n'est pas un bien marchand. L'idée de « services écologiques » revient à une nomenclature d'effets chimiques et biologiques qui progressivement justifie par l'analyse coûts-bénéfices toutes les substitutions basées sur des équivalences technocratiques [11]. Et ces substitutions favorisent l'accaparement par des sociétés privées des brevets

favorisant les productions artificielles au détriment des cultures traditionnelles, dont la limite est sans cesse repoussée par des instances qui n'ont d'autres références éthiques en tête que la logique économique [11]. L'approche odumienne projette sur le vivant une grille de pensée économiste et productiviste qui engendrera la théorie des services écosystémiques qui préconisent de penser le vivant en fonction des services économiques pour assurer les besoins matériels et culturels que rendent les écosystèmes. Cette pensée va irriguer la majeure partie des études en écologie au cours de la seconde moitié du XXe siècle.

Si l'on veut éviter que le monde soit mis en conformité avec cette seule approche odumienne, et donc, limiter la déforestation, le recours à une agrochimie intensive, le brevetage sans limite du vivant modifié, et l'érosion de la biodiversité dans la perspective du seul profit économique, il faut entendre les avertissements des scientifiques qui depuis près d'un demi-siècle alertent sur les dangers de l'exploitation irraisonnée du vivant. Il nous faut changer de perspective et d'approche épistémologique : d'un savoir sans limites encapsulé dans la croyance positiviste d'une science à l'épreuve d'un réel entièrement dévoilé, il nous faut reconnaître notre ignorance face à la complexité que représente les écosystèmes à la fois dans leur structure et leur fonctionnement, car il y aura toujours des zones, des interstices où la science viendra buter contre ce réel sans l'éclairer dans sa totalité. Cette ignorance est d'ailleurs gage à la fois de modestie, et donc de respect vis-à-vis de l'objet d'étude, la nature, mais aussi de *libido sciendi*, de désir de connaissance. Il faudra pour y arriver « se libérer d'une philosophie de la connaissance qui se présente comme ayant trouvé l'efficacité définitive [12] ».

4 Conclusion

L'inspiration économique qui a imprégné la théorie des écosystèmes, dans des dimensions analytico-réductives d'une approche quantitative fondée sur des bilans de matière et d'énergie, a engendré la théorie des services écosystémiques qui regroupe les fonctions des écosystèmes selon les services qu'ils nous rendent et contribuent à notre bien-être. Monétariser le vivant conduit à séparer le « bon grain de l'ivraie », les milieux dits ordinaires de ceux qui mériteraient plus notre attention et protection. Cependant, cette vision utilitariste a ses limites par les biais anthropocentrés qu'elle introduit dans l'évaluation d'un environnement à protéger, qui selon nous, n'est pas marchandable. Car l'arrêt des fonctions assurées par les habitats et les espèces, ce rôle qu'ils exercent pour que l'ensemble tienne, ne procède pas d'une quantification linéaire, qui consisterait à dire, il y a 60% d'espèces en moins, et donc, 60% de fonctions perdues. Des « points de non-retour » peuvent être

franchis au-delà d'un certain seuil qui provoquent un effondrement général de la biodiversité. Pour autant, il ne s'agit pas de se passer de l'évaluation des services écosystémiques, car nous dépendons bien évidemment de la nature pour notre survie et notre production. Il faut en revanche bien cerner la portée et les limites de ce concept, et l'intégrer dans une perspective qui transforme notre regard sur la nature pour lui reconnaître une valeur intrinsèque qui dépasse nos intérêts propres.

Références

- [1] T. Rolland, «Peut-on se passer du concept d'écosystème ? Partie I : questions épistémologiques et méthodologiques,» *European Scientific Journal*, vol. 32, pp. 306-325., 2018.
- [2] J.-P. Deléage, Histoire de l'écologie, une science de l'homme et de la nature, La Découverte, 1991.
- [3] A. G. Tansley, «The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms,» *Ecology*, vol. 16, pp. 284-307, 1935. P. Acot, Histoire de l'Écologie, Paris: PUF, 1994.
- [4] R. L. Lindeman, «The trophic-dynamic aspect of ecology,» *Ecology*, vol. 23, pp. 399-418, 1942.
- [5] E. P. Odum, Fundamentals of Ecology, 3e édition. s.l. : W.B. Saunders Company,., 1953.
- [6] W. Schlesinger, Discussion : ecosystem structure and function, Princeton: Roughgarden, J. et al. (eds), Perspectives in ecological theory, Princeton University Press, 1989, pp. 268-274E.
- [7] R. Margalef, Perspectives in ecological theory, Margalef, E. R. Perspectives in ecological theory. Chicago : Univ. of Chicago Press., 1968.
- [8] G. E. Hutchinson, «Circular causal Systems in Ecology,» *Annals of the New York Academy of Sciences* 50, pp. 221-246, 1948.
- [9] V. R. O'Neill, «Is it time to bury the ecosystem concept? With fully military honors, of course,» *Ecology*, pp. 3275-3284, 2001.
- [10] P. Acot, Histoire de l'Écologie, Paris: PUF, 1994.
- [11] N. Bouleau, Introduction à la philosophie des sciences, Spartacus, 2020.
- [12] N. Bouleau, Ce que Nature sait. La révolution combinatoire de la biologie et de ses dangers, PUF/Humansis, 2021, p. 538.

Pourquoi écrit-on des fanfictions ? Entre réception et inscription de soi en discours

Magali Bigey¹

magali.bigey@univ-fcomte.fr

¹ IUT Besançon-Vesoul, Université de Franche-Comté
Laboratoire ELLIADD, EA 4661

Thèmes – SHS - Lettres - Communication

Résumé – *La fanfiction est peu connue du grand public, pourtant elle a donné lieu à des publications qui ont généré des millions de ventes dans le monde (50 Shades of Grey, After...). La très grande majorité des 12-25 ans lit des fanfictions, et une grande partie d'entre eux en écrivent. Elles sortent peu à peu de l'ombre, et les fanficeurs ne sont plus seulement des adolescents mais sont représentés par des adultes et jeunes adultes qui ont débuté tôt la pratique. La fanfiction est portée par des plateformes collaboratives sur internet, et si certains peuvent être amenés à penser que c'est un passe-temps peu impliquant, nous montrerons dans cet article comment le mécanisme de production se met en œuvre, et comment les auteurs s'impliquent personnellement dans leurs écrits tout en respectant les codes. Nous verrons ce qu'est la fanfiction, comment elle fonctionne et quels sont ses ressorts créatifs, entre réception de la lecture et écriture de soi.*

Mots-Clés – fanfiction – acte d'écriture – ethos - lectorat

1 Introduction

C'est à mi-chemin entre la lecture et l'écriture que l'on trouve la fanfiction. Lecture au sens large, puisqu'il est ici question de réception, de lecture d'une œuvre, quelle qu'elle soit. Une fanfiction est un écrit réalisé par un fan et quand un futur auteur rencontre le canon de ce qui deviendra partie intégrante de sa vie, il s'est passé quelque chose entre le canon et le fan. Comment est-il possible d'écrire l'autre, sans y mettre de soi, est-ce possible d'ailleurs ? En étudiant les pratiques de fans, en observant les auteurs parler de leurs passions, de leurs motivations et en nous plongeant dans des fanfictions, nous avons vu émerger la trace d'un ethos, celui de l'écrivain, à travers le(s) personnage(s) qu'il fait vivre et réinvente au fil du temps.

2 La création fanfictionnelle

La fanfiction (ou « fanfic ») est un récit de fans, écrit, réalisé, pensé par des fans, pour eux-mêmes ou d'autres fans, le plus souvent pour prolonger, modifier, réécrire, amputer une œuvre, souvent une série, qu'elle soit littéraire ou télévisuelle. Elle est un mode d'expression à part entière, un lieu d'investissement où se jouent divers engagements pour leurs auteurs qui se retrouvent tour à tour du côté de la réception (car recevant et métabolisant la série qui leur plaît) comme de la production, en mettant en scène de nouveaux pans de la série sortis de leur imagination, répondant aux manques qu'ils voient dans l'original, ou à un désir de s'en emparer par ce biais pour y participer. Dans cette configuration, les fans deviennent auteurs, lus par d'autres fans qui peuvent éventuellement devenir eux-mêmes des fanficeurs... C'est un phénomène circulaire par lequel on assiste à une mise en abîme de la production sérielle originale, que le fanficeur va s'approprier le temps de sa propre création ; cela va d'ailleurs engendrer des modifications de rapports de place, et c'est cet écrit secondaire qui va lui-même définir les positionnements de production/réception, pour les auteurs comme pour les lecteurs. Le fan propose à la lecture son écrit fanfictionnel passant donc d'un rôle de public récepteur à celui d'auteur acteur, se mettant dans l'attente de remarques et commentaires pour son écrit : « La raison d'être des fanfictions se trouve [...] dans une attitude active, voire critique, face aux produits médiatiques adorés, entre "admiration" pour ces derniers et "frustration" face aux choix officiels », François [1].

En publiant sur une voire plusieurs plateformes, les auteurs donnent à voir leurs choix d'histoires, les partis pris et modifications réalisées : « Les fans ont la possibilité d'explorer le "what else ?" : par des suites proleptiques, analeptiques ou elliptiques, ils étendent l'œuvre d'origine en comblant les ouvertures laissées par l'auteur. Ils explorent également le "what if ?" lorsqu'ils

modifient tel élément canonique pour en voir les conséquences. Tout dépend donc de la façon dont les fans se positionnent par rapport à l'œuvre d'origine », Boucherit [2].

Alors en devenant eux-mêmes producteurs, donc émetteurs et plus seulement récepteurs, les auteurs de fanfictions changent de statut. Dans « L'impossible clôture des récits multimédiatiques » Marc Lits [3] soulève le point très important de l'articulation entre réception et production des récits, qui sont intrinsèquement liées dans les œuvres de fans : ces derniers deviennent à leur tour émetteurs de l'œuvre de fiction qu'ils considèrent comme suffisamment intéressante pour la compléter ou la modifier, en fonction de ce qu'ils ressentent ou des moments de leur rencontre avec elle, qui sera très importante pour la suite de la réalisation ; certains auteurs parlent même de décliv. Les études menées par les diverses plateformes montrent que les jeunes de 18 à 27 ans sont les plus représentés, et que ces auteurs(es) sont principalement des femmes, à plus de 80 % ; c'est à elles que nous allons nous intéresser.

3 Les fanfictions : une histoire de filles ?

La fanfiction, cet écrit inspiré d'une œuvre originale, écrit par qui souhaite le faire en respectant ou non des règles, est donc une pratique répandue qui permet à tout un chacun (chacune ?) de laisser libre court à son imagination. Est-ce une « histoire de filles » ? Pas totalement, mais un peu tout de même. Les auteures de fanfictions elles-mêmes se rendent compte qu'elles sont entre filles, dans l'acte d'écriture, de lecture :

« Quand on va sur le site on se rend compte qu'il y a beaucoup plus de femmes que d'hommes, c'est évident, je pense qu'on s'en rend compte dans les commentaires, on s'en rend compte même dans l'écriture souvent (...) on n'a pas d'indicateurs qui nous le laissent penser, mais finalement on se rend quand même rapidement compte effectivement que l'écriture est féminine, que les commentaires sont féminins que... alors comment on s'en rend compte, je sais pas. »

En effet, les marqueurs de la féminité dans l'écriture ne sont pas forcément flagrants, d'aucuns diraient que c'est dans le style, plus délié, moins agressif, des termes plus recherchés, mais pas forcément... autant de marqueurs donc que de poncifs sur une écriture genrée, « où l'opposition "style viril/roman sentimental" scelle les deux bornes de l'opposition entre le masculin et le féminin » [4]. Quoi qu'il en soit, même si intuitivement les auteures comme les lectrices de fanfictions ont cette impression, c'est très vraisemblablement parce que c'est le cas, c'est une production très majoritairement réalisée par des femmes.

3.1 Les fanfictions : ce qu'elles en disent

Dans cet art personnel donné à voir, les auteures

revendiquent plusieurs motivations de création. Loin d'être un simple passe-temps, pour beaucoup la fanfiction est une activité artistique réfléchie qui parfois trouve son origine, son moteur, dans des chemins de vie divers clairement assumés. C'est auprès de plusieurs d'entre elles, rencontrées par l'intermédiaire du webdocumentaire Citizen Fan ou par le biais de conférences-débats, que nous identifions certaines de ces motivations.

Elles écrivent parfois sous un pseudonyme, donc sous couvert d'un anonymat qui leur permet une grande liberté d'expression. L'une d'entre elles, MadokaAyu, parle de la difficulté d'être mise en avant par l'acte d'écriture et surtout par sa diffusion ; l'anonymat est le moyen pour elle de préserver son identité personnelle au bénéfice du récit, puisque l'auteure s'efface, du moins dans les signes habituels qui permettent de l'identifier.

L'investissement personnel dans l'acte d'écriture parfois fantasmatique n'écrase par l'auteure ou sa personnalité, mais représente au contraire une sorte de catalyseur. À ce propos, les paroles de Lasilvana au sujet de sa pratique fanfictionnelle sont des plus claires : « On écrit avec ce qu'on est, on met beaucoup de soi dans un écrit, souvent des choses un peu intimes. Moi par exemple j'ai essayé d'écrire des textes originaux, que j'ai publiés sur Fictionpress, et je les ai tous effacés parce que j'avais l'impression que ça se voyait trop que c'était moi quoi, que ça parlait de moi, et j'ai pas réussi à les laisser parce que j'avais l'impression de mettre des choses trop intimes sur Internet, alors que la fanfiction, c'est des personnages, c'est pas moi qui les ai créés, ils existent déjà, et du coup, je peux parler d'eux, même si ils me ressemblent, ben c'est quand même pas moi » (sic). L'incarnation en dehors du canon permet une grande liberté d'imagination, même dans l'écriture *In Character*¹. La plupart du temps, quand on questionne les fanficeurs, ils sont bien conscients des mécanismes de leur acte créatif. Par exemple pour MadokaAyu, la fanfiction est une consolation qui pallie les manques qu'elle éprouve dans la série américaine *Castle*, dont elle se dit fan depuis la première saison.

3.2 S'approprier et ne pas subir l'œuvre

Si l'appropriation est un terme récurrent dans les commentaires des auteures sur leurs pratiques, elle revêt diverses formes, diverses manières de métaboliser le récit initial et de le présenter transformé, parfois en réaction par exemple à un battage médiatique trop fort ou à des événements qui déplaisent. Pour Elimor, écrire une fanfiction « (...) c'est une façon de s'approprier l'œuvre, de ne pas la subir, au contraire, d'y prendre ce qu'on veut, de retrouver sa liberté face à un matraquage

[médiatique] ». Des choix se font parfois purement sur des critères physiques, d'autres sont ancrés plus loin : « Le personnage est assez ressemblant à tous les personnages féminins que j'ai aimés dans mon enfance. »

Cette dernière remarque rejoint ce qui est dit de la pratique lectorale des *Yaoi*² par Christine Détrez [5] concernant les motivations de lecture, « les filles trouveraient, dans ces personnages masculins le plus souvent androgynes, une possibilité d'identification en alternative aux personnages féminins trop niais et stéréotypés ». Les motivations d'écriture sont ici très proches des motivations de lecture.

4 Conclusions

La fanfiction, plutôt pratique féminine, est l'objet d'un braconnage hétéroclite d'idées, d'inspirations, de personnalités, de commentaires dans la réalisation de l'acte d'écriture. Si l'histoire, la fabula dépassent le genre, en sont indépendantes, le plaisir de l'écriture puis de la lecture le sont apparemment également. On sent une sorte d'attachement pour le personnage ainsi créé, l'auteure lui créant un environnement fictionnel auquel il s'accorde et qui le satisfasse. L'écriture fanfictionnelle est donc vécue comme une manière de s'exprimer, en se tenant soi-même à distance, une distance réfléchie, personnelle, en choisissant des personnages existants et en les incarnant. La plupart du temps, ces personnages ont des résonances conscientes chez les auteures, de ce qu'elles aiment, de ce qu'elles souhaitent lire voire être. La fanfiction permet tout cela. C'est ce jeu, cette implication qui permet également l'acte créatif à partir du canon, qui permet de s'en détacher assez pour pouvoir l'intégrer, le modifier, le restituer sous une autre forme, ce qui n'est pas sans rappeler le braconnage de De Certeau [6].

Références

- [1] François S. (2009), « Fanf(r)ictions. Tensions identitaires et relationnelles chez les auteurs de récits de fans », Réseaux, vol. 1, n° 153, pp. 157-189.
- [2] Boucherit A. (2012), « Fanfictions », Médium, vol. 1, n° 30, pp. 51-64.
- [3] Lits M. (2010), « L'impossible clôture des récits multimédiatiques », A contrario, vol. 1, n° 13, pp. 113-114.
- [4] Naudier D. (2001), « L'écriture-femme, une innovation esthétique emblématique », Sociétés contemporaines, vol. 4, n° 44, pp. 57-73
- [5] Détrez C. (2011), « Des shonens pour les garçons, des shojos pour les filles ? Apprendre son genre en lisant des mangas », Réseaux, vol. 4, n° 168-169, pp. 165-186.
- [6] De Certeau M. (1990), *L'invention du quotidien. Tome I : Arts de faire*, Gallimard.

¹ Personnage respectant tous les traits physiques, moraux et relationnels lui étant attribués dans l'œuvre originale.

² Œuvre de fiction centrée sur les relations sentimentales et/ou sexuelles entre personnages masculins

La digitalisation de la Supply Chain comme aide à la création d'un Business Model

Durable

Didier Bédé¹ Taskeen Torrero² Saliha Hadna-Bremand³
Marie-Andrée Rakotovahiny⁴ Saïd Tkhayyare⁵

¹ IUT, Université Toulouse III Paul Sabatier
Laboratoire de Gestion et des Transitions Organisationnelles (URU-7416)
Département Gestion des Entreprises et des Administrations (site de Ponsan)
Maître de Conférences en Sciences de Gestion
didier.bede@iut-tlse3.fr (corresponding author)

² IUT, Université Toulouse III Paul Sabatier
Département Gestion des Entreprises et des Administrations (site de Ponsan)
PRCE en Anglais
taskeen.torrero@iut-tlse3.fr

³ IUT, Université Toulouse III Paul Sabatier
Centre d'Étude et de Recherche Travail Organisation Pouvoir (UMR-5044)
Département Gestion des Entreprises et des Administrations (site de Ponsan)
Maître de Conférences en Sociologie
saliha.hadna-bremand@iut-tlse3.fr

⁴ IUT, Université Toulouse III Paul Sabatier
Laboratoire d'Études et de Recherches Appliquées en Sciences Sociales (EA-827)
Département Gestion des Entreprises et des Administrations (site de Ponsan)
Maître de Conférences HDR en Droit Privé
marie-andree.rakotovahiny@iut-tlse3.fr

⁵ IUT, Université Toulouse III Paul Sabatier
Département Gestion des Entreprises et des Administrations (site de Ponsan)
PRLP en gestion de la production et comptabilité
said.tkhayyare@iut-tlse3.fr

Thèmes – Gestion - SHS

Résumé – *Cet article a pour ambition de comprendre l'impact de la digitalisation de la Supply Chain sur la prise de décision dans le cadre du développement d'un business model durable. Pour éclairer les conséquences de la digitalisation de la Supply Chain sur la proposition de business model, nous avons mobilisé le concept de développement durable en management de la chaîne logistique. À partir d'une mise en application au sein d'une Situation d'Apprentissage et d'Évaluation (SAÉ) auprès de 26 étudiants spécialisés en Supply Chain Management, nous avons utilisé un serious game dans le secteur du transport et fait usage de la réalité virtuelle comme supports de la digitalisation de la Supply Chain afin de concevoir des observations et une analyse de situations particulières qui contribuent à la prise de décision dans les phases d'idéation et confrontation du business model durable à la réalité du terrain. Les premiers résultats montrent que la digitalisation de la Supply Chain augmente la créativité des porteurs de projets et renforce les processus de sérendipité en favorisant l'identification de paramètres imprévus.*

Mots-Clés – Supply Chain, Digitalisation, Serious Game, Réalité Virtuelle, Business Model, SAÉ.

1 Introduction

L'importance de la logistique pour développer la création de valeur économique ne cesse de croître, tout comme le spectre des compétences et des activités regroupées dans le domaine du management de la chaîne. Dans le cadre de la construction de la SAÉ3.GEMA.02 : « De la recherche de l'idée à la création d'activité à l'aide d'un Business Model »¹ relatif au parcours BUT GEMA spécialisé en « International Supply Chain Management » au sein du département Gestion des Entreprises et des Administrations de l'IUT Paul Sabatier (Université Toulouse III – site de Ponsan), nous avons utilisé des supports de digitalisation de la Supply Chain (SC) afin de permettre à 26 étudiant(e)s d'affiner leurs prises de décisions quant à la conception d'un Business Model Durable (BMD). La SAÉ s'est déroulée du 07 au 10 novembre 2022 en suivant une organisation précise (cf. Annexe 1 – Organisation de la SAÉ).

Les points marquants du planning relatif à l'utilisation de supports en lien avec la digitalisation de la SC dans la construction d'un BMD ont occupé un jour et demi sur les quatre jours de la SAÉ. L'après-midi du 1^{er} jour de la SAÉ a été consacré au 1^{er} support de digitalisation de la SC : l'utilisation du serious game « Start-Up Mission - Entrepreneuriat Durable² » (cf. Annexe 2 - Réalisation du serious game). L'objectif pédagogique du jeu est d'intégrer les fondamentaux de la création d'une start-up durable dans le secteur du transport de passagers (VTC). Le jeu a servi de préalable à l'idéation d'un BMD par les étudiants. Le 3^{ème} jour de la SAÉ a été consacré à l'utilisation du 2nd support de digitalisation de la SC : l'utilisation de la réalité virtuelle (cf. Annexe 3 - Utilisation de la réalité virtuelle) pour confronter le BMD proposé par les étudiants à la réalité du terrain. Les étudiants ont ainsi pu visualiser des vidéos à 360°, *via* l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle, du lieu d'implantation de leur projet.

2 Digitalisation de la Supply Chain et Business Model Durable

Les organisations remodelent actuellement leurs stratégies pour devenir de plus en plus transparentes, y compris quant à la gestion de leur chaîne logistique. La digitalisation de la chaîne logistique commence ainsi à susciter une attention croissante la part des professionnels et des universitaires (Seyedghorban et al., 2020). La digitalisation consiste à utiliser et à adopter des ressources digitales (Internet des objets, big data, blockchain, réalité

virtuelle) pour améliorer le fonctionnement de la SC. Parallèlement, le concept de « *Business Model* », apparu dans les années 1990, vise à expliquer la logique commerciale fondamentale d'une entreprise, c'est-à-dire la manière dont elle crée de la valeur pour les clients et les parties prenantes tout en générant des revenus. Compte tenu des objectifs de développement durable contemporains, tel que le développement d'une économie circulaire, les BMD ont apporté un avantage concurrentiel pour améliorer les performances des organisations en matière de durabilité (Nosratabadi et al., 2019). Pour Bocken et al. (2015), le BMD est exploré à travers la valeur durable qu'il génère et se compose de trois éléments : la proposition de valeur ; la création et la mise à disposition de la valeur et finalement la capture de la valeur. À partir de ces éléments, un canevas de construction d'un BMD a été développé par Comin et al. (2020) pour permettre de représenter, en une seule page, l'ensemble du modèle économique d'un projet prenant en compte son orientation responsable et durable (cf. Annexe 4 – Matrice du modèle d'affaires responsable).

3 Résultats

La SAÉ 3.GEMA.02 a permis à 5 équipes d'étudiant(e)s de proposer 5 BMD³ d'amélioration de la SC et du transport de passagers sur 5 continents différents⁴. Suite à la réalisation de la SAÉ, l'utilisation de supports de digitalisation de la SC nous permet de relever 5 résultats significatifs.

3.1 Développer la créativité des porteurs de projets

L'utilisation d'un serious game préalablement au processus d'idéation d'un BMD permet, par l'utilisation d'un scénario inspiré de situations réelles, de développer la créativité des porteurs de projets en identifiant des limites spécifiques tout en ne négligeant pas les enjeux environnementaux et sociaux. Dans le cadre de la réalisation de la SAÉ, la principale limite fût liée à l'identification par les étudiant(e)s, dès la 2^{ème} session de jeu, d'une stratégie gagnante fondée sur des décisions uniquement en lien avec la durabilité du projet, quitte à ce que ces choix soient réalisés au détriment des facteurs économiques. Cette découverte a incité les porteurs de projets à chercher un équilibre entre la durabilité et la rentabilité de leurs BMD.

3.2 La digitalisation comme facteur de réflexivité face à l'échec

Les supports de digitalisation de la SC utilisés permettent

¹ Les compétences visées par cette SAÉ consistent à analyser une situation d'entreprise complexe ; utiliser des outils d'analyse et de diagnostic et sélectionner et traiter les informations pertinentes.

² Pour plus d'informations sur « Start-Up Mission » : <https://www.franck-tonnerre.com/presentation>

³ Les livrables demandés aux étudiant(e)s sont des présentations

PowerPoint sonorisées constituées de 6 slides, d'une durée maximum de 6 minutes, qui expliquent chaque élément clé du BMD. Les livrables sont consultables *via* le lien suivant : [BMD](#).

⁴ La création des équipes et l'attribution des zones continentales d'application des BMD ont été réalisées par un tirage au sort.

également de confronter les étudiant(e)s à un feedback immédiat (succès ou échec) quant à leurs prises de décisions. L'apprenant doit ainsi savoir observer et admettre ses doutes, et ses échecs, sereinement et avec modestie, tout en relativisant et en restant motivés pour conserver son efficacité. La digitalisation façonne ainsi des savoirs issus de l'action par un processus de réflexivité définie comme « *le mécanisme par lequel le sujet se prend pour objet d'analyse et de connaissance* » (Bonnet & Barth, 2017).

3.3 Créer des boucles de rétroactions nouvelles

La digitalisation de la SC permet de créer des boucles de rétroactions nouvelles nécessaires à la réalisation des premières versions du BMD en confrontant le projet à la réalité du terrain que ce soit *via* la réalisation d'un serious game fondée sur des situations réelles ou *via* la visualisation de vidéo à 360° réalité virtuelle. Le développement d'un BMD par la mobilisation de la digitalisation de la SC rejoint ainsi les affirmations de Leyronas, C. et Loup (2015) qui indiquent que « *le Business Model repose sur deux axes, un axe narratif (légitimité) et un axe économique lié à la justification d'une création de valeur (faisabilité)* ». Tandis que le serious game oriente la légitimité de l'inclinaison durable du BMD dans le secteur des transports, les vidéos à 360° en réalité virtuelle permettent une première projection du projet dans un cadre réel afin de mettre à l'épreuve la faisabilité du projet.

3.4 Fonctions hédoniques et utilitaires de la digitalisation de la Supply Chain

L'utilisation de la réalité virtuelle a eu un effet positif sur la motivation des étudiant(e)s à réaliser la SAÉ. Par une augmentation de la sensation de divertissement, l'on constate un renforcement positif de l'attitude des étudiant(e)s face au projet développé et à la perception de la SAÉ dans son ensemble.

3.5 Un renforcement des processus de sérendipité

Le principal apport de la digitalisation de la SC dans la création d'un BMD est relatif à l'identification de facteurs hasardeux et non linéaires : la topographie d'une ville, la présence d'activités sportives, l'identification de hub logistique, la présence d'infrastructures de transports, etc. L'utilisation de la digitalisation engendre des découvertes totalement inattendues et d'importance capitale, alors que les porteurs de projets cherchaient autre chose.

4 Conclusion

Cet article avait pour ambition de comprendre l'impact de la digitalisation de la SC sur la prise de décision dans le cadre du développement d'un BMD. Les supports mobilisés dans le cadre de la SAÉ3.GEMA.02 : « De la

recherche de l'idée à la création d'activité à l'aide d'un Business Model » mettent en lumière une amélioration de la créativité des porteurs de projets, permettent de les confronter à une situation d'échec engendrant une réflexivité des apprenants, renforcent la légitimité et la faisabilité du BMD, consolident la motivation des étudiant(e)s par le caractère hédonique et utilitaire des outils mobilisés, et accroissent la sérendipité des coïncidences pour pourraient s'avérer profitables pour les BMD.

Il semble également que l'utilisation de la réalité virtuelle soit une réponse aux attentes expérientielles d'une génération d'étudiant(e)s, la génération Z, qui accorde une importance capitale à un storytelling, à un contenu réaliste et authentique et à un mode d'apprentissage ludique et autonome (Schwieger et Ladwig, 2018). Ainsi, mixer des expériences d'évasion, d'éducation et de divertissement via des supports de digitalisation de la SC engendre une perception positive des porteurs de projets dans la réalisation d'un BMD.

Finalement, la digitalisation de la SC met en lumière le caractère intangible des projets et met l'accent sur les compétences à développer pour les futurs managers des chaînes logistiques quant à l'art de prêter attention à ce qui surprend et d'en imaginer une interprétation pertinente.

Références

- [1] Seyedghorban, Z., Tahernejad, H., Meriton, R., & Graham, G. (2020). Supply chain digitalization: past, present and future. *Production Planning & Control*, 31(2-3), p. 96-114.
- [2] Nosratabadi, S., Mosavi, A., Shamsirband, S., Zavadskas, E. K., Rakotonirainy, A., & Chau, K. W. (2019). Sustainable business models: A review. *Sustainability*, 11(6), 1663.
- [3] Bocken, N. M. P., Rana, P., & Short, S. W. (2015). Value mapping for sustainable business thinking. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 32(1), 67-81. <https://doi.org/10.1080/21681015.2014.1000399>
- [4] Comin, L.C., Aguiar, C.C., Sehnem, S., Yusliza, M.-Y., Cazella, C.F. and Julkovski, D.J. (2020), "Sustainable business models: a literature review", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 27 No. 7, pp. 2028-2047. <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2018-0384>
- [5] Bonnet, D., & Barth, I. (2017). Reflexivity and reflective work. *Revue internationale de psychosociologie et de gestion des comportements organisationnels*, 45-56.
- [6] Leyronas, C. & Loup, S. (2015). Le développement des compétences entrepreneuriales lors de la préincubation des projets d'étudiants. *Entreprendre & Innover*, 26, 8-17. <https://doi.org/10.3917/entin.026.0008>
- [7] Schwieger, D., Ladwig, C. (2018). Reaching and Retaining the Next Generation: Adapting to the Expectations of Gen Z in the Classroom. *Information Systems Education Journal*, 16(3) pp 45-54. <http://isedj.org/2018-16/> ISSN: 1545-679X.

Pratiques de recrutements en formation et critères de sélection : représentations des équipes pédagogiques en IUT

Anne-Laurence Ferrari¹ Cyril Masselot² Laurent Milland³
Antoniotta Specogna⁴

1 et 2 Université de Franche-Comté, IUT Besançon-Vesoul

anne-laurence.ferrari@univ-fcomte.fr ; cyril.masselot@univ-fcomte.fr

CIMEOS EA4177

³Université de Poitiers, IUT de Poitiers

CeRCA - UMR CNRS 7295

laurent.millant@univ-poitiers.fr

⁴Université de Lorraine, IUT Thionville-Yutz

2LPN, EA 7489

antoniotta.specogna@univ-lorraine.fr

Thèmes – SHS Communication

Résumé – Pour recruter les nouveaux étudiants en IUT les équipes pédagogiques s'adonnent à la sélection des dossiers déposés sur la plateforme Parcoursup par les candidats. La communication présentée s'attachera à analyser les pratiques de recrutement mises en œuvre au travers des choix de modalités effectuées et des critères de sélection privilégiés. Pour ce faire, les données recueillies grâce à la maîtrise d'œuvre « Parcoursup » seront analysées de façon quantitative puis et qualitative. L'intérêt est ici porté sur ce qui sous-tend la variabilité et l'invariabilité des pratiques de recrutement selon les deux secteurs que l'on retrouve pour les diplômes de Bachelor Universitaire de Technologie (B.U.T.) soit les B.U.T. en production et les B.U.T. en service.

Mots-Clés – Pratiques et représentations - recrutement - sélection – critères – modalités

1 Introduction

Avant chaque nouvelle année universitaire, le recrutement des nouveaux étudiants en France, s'opère par le biais de la plateforme nationale « Parcoursup ». Les choix émis par les élèves s'effectuent sur une période de fin d'année de terminale et sont étayés par divers documents attendus par la constitution du dossier ou complémentaires selon le choix des structures d'accueil ou de l'élève lui-même. Si la structure constituée au sein de la plateforme est uniforme, les modalités de recrutement sont spécifiques aux structures d'accueil. Pour ce qui nous concerne, nous avons choisi de nous intéresser à ces modalités pour appréhender au mieux les pratiques de recrutement élaborées par les équipes pédagogiques au sein des IUT et déceler la part invariable et la part variable de ces dernières.

2 Contexte de la recherche

L'objet de la recherche est d'interroger les pratiques de recrutement des candidats en première année de BUT et la représentation qu'en ont les recruteurs en mettant en exergue les critères qui font l'objet de sélection.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur les données quantitatives et qualitatives officielles et exhaustives fournies par la maîtrise d'œuvre « Parcoursup » pour les 108 IUT et leurs 24 spécialités de Bachelor Universitaire de Technologie (B.U.T.) des rentrées universitaires 2021 et 2022, en distinguant les modalités de recrutement de type épreuves ou entretiens de sélection au regard des spécialités et des choix de filières en formation initiale ou en apprentissage. Le lien étroit entre pratiques et représentations sociales [1] en matière de recrutement sera également exploré.

3 Cadrage théorique et méthodologique

Afin de nous saisir de ce qui fait l'objet de pratiques plus fines notamment au regard des critères de sélection et de ce qu'ils signifient pour les équipes pédagogiques nous nous appuyons sur le cadre théorico méthodologique de la psychologie sociale et de la didactique professionnelle pour rendre compte des représentations des examinateurs et des croyances qui nourrissent leur agir.

Les études quantitatives et qualitatives menées en psychologie sociale permettent d'appréhender dans l'agir comme dans le dire les représentations des opérateurs [4] qui nous amènent à extraire les

théorèmes et concepts en actes ([3] ; [12]) pour en élaborer les invariants opératoires.

La didactique professionnelle ([9]) prend son origine dans les trois domaines théoriques que sont la psychologie du développement [13], la psychologie ergonomique [8] [5] [6] et la didactique des disciplines, notamment la discipline mathématique [2]. Elle a comme objet l'analyse de l'activité en vue de concevoir la formation et rend compte de ce que les opérateurs « tiennent pour vrai » pour effectuer les tâches qui sont les leurs. De ce fait, elle est le cadre théorique pertinent pour compléter le cadre de la psychologie sociale précédemment citée et analyser l'agir dans l'action en vue de rendre compte des schèmes mis en place par les opérateurs. C'est précisément pour saisir les pratiques et représentations de celles et ceux qui les engagent et les mobilisent que nous avons notamment opté pour une analyse textuelle automatisée sur des corpus textuels numérisés via Alceste et son application IRaMuTeQ [10] ; [11]. Au travers des analyses que nous présentons ici, il s'agit d'identifier les traces de l'intention donnée, des pratiques mises en œuvre.

3.1 Premiers résultats : modalités de recrutement

Quels sont les éléments dont les équipes pédagogiques se saisissent pour recruter les futurs étudiants dans les filières de B.U.T. ? Est-ce que les attendus sont variables selon le choix de formation initiale ou en apprentissage ou encore, selon la spécialité de B.U.T. ? Nos analyses permettent de montrer par exemple :

- la similitude entre la nécessité ou pas d'un entretien ou d'une épreuve organisée pour la sélection toute spécialité confondue (tableau 1).
- la variabilité entre le type de formation choisie (tableau 2).

	Oui	Non
B.U.T. - Production	44	56
B.U.T. - Services	41	59
TOTAL	43	57

Tableau 1 – Epreuves/entretiens selon domaines de formation en %

Épreuves ou entretiens de sélection	Oui	Non
Sans apprentissage en 1 ^{ère} année	38	62
Avec apprentissage en 1 ^{ère} année	68**	32**
TOTAL	43	57

Tableau 2 - Epreuves/entretiens selon modalités de formation en %
**(indépendance statistique $\chi^2 = 42.42$, $ddl = 3$; $p. <= .001$)

3.2 Autres résultats : critères de recrutement

Compétences communicationnelles, formation pour les métiers du commerce

Antonietta Specogna¹ Tiago Mateus²

antonietta.specogna@univ-lorraine.fr tiago.mateus@univ-lorraine.fr

^{1,2} Université de Lorraine, IUT Thionville-Yutz
2LPN Laboratoire Lorrain de Psychologie et Neurosciences, EA 7489

Thèmes – *SHS - Communication* -

Résumé – La communication présentée explore les compétences transversales et plus précisément les compétences communicationnelles nécessaires aux métiers du commerce par le biais d'un dispositif de formation spécifique. Il sera alors question de montrer comment le dispositif mis en place participe du développement des compétences et ce qu'il génère chez les apprenants et chez les futurs recruteurs. Pour en rendre compte, il sera fait état de l'analyse d'un recueil de données obtenu par des observations réalisées en situations effectives, des entretiens qualitatifs menés auprès du public cible et des résultats aux évaluations auxquelles les apprenants sont soumis. Le dispositif de formation sera interrogé en vue de rendre compte de ce qui se produit pour le développement des compétences communicationnelles chez l'apprenant inscrit en BUT Techniques de Commercialisation.

Mots-Clés – *Analyse des échanges verbaux, didactique professionnelle, compétence communicationnelles, formation.*

1 Introduction

La réforme du Bachelor Universitaire de Technologie (B.U.T.) axe davantage la formation des étudiants autour de l'approche par compétences pour promouvoir le développement des compétences professionnelles en lien avec les métiers se rapportant aux différentes filières des B.U.T.

Dans cette optique les chercheurs du 2LPN se sont emparés de la question en vue d'évaluer un dispositif de formation spécifique aux métiers du commerce par le développement des compétences communicationnelles que l'on retrouve dans le programme national dudit diplôme.

Cette communication présentera le dispositif mis en place pour les étudiants de B.U.T. Techniques de commercialisation inscrits en 1^{ère} année. Il sera fait état du cadrage théorique et méthodologique du recueil et d'analyses de données pour mettre en exergue les compétences effectivement déployées par les sujets observés.

2 Contexte de la recherche

Les premières observations ont eu lieu en amont de la crise sanitaire de 2020, lorsqu'encore le B.U.T n'était pas né et était précédé du D.U.T. Pour construire les relations entre les acteurs des formations post baccalauréat des filières du commerce sur un même territoire, les intervenants de BTS et de DUT se sont réunis et ont constitué un groupe de pilotage pour concevoir un dispositif en lien avec les compétences communicationnelles. Par ailleurs cela a donné la possibilité aux étudiants de DUT deuxième année de conduire ce qui s'appelait alors un projet tuteuré avec comme événement de clôture « le concours d'éloquence ». Tout au long de l'année universitaire les élèves BTS et les étudiants de DUT participaient aux modules inscrits dans leur programme de formation du type expression communication culture, vente, psychologie sociale de la communication et développement des compétences relationnelles et ce en axant autour des attendus du référentiel de compétences : développement de l'esprit critique, argumentation, analyse et synthèse de documents, expression écrite et orale en langue française. Ce dispositif a depuis fait l'objet d'une transposition vers le B.U.T. TC pour les seuls étudiants en IUT. L'évènement de clôture reste le même et s'inscrit dans une situation professionnelle à analyser soit, une situations d'apprentissage et d'évaluation (SAé) pour mesurer notamment la capacité à argumenter en vue de s'en saisir pour l'appliquer à un acte de vente.

3 Cadrage théorique et méthodologique

Communiquer ne saurait se réaliser sans argumenter pour défendre un point de vue, pour faire valoir une opinion, pour exposer une opinion. Ces actions impliquent une adaptation à son public, à son interlocuteur, de choisir et structurer les éléments à exposer, bref d'avoir une posture de communicant

La question de recherche qui se pose est de savoir comment le dispositif de formation mis en place permet-il de promouvoir les compétences transversales en lien avec les attendus du programme de formation dans lequel sont inscrits les étudiants soit, le B.U.T TC et ce en vue de les former aux compétences attendues dans les métiers du commerce.

Le dispositif de formation dans lequel s'inscrit l'évènement « concours d'éloquence » fait l'objet d'une analyse pour rendre compte de la compétence savoir communiquer pour convaincre.

La littérature abonde et on peut trouver des éclairages du type la compétence se définit comme la capacité d'accomplir une tâche de façon satisfaisante » ou « à résoudre des problèmes de manière efficace dans un contexte donné » [1] ou côté sujet de savoir mobiliser des ressources internes ou externes.

Ces définitions cadrent nos travaux et permettent d'identifier comment les situations d'apprentissage ou professionnelles participent du développement des compétences par le biais des échanges langagiers et de l'analyse de l'activité. Les cadres théoriques et méthodologiques dont il sera question sont ceux de l'analyse des échanges verbaux [5] et de la didactique professionnelle [2]. Les échanges verbaux ou les énonciations verbales à propos de l'agir permettent de saisir les raisonnements tenus par les opérateurs et ainsi de s'en saisir pour la formation. C'est ce qui nous amène à imbriquer les deux cadres théorico-méthodologiques pré-cités avec cette particularité que au-delà de réaliser une analyse de l'activité cette dernière est de fait au service de la conception de formation.

Pour ce faire, nous appuierons nos analyses en tenant compte :

- des observations quant à la réalisation de l'activité et notamment des décisions prises par le groupe de pilotage,
- des résultats obtenus par le biais d'entretiens semi-directifs et individuels auprès des étudiants et des acteurs du monde socio-économique,
- des résultats universitaires obtenus au cours du semestre 2 de l'année universitaire en cours.

L'échantillon se répartit de la façon suivante :

- du côté des étudiants en 65 entretiens semi-directifs et 15 entretiens d'explicitations,
- du côté du monde socio-économique, 3 entretiens par

secteurs d'activités (commerce, services et métiers de la banque).

3.1 Premiers résultats

En vue de pouvoir appréhender le ressenti des participants à l'issue de la période de formation et à l'issue de l'événement « concours d'éloquence », des entretiens semi-directifs et des entretiens individuels ont été conduits.

Les données recueillies révèlent :

- une aisance à l'oral,
- une meilleure estime de soi,
- une découverte de capacités non connues par le sujet,
- une transposition des compétences acquises au service de situations autres et,
- une confiance en soi.

Ces données qualitatives prélevées de façon individuelle ont été complétées par des données qualitatives organisées en situation collective et réflexive à propos dudit dispositif mis en place et ce, en questionnant ses apports, ses difficultés ou appréhensions. Il est par exemple fait état de la découverte d'un agir chez un camarade de promotion « moi monsieur je ne pensais pas que X était capable de parler comme elle a parlé, elle est trop forte » ou encore d'un changement d'opinion « au début je ne pensais pas que j'allais être d'accord et là franchement je me rends compte que je suis d'accord avec ce qui a été dit à propos de ... ».

Le dispositif étant axé sur différentes phases pour répondre à une progression dans le développement des compétences langagières certains décrivent la phase individuelle comme plus abordable « c'est quand même plus facile de répondre à l'exercice quand on est tout seul que quand on est face à tout le public » ou encore « quand on a dû créer notre vidéo c'était plus facile parce qu'on pouvait recommencer, on était libre d'appuyer sur le bouton arrêt ... ».

3.2 Résultats à venir

Si les premiers résultats semblent convenir au développement des compétences des apprenants, notre intérêt est aussi celui d'évaluer le dispositif de formation mis en place.

Un travail d'analyse centré sur les travaux de Saint-Dizier et Agnoletti (2015) (figure 1) est effectué pour estimer les besoins, établir les objectifs, préparer la formation, former les apprenants, et évaluer leurs apprentissages effectifs. Grâce aux entretiens auprès des professionnels du monde socio-économique, nous pourrions établir une corrélation entre les compétences développées en formation et les compétences attendues par les recruteurs.

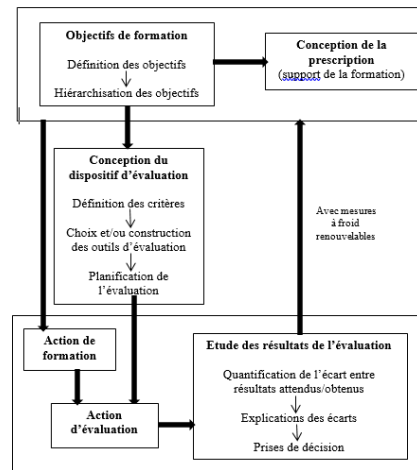


Figure 1 évaluation des dispositifs de formation image extraite de (Saint-Dizier de Almeida V, Agnoletti MF, 2015)

4 Conclusions

Les compétences communicationnelles sont abordées au sein de cette communication au travers d'un dispositif de communication qui place le sujet apprenant en qualité de participant à un événement qui le conduit à faire preuve d'éloquence. Les entretiens analysés montrent comment l'apprenant se découvre, se réalise, se confronte à une connaissance de soi dont il n'avait pas idée. Comment le potentiel de développement [3] s'installe chez l'apprenant et comment l'apprenant transpose ce potentiel dans d'autres situations. En l'occurrence, comment ce potentiel est en lien avec les attendus professionnels.

5 Remerciements

Nos remerciements s'adressent aux étudiants du département Techniques de Commercialisation de l'IUT Thionville-Yutz et à l'ensemble des personnels qui ont œuvré pour la formation ou pour l'événement « concours d'éloquence ».

Références

- [1] Landsheere (de) V. (1988), Faire réussir, faire échouer ; la compétence minimale et son évaluation, Paris: PUF
- [2] Pastré, Mayen, Vergnaud. (2006). La didactique professionnelle. *Revue française de pédagogie*, 145-198.
- [3] Rochex, J. (2017). Vygotski : une conception dialectique du développement. *La Pensée*, 391, 50-64.
- [4] Saint-Dizier de Almeida V., Agnoletti M-F., (2015) Saint-Dizier de Almeida, V., & Agnoletti, M. F. (2015). Impact of online training on delivering a difficult medical diagnosis: Acquiring communication skills. *Applied ergonomics*, 50, 242-250.
- [5] Specogna, A. (2007) Comment l'analyse interlocutoire et la didactique professionnelle rendent compte de l'activité d'un formateur de la formation professionnelle in Enseigner dans l'Interaction Specogna (Ed.collection langage – cognition – interaction), PUN. pp 305-324

Analyse communicationnelle d'un projet de développement orienté vers les jeunes et adolescents camerounais : la participation en question

Dolorès KAMTCHUENG FOPING

dolores.kamtchueng-foping@iut.u-bourgogne.fr

IUT Dijon - Auxerre
Laboratoire CIMEOS, EA 4177

Thèmes – *Information - Communication*

Résumé – *Les projets de développement s'accompagnent de multiples interactions entre développés et développeurs suivant des logiques, stratégies et idéologies variées. La participation, entre concertation et influence sur les décisions à mettre en place vis-à-vis des bénéficiaires, y occupe une place de choix. Cette communication interroge cette notion de participation à travers l'étude des usages des outils de communication du projet U-Report Cameroun, porté par l'UNICEF et le ministère camerounais de la jeunesse et de l'éducation civique. Une plateforme de téléphonie mobile est au cœur de sa mise en œuvre. Il s'agit ici de cerner le sens que les jeunes bénéficiaires de ce projet ont de la participation qui y est mise en avant à travers son slogan : « Votre voix compte ». L'analyse de leurs points de vue fait ressortir des formes de participation propres au contexte d'étude, traversées par des intérêts et stratégies d'émancipation et d'instrumentalisation des acteurs du projet.*

Mots-Clés – *Participation, projet de développement, téléphonie mobile*

1 Introduction

Cette présentation aborde l'étude des usages des outils de communication du projet U-report Cameroun et les formes de participation qu'il suscite ; la participation étant mise en avant comme l'indique son slogan « Votre voix compte ». Lancé depuis 2015 par UNICEF et le ministère de la jeunesse à l'intention des jeunes et adolescents camerounais de 15 à 35 ans, ce projet est une adaptation nationale du projet U-report implémenté dès 2011 en Ouganda. La forte utilisation du téléphone mobile (plus de 70% d'abonnés en 2014) [1] par ces cibles est mise à contribution pour les faire participer au développement. Les porteurs disent vouloir ainsi être plus redevables envers les jeunes et concevoir des interventions qui leur sont davantage adaptées. Pour mieux combler leurs besoins, il s'agit de collecter leurs avis à considérer dans les décisions sur les sujets les concernant et les impliquer dans la réalisation des actions ('les voix qui comptent').

Le projet est déployé autour de deux axes. Premièrement, des « sondages » sont organisés sur des thématiques d'UNICEF, dont l'éducation, la nutrition, et principalement la santé sexuelle et reproductive. Des questions, pour la plupart fermées, sont envoyées par SMS pour recenser les avis des cibles. Deuxièmement, les bénéficiaires peuvent être télé-conseillés de façon anonyme et gratuite en appelant la ligne téléphonique (ligne verte) 8555 pour soumettre leurs difficultés relatives aux thématiques abordées, et obtenir une information supposément de qualité ou être référés vers des services pour une prise en charge spécialisée [2].

2 Cadre théorique

Il faut souligner qu'en matière de santé sexuelle et reproductive des adolescents et jeunes, des auteurs évoquent au Cameroun des pesanteurs organisationnelles, structurelles et socioculturelles : faible utilisation des méthodes contraceptives par les jeunes, tabous, regard accusateur des personnels de santé envers les jeunes sexuellement actifs, rôle surévalué des pairs éducateurs par rapport à celui des parents et leaders d'opinion, faible contextualisation des projets importés d'Occident [3], [4].

Par ailleurs, les projets de développement sont vus par des chercheurs comme des faces visibles d'actions visant en réalité à entretenir et concrétiser des idéologies et stratégies de promotion du modèle occidental de modernisation [5], [6]. Toutefois, nous suivons davantage la vision des auteurs pour qui le développement peut être considéré comme une série d'interventions entre des développeurs et des développés occasionnant des interactions entre ceux-ci, guidées par diverses logiques et intérêts de chacun de ces acteurs [7]. Sur la scène internationale du développement, la participation occupe

une place centrale [8], surtout à l'ère du numérique où participer est une injonction qui serait considérée comme un véritable levier d'une gestion efficace de projet [9]. Ce qui est désigné comme participation peut prendre des formes variées allant d'une simple information des concernés par une action à leur influence réelle sur la décision relative à l'action en passant par leur concertation sans effet sur la décision [10].

3 Problématique

« Je porte la voix de ma communauté », « Je participe au changement », « Je suis acteur du changement », telles sont quelques expressions phares résumant les objectifs de participation et de renforcement du pouvoir d'agir des jeunes et adolescents camerounais auxquels voudrait aboutir le projet étudié. Nous partons ici des points de vue des cibles du projet, celles qui en plus d'en être bénéficiaires font sa promotion auprès d'autres jeunes, pour éclairer le sens qu'a, pour elles, la participation, au-delà des conceptions de la littérature et de celles des porteurs du projet. Notre analyse tourne précisément autour de ces questionnements : Quel sens a l'expression « votre voix compte » pour ces jeunes ? Qu'attendent-ils de la participation dans ce projet et de ses outils de communication ? Notre postulat est qu'à travers l'usage de ces outils de communication, la participation serait pour ces acteurs du projet, objet d'instrumentation et d'émancipation au gré de leurs intérêts et stratégies.

4 Méthodologie

Nous avons conduit des entretiens pour la plupart en face à face et quelques fois par téléphone, dans quatre villes camerounaises, de 2021 à 2022. 49 entretiens ont été menés au cours de cette période avec 11 concepteurs de ce projet (UNICEF et ministère de la jeunesse), 4 téléconseillers, 5 responsables des associations partenaires d'implémentation et 29 jeunes bénéficiaires et ambassadeurs auprès de leurs pairs. L'échantillonnage s'est fait en « boule de neige », des concepteurs aux bénéficiaires en passant par les associations partenaires ; l'introduction auprès de l'enquêté suivant étant faite par le précédent. Nous avons abordé de façon détaillée au cours de ces entretiens leur regard global, leurs avis d'acteurs du projet, la place qu'ils accordent à la communication et la participation. Pour cet article, nous nous sommes focalisée sur les points de vue des jeunes relatifs à leurs besoins en santé sexuelle et reproductive, leurs perceptions des bénéfices du projet, leurs représentations sur la participation et leurs attentes en termes de communication et d'amélioration de leur participation.

5 Résultats et discussion

Globalement, un fervent accueil semble réservé au

projet, dû à son côté « innovant » comparé aux techniques usuelles d'information-éducation-communication comme les causeries éducatives, l'engouement des jeunes pour le numérique et son accès gratuit et anonyme. Aussi, des jeunes voient d'un bon œil l'opportunité offerte d'un espace numérique d'expression. Une répondante affirme ainsi que : « *Maintenant à travers la ligne verte, ils savent que s'ils ont un problème, ils peuvent avoir plus d'éclaircissement sur ces problèmes. Ils peuvent appeler cette ligne. Non seulement parce qu'ils savent qu'ils ne connaissent pas la personne. Et en même temps c'est aussi ouvert, puisqu'ils parlent et posent leurs problèmes* ». Pour certains, participer est synonyme de pouvoir mouler la pâte à leur guise et s'engager de façon autonome dans les actions les concernant. Ce répondant déclare ainsi : « *Pas comme quand on te force, tu dis : 'Ah je fais aussi pour que l'on ne bavarde pas trop dans mes oreilles'. C'est un peu ça, mais quand tu aimes, tu veux vraiment.* ». Pour d'autres, participer à un tel projet peut permettre d'obtenir des informations utiles pour sa santé. L'un d'eux affirme ainsi : « *C'est très important. Moi je juge ça très important. Parce que plus les jeunes sont à U-report, plus on évite certaines maladies, certains cas de grossesse. Oui les jeunes doivent participer* ».

Aussi, constat est fait chez certains enquêtés d'une méfiance liée à la potentielle exploitation malveillante de leurs données personnelles. Quant à l'effectivité de la participation, à la question de savoir s'ils considèrent que leurs voix comptent, les avis sont partagés. Certains supposent que leurs voix comptent, dès lors qu'elles sont exprimées et portées à travers la réponse aux sondages, mais sans savoir en quoi ni comment. Pour d'autres, leurs voix comptent au niveau micro, dans leur communauté, quand ils parlent du projet à leur entourage. Mais elles ne comptent pas au niveau macro, puisqu'ils ne voient pas d'actions concrètes faisant suite aux sondages.

Notons des enjeux matériels ou financiers de participation aux actions promotionnelles et aux sondages, motivée par diverses rétributions attendues : *perdiems*, kits de planning familial et/ou crédits téléphoniques. Bien que les implications dans ce projet soient bénévoles, des jeunes espèrent, via l'opportunité d'y participer, trouver des voies d'insertion professionnelle. L'un d'eux dit : « *Quand tu parles d'U-report, beaucoup vont te dire : 'Qu'est-ce que ça m'apporte ? Même si c'est gratuit, qu'est-ce que ça m'apporte moi, financièrement ?' D'autres disaient : 'Je veux que tu me mettes dans le même circuit, que je puisse enregistrer des personnes et avoir de l'argent'. Quand tu expliquais : 'Non, c'est juste du bénévolat, on ne croyait pas du tout !' ».*

Dès lors, il est logique que même si l'intensification de la promotion par les réseaux sociaux soit assez proposée,

des attentes pragmatiques de jeunes en précarité ressortent ensuite. Ce jeune dit ainsi : « *Je pense que pour améliorer la participation du jeune, déjà il faut encourager les jeunes à participer aux sondages. Oui, c'est vrai, le fait que c'est gratuit c'est bien. Mais parfois, lorsqu'il reçoit un message au 8555, il ne se sent pas très obligé ou motivé à participer aux sondages. Ça veut dire que peut-être, il faut parfois encourager les jeunes, les plus réguliers dans la participation, avec des petits crédits de communication de 500 – 1000 F [0,76 -1,52 euros]* ».

6 Conclusion

Dans ce contexte, des formes de 'participation de raison' sont relevées, entre fantasme, espoir et désillusion. Sous-tendue par des logiques d'instrumentation et d'émancipation, cette participation a des sens multiples. Des besoins d'autonomie financière et d'insertion professionnelle des bénéficiaires sont en toile de fond. Non exprimés en premier lieu, ils sont en pole position aux côtés des besoins en informations de qualité et en contribution aux décisions sur les sujets concernant ces cibles. Penser un dispositif communicationnel de participation des jeunes aux actions de développement ne peut faire l'économie de ces logiques plurielles.

Références

- [1] UNICEF Cameroun, "Projet U-Report Cameroun. Phase pilote Mfoundi." 2014.
- [2] UNICEF Cameroun, "Stratégie du U-report Cameroun." 2015.
- [3] J. Ngo Mayack, "Politique de planification familiale au Cameroun : quelle place pour les jeunes ? 2014," *Autrepart*, vol. N° 70, no. 2, pp. 57–71, 2014, doi: 10.3917/autr.070.0057.
- [4] M. M. Nsangou, R. C. Bonono, and P. Ongolo-Zogo, "Quelles données probantes pour éclairer le choix des stratégies de santé sexuelle et reproductive des adolescents au Cameroun ? Note d'information stratégique e' SUREKT," *CDBPS*, p. 10, 2018.
- [5] A. Mattelart and M. Mattelart, *Histoire des théories de la communication*, 4e éd. Paris: la Découverte, 2018.
- [6] Missé Missé, "Les théories critiques en communication pour le changement social : regard critique," *Rev. Fr. Sci. L'information Commun.*, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2014, doi: 10.4000/rfsic.931.
- [7] J.-P. Olivier de Sardan, *Anthropologie et développement: essai en socio-anthropologie du changement social*. Marseille: APAD [Karthala], 1995.
- [8] M.-H. Bacqué and C. Biewener, "L'empowerment, un nouveau vocabulaire pour parler de participation ?," *Idées Économiques Soc.*, vol. N° 173, no. 3, pp. 25–32, 2013, doi: 10.3917/idee.173.0025.
- [9] O. Galibert, "L'injonction participative au débat environnemental en ligne : imaginaires d'Internet, démocratie environnementale et communication engageante," *Enjeux Inf. Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 35–49, 2013, doi: 10.3917/enic.014.0035.
- [10] S. R. Arnstein, "A ladder of citizen participation," *J. Am. Inst. Plann.*, vol. 35, no. 4, pp. 216–224, 1969.

Des formations qualifiantes pour l'emploi : quel avenir pour les licences professionnelles et le BUT ?

Aziz Mouline
Professeur des Universités
aziz.mouline@univ-rennes1.fr

IUT de Rennes, Université de Rennes 1
Centre de Recherche en Economie et Management (CREM), UMR CNRS 6211

Thèmes – *Économie - Gestion*

Résumé – *Créées en 1999 pour renforcer la professionnalisation et améliorer l'insertion professionnelle des étudiants dans les universités, les licences professionnelles ont essentiellement été portées par les IUT. Ces licences, aux succès indéniables, sont actuellement à un tournant avec la transformation des DUT en BUT avec deux menaces lourdes de conséquences : plusieurs licences professionnelles ne trouvent pas de parcours du BUT auquel elles peuvent être rattachées ; la mise en place d'une troisième année dans les IUT à moyens constants.*

Mots-Clés – *Licences professionnelles ; IUT ; Professionnalisation ; Croissance endogène ; Financement des universités*

1. En guise d'introduction : les licences professionnelles, un atout majeur des universités pour l'amélioration de l'insertion professionnelle

Les licences professionnelles ont été créées en France en 1999¹ dans un but très précis : professionnaliser les formations dans les universités et améliorer l'insertion professionnelle des étudiants. Formations sélectives octroyant à son titulaire un grade de licence, elles permettent notamment aux étudiants de DUT et de BTS, ainsi qu'aux salariés et demandeurs d'emplois, d'accéder à une formation courte (un an) dont l'équation bien connue est la clé de leur réussite : savoir universitaire + partenariat avec les branches professionnelles et les entreprises = formation qualifiante pour l'emploi.

En d'autres termes, pour ces licences professionnelles, les savoirs académiques ne sont pas séparés de leurs utilités professionnelles. Elles ne préparent pas seulement à un premier emploi mais à l'ensemble de la vie active tout comme la professionnalisation des universités fondée sur la transversalité, la transférabilité des acquis et les capacités d'adaptation combinant formation théorique et apprentissage en situation de travail [1].

Il faut préciser que la création de ce nouveau diplôme répond aussi à une très forte augmentation des poursuites d'études des étudiants détenteurs d'un DUT (Diplôme universitaire de technologie) [2] et à une demande incessante des IUT d'une troisième année pour la préparation du DUT [3].

La réussite de ces licences professionnelles réside aussi dans un partenariat harmonieux entre les universités et le monde socio-économique avec des compétences bien identifiées et répondant aux besoins des employeurs [4] (taux d'insertion professionnelle supérieur à 93% au niveau national).

Ces licences professionnelles ont donc rencontré un réel succès avec des effectifs qui n'ont cessé de croître entre 2001-2002 (9 038) et 2021-2022 (52 014).

2. Le rôle déterminant des IUT dans la création des licences professionnelles

Au niveau national, plus de 50% des étudiants en licence professionnelle sont inscrits dans les IUT.

A l'université de Rennes 1 par exemple, pendant

¹ Il s'agit du dernier diplôme national créé dans le système français de l'enseignement supérieur ; le master professionnel apparu ensuite en 2005 relève d'une transformation des DESS au moment du passage en LMD (Licence-master-doctorat).

l'année universitaire 2022-2023, près de 1100 étudiants sont inscrits dans les 37 licences professionnelles. Elles sont essentiellement portées par les 4 IUT de cette université (86,4% des étudiants inscrits en licence professionnelle). Dans leur très grande majorité, elles se réalisent en alternance : contrat d'apprentissage ou de professionnalisation. Les enquêtes à 30 mois montrent un taux d'insertion professionnelle de 96% pour les diplômés de 2019.

Les transformations en alternance de ces licences professionnelles ont été réalisées pour deux raisons :

- répondre à une forte demande des entreprises partenaires qui souhaitent recruter des jeunes en alternance (former de manière progressive aux spécificités de l'entreprise et sécuriser les recrutements sur le long terme) et répondre à un enjeu sociétal (favoriser l'insertion rapide des jeunes sur le marché de l'emploi). Cela suppose une proximité dans l'efficacité de l'appariement entre offres et demandes sur les marchés locaux du travail ainsi que des dispositifs de coordination particuliers [5]
- répondre à une forte demande d'un grand nombre d'étudiants pour une formation en alternance leur permettant d'appliquer directement ce qu'ils apprennent en formation. Un des enjeux de la loi du 6 septembre 2018 « Pour la liberté de choisir son avenir professionnel » est de permettre aux jeunes de s'orienter vers l'apprentissage leur donnant la possibilité d'intégrer le marché de l'emploi rapidement à l'issue de leur cursus.

Certaines de ces licences professionnelles se déclinent déjà en blocs de compétences. Dans le domaine de la formation professionnelle, on ne peut plus raisonner seulement en termes de diplôme mais bien en blocs de compétences, ce qui suppose une adaptation de la formation aux besoins des salariés et des demandeurs d'emplois. La temporalité n'est plus la durée (un diplôme en fin d'année) mais l'immédiateté (des compétences ciblées en un temps court). La demande s'oriente de plus en plus vers des formations courtes, plus souples et plus adaptées à la situation de chacun. L'inscription des formations en blocs de compétences dans les référentiels gérés par France compétences est un préalable indispensable pour qu'elles soient éligibles à un financement du Compte Personnel de Formation (CPF).

Cette déclinaison en blocs de compétences permet au bénéficiaire de l'action de formation (étudiants, apprentis, salariés en reprise d'étude) :

- d'identifier plus facilement les compétences visées par le parcours dans lequel il est inscrit
- de l'aider à valoriser les compétences qu'il a acquises

C'est donc également une opportunité pour les salariés et demandeurs d'emplois d'accéder à **des formations universitaires sur des formats plus courts** leur permettant de concilier formation et activité professionnelle. Ils auront aussi la possibilité d'acquérir une certification universitaire inscrite au RNCP (Répertoire national des certifications professionnelles) et de capitaliser les blocs dans l'objectif d'une reprise d'études ou d'une VAE (Validation des Acquis de l'Expérience)

3. En guise de conclusion : quel avenir pour les licences professionnelles et la mise en place du BUT ?

Les licences professionnelles ont ainsi fait leur preuve en s'imposant dans le paysage de l'enseignement supérieur par leurs atouts incontestables : professionnalisation des formations et amélioration de l'insertion professionnelle des étudiants.

Elles sont à un tournant avec la réforme de la transformation des DUT en BUT (Bachelor Universitaire de Technologie), un diplôme préparé en trois ans en IUT. Logiquement, les licences professionnelles devraient se fondre dans cette réforme et faire partie du BUT. Ce n'est pas toujours possible car plusieurs licences professionnelles actuelles ne trouvent pas un parcours du BUT auquel elles pourraient être rattachées. Pourtant, elles répondent à un véritable besoin des entreprises tout en étant définitivement ancrées dans le tissu économique local avec un excellent taux d'insertion professionnelle.

De manière générale, se pose une question de fonds qui reste sans réponse à ce jour. Imposer la transformation du DUT en BUT à moyens constants se heurtera inévitablement, et se heurte déjà, à des limites humaines et organisationnelles. On revient alors à un problème maintes fois soulevé et toujours sans solutions concrètes, celui du financement de l'enseignement supérieur : régulation par les pouvoirs publics ou recours aux mécanismes de marché ; financement centralisé ou financement décentralisé [6].

Nous tenons à souligner avec force que l'étudiant, futur diplômé, ne peut pas être abordé seulement sous le prisme de son coût. Il est aussi et surtout une source de richesse et de création de valeur ajoutée. Dans le cadre de la théorie de la croissance endogène [7] et du renouvellement des théories de la croissance [8], le rôle et la contribution des universités à l'accroissement de la richesse d'une nation, de l'emploi et de l'innovation [9] doivent être pris en compte par les pouvoirs publics et les collectivités territoriales.

Une récente étude² a montré que les dix universités d'Udice (Association composée de 10 grandes universités de recherche en France, créée en octobre 2020, 487 000 étudiants, 116 000 membres du personnel) ont contribué à hauteur de 41 milliards d'euros et 364 000 emplois à l'économie française en 2019. L'étude précise également que l'obtention d'un diplôme universitaire durant toute la durée d'une carrière contribue à hauteur de 11,7 milliards d'€ à la croissance économique en France pour la cohorte des diplômés 2019 des seules universités d'Udice.

Il est grand temps de revoir le modèle d'allocation des moyens et de préserver et pérenniser un système que tout le monde nous envie : celui des IUT, force d'évolution, de proximité avec le monde socio-économique, de réussite et d'insertion professionnelle de qualité de nos étudiants.

Références

[1] Agulhon Catherine, Convert Bernard, Gugenheim Francis, Jakubowski Sébastien (2012), Pour une université « utile » ?, Paris, L'Harmattan 2012, p. 91.

[2] Blanchard Marianne, Philippe Lemistre, « Un nouvel âge de la sélection scolaire ? Formes et logiques de sélection dans un système éducatif massifié », *Formation Emploi*, 2022/2, n°158, pages 7-22.

[3] Maillard Dominique, Veneau Patrick, « Les licences professionnelles : formes et sens pluriels de la « professionnalisation » à l'université », *Société contemporaines*, 2006/2, n° 62, pages 49-68.

[4] Bournel-Bosson Maryse, Henry Muriel, « L'alternance mise en œuvre par les enseignants universitaires : le paradoxe de la coupure et du lien dans les licences professionnelles », *Revue française de pédagogie*, n° 196, 2016, pages 117-128.

[5] Moysan-Louazel Anne, « Les marchés du travail et de la formation : entre singularités et proximités », *Formation Emploi*, 2011/4, n° 116, pages 19-34.

[6] Mouline Aziz, « Après dix ans d'autonomie, quel nouveau modèle économique pour les universités françaises ? », *Management international*, Vol. 24, n°1, pages 154-164.

[7] Romer Paul, « Increasing Returns and Long-Run Growths », *The Journal of Political Economy*, Vol. 94, n°5, oct., 1986, pages 1002-1037.

[8] Lucas E. Robert, « On The Mechanics of Economic Development », *Journal of Monetary Economic*, 22, 1988, pages 3-42.

[9] Railean Valentin., Curbatov Oleg., Gay Michel., *Le rôle des universités et des universitaires dans l'économie de la connaissance*, Chisinau-Paris, 2012, IMI-NOVA, IUAPL.

² Biggar, « Contribution économique des universités de l'Udice », Rapport final pour l'Udice, février 2021.

Etre ou souffrir ? Le rôle du sacré et des émotions dans le déverrouillage d'investissements agricoles plus respectueux de l'environnement.

Mikaël Akimowicz¹
mikael.akimowicz@iut-tlse3.fr

Denis Requier-Desjardins²
denis.requier-desjardins@ut-capitole.fr

Karen Landman³
klandman@uoguelph.ca

Charilaos Képhaliacos⁴
charilaos.kephaliacos@ensfea.fr

Harry Cummings³
harry@hcaconsulting.ca

¹ IUT, Université Paul Sabatier

Laboratoire d'Etude et de Recherche sur l'Economie, les Politiques et les Systèmes sociaux, EA 4212

² IEP Toulouse

Laboratoire d'Etude et de Recherche sur l'Economie, les Politiques et les Systèmes sociaux, EA 4212

³ University of Guelph, ON

School of Environmental Design and Rural Development

⁴ Ecole Nationale Supérieure de Formation l'Enseignement Agricole

Laboratoire d'Etude et de Recherche sur l'Economie, les Politiques et les Systèmes sociaux, EA 4212

Thèmes – *Économie - Environnement*

Résumé – *Dans un monde incertain caractérisé par des changements environnementaux rapides, une stricte perspective économique ne permet pas d'examiner la complexité de la santé mentale des agriculteurs. La dimension émotionnelle de la prise de décision est abordée grâce à une approche institutionnaliste à laquelle sont intégrés les concepts de sacré et de dissonance cognitive. Nous proposons un cadre conceptuel interdisciplinaire pour évaluer l'impact de la rigidité des structures agricoles sur la santé mentale des agriculteurs. Les interviews de 41 agriculteurs, situés dans des zones sous influence urbaine caractérisées par des niveaux élevés d'incertitude, reposent sur la conception des modèles mentaux de leur décision d'investissement. Les résultats corroborent que l'acceptation de l'organisation actuelle du secteur agricole résulte de la résolution de dissonances cognitives réactivées aujourd'hui par les demandes divergentes auxquelles sont confrontés les agriculteurs. Aujourd'hui, les dissonances cognitives pourraient être utilisées pour institutionnaliser de nouvelles visions en faveur d'un développement socialement durable.*

Mots-Clés – *Investissement agricole, Croyances sacrées, Emotions, Dissonances cognitives*

1 Introduction

L'impact des structures agricoles sur la santé mentale des agriculteurs n'a commencé à être discuté que récemment (Kanamori et Kondo [1], Klingelschmidt et al. [2]). La capacité limitée de l'économie à aborder la dimension psychologique de la décision d'investissement trouve une origine dans les caractéristiques grossières de l'agent économique a-émotionnel. L'atomicité et la rationalité d'Homo Economicus modélisent mal la prise de décision entrepreneuriale. Alors que la philosophie pragmatiste met en évidence l'existence d'un processus rationnel de révision des croyances, la dimension émotionnelle de la prise de décision reste négligée.

Dans cette perspective, le concept de « personne » dotée d'un sens de la responsabilité envers ses communautés d'appartenance, tel que défini par l'École d'Abidjan, est la base d'un cadre conceptuel plus approprié (Ballet et al. [3]). En particulier, l'identité d'une personne, qui résulte à la fois de l'intégration des normes sociales (Akerlof et Kranton [4]) et des valeurs personnelles (Davis [5]), articule les tensions qui existent entre les individus et leur environnement social et favorise l'analyse de l'agencité de la personne en tant qu'acteur du changement.

2 Cadre conceptuel

Le concept de croyance (Peirce [6]) est examiné à la lumière de celui de sacré (Godelier [7]). Les croyances superficielles, plus facilement révisées, sont différenciées des croyances profondes d'ordre identitaire, plus résistantes au changement.

Les agriculteurs périurbains sont confrontés à de multiples sources d'incertitude. L'existence de coûts irrécouvrables dans un environnement incertain peut alors aboutir à des décisions inappropriées. Selon la perspective pragmatiste, on peut supposer que les tentatives des agriculteurs de surmonter l'incertitude reposent sur des représentations simplifiées de leur environnement – les croyances. Dans des environnements mouvants, la révision des croyances est essentielle pour ajuster les comportements. Les croyances sacrées forment une surréalité intériorisée qui contraint les actions des individus sans être remise en cause de manière critique. En contribuant à la légitimation des systèmes d'obligations et de droits, elles façonnent les identités.

Dans ce contexte une approche centrée sur la personne fournit un cadre pertinent du processus de décision des agriculteurs. La personne est un décideur autonome, socialement contraint par des engagements envers ses communautés d'appartenance (déterminisme social) et poursuivant intentionnellement ses propres objectifs (agencité). En raison de la multipolarité des environnements sociaux, la personne élabore des compromis entre différents ensembles d'obligations et de

droits parfois contradictoires. La personne est donc un lieu de tensions permanentes entre le soi et l'environnement social.

Bien que les émotions aient longtemps été perçues comme interférant de manière néfaste avec la prise de décision, elles peuvent aussi être comprises comme une connaissance somatique (Petit [8]). L'existence de tensions provoque des changements destinés à remédier aux incohérences cognitives qui affectent le système de croyances : les dissonances cognitives (Festinger [9]). En économie, les dissonances cognitives peuvent maintenir les preneurs de décision sur un chemin de dépendance cognitif qui renforce le chemin de dépendance matériel (Akerlof et Dickens [10]). Il existe quatre paradigmes principaux de dissonances cognitives : le paradigme du choix, le paradigme de l'infirmité des croyances, le paradigme de la rationalisation et le paradigme de la soumission induite.

Nous soutenons que la résolution des dissonances cognitives a pu aboutir à l'adoption de l'identité de "l'agriculteur moderne". De nos jours, celle-ci ne permettrait plus de concilier les demandes antagonistes émanant de la société civile, du secteur agricole et des institutions publiques, favorisant des tensions qui peuvent expliquer le mal-être des agriculteurs sensibles au stress et à d'autres problèmes de santé mentale.

3 Méthode et Données

L'approche comparative repose sur 41 entretiens avec des agriculteurs périurbains canadiens et français. Au cours des entretiens, les agriculteurs ont construit les modèles mentaux sous-jacents à leur décision d'investissement (Figure 1) tout en répondant aux questions complémentaires nécessaires à la compréhension des interactions entre ces facteurs. L'échantillon comprenait des éleveurs, des maraîchers et des agriculteurs en grandes cultures.

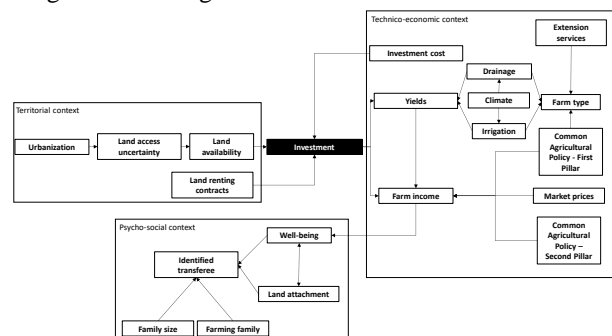


Figure 1 – Modèle mental réalisé au cours des entretiens

4 Résultats

Le paradigme du choix : tous les participants s'accordent à dire que l'agriculture leur procure, ainsi qu'à

leur famille, une qualité de vie à laquelle ils n'accéderaient pas s'ils travaillaient dans un autre secteur. Alors que les nouveaux agriculteurs font généralement référence à leur système de valeurs pour justifier leur décision d'installation, les héritiers font référence au devoir de transmettre l'exploitation familiale.

Le paradigme de l'infirmité des croyances : une seule participante a explicitement partagé l'absence de souffrances physiques ou morales liées au travail sur son exploitation. Les autres participants ont fait référence soit à des réactions de fuite (installation sur une exploitation plus éloignée de la ville), des réactions de confrontation (adaptation du système agricole pour une capture plus importante de valeur ajoutée), des réactions inhibées (poursuite sans modification du système d'exploitation).

Le paradigme de la rationalisation : parmi les agriculteurs qui ont maintenu leur système d'exploitation, tous font référence à une aliénation à l'investissement. Ils ont développé des stratégies pour amortir des investissements toujours plus coûteux. Quatre agriculteurs ont par conséquent décidé de ne pas transmettre leur exploitation. Cette réaction est plus courante chez les agriculteurs en grandes cultures que chez les maraîchers.

Le paradigme de la soumission induite : les agriculteurs sont aujourd'hui confrontés à des injonctions parfois contradictoires portées par la filière, le système légal et la société civile. En particulier, la fonction alimentaire et le besoin de préservation de l'environnement apparaissent antinomiques. Une manière de résoudre cette contradiction passerait par le recours à des statuts juridiques de société légale ou commerciale, plébiscités par les organismes de l'encadrement agricole.

5 Conclusion

L'introduction d'une dimension anthropologique est cohérente avec les travaux de l'ancien institutionnalisme américain dans lesquels une relation dialectique entre les individus et les institutions sociales est présupposée. Ces résultats soulignent notamment que les émotions s'apparentent plutôt à une connaissance somatique.

Au niveau individuel, trois besoins psychologiques pourraient être activés pour favoriser une transition agroécologique : le besoin d'autonomie, de compétence et de connexion (Deci et Ryan [11]). L'autonomie reflète le besoin d'un sentiment de contrôle sur les comportements et les objectifs, la compétence reflète le besoin d'un sentiment de maîtrise des tâches, et la connexion reflète le besoin d'un sentiment d'appartenance et d'attachement.

Au niveau social, la propriété privée des moyens de production entrave la transformation des systèmes alimentaires. L'accès compliqué à la terre et au capital ralentit l'engagement des agriculteurs dans la transition agroécologique. Une articulation territorialisée des

ressources privées, collectives et publiques semble reposer sur une démarchandisation de ces facteurs à l'aide des collectivités territoriales et de la société civile.

L'existence de croyances sacrées sur le fonctionnement du système économique entrave le changement. A cet égard, Maris (1999) a mis en évidence le caractère immuable du concept de croissance économique. Ces résultats soulignent le besoin de compléter les analyses des structures agricoles basées sur des indicateurs matériels, tels que la taille de l'exploitation ou les actifs financiers, par des analyses des visions qui sous-tendent les décisions des agriculteurs.

6 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Research Executive Agency de Commission Européenne pour le financement du projet MARSUPIA (projet Marie Curie - IOF 622830),

Références

- [1] M. Kanamori, N. Kondo, 2020. Suicide and types of agriculture: A time-series analysis in Japan. *Suicide and Life-Threatening Behavior*, 50(1), p. 122 – 137
- [2] J. Klingelschmidt, J.F. Chastang, L. Khireddine-Medouni, L. Chérié-Challine, I. Niedhammer, 2020. Facteurs professionnels en lien avec le suicide au sein des salariés affiliés à la Mutualité Sociale Agricole et en activité entre 2007 et 2013. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, 68(1), p. 1 – 8
- [3] J. Ballet, J.L. Dubois, A. Kouadio, 2021. The Abidjan School and Louis-Joseph Lebrét: Marrying empirical research and development ethics. *Journal of Global Ethics*, 17(2), p. 222 – 242
- [4] G.A. Akerlof, R. Kranton, 2000. Economics and identity. *Quarterly Journal of Economics*, 115(3), p. 715 – 753
- [5] J.B. Davis, 2007. Akerlof and Kranton on identity in economics: Inverting the analysis. *Cambridge Journal of Economics*, 31(3), p. 349 – 362
- [6] C.S. Peirce, 1877. The fixation of belief. *Popular Science Monthly*, 12, p. 1 – 15
- [7] M. Godelier, *L'imaginé, l'imaginaire et le symbolique*. CNRS, 2015.
- [8] E. Petit, *L'émotion est ce qui nous relie*. Essai sur la société des émotions. L'Harmattan, 2021
- [9] L. Festinger, 1962. Cognitive dissonance. *Scientific American*, 207(4), p. 93 – 106
- [10] G.A. Akerlof, W.T. Dickens, 1982. The economic consequences of cognitive dissonance. *The American Economic Review*, 72(3), p. 307 – 319
- [11] E.L. Deci, R.M. Ryan, *Overview of self-determination theory: An organismic dialectical perspective*, Handbook of Self-determination Research, ouvrage collectif, E.L. Deci, R.M. Ryan (Eds.), University of Rochester Press, 2002
- [12] B. Maris, *Lettre ouverte aux gourous de l'économie qui nous prennent pour des imbéciles*. Albin Michel, 1999

Genre et travail

Propos juridique et économique

Mathilde JULIEN¹

Virginie FOREST²

mathilde.julien-le-borgne@univ-lyon1.fr virginie.forest@univ-lyon1.fr

¹ IUT, Lyon 1 Université
CERCRID UMR CNRS 5137

² IUT, Lyon 1 Université

Thèmes – *Économie - Droit - Gestion*

Résumé – *Comment la question des discriminations en raison du sexe, du genre ou de l'orientation sexuelle dans le cadre du travail est-elle appréhendée ? Pour nombre d'employeurs, il y a là le siège d'un risque juridique, précisément d'un risque contentieux qu'il convient d'éviter. Par ailleurs, au-delà de tout angélisme et des valeurs d'égalité et de justice, ces discriminations représenteraient aussi un manque à gagner économique et les entreprises pourraient tirer des gains de leur réduction. Pour ces raisons, les services RH se sont emparés du sujet, choisissant de promouvoir la « diversité » ou l'« inclusion », au moyen d'une gestion de la main-d'oeuvre voulue comme socialement vertueuse et économiquement performante. L'article questionne le cadre de ces pratiques de gestion des ressources humaines et la manière dont elles se saisissent - ou devraient se saisir - du genre, en lien au non avec d'autres critères prohibés. Points de vue juridique et économique gagnent à être croisés pour s'interroger sur les mérites d'une meilleure appréhension du genre et une résorption plus efficace des discriminations directes ou indirectes, combinées, multiples ou systémiques.*

Mots-Clés – *Travail, Genre, Discrimination, Egalité*

1 Introduction

Le licenciement d'un salarié portant des boucles d'oreilles, jugées inadaptées pour un homme, est discriminatoire en ce qu'il a pour cause l'apparence physique rapportée au sexe (Soc. 11 janv. 2012, n° 10-28.213). Un employeur est condamné pour discrimination, une alternante en poste dans l'entreprise ayant été traitée de « sac à foutre », insulte accompagnée de jets de débris (Soc. 20 mai 2015, n° 14-13.357). Autre condamnation dans une affaire où un salarié voit sa période d'essai rompu après avoir reçu par erreur un sms de son manager : « Je ne [le] garde pas, [...] je ne le sens pas ce mec, c'est un PD, ils font tous des coups de putes » (CA Paris, 16 décembre 2015). La discrimination subie par un steward portant des tresses africaines a été récemment reconnue : il avait été mis à pied en raison de sa coiffure puis astreint à porter une perruque au travail. Il assigne son employeur et obtient gain de cause devant la Cour de cassation, celle-ci rejetant les stéréotypes de genre pour retenir en l'espèce une discrimination directe en raison du sexe (Soc. 23 novembre 2022, n° 21-14.060). Ces contentieux sont édifiants mais rares. Pourtant, le travail est un lieu d'expériences de conduites discriminatoires. Selon l'Insee, en 2019, le revenu salarial des femmes reste inférieur en moyenne de 22 % à celui des hommes. Le baromètre 2020 des discriminations dans l'emploi[1] établit que 42% des personnes actives en France déclarent avoir été témoins de discrimination. 41% des personnes actives disent avoir été victimes d'au moins un propos ou comportement sexiste, homophobe, raciste, lié à l'état de santé, au handicap ou à d'autres caractéristiques personnelles au travail. 23% des personnes actives déclarent avoir été victimes de discrimination(s) dans l'emploi. Les critères de discrimination les plus souvent évoqués sont l'apparence physique (40% des personnes ayant déclaré des discriminations), le sexe (40% d'entre elles) et l'état de santé (30% d'entre elles). Une personne homosexuelle ou bisexuelle a trois fois plus de risque d'être victime de discrimination au travail par rapport à un individu hétérosexuel, blanc et en bonne santé. Pourtant la France possède un cadre normatif contre les discriminations dans tous les domaines de l'emploi. La question du genre au travail est un objet de recherche en sciences sociales, en droit comme en économie.

2 Droit de la non-discrimination et genre dans les relations de travail

La loi française - code pénal et code du travail – et les textes internationaux et européens prohibent un certain nombre de motifs discriminatoires. Parmi ceux-là, figurent le sexe, mais aussi l'identité de genre et l'orientation sexuelle. D'autres, tels que le handicap, l'état de santé,

l'origine, la vulnérabilité économique peuvent se combiner même si les dispositifs juridiques se préoccupent peu du fait que les personnes puissent être victimes simultanément de plusieurs formes de discrimination. Sur ce plan, le concept d'intersectionnalité ouvre la voie d'une prise en considération de cette interaction de différents motifs. Cette perspective intersectionnelle qui va au-delà des expériences de prise en compte des catégories uniques et isolées de discrimination, au-delà donc du traitement de la discrimination sur un seul motif, permet d'appréhender la discrimination comme résultant des rapports sociaux et non de caractéristiques propres aux individus.

Le sexe identifie deux catégories, les femmes et les hommes. Cette différence est entérinée, peut-être même en partie produite, par le droit lui-même. Le genre comme l'orientation sexuelle postulent d'autres situations qui, elles, ne sont pas nommées par des énoncés normatifs, notamment dans le Code du travail. Le sigle LGBTQI+ évoque les personnes lesbiennes, gays, bisexuelles, trans, queers, intersexes et autres variantes, c'est-à-dire non hétérosexuelles, non cisgenres ou non dyadiques. La recherche d'égalité entre femmes et hommes, et plus largement entre individus sans considération du genre ou de l'orientation sexuelle repose de manière générale sur un arsenal normatif riche et complexe : le droit au respect de la vie privée, la protection de la vie personnelle, l'égalité de droits ou l'égalité de traitement, les libertés et droits fondamentaux, les règles de non discrimination - directe ou indirecte, systémique, l'action positive, l'interdiction du harcèlement sexuel ou discriminatoire et de l'injonction de discriminer[2].

Dans le cadre des relations de travail, ces règles sont mobilisables contre l'entreprise, la personne morale et/ou la ou les personnes physiques la représentant, en cas de refus d'embauche, mais aussi dans l'exécution du contrat, dans des situations dites de « mise au placard » ou de retard dans l'évolution de carrière comme en matière salariale, en cas de licenciement, etc. En pratique contentieuse, il s'avère que la discrimination, la violation d'une liberté et le harcèlement sont plaidés par les avocats de manière principale ou accessoire, en complément d'un premier objet de demande pour invoquer des sanctions plus lourdes contre l'employeur. Il s'agira d'obtenir la nullité de la décision patronale (du licenciement prononcé par exemple), et une meilleure réparation, parce qu'intégrale, du préjudice. L'employeur pourra aussi faire l'objet d'une condamnation pénale. Le candidat à l'emploi ou le salarié, demandeur en justice, se trouve très souvent confronté à des difficultés probatoires. Certes, les règles de preuves sont aménagées, en tout cas au contentieux civil. L'action de groupe est possible. Et

les juges n'hésitent pas à reconnaître la discrimination indirecte en présence de règles conventionnelles ou patronales apparemment neutres mais ayant des conséquences discriminatoires sur le plan individuel ou collectif. Cela concourt à armer les personnes touchées par la discrimination et le harcèlement dans le monde du travail. Reste l'épineuse question de l'effectivité de ces règles et dispositifs juridiques, de la conformité des actions et situations réelles au modèle d'égalité que le droit signifie. L'égalité juridique ne suffit pas à assurer l'égalité réelle, notamment dans l'espace privé qu'est l'entreprise.

3 Les intérêts de la non-discrimination en raison du genre dans le travail

Pourquoi mettre en œuvre le droit de la non-discrimination liée au genre dans les relations de travail ? Dans une visée instrumentale, pour des impératifs de gestion, pour atteindre des objectifs économiques et financiers, un gain de performance, pour une profitabilité supérieure à celle des concurrents, pour améliorer l'image de marque et l'attractivité de l'entreprise, pour fidéliser les talents ? Peu importe alors les valeurs associées à la non-discrimination et à l'égalité. Ou alors sont-elles seulement secondaires. C'est aussi la question de la sincérité des entreprises et des pratiques dites de *pinkwashing*.

Dans cette perspective, les préoccupations de l'entreprise reposent sur une analyse économique des coûts de la discrimination[3], qu'elle résulte de biais cognitifs ou stéréotypes de genre ou qu'elle soit systémique. L'accent est mis depuis peu sur le déploiement de dispositifs incitatifs et pédagogiques visant à minimiser les pertes individuelles et collectives liées à ces pratiques discriminatoires. En ce sens, il convient de mieux former les salariés des services RH à ne pas discriminer en luttant contre les préjugés liés au genre ; d'inciter les entreprises à mettre en œuvre de bonnes pratiques, au-delà de la peur du « gendarme étatique », dans une logique de *soft law* ; de créer des certifications ou labels (tel le label RSEi Responsabilité Sociétale des Entreprises inclusives), pour faire connaître et valoriser les employeurs les plus « inclusifs » ; de produire des indicateurs salariaux ou quantitatifs de gestion pour identifier et mesurer statistiquement les inégalités professionnelles et mieux les résorber. Ici, les limites de la règle de droit, perçue dans sa dimension punitive et sanctionnatrice, sont dénoncées : inefficacité voire effets pervers. L'analyse économique est finalement invoquée pour réduire la place du droit dur (obligatoire et sanctionnable devant un tribunal) au profit de dispositifs de « nudging » ou d'incitation à l'inclusion, à la diversité, à l'égalité des chances et à la prévention des

discriminations.

La mise en œuvre de ces dispositifs favorise sans doute le déploiement de politiques RH transparentes, objectives et proactives en matière de gestion du personnel. Le respect de la personne et de sa dignité, la cohésion sociale, le droit à l'autodétermination et la protection de la vie privée portés par le droit de la non-discrimination requièrent la combinaison de procédés incitatifs volontaires de la part des entreprises et de mécanismes juridiques étatiques dits durs. Cette combinaison a le mérite de tenir compte de l'interaction entre les logiques de marché et de protection des droits fondamentaux. En tout état de cause, il s'agit de ne pas imputer aux caractéristiques personnelles des individus minorisés la discrimination qu'ils subissent. Certes il faut rétablir les droits de ceux qui sont lésés à titre individuel mais aussi lutter contre les mécanismes producteurs des inégalités sociales liées au genre pour que les discriminations disparaissent. Ainsi les entreprises peuvent-elles mettre en place une politique de diversité ciblant le critère de l'orientation sexuelle ou l'identité de genre (via une charte par exemple). Cette politique par essence temporaire prendra fin une fois l'égalité réelle atteinte. Ces actions positives sont un moyen de combattre les discriminations et non une fin en soi.

4 Conclusion

Les problématiques évoquées ici sont centrales dans le champ des relations de travail. En guise de conclusion et pour ouvrir le propos, on soulignera que d'autres formes plus complexes de discriminations émergent. Elles sont produites par l'intelligence artificielle. En effet le recours aux algorithmes dans la gestion des ressources humaines engendre des risques de discrimination importants et sous-estimés. Ces discriminations dites algorithmiques requièrent sans doute de nouveaux mécanismes de contrôle. A tout le moins, les exigences d'objectivité et de transparence qui pèsent sur l'ensemble des outils décisionnels et des process RH s'imposent-elles également à ces dispositifs technologiques, prétendument efficaces, autonomes et neutres.

Références

- [1] Défenseur des droits et Organisation internationale du travail, *Baromètre de la perception des discriminations*, coll. Études & Résultats, 13^{ème} édition, déc. 2020
- [2] M. Mercat-Bruns, *Les différentes figures de la discrimination au travail : quelle cohérence ?* Rev. trav. 2020, p. 25
- [3] S. Carcillo et M.-A. Vaillfort, *Les discriminations au travail : femmes, ethnicité, religion, âge, apparence, LGBT*, Sciences Po Les Presses, 2018, p. 73

L'impact du goût sur la valeur de l'expérience : le cas des produits locaux élaborés par des micro-producteurs

Guguen-Gicquel Inès et Briand-Decré Gwenaëlle

Ines.Guguen-Gicquel@univ-nantes.fr, Gwenaelle.Briand-Decre@univ-nantes.fr

Lemna EA 4272 – IUT de Saint-Nazaire - Nantes Université

Thèmes – *Gestion, marketing durable : le rôle de la dégustation des produits locaux de micro-producteurs dans la valorisation de l'expérience du consommateur.*

Résumé – *les micro-producteurs locaux disposent assez naturellement d'une offre expérientielle forte de par son contenu aux valeurs sociales et sociétales positives, son contexte expérientiel de commercialisation en circuit direct, qui permet par ailleurs la dégustation des produits alimentaires qu'ils proposent. Le goût est un aspect du marketing sensoriel très peu traité dans la littérature expérientielle. Pourtant, son intérêt dans la stimulation sensorielle que propose l'ensemble du contexte expérientiel et son évaluation dans la valeur globale perçue de l'expérience par le consommateur méritent d'être approfondis. Cette recherche, à visée de contribution essentiellement théorique, a pour objectif d'optimiser la mobilisation de ce levier expérientiel fort par les petites unités de production et de vente que sont les micro-producteurs dans un contexte de soutien et de valorisation par la recherche marketing des clés de développement d'une économie d'échanges durables, favorisant la rencontre entre l'offre et la demande, forte, pour ces productions locales et soutenables.*

Mots-Clés – *marketing sensoriel, goût, valeur de l'expérience, micro-producteurs*

L'engouement pour les produits locaux se confirme : 51% des consommateurs français souhaitent en consommer davantage. Le produit local est pour le consommateur synonyme de produit régional et sa demande est supérieure à celle des produits fabriqués en France, sa consommation se fait même au détriment des produits issus de l'agriculture biologique (LSA data, 2022)¹. Si 71% des français déclarent vouloir consommer plus responsable, plusieurs freins à l'achat se dessinent : (1) 65% pensent qu'adopter un mode de consommation responsable coûte trop cher, (2) 60% des consommateurs pensent qu'une consommation plus responsable consiste à consommer moins, (3) seuls 34% d'entre eux déclarent vouloir consommer des produits locaux ou certifiés pour aligner leur consommation sur leurs valeurs responsables (Baromètre Greenflex, 2022). A ces freins à l'achat du côté du consommateur s'ajoute le déficit de notoriété dont souffrent des produits fabriqués par de très petits producteurs face à des marques locales reconnues ou des marques nationales arborant labels et certifications.

Afin de faire face à ces freins, les micro-producteurs de produits alimentaires ou de boissons peuvent opter pour une stratégie basée sur la dégustation de leurs produits aussi bien en BtoB qu'en BtoC. Cette stratégie est souvent un élément stratégique de recrutement pour inciter à l'achat de leur produit en réduisant la perception de prise de risque par le consommateur. Nous proposons d'étudier le rôle joué par la valeur de l'expérience de dégustation pour expliquer les mécanismes sous-jacents du comportement du consommateur.

Lors de la commercialisation d'un produit local en circuit court, les micro-producteurs peuvent proposer leur dégustation afin de lever les doutes du consommateur. Pourtant cette stratégie peut compromettre la valeur globale perçue de l'expérience par le consommateur. En effet, une recherche menée par Masson et al. (2009) [1] montre que les informations non sensorielles (comparées à des informations sensorielles dans le cadre d'une dégustation) permettent une meilleure catégorisation d'un nouveau produit et un meilleur jugement de sa typicalité. En outre, Krishna et Morrin (2008) [2] mettent en évidence que le toucher d'un contenant a un effet plus ou moins important sur la perception de goût d'un produit, selon le besoin de toucher du consommateur concerné, laissant penser que la perception de goût peut être perturbée par un élément sensoriel non lié à la dimension gustative. Les travaux de Briand-Decré et Davies (2016) [3] confirment

ses résultats et montrent que les représentations graphiques sur les étiquettes peuvent influencer la perception de goût *a priori* et même le goût intrinsèque du produit lors de la dégustation (partie des résultats non publiés). Dans son ouvrage *Sensory Marketing : Research on the sensuality of products*, Krishna [4] explique, en définitive, que dans le cadre d'une communication, l'interaction des cinq sens est plus puissante pour former des pensées sensorielles positives et donc une meilleure perception du goût que le goût dans son plus simple appareil.

Si le marketing sensoriel permet d'orienter les décisions stratégiques quant à la mise en valeur des produits dans un contexte commercial, force est de constater que le goût est l'un des sens le moins étudié dans la littérature en marketing, son développement étant par exemple quasi-absent de l'ouvrage de référence coordonné par Sophie Rieunier (2022) [5], le marketing sensoriel et expérientiel du point de vente.

Un micro-producteur souhaitant améliorer la perception de son produit tout en augmentant ses ventes doit donc être vigilant lorsqu'il propose la dégustation de celui-ci. S'il peut être difficile pour un micro-producteur de contrôler l'ensemble des facteurs exogènes susceptibles de perturber l'expérience de dégustation, la dégustation des produits en vente directe peut lui permettre de différencier fortement son offre. Ainsi, la valeur de l'expérience retirée par le consommateur de son interaction intègre l'aspect sensoriel du goût et permet d'augmenter la puissance sensorielle globale de l'expérience à partir de cette dynamique. Ce contexte expérientiel (Carù et Cova, 2006) [6] présente des spécificités uniques non étudiées.

Traditionnellement, l'expérience se comprend comme une interaction entre une personne, un objet consommé (ou dégusté dans notre cas), dans une situation donnée : $\text{Personne} \times \text{Objet} \times \text{Situation}$ (Punj et Stewart, 1983) [7]. Le contexte expérientiel correspond aux conditions d'occurrence d'une situation : volontairement définies par l'entreprise (couleurs, produits, personnel en contact, etc.) voire accidentelles (météo, interventions diverses, etc.). Ces éléments vont jouer un rôle dans l'expérience qui va advenir. Il s'agit ici de la combinaison $\text{Objet} \times \text{Situation}$ proposée à l'interaction au consommateur. Les différentes dimensions de l'expérience vécue (Roederer, 2012) [8] comprennent quatre composantes : la dimension hédonico-sensorielle (aspects physiques et sensoriels en termes de plaisir/déplaisir à interagir avec le contexte

¹ Lsa data (2022) Le local a la cote chez les consommateurs français, <https://www.lsa-conso.fr/le-local-a-la-cote-chez-les-consommateurs-francais-lsa-data.422746>.

expérientiel), la dimension rhétorique socioculturelle (sens attribué à l'expérience), la dimension temporelle (durée, rythme et ressource-temps à maîtriser) et la dimension praxéologique (actions, activités de l'expérience). La dégustation proposée par les micro-producteurs : en vente directe sur le lieu de production, au marché ou en AMAP, correspond au contexte expérientiel typique de leur forme de commercialisation. Celui-ci encourage l'adhésion du consommateur par sa participation active et par l'intensité de la mobilisation de toutes les dimensions du contexte expérientiel, et de manière originale, dans la dimension hédonico-sensorielle, par la dégustation et le goût.

Plus particulièrement, le contexte du marché renforce, par ailleurs, de par son fonctionnement même de lieu que l'on peut qualifier d'hyperlieu, ce contexte expérientiel extrêmement riche [9]. Les micro-producteurs disposent donc assez naturellement d'une offre expérientielle forte et peu reproductible sur l'ensemble des dimensions de l'expérience vécue par le consommateur, aussi bien dans l'interaction avec le produit en lui-même qu'avec leur contexte de commercialisation préférentiel (circuit court).

La valeur perçue de ces expériences peut, elle, être comprise comme le résultat de l'évaluation par le consommateur de l'interaction entre l'individu et le contexte expérientiel auquel il est confronté (Personne x Objet x Situation) (Aurier et al., 2004 [10] ; Mencarelli, 2008 [11]). De nature multidimensionnelle : six composantes de la valeur de consommation (utilitaire, connaissance, stimulation expérientielle, lien social, expression de soi, spirituelle) sont intégrées dans le jugement de valeur globale perçue du consommateur (ratio entre bénéfices et sacrifices). Ce modèle (Aurier et al., 2004) [10], particulièrement adapté au contexte expérientiel, permet donc à la fois de mesurer l'impact de la modification de l'intensité du contexte sensoriel auquel le consommateur est confronté sur l'ensemble de sa valeur perçue. Il permet également d'étudier les effets de synergie entre les différentes composantes de la valeur sur le jugement global perçu, et cela dans différents contextes ou selon les stimuli sensoriels mobilisés.

Afin de répondre à la demande de consommateurs de plus en plus concernés et soucieux de contribuer, à leur échelle, à un développement économique harmonieux et durable, nous cherchons dans cette recherche à identifier les leviers et réglages d'optimisation de l'expérience de dégustation proposée par les micro-producteurs sur l'ensemble de la valeur perçue de l'expérience par le consommateur. Afin d'envisager dans quelle mesure la dégustation peut constituer un levier supplémentaire, mais surtout inimitable, de valorisation des produits de micro-producteurs locaux, nous identifierons et formaliserons les

conditions de valorisation d'une offre expérientielle fondée sur le goût durant une dégustation dans un contexte de vente en circuit court (marché, à la ferme, AMAP).

La première partie de notre étude présentera l'état d'avancement de la littérature sur les conditions de l'intégration du goût et de sa valorisation globale dans un contexte sensoriel pour pouvoir l'appliquer plus spécialement au micro-producteur. Nous envisagerons ensuite dans une deuxième partie cette mise en valeur dans les différents types de circuits courts qu'il peut être amené à mobiliser : marchés, vente sur le lieu de production ou AMAP, de façon à identifier les modalités de présentation de l'offre les plus à même de valoriser les produits présentés à la dégustation.

Références

- [1] Masson Josselin, Philippe Aurier et François d'Hauteville, *Faut-il le dire ou le faire déguster ? Effet de l'information sensorielle et non-sensorielle sur la catégorisation d'un nouveau produit alimentaire*, 25ème Congrès de l'Association Française de Marketing, AFM, 2009
- [2] Krishna Aradhna and Maureen Morrin, *Does touch affect taste? The perceptual transfer of product container haptic cues*, Journal of Consumer Research 34.6, 2008, p.807 – 818
- [3] Briand-Decré Gwenaëlle et Gemma Davies, *Les effets d'une image végétale sur l'étiquette sur la perception du vin par les jeunes consommateurs*, C. Territoires du Vin. Angers, 2016
- [4] Krishna Aradhna, *Sensory Marketing: Research on the Sensuality of Products* New York: Routledge, 2011
- [5] Rieunier Sophie (dir.), *Marketing sensoriel et expérientiel du point de vente*, -5e éd. Dunod, 2022
- [6] Carù Antonella et Bernard Cova, *Expériences de marque : comment favoriser l'immersion du consommateur ?* Décisions marketing, 2006, p. 43 – 52
- [7] Punj Girish N. and David W. Stewart, *An interaction framework of consumer decision making*, Journal of Consumer Research 10.2, 1983, p. 181 – 196
- [8] Roederer Claire, *Contribution à la conceptualisation de l'expérience de consommation : Émergence des dimensions de l'expérience au travers de récits de vie*, Recherche et Applications en Marketing, 27.3, 2012, p. 81 – 96
- [9] Guguen-Gicquel Inès et Géraldine Thevenot, *Le marché, un hyper-lieu au service du marketing de la ville et du territoire*, Décisions Marketing 98.2, 2020, p. 65 – 82
- [10] Aurier Philippe, Yves Evrard et Gilles N'Goala, *Comprendre et mesurer la valeur du point de vue du consommateur*, Recherche et Applications en Marketing, 19.3, 2004, p. 1 – 20
- [11] Mencarelli Rémi, *L'interaction lieu-objet comme conceptualisation de l'expérience vécue : test d'un modèle intégrateur*, Recherche et Applications en Marketing, 23.3, 2008.

Analyse juridique du phénomène du présentéisme du personnel soignant

Nathalie Dedessus-Le-Moustier

Nathalie.dedessus-le-moustier@univ-ubs.fr

IUT Lorient, Université de Bretagne sud

Lab-LEX, EA 7480

Thèmes – *Droit (droit du travail et statut de la fonction publique hospitalière)*

Résumé – *Le présent article propose une analyse du point de droit du phénomène du présentéisme du personnel soignant, observé par deux enseignants-chercheurs en sciences économiques et de gestion, dans le cadre du projet de recherche PRES-ANTS, labellisé par la MSHB. Une enquête qualitative par entretiens semi-directifs a été réalisée dans un établissement privé de rééducation fonctionnelle et dans un établissement hospitalier public. Les entretiens entièrement retranscrits ont fait l'objet d'une analyse de contenu thématique par ces chercheurs. La finalité de cette contribution est d'analyser les questions que soulèvent le présentéisme sous ses différentes formes d'un point de juridique. Sa pratique est examinée au regard du droit du travail et des règles de la fonction publique hospitalière.*

Mots-Clés – *Santé au travail, droit au repos, heures supplémentaires.*

1 Introduction

Trois formes de présentéisme du personnel soignant ont été identifiées par l'enquête : le dépassement des horaires théoriques de travail, le présentéisme maladie et l'auto-remplacement [1]. Il n'existe pas de définition juridique du présentéisme ou de dispositions directement applicables en droit du travail et dans le statut de la fonction publique hospitalière. Pour autant, ces pratiques suscitent un certain nombre de réflexions et d'interrogations pour le juriste qui touchent à plusieurs aspects de la relation de travail (2). Le présentéisme d'auto-remplacement, pratiqué par l'établissement public dans cette enquête, nous semble poser des problèmes spécifiques (3).

2 Problèmes juridiques généraux posés par le présentéisme

Le présentéisme heurte certains principes essentiels tels que le droit à la santé, le droit au repos et aux congés en lien avec les règles relatives à la durée du travail. Le sujet central est celui des effets potentiellement néfastes de cette pratique sur la santé et la sécurité des soignants.

L'employeur privé comme public a l'obligation de mettre en place une véritable politique de santé au travail. Pour ce faire, il doit évaluer les risques professionnels puis prendre « les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale des travailleurs ». L'article L. 4121-1 du Code du travail prévoit « la mise en place d'une organisation et de moyens adaptés ». C'est à la direction de l'établissement de santé de veiller à ce que l'organisation du travail ne soit pas source de présentéisme. Le présentéisme peut être considéré comme un risque professionnel aussi bien pour la santé physique que pour la santé mentale. Ce risque devrait donc être évalué et figurer dans le document unique assorti d'un plan d'actions.

Actuellement, les différents mécanismes liés à la gestion du temps de travail ont autant pour objectif la protection de la santé des travailleurs que la satisfaction d'une aspiration à une meilleure qualité de vie. Dans ce sens, l'article L. 3122-37 du Code du travail reconnaît au salarié le droit de refuser un travail de nuit lorsque ce travail « est incompatible avec des obligations familiales impérieuses ». Bien sûr, l'employeur peut recourir aux heures supplémentaires et même imposer au salarié ou à l'agent d'en effectuer. Dans cette hypothèse, il doit accorder aux personnels concernés des contreparties en termes de rémunération et/ou en repos compensateur et respecter un contingent annuel d'heures supplémentaires pour le secteur privé et un quota pour la fonction publique

hospitalière.

Le Code du travail oblige également le travailleur à prendre soin de sa santé et de celle des autres personnes concernées du fait de ses actes ou de ses omissions au travailⁱ. Le manquement volontaire à cette obligation peut être sanctionné disciplinairement. En ce qui concerne le présentéisme, quelle faute pourrait être opposée à l'agent ? Le dépassement d'horaires ? D'avoir accepté de remplacer un collègue absent à la demande du cadre de santé ? En contrepartie de son obligation de sécurité, le travailleur dispose d'un droit de retrait qui lui permet de se soustraire temporairement à l'autorité de l'employeurⁱⁱ. Le présentéisme sous ses différentes formes est susceptible de conduire à un épuisement ou à un burn-out. Il est envisageable que l'agent exerce son droit de retrait en refusant la demande d'auto-remplacement ou le dépassement d'horaires. Cette décision pourrait relever d'un service puisque le droit de retrait s'exerce individuellement ou collectivement

Enfin, peu importe qu'un travailleur ait accepté une charge de travail trop importante, c'est à l'employeur de bien mesurer la charge qu'il lui confie et de vérifier qu'elle est adaptée aux capacités de l'intéressé. Cette solution s'applique tout à fait aux personnels soignants qui acceptent de remplacer des collègues en plus de leur charge de travail habituelle ou de travailler alors qu'ils sont malades. Il appartient à l'employeur quel qu'il soit de s'assurer que l'organisation du travail mise en place est acceptable aussi bien du point de vue du collectif de travail que de l'individu.

3 Problèmes juridiques spécifiques posés par l'auto-remplacement

Dans les établissements de santé, l'absentéisme est une donnée importante pour le personnel d'encadrement et le fonctionnement satisfaisant des équipes. La prise en charge des patients ne doit pas être interrompue. L'établissement des plannings et leur révision en fonction des absences constituent des tâches essentielles pour les cadres de santé. Pour faire face au manque de personnel, ils peuvent faire appel à des soignants en repos ou recourir, souvent dans l'urgence, à l'auto-ajustement des plannings.

Le présentéisme d'auto-remplacement, pratiqué par l'établissement public, objet de l'enquête pour faire face à des arrêts courts, pose des questions particulières. Tout d'abord, celles des atteintes au respect de la vie privée et personnelle et l'interdiction des discriminations. En effet, la situation familiale joue un rôle important quand il s'agit de solliciter une personne pour un remplacement imprévu.

Il est également prioritairement fait appel au personnel à temps partiel et aux contractuels.

La décision qui est prise d'appeler tel ou tel soignant en raison de ses caractéristiques propres, notamment sa situation de célibat ou le fait qu'il n'a pas d'enfant, est constitutive d'une différence de traitement et donc d'une discrimination. Le principal texte de référence en matière de lutte contre les discriminations est la loi n° 2008-496 du 27 mai 2008, qui vaut pour toutes les discriminations, qu'elles soient pratiquées dans le privé ou dans la fonction publique. Les discriminations sont prohibées car elles portent atteinte à la dignité de la personne. Toutefois, le droit permet d'envisager l'introduction d'une certaine souplesse dans la définition de la règle pour tenir compte des besoins de chaque personne, par exemple les salariés qui ont des jeunes enfants à charge. Il semble que la pratique d'appeler tel ou tel soignant en raison de ses caractéristiques varie en fonction des cadres de santé.

La prise en compte par l'employeur de l'existence d'enfants, de leur nombre ou de leur âge ou de la situation professionnelle du conjoint afin d'arrêter une décision peut également constituer une atteinte à la vie familiale et personnelle du salarié. Or, les droits fondamentaux sont particulièrement protégés par le droit. Aux termes de l'article L. 1121-1 du Code du travail, « nul ne peut apporter aux droits des personnes et aux libertés individuelles et collectives de restrictions qui ne seraient pas justifiées par la nature de la tâche à accomplir ni proportionnées au but recherché ». Les agents publics, comme toutes les personnes physiques, ont droit au respect de leur vie privée. La jurisprudence sociale est attentive à garantir une aire d'autonomie au salarié et à limiter le pouvoir de direction de l'employeur pour cette raison. Ainsi, les juges considèrent que l'instauration d'une nouvelle organisation du travail sur la journée relève du pouvoir de direction de l'employeur sauf atteinte excessive au droit du salarié au respect de sa vie personnelle et familiale ou à son droit au repos. L'auto-remplacement pourrait constituer une telle atteinte.

Le présentéisme d'auto-remplacement porte également atteinte à la qualité de vie au travail des soignants. Ce concept renvoie à une mise en œuvre de l'organisation du travail permettant de concilier l'amélioration des conditions de travail et de vie pour les salariés et la performance collective de l'organisation [2]. La question des temps, de travail, personnel, de repos, y occupe une place centrale. La charge de travail constitue également une dimension essentielle de la qualité de vie au travail [3]. Les personnels soignants sont soumis à des organisations du travail reconnues comme étant sources

de fatigue comme le travail de nuit ou des amplitudes horaires importantes, et ne favorisant pas la conciliation entre la vie privée et la vie professionnelle. La pratique de l'auto-remplacement augmente le risque d'une détérioration de leur qualité de vie au travail. L'employeur est considéré comme responsable de la mise en place d'une organisation du travail permettant la prise effective des pauses et repos obligatoires. Cette exigence d'effectivité des temps de repos pourrait également justifier la suppression de la pratique de l'auto-remplacement ou du moins son strict encadrement.

4 Conclusion

Alors que le risque d'épuisement professionnel des soignants était mis en lumière par des études récentes, le 6 mars 2020, le plan blanc à l'hôpital et le plan bleu dans les EHPAD ont été déclenchés pour faire face à l'épidémie de Coronavirus. La crise sanitaire a pu modifier les comportements en matière de présentéisme. Mais la nécessité de continuité de service a surtout conduit de nombreux soignants à se rendre au travail malgré un état de santé dégradé. L'analyse juridique de ce phénomène demeure un sujet d'actualité aussi bien pour les soignants que pour l'ensemble des travailleurs.

5 Remerciements

L'auteur exprime sa gratitude à B. Berthe et M. Dumas qui ont mené l'étude qualitative sur le présentéisme du personnel soignant et en ont dressé un constat et une étude de ses causes et conséquences qui a permis cette analyse juridique.

Références

- [1] *Bénédictte Berthe, Nathalie Dedessus-Le-Moustier et Marc Dumas, Le présentéisme du personnel soignant et son traitement par le droit*, RFAS 2021, n°2, p. 215-236.
- [2] ANI du 19 avril 2013 sur la qualité de vie au travail et l'égalité professionnelle.
- [3] *Sophie Fantoni et Pierre-Yves Verkindt, Charge de travail et qualité de vie au travail*, Droit social 2015, p. 106-112.

Innovation pédagogique au croisement de la sociocratie et de la communication nonviolente : apports croisés de la recherche et de la formation

Anne Carbonnel¹

Anne.carbonnel@univ-lorraine.fr

¹ IUT de Metz, Université de Lorraine

Centre Européen de Recherche en Economie Financière et Gestion des Entreprises, UMR 7373

Thèmes – *Gestion - SHS - Communication*

Résumé – *Face aux risques psychosociaux du travail, aux désillusions du management participatif, et l'émergence de modèles organisationnels horizontaux, cette communication présente les résultats d'une étude sur la première formation professionnelle universitaire française, créée en 2016 à l'IUT de Metz, qui allie sociocratie et communication nonviolente. Ces deux méthodes combinées permettent plus d'efficacité du système organisationnel, et plus de satisfaction des besoins individuels et collectifs (notamment autonomie, coopération, sécurité, et interdépendance); par leurs réponses spécifiques elles satisfont des besoins individuels, collectifs et organisationnels, et favorisent le développement de compétences organisationnelles, collectives et individuelles; au vu des enjeux et difficultés à relier ces différents niveaux de besoins et de compétences, nos résultats argumentent en faveur d'une innovation sociale pédagogique et managériale dans ses attendus pour les professionnels. Les résultats présentés ici se basent sur nos travaux de recherche antérieurs, et les retours, évaluations et témoignages de 127 participants de 12 organisations professionnelles différentes ayant participé à cette formation innovante.*

Mots-Clés – *Innovation, gouvernance, participation, communication*

1 L'accroissement des risques psychosociaux (RPS)

Entre 2006 et 2010 l'évolution de l'exposition aux RPS croit, se manifeste par plus d'exigences du travail, d'exigences émotionnelles, un manque d'autonomie, des relations sociales dégradées, des conflits de valeurs, et l'insécurité économique [1]. 1 personne sur 3 désapprouve ce qui est attendu d'elle et vit de mauvaises relations de travail avec ses collègues ; 1 sur 2 n'a pas les moyens de faire un travail de qualité ; plus de 60 % estiment devoir cacher leurs émotions, et travailler sous pression. Depuis 2010, malgré l'obligation pour tout employeur de détecter, prévenir et remédier aux RPS, une enquête nationale ministérielle souligne que 1/ les exigences émotionnelles et les conflits de valeurs sont très significatifs notamment pour la fonction publique hospitalière ; 2/ le manque d'autonomie est significatif dans le secteur privé, pour les salariés du commerce, des transports, de l'agriculture et de l'industrie. [2]

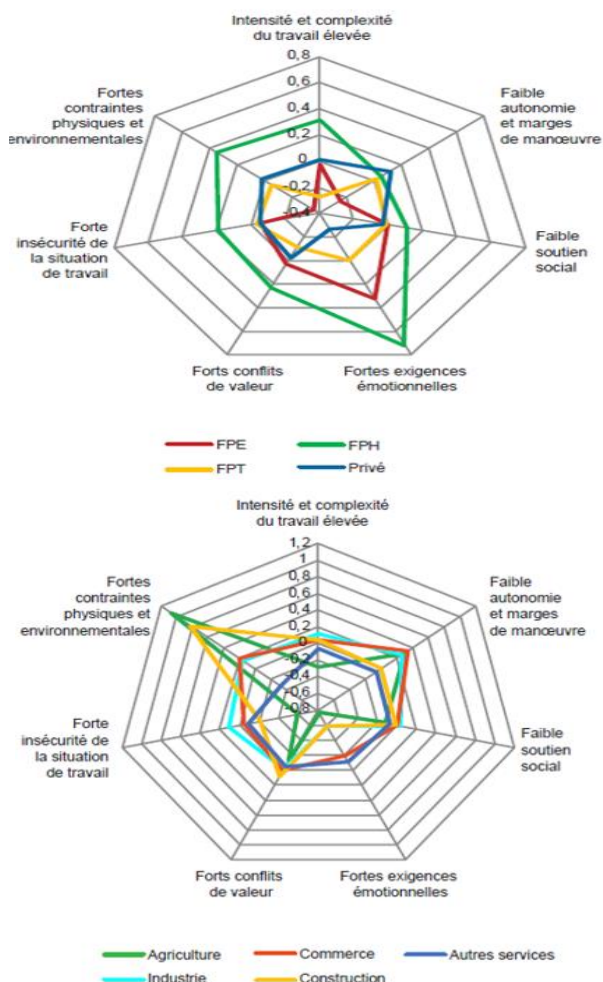


Figure 1 – Exposition aux risques professionnels et psychosociaux par type d'employeur et secteur d'activité [2]

Suite au COVID la moitié des actifs vivent l'intensification et la dégradation de leurs conditions de travail [2] avec pour conséquence le doublement du risque dépressif [3].

2 Une formation innovante qui allie sociocratie et communication nonviolente, pour plus d'efficacité et d'intégration des besoins individuels collectifs et organisationnels

La sociocratie est une méthode créée dans les années 1970 par Endenburg [4], pour gérer son entreprise d'électromécanique ; son but est l'efficacité par l'auto-régulation, selon une gouvernance systémique. L'auto-régulation du système est facilitée par un processus itératif de gestion (T0-T1...Tn) et 3 composantes du processus : 1/ définition des vision-mission-but-objectifs ; 2/ mise en œuvre et réalisation des résultats ; 3/ évaluation des résultats. Quatre règles principales se déclinent pour chaque entité organisationnelle : 1/ Le cercle (groupe de personnes identifiés par une mission, des moyens et l'autonomie organisationnelle pour réaliser leur mission) 2/ la décision par consentement (processus de clarification, réaction, consentement des membres) ; 3/ l'élection sans candidats (pour choisir les titulaires des rôles du cercle (1^{er} lien ou chef d'équipe, animateur-trice des réunions ; secrétaire ; double lien, qui garantit représentation et participation aux décisions aux divers niveaux organisationnels).

La communication nonviolente ou CNV [5] est une méthode qui favorise l'intelligence émotionnelle (régulation interne des émotions, et inter individuelle). Son processus qui repose notamment sur 4 points (observation-sentiments-besoins-demande), vise à améliorer la qualité des relations, en se fondant sur l'interdépendance des personnes, dans un dialogue authentique. Elle développe conscience et responsabilité des pensées, émotions, besoins et demandes, notamment leurs effets dans les relations et sur les solutions.

Cette formation vise 6 catégories de compétences (C) : C1 : Construire un management participatif, favoriser l'autonomie des équipes de travail ; C2 : Développer des compétences en intelligence émotionnelle ; C3 : Accompagner le changement, en identifiant étapes et modalités d'évaluation et d'amélioration ; C4 : Stabiliser les changements ; C5 : Développer une culture de l'apprentissage continu ; C6 : Développer des compétences en intelligence relationnelle, dans la relation à soi et à l'autre.

Aux modules de sociocratie et de communication nonviolente se rajoutent dans cette formation l'élaboration individuelle puis collective du diagnostic initial et du bilan final ; par ailleurs alternent les temps de formation et d'expérimentation professionnelle.

3 La méthodologie qualitative de l'étude

Suivant la typologie retenue dans l'enquête SIP de la DREES et DARES [6] les 15 facteurs de RPS sont regroupés en 6 dimensions que nous avons étudiées, pour examiner les contributions de chacune des 6 compétences visées par la formation.

Les données proviennent de 12 organisations différentes (de l'industrie, la fonction publique, l'enseignement, la recherche, l'aide sociale, l'éducation populaire, le tourisme), recueillies auprès de 127 personnes bénéficiaires de la formation. Elles se composent des retours des participants (à l'issue de chaque séquence formative, en fin de formation, et plusieurs mois après), complétés par six entretiens enregistrés et retranscrits. Ces données ont été traitées en méta-matrice puis matrice ordonnée [7].

4 Résultats

Nous présentons ici les verbatims illustrant les correspondances entre dimensions (D) de RPS et compétences (C) acquises par les participants de la formation.

Des exigences du travail (D1)... aux compétences à organiser le travail et gérer le changement (C1-2-3-4): « Notre groupe fonctionne nettement mieux aujourd'hui qu'il y a quelques mois, les individus ont fait place à un vrai collectif, la répartition des tâches est faite de façon beaucoup plus naturelle et facile, chacun a trouvé sa place ; on est plus efficaces et plus productifs aujourd'hui."

Des exigences émotionnelles (D2) et rapports sociaux... aux compétences en intelligence relationnelle : « Certaines personnes dans le groupe ont réussi à plus s'affirmer et s'autoriser à dire des choses, ça c'est une vraie évolution". « Le consensus mutuel est plus facile à obtenir".

Du manque d'autonomie (D3)...à l'autonomie et l'auto-organisation de l'équipe (C1-C5) : « Le modèle de gouvernance qu'on a vu c'est une voie nouvelle à approfondir et à transposer ; dans l'animation démocratique des réunions par exemple, ça donne beaucoup plus d'autonomie et de pouvoir d'agir et plus de sécurité finalement pour notre organisation de travail ».

Des conflits de valeurs (D5)...à la capacité à mettre en place un management réellement participatif (C1-C2) : "en s'écoutant, en remettant à plat les choses, on a pu mesurer sur un an et demi les effets". "Le collectif a continué dans la durée à améliorer son fonctionnement, et ça c'est des effets sur du long terme ». « Concrètement, on peut prendre maintenant des décisions qui prennent en compte la réalité des différences ».

5 Conclusions

Déjà en augmentation avec la crise économique de 2008, tous secteurs d'activité confondus, tous les facteurs de RPS ont augmenté leur emprise depuis 2020. Les témoignages des participants à cette formation rendent compte de compétences individuelles collectives et organisationnelles, qui permettent de réduire le risque d'occurrence des RPS, par le développement de l'autonomie, du pouvoir d'agir, la gestion des relations interpersonnelles et de la coopération entre les parties prenantes. Ces résultats conduisent à argumenter en faveur d'une innovation sociale pédagogique.

Si les discours tendent à l'éloge, il convient de souligner, sur la base du recul de nos 6 années d'observation : 1/ l'adhésion forte et l'effet « boule de neige » dans la demande de participer aux sessions ultérieures ; 2/ les peurs de changement chez les individus qui voient une menace dans le partage du pouvoir et des relations plus authentiques.

Par conséquent comme nous l'avons déjà souligné [8] l'accompagnement ou l'étalement dans la durée des modules de formation est gage d'appropriation progressive et stabilisation des changements dont cette formation porte la promesse. Dans le cadre d'un agenda futur, des études complémentaires gagneraient à être conduites, par exemple dans un réseau regroupant plusieurs IUT proposant cette formation innovante.

Références

- [1] Roméo Fontaine, Pascale Lengagne, Damien Sauze, « L'exposition des travailleurs aux RPS a-t-elle augmenté pendant la crise de 2008 ? », *Economie et statistiques*, 2016 n° 486-487, pp. 103-128.
- [2] Sandra Zilloniz, Éva Baradji, « Exposition aux risques professionnels et psychosociaux au travail : une analyse globale », *Collection Statistiques et Recherche sur la Fonction Publique, sous collection Point Stat* 2019, n°30.
- [3] DARES, « Quelles conséquences de la crise sanitaire sur les conditions de travail et les risques psycho-sociaux ? » *Analyses de la DARES*, 2021, n°28.
- [4] Gerard Endenburg, *Sociocracy: The Organization of Decision-Making*, Delft: Eburon, 1998. Romme A. G. L. & Endenburg G., « Construction principles and design rules in the case of circular design », *Organization Science*, 17, 2006 pp. 287-297.
- [5] Marshall B. Rosenberg, *Les mots sont des fenêtres (ou bien ce sont des murs)*, Ed. La Découverte, 1999.
- [6] <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sources-outils-et-enquetes/06-lenquete-sante-et-itineraires-professionnel-sip>
- [7] A. Michaël Huberman, B. Matthiew Miles, *Analyse de données qualitatives*. Ed. De Boeck 2015.
- [8] Vincent Grosjean, Anne Carbonnel, « Conditions d'appropriation de la gouvernance partagée dans une structure bureaucratique », *La revue des conditions de travail*, n°12, 2021, pp. 62-73, Editions de l'ANACT.

Le bien-être au travail (BET) des collaborateurs japonais

Sophie Szymkowiak¹

Jordane Creusier²

Franck Biétry³ *

sophie.szymkowiak@univ-littoral.fr jordane.creusier@univ-littoral.fr franck.bietry@unicaen.fr

¹ IUT du Littoral Côte d'Opale, Université du Littoral Côte d'Opale, CNRS
Lille Economie Management LEM, UMR 9221

² Université du Littoral Côte d'Opale, CNRS
Lille Economie Management LEM, UMR 9221

³ IAE, Caen Université
Normandie Innovation Management Entreprise Consommation NIMEC, UR 969

THÈMES – *Gestion*

RÉSUMÉ – *Cette recherche est issue de plusieurs observations : le degré d'internationalisation des groupes, les effets du bien-être sur le PIB et du bien-être au travail sur la performance organisationnelle. Dans la continuité des travaux de Morin et al. (2017) en Chine, la question de l'universalité du concept de bien-être au travail (BET) reste posée. Notre ambition est de vérifier le caractère universel de sa définition (structure factorielle) et de son ressenti (profils de salariés). Pour ce faire, dans la continuité des travaux de Biétry et Creusier (2015, 2017), une étude comparative est menée entre les collaborateurs japonais et les collaborateurs américains et français. Les résultats obtenus auprès de 612 salariés japonais, par une approche centrée sur les variables puis sur les personnes, tendent à conforter l'hypothèse générale selon laquelle la conception du BET est similaire en orient et en occident tandis que son ressenti – exprimé par les profils – est partiellement contingent. En effet, des profils originaux apparaissent au Japon, dominés par a) la compatibilité des différents temps sociaux, b) par la qualité des relations aux collègues et au manager, et enfin, c) par des rapports favorables aux temps sociaux et à l'environnement matériel de travail. De ce fait, il n'est pas établi que les pratiques managériales à recommander dans les établissements employant une main-d'œuvre occidentale pour développer toutes les dimensions constitutives du BET soient efficaces dans ceux employant un personnel japonais.*

MOTS-CLÉS – *Bien-être au travail, Contingence, Japon, Profils.*

*Ce travail a été financé en partie par l'ARIMHE.

1 Introduction

Depuis les années 2000, la thématique du bien-être au travail (BET) fait l'objet de nombreuses investigations. Essentiellement étudié dans les économies développées des pays occidentaux [1], l'universalité du concept reste sujette à caution. Dans la lignée des travaux de [2], notre ambition est de contribuer à rendre plus efficaces les préconisations interculturelles de développement du BET. Plus précisément, la conception générale et la manière dont les salariés japonais ressentent le BET sont-elles différentes de celles de leurs homologues occidentaux ? Le choix du Japon s'explique par ses fortes similarités de développement économique et de stabilité politique avec les pays occidentaux mais aussi et surtout par ses spécificités culturelles. Ryff *et al.* avaient conclu que les émotions positives et négatives sont interprétées de manière différente entre les salariés américains et japonais [3]. Maximiser le bonheur chez les américains apparaît comme un objectif déclaré alors que trouver un équilibre et une modération semblent être des idéaux chez les japonais. Ces différences découlent d'une conceptualisation du bien-être spécifique au Japon désigné sous le nom de « bien-être minimaliste » [3]. Ainsi, les influences culturelles joueraient un rôle dans la manière dont les émotions sont vécues et expérimentées. Cependant, elles auraient un statut explicatif partiel et non prédictif des attitudes et comportements.

2 Le BET : universalité ou contingence ?

D'après les recherches interculturelles, la culture japonaise semble plutôt relever du collectivisme vertical [4]. Ce pays est caractérisé par une pression exacerbée en faveur de normes comportementales où les valeurs de modération, de subtilité, d'harmonie avec les autres plutôt que de profit, de pouvoir ou de prestige personnels sont autant de vertus fondamentales. Ces caractéristiques seraient la conséquence d'un « substrat structurel unique » fait de bouddhisme, de confucianisme et de shintoïsme [5]. Le modèle japonais prône l'harmonie, le consensus et la conformité sociale mais reste très perméable aux influences des autres cultures. Ainsi, au Japon, le monde du travail est devenu anxigène, épuisant, et stressant en raison de l'exigence de dévouement et de la peur du chômage. Désormais, la vision de l'employé à vie y est contestée du fait notamment de ses effets négatifs sur le BET.

Plusieurs propositions dominent dans la littérature sur le BET, si bien qu'aucun accord n'est établi sur une définition cohérente et actionnable ou sur ses conditions d'émergence. Ne plus se focaliser sur la souffrance, les risques psycho-sociaux et le mal-être au travail est un consensus établi. De même, il est entendu que le BET est un concept multiforme. Aujourd'hui, la littérature s'oriente vers une combinaison des perspectives individualistes (hédoniste, eudémonique), collectives et structurelles en observant à la

Genre		Ancienneté moyenne	12,1 ans
<i>Homme</i>	385	Age moyen	49,2 ans
<i>Femme</i>	227		
Taille entreprise		Statut	
<i>Mois de 20</i>	149	<i>Ouvrier</i>	25
<i>De 20 à 50</i>	111	<i>Employé</i>	313
<i>De 50 à 200</i>	172	<i>Manager</i>	225
<i>De 200 à 500</i>	123	<i>Autres</i>	49
<i>Plus de 500</i>	57		

TABLE 1 – Description de l'échantillon

fois les conditions subjectives (prédisposition individuelle à interpréter la vie au travail et à y réagir positivement ou non), objectives (conditions et événements liés à la vie travail) et sociales (collectif et environnement social) du BET [7]. Dans la continuité des travaux de Biétry et Creusier [1, 7], nous envisageons le BET comme un état psychologique positif résultant d'une évaluation affective et cognitive favorable des expériences professionnelles. Cette définition constitue l'ancrage de l'échelle de mesure « EP-BET » que nous mobilisons. Elle comporte quatre dimensions : 1) un assouvissement du besoin d'intégration sociale par un rapport positif aux collègues de travail (REL), 2) un contentement du besoin de réalisation personnelle grâce à un rapport positif au manager direct (MAN), 3) une réponse au besoin d'être considéré en tant que salarié, mais aussi en tant que personne, par le biais d'un rapport favorable aux temps traduisant une compatibilité perçue entre les différentes temporalités sociales (TEM), 4) enfin, un assouvissement du besoin d'efficacité personnelle rendu possible par un rapport positif à l'environnement physique de travail (ENV).

La validité externe de l'échelle EPBET a été étudiée en Amérique du Nord, via des approches centrées sur les variables puis les profils [1, 7]. Les premières traitent les données empiriques à partir des scores globaux de BET tandis que les deuxièmes correspondent à des regroupements originaux de salariés suivant les scores enregistrés sur chacune des dimensions constitutives du BET. En l'espèce, une invariance de la structure factorielle et l'identification de certains profils similaires entre les collaborateurs français et américains sont observées. Les profils qualifiés de « déficit de bien-être », de « bien-être élevé » et de « bien-être de référence » qui s'y retrouvent correspondent respectivement à des niveaux faibles, élevés et moyens sur les quatre dimensions de l'EPBET.

	REL	TEM	ENV	MAN	Genre	Âge	Taille
TEM	0,34						
ENV	0,53	0,46					
MAN	0,57	0,19	0,60				
Genre	0,01	-0,01	-0,02	-0,11			
Âge	0,04	0,10	0,09	0,07	-0,35		
Taille	0,13	-0,08	-0,02	0,13	-0,04	-0,08	
Ancienneté	0,07	0,05	0,14	0,14	-0,17	0,39	0,06

TABLE 2 – Matrice des corrélations

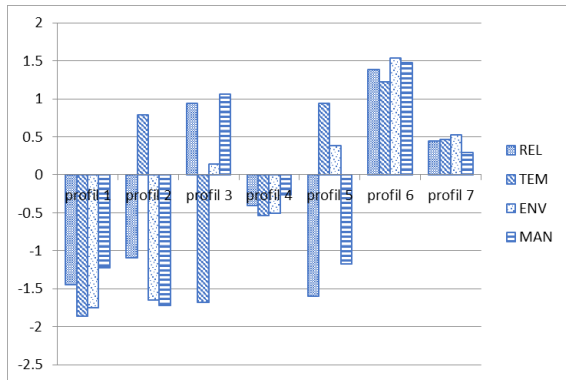


FIGURE 1 – Profils latents de BET au Japon

Dans la continuité de ces recherches, notre collecte de données a été confiée à un cabinet privé au Japon reconnu pour ses panels. En outre, il est engagé dans le respect de la norme et des codes éthiques ICC/ESOMAR (International Code on Market, Opinion and Social Research and Data Analytics). Notre échantillon final est composé de 612 salariés (tableau 1). L'EPBET en douze items est mobilisée [7]. La validation de l'échelle dans le contexte japonais (analyse factorielle confirmatoire par Amos v21) est confirmée en l'absence de corrélations fortes entre les variables socio-démographiques et le BET (tableau 2). L'approche centrée sur les personnes révèle les profils latents au Japon (figure 1). Les résultats montrent que trois profils déjà observés dans [7, 1] sont également présents dans le contexte japonais (profils 1, 6 et 7). Ils correspondent aux formes fortes de « déficit de bien-être », « bien-être élevé » et « bien-être de référence ». Un profil « faible bien-être » (4) – déjà révélé chez les collaborateurs américains [1] – est également observé chez les collaborateurs japonais. Trois profils originaux sont observés au Japon, respectivement dominés par la qualité des temps sociaux (profil 2), par la domination des relations aux collègues et au manager (profil 3) et par la présence concomitante des dimensions temporelle et de l'environnement matériel de travail (profil 5). Le BET semble conçu de la même manière en France, aux États-Unis et au Japon puisque les qualités métriques de l'EPBET sont conservées. La présence de profils de formes fortes indique que certains salariés japonais ont le même ressenti du BET qu'en France et aux États-Unis tandis que pour d'autres, l'identification de formes faibles suggère que des spécificités existent dans ce pays. Comme le montrent les études en psychologie interculturelle, le bien-être subjectif est davantage influencé par les normes et les évaluations sociales, les relations et les émotions interpersonnelles.

3 Conclusion

Dans cet article, nous montrons que le BET est conçu de la même manière au Japon, en Amérique du Nord et en France. Par contre, il existe des spécificités dans son ressenti entre les collaborateurs occidentaux et orientaux. Pour aller plus loin, l'impact de l'organisation du travail et des conditions de travail pourraient être des axes de recherche pertinents. De même, l'impact de la segmentation du marché du travail japonais [5] pourrait se révéler judicieuse. Enfin, la proposition de la dépendance des profils de BET à la culture est aussi plausible. Elle amènerait à déterminer dans laquelle mesure la variable culturelle influence de manière prépondérante l'existence de profils spécifiques par rapport à d'autres variables de contingence (par ex. l'état de prospérité économique ou la stabilité politique).

Références

- [1] F. Biétry, J. Creusier, *How to develop a full well-being profile among US employees? A person-centered approach*. *Revue de Gestion des Ressources Humaines*, Vol. 106, No. 4, pp. 3–18, 2017.
- [2] A. J. Morin, J.-S. Boudrias, H. W. Marsh, D. M. McInderny, V. Dagenais-Desmarais, I. Madore, D. Litalien, *Complementary variable-and person-centered approaches to the dimensionality of psychometric constructs : Application to psychological well-being at work*. *Journal of Business and Psychology*, vol. 32, No. 4, pp. 395–419, 2017.
- [3] C. D. Ryff, G. D. Love, Y. Miyamoto, H. R. Markus, K. B. Curhan, S. Kitayama, J. Park, N. Kawakami, C. Kan, M. Karasawa, *Culture and the promotion of well-being in East and West : Understanding varieties of attunement to the surrounding context*. In *Increasing psychological well-being in clinical and educational settings*, pp. 1–19, 2014.
- [4] T. S. Lebra, *Japanese Social Organization*. University of Hawaii Press, Hawaï, 1992.
- [5] E. Yoneyama, *Culture et gestion au Japon : Harmonie, sérénité et rigueur*. In E. Davel et al., dir. *Gestion en contexte interculturel : Approches, problématiques, pratiques et plongées*, Québec : Presses de l'Université Laval et Télé-université, 2008.
- [6] K. Kobayashi, G. Eweje, D. C. Tappin, *Employee wellbeing and human sustainability : Perspectives of managers in large Japanese corporations*. *Business Strategy and the Environment*, Vol. 27, No. 7, pp. 801–810, 2018.
- [7] F. Biétry, J. Creusier, *Le bien-être au travail : les apports d'une étude par profils*. *Relations industrielles/Industrial relations*, Vol. 70, No. 1, pp. 11–35, 2015.

MMORPG EN 3D : Quand la réalité virtuelle rejoint la vraie vie

Alan Reiter¹

alan.reiter@univ-lorraine.fr

Jean-Pierre Mouline²

Jean-pierre.mouline@univ-lorraine.fr

Hélène Yildiz³

helene.yildiz@univ-lorraine.fr

¹ IUT Nancy-Charlemagne ; Université de Lorraine
CEREFIGE, EA 3942

² IUT Nancy-Charlemagne ; Université de Lorraine
CEREFIGE, EA 3942

³ IUT de Longwy ; Université de Lorraine
CEREFIGE, EA 3942

Thèmes – *Gestion - Marketing*

Résumé – *L'objectif de la recherche est de comprendre les raisons qui favorisent l'intention d'achat d'objets virtuels (OV) des joueurs MMORPG en réalité virtuelle (3D). A partir des résultats portant sur un échantillon de 567 joueurs, il ressort deux éléments théoriques importants. Premièrement, le modèle conceptuel met en exergue les mécanismes menant à l'achat d'OV en puisant dans les fondements théoriques de l'identification projective [1] et de l'effet Proteus [2] pour démontrer l'influence forte exercée par l'avatar sur les attitudes et le comportement du joueur dans les univers en ligne multi-joueurs en 3D. Deuxièmement, les résultats de notre étude apportent une vision théorique unifiée en éclairant sur les effets combinés des trois construit sous-jacents aux deux théories précédemment citées, à savoir : l'incarnation, l'engagement communautaire et le sentiment d'appartenance. En outre, la recherche expose des implications managériales sur deux axes afin d'aider les professionnels à développer des solutions plus performantes.*

Mots-Clés – *effet Proteus, engagement communautaire, sentiment d'appartenance, identification projective.*

1 Introduction

A travers ce papier, nous mettons en exergue l'effet combiné du sentiment d'incarnation sur le sentiment d'appartenance, sur l'engagement communautaire et par effet de médiation sur l'intention d'achat d'objet virtuel (OV) de la part des joueurs dans les MMORPG en VR. Les résultats du test du modèle théorique sur un échantillon de 567 joueurs contribuent à mieux comprendre l'achat d'OV dans le monde du jeu multi-joueurs en 3D et fournit aux éditeurs de jeux des voies de développement destinées à concevoir des solutions de jeux plus immersives et hautement communautaires visant à inciter le joueur à acheter des OV afin de continuer à personnaliser son avatar. Dans un premier temps le cadre théorique sera évoqué ainsi que les hypothèses de recherche qui en découlent. Puis, il sera présenté la méthodologie de l'étude, la présentation des résultats obtenus et les contributions de l'étude.

Revue de la littérature et cadre conceptuel

Composante de l'incarnation, l'agentivité correspond au fait que l'individu a la sensation d'être l'auteur de l'action. L'agentivité regroupe les aspects d'intention, de sélection motrice, d'action, et de contrôle final du mouvement [3]. Dans leurs travaux portant sur l'agentivité, [4] ont notamment montré qu'un fort sentiment d'agence augmente l'esprit d'équipe, les échanges et la créativité au sein d'un groupe d'individu. Aussi, plus le sentiment d'agence est élevé, plus l'individu aura le sentiment d'être pleinement présent dans le jeu virtuel et *in fine* d'être acteur dans sa communauté. Dès lors, nous formulons l'hypothèse suivante :

H1(a) : L'agentivité influence positivement l'engagement communautaire du joueur.

En outre, les travaux de [5] ont montré qu'une forte identification de l'individu à son avatar augmente le sentiment de confiance à l'égard du groupe et par extension le sentiment d'appartenance. Le renforcement de cette identification est rendu possible, grâce au mécanisme d'agentivité. Ainsi nous posons l'hypothèse suivante :

H1(b) : L'agentivité influence positivement le sentiment d'appartenance du joueur à sa communauté.

Seconde composante du sentiment d'incarnation, [3] définissent la propriété comme l'attribution d'un soi virtuel à son propre corps. En réalité, pour que l'incarnation soit totale, il faut nécessairement que l'individu ressente qu'il est le sujet principal du personnage virtuel. Dans les MMORPG, l'avatar qui représente un utilisateur est défini comme un personnage virtuel dirigé par le comportement humain. Par extension, un sentiment fort de propriété à l'égard de l'avatar engendre inéluctablement le sentiment d'être pleinement présent dans la communauté en tant qu'individualité virtuelle saillante pouvant exercer une influence spécifique au sein du groupe, satisfaire des besoins

individuels et partager des intérêts communs [6]. Ainsi, nous émettons l'hypothèse ci-dessous :

H2(a) : La propriété influence positivement l'engagement communautaire du joueur.

Selon [7], plus l'individu a le sentiment de posséder l'avatar, plus son attachement à celui-ci est élevé et plus sa projection identitaire virtuelle au sein du groupe de joueurs est grande. Ainsi, grâce à son avatar, le joueur occupe une place de choix dans sa communauté virtuelle, accentuant un processus d'identification positive fort à l'égard de celle-ci [8] et impliquant inéluctablement une modification de ses attitudes et de son comportement réel au profit des attentes du groupe [9]. Dans cette optique, nous soumettons l'hypothèse suivante :

H2(b) : La propriété influence positivement le sentiment d'appartenance du joueur à sa communauté

Directement lié à l'effet Proteus, les rôles (statut et compétences du joueur dans le clan) possiblement joués par l'individu à travers l'apparence et le reflet identitaire de son avatar au sein du groupe, l'encouragent à s'inscrire dans une démarche d'acquisition d'OV afin d'explorer et d'affirmer davantage son soi virtuel (Roland et Parmentier [10]). Dans le même prolongement, les travaux de [11] révèlent que l'influence de la communauté liée à l'esprit de compétition et à la place occupée par le joueur auprès son groupe le positionne dans un état de persévération l'incitant à acheter continuellement des OV pour maintenir son niveau dans le jeu. De plus, sachant qu'une identification forte à la communauté engendre une attitude favorable à l'exploitation des univers virtuels et par extension des achats d'OV [5], nous pouvons avancer l'hypothèse suivante :

H3(a) : L'engagement communautaire influence positivement les intentions d'achat du joueur pour aider sa communauté de jeu.

Tout comme l'engagement communautaire, le sentiment d'appartenance est également intimement lié à l'effet Proteus et plus particulièrement au mécanisme de désindividuation qu'il engendre. En effet, l'anonymat offert par l'avatar, rend l'individu plus susceptible d'acheter des OV pour affirmer une personnalité « avatarisée » et normée aux attentes de la communauté. [12] ont montré que l'enjeu d'acceptation par la communauté et la réponse aux exigences des membres sont deux leviers importants dans l'intention d'achat dans les mondes virtuels. D'où l'hypothèse suivante :

H3(b) : Le sentiment d'appartenance influence positivement les intentions d'achat du joueur pour aider sa communauté de jeu.

Méthodologie et résultats

Le modèle conceptuel et les hypothèses qui en découlent ont été testés auprès des joueurs du jeu MMORPG VR Zenith : « The Last City ». Nous avons recueilli 751 réponses, dont 567 validées. Les concepts et construits d'agentivité, de possession par rapport au jeu, le sentiment d'appartenance au groupe, l'engagement vis-

à-vis du groupe de joueurs et l'intention d'achat de biens virtuels pour contribuer davantage à la performance du jeu dans le groupe ont été mesurés à l'aide des échelles de mesures issues de la littérature par le biais d'une échelle de Likert à 7 points. L'estimation du modèle s'est effectuée grâce aux équations structurelles. L'analyse des données a été réalisée en utilisant les logiciels SPSS v28 et AMOS v26.

Les résultats induits de l'analyse en composante principale (ACP) et de l'utilisation des équations structurelles montrent que les variables d'agentivité et de possessions impactent positivement et significativement le sentiment d'appartenance et d'engagement communautaire. Ainsi, les hypothèses H1(a), H1(b), H2(a) et H2(b) de notre modèle conceptuel sont validées (H1(a) : $\beta = 0,210$, et $p < 0,001$; H1(b) : $\beta = 0,273$ et $p < 0,005$; H2(a) : $\beta = 0,238$ et $p < 0,001$; H2 (b) : $\beta = 0,273$, et $p < 0,001$). De plus, force est de constater que l'agentivité génère un impact plus significatif sur le sentiment d'appartenance et d'engagement communautaire que la possession. Par ailleurs, les intentions d'achats sont positivement impactées par l'engagement communautaire et le sentiment d'appartenance. Ce qui nous permet de valider les hypothèses H3(a) et H3(b) (H3(a) : $\beta = 0,244$ et $p < 0,001$; H3(b) : $\beta = 0,121$ et $p < 0,005$). Enfin, nos résultats permettent de mettre en exergue l'effet médiateur de l'engagement communautaire et du sentiment d'appartenance entre les variables indépendantes d'agentivité et de possession et la variable dépendante d'intention d'achat de OV. En outre, l'effet médiateur est plus important au niveau de l'engagement communautaire qu'au niveau du sentiment d'appartenance.

Discussions, contributions et implications managériales.

Cette étude confirme l'impact combiné des trois construits (incarnation, engagement communautaire et d'appartenance) sur les intentions d'achats du joueur évoluant dans un MMORPG en réalité virtuelle. De surcroît, notre étude met en lumière le rôle important joué par l'avatar dans les intentions d'achat d'OV pour le joueur s'inscrivant dans une dynamique de construction identitaire virtuelle corrélée aux attentes de sa communauté. Ce constat de recherche rentre dans le sillon de l'effet Proteus de [2] et le complète.

Au niveau des contributions théoriques, notre modèle éclaire un mécanisme multifactoriel encore peu analysé dans les recherches académiques portant sur cette nouvelle thématique. De plus, notre étude est selon nous la seule à mettre en exergue l'impact de l'effet Proteus sur le comportement d'achat du joueur dans un MMORPG en 3D. Aussi, le modèle met en relief une nouvelle convergence possible de plusieurs fondements théoriques relatifs au comportement d'achat du joueur, à savoir : la complémentarité de la théorie de l'effet Proteus [2], de la théorie du sentiment communautaire virtuel [13] et du

concept d'incarnation [3].

Concernant les implications managériales, les résultats laissent entrevoir deux principaux axes opérationnels. Premier axe à coloration instrumentale, avec la nécessité pour les professionnels de concevoir et d'améliorer leurs solutions de jeu en proposant des technologies plus dynamiques et immersives afin d'accroître le sentiment d'incarnation et de présence de l'individu dans le jeu, accentuant ainsi son rôle d'acteur privilégié auprès des membres de sa communauté virtuelle. Deuxième axe à coloration psychosociologique, en orientant les éditeurs vers l'intérêt de soutenir des liens forts entre les joueurs pour consolider la solidarité et la coopération entre eux grâce à la création d'interfaces communautaires plus engageante au travers de challenges en équipes, de compétitions entre les guildes et de systèmes chat audio actif.

Références :

- [1] Klein M. (1946) Notes on some schizoid mechanisms. *The International journal of Psychoanalysis* 27 : 99-110.
- [2] Yee N et Bailenson J (2007) The Proteus Effect: The Effect of Transformed Self-Representation on Behavior, *Human Communication Research* 33(3) : 271-290.
- [3] Kiltani K, Groten R et Slater M (2012) The sense of embodiment in virtual reality. *Presence: Téléopérateurs & Environnements Virtuels* 21 : 373-387.
- [4] Ayed H et Dorta T (2021) « L'agentivité des systèmes immersifs de réalité virtuelle en situation de codesign : étude comparative entre le Hyve-3D et un environnement traditionnel ». *Sciences du Design* 13(1) : 27-41.
- [5] Kim C, Lee SG et Kang M (2012) I became an attractive person in the virtual world: Users' identification with virtual communities and avatars. *Computers in Human Behavior* 28(5) : 1663-1669.
- [6] Wu JJ, Chen YH et Chung YS (2010) « Trust factors influencing virtual community members: A study of transaction communities ». *Journal of Business Research* 63(9-10) : 1025-1032.
- [7] Watkins R et Molesworth M (2012) "Attachment to Digital Virtual Possessions in Videogames". *Research in Consumer Behavior* 14 : 153-170.
- [8] Guegan J, Buisine S et Collange J (2017) « Effet Proteus et amorçage : ces avatars qui nous influencent », *Bulletin de psychologie* 547(1) : 3-16.
- [9] Yee N, Bailenson JN et Ducheneaut N (2009) The Proteus Effect Implications of Transformed Digital Self-Representation on Online and Offline Behavior. *Research in communication* 36 (2) : 285-312
- [10] Rolland S et Parmentier G (2009) Les consommateurs des mondes virtuels : construction identitaire et expérience de consommation dans Second Life. *Recherche et Applications en Marketing* 24(3) : 43-56
- [11] Belaud L, Heitz-Spahn S, Yildiz H (2017) Le joueur social et connecté : une perspective d'analyse par la théorie de l'engagement comportemental. *Decisions Marketing, Association Française du Marketing* 84 : 77-94.
- [12] Hassouneh D et Brengman M (2014) A motivation-based typology of social virtual world users *Computers in Human Behavior* 33 : 330-338.
- [13] Blanchard AL et Markus ML (2004) Le « sens » vécu d'une communauté virtuelle : caractéristiques et processus. *Base de données SIGMIS* 35(1) : 64-79.

Simulation des effets systémiques d'une mesure climatique inédite sur l'aire urbaine de Bordeaux : le Retrait des Logements Énergivores du marché locatif (RLE)

Seghir Zerguini^{1,2}
seghir.zerguini@u-bordeaux.fr

Simon Gorecki^{1,3}
simon.gorecki@u-bordeaux.fr

Nathalie Gaussier²
nathalie.gaussier@u-bordeaux.fr

¹ IUT de Bordeaux, Université de Bordeaux

² Bordeaux Sciences Économiques BSE - Université de Bordeaux, UMR 6060

³ Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système IMS - Université de Bordeaux, UMR 5218

Thèmes – *Champs thématiques de votre contribution : Économie - Énergie - Environnement - Informatique - SHS.*

Résumé – *Cet article explore les effets intrinsèques et systémiques d'une mesure « phare » décidée par le gouvernement dans le cadre de l'action climatique de la France vers l'objectif de neutralité carbone en 2050 : le Retrait du marché locatif des Logements Énergivores (RLE). Les effets sont analysés sur l'aire urbaine de Bordeaux à partir de la plateforme de simulation SIMUTEC dédiée à la simulation des politiques des collectivités territoriales en matière d'urbanisme, de transport et de logement. SIMUTEC s'appuie sur un modèle de type LUTI (Land Use Transport Interaction) pour rendre compte des choix de localisation des ménages et des emplois, et d'un module de calcul des impacts sur l'environnement. La mesure RLE est simulée à l'aide de différents scénarios plus ou moins optimistes selon le taux de rénovation des logements, pour montrer l'importance et la nature de ses effets. Nous montrons l'existence d'effets de seuil du point de vue du bilan énergétique global de la mesure, associés à une hausse de la mobilité, et d'un effet de valorisation des biens rénovés conduisant plus globalement à la hausse des prix de l'immobilier sur le marché locatif.*

Mots-Clés – *Simulation multi-agents, Action climatique, Rénovation thermique, Logements énergivores.*

Le projet SIMUTEC a bénéficié de soutiens financiers de la Région Nouvelle Aquitaine, de l'ADEME et de l'IUT de Bordeaux

1 Introduction

L'année 2023 marque la mise en œuvre dans les métropoles françaises d'une mesure phare dont l'objectif est la neutralité carbone de la France à l'horizon 2050 : le Retrait des Logements Energivores du marché locatif (RLE). On attend de cette mesure qu'elle réduise l'impact environnemental des logements les plus énergivores, considérés comme des « passoires thermiques ». En même temps, cette mesure pourrait entraîner d'importants effets systémiques, notamment en matière de mobilité, et réduire l'impact attendu sur l'environnement. Ce papier rend compte de ces effets à l'aide de la plateforme de simulation SIMUTECH appliquée sur l'aire urbaine de Bordeaux. La plateforme (<https://simutech-climate.com>), présentée lors du précédent CNRIUT2022, n'est pas exposée ici. Le papier se structure ainsi : nous détaillons le cadre d'analyse du décret RLE, puis nous posons les hypothèses de recherche, les scénarios et les principaux résultats. Les simulations soulignent l'existence d'effets de seuil en matière de bilan environnemental global, une hausse de la mobilité et un effet de valorisation du prix de l'immobilier sur le marché locatif.

2 Cadre d'analyse : le décret visant le Retrait du marché locatif des Logements Energivores

Depuis le 1^{er} janvier 2023, les logements les plus énergivores, seront interdits à la location sans rénovation préalable. Le décret n°2021-19 du 11 janvier 2021 issu de la loi relative à l'énergie et au climat de 2019, définit en effet un nouveau critère de décence d'un logement (loi du 6 juillet 1989) en fonction de sa classe énergétique.

Si l'on comprend bien les enjeux en termes de réduction de la facture énergétique des locataires, mais aussi et surtout du point de vue du bilan carbone direct de la mesure, les effets indirects et plus globaux demandent d'être discutés. En effet, le RLE pourrait se traduire par une diminution de l'offre de logements et, par effet mécanique, par une augmentation du prix de l'immobilier dans les zones à forte pression immobilière notamment dans les centres urbains. Le prix élevé de l'immobilier pourrait pousser les ménages à faible revenus à se relocaliser en périphérie des villes, au prix d'une augmentation de leur mobilité pour accéder au centre et aux emplois, voire à les enfermer hors des villes. Les ménages modestes pourraient alors remettre en cause le bilan environnemental global attendu.

3 Hypothèses

La mesure RLE vise l'interdiction progressive de mise en location des logements selon de leur Diagnostic de

Performance Énergétique (DPE) et le calendrier suivant : depuis le 01/01/2023, les logements de classe énergétique G sont interdits à la location ; au 01/01/2028, les logements de classe F seront concernés ; puis au 01/01/2034, les logements de classe E.

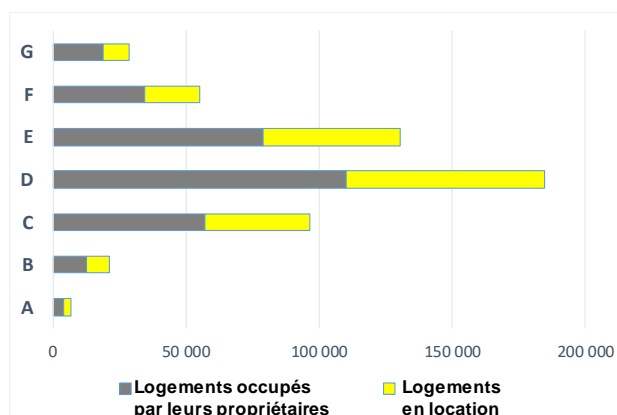
Le tableau 1 présente les consommations et émissions unitaires selon l'étiquette énergétique du logement.

Classe	Energie consommée (kWh/m ² .an)	Gaz à effet de serre émis (kg eqCO ₂ /m ² .an)
A	25	2,5
B	70	8
C	120	15,5
D	190	28
E	280	45,5
F	390	68
G	500	100

Tableau 1 : Consommation et émission selon la classe énergétique des logements

Nous considérons que la mesure RLE sera mise en place dans son intégralité en 2035, date à laquelle tous les logements de classe E, F et G seront exclus du marché locatif s'ils ne sont pas rénovés en classe D au minimum.

Le graphique 1, construit à partir des données de l'Observatoire National de la Rénovation Énergétique et de l'INSEE, montre bien l'importance du parc immobilier résidentiel de l'agglomération bordelaise, classé E, F et G : il représente près de 41% de l'ensemble des 523 385 logements (résidences principales) de l'agglomération.



Graphique 1 : Nombre de logements de l'agglomération de Bordeaux selon leur classe énergétique et le statut d'occupation

N'ayant pas à disposition de données sur le statut locatif des logements selon leur classe énergétique, nous l'avons approximé à partir de la structure d'occupation du parc résidentiel en France, dont on sait que 58% sont des logements du parc privé occupés par leurs propriétaires, 25% sont des logements du parc privé en location et 17% sont des logements sociaux. Nous en déduisons que la mesure RLE devrait concerner **12,5 % du parc privé** et **35,1 % du parc social**.

4 Scénarios testés avec SIMUTEC

Nous simulons la mesure RLE sur l'aire urbaine de Bordeaux à partir de scénarios intégrant le taux de rénovation de 0 à 100% en classe D, des logements en location dont la classe énergétique est E, F ou G. Pour l'ensemble des scénarios, les logements non rénovés du parc locatif, sont retirés du marché immobilier.

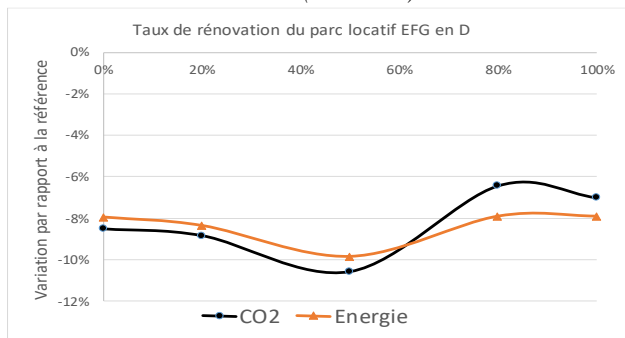
Nous avons ainsi simulé 5 scénarios : du plus pessimiste (aucun logement du parc locatif classé E, F ou G n'est rénové en classe D), au plus optimiste (100% du parc locatif classé E, F et G est rénové en classe D).

5 Principaux résultats

Le tableau 2 présente les résultats des simulations, du scénario le plus pessimiste S1 au plus optimiste S5, en matière d'énergie consommée sur l'agglomération de Bordeaux dans les secteurs du logement et de la mobilité. Ces scénarios doivent être mis en perspective par rapport à la situation de référence en 2035 selon laquelle la mesure RLE n'est pas mise en place. La variation de l'énergie consommée et des émissions de CO2 par rapport à la situation de référence tous secteurs confondus (logement et mobilité) sont présentés dans le graphique 2.

	Logement	Mobilité	Logement & Mobilité
SR2035 (Situation de référence en 2035)	4 948	2 852	7 800
S1 (0%EFG du parc locatif rénové en D)	4 251	2 932	7 180
S2 (20%EFG du parc locatif rénové en D)	4 173	3 011	7 148
S3 (50%EFG du parc locatif rénové en D)	4 378	2 653	7 031
S4 (80%EFG du parc locatif rénové en D)	4 369	2 779	7 184
S5 (100%EFG du parc locatif rénové en D)	4 424	2 756	7 183

Tableau 2 : Energie consommée sur l'agglomération bordelaise (GWh/an)

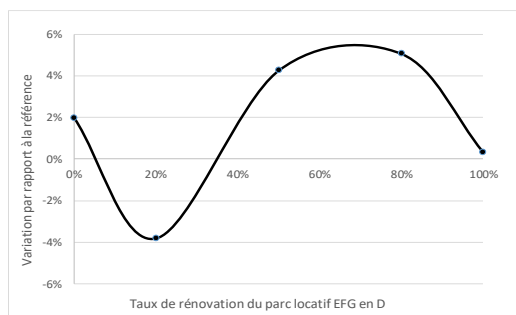


Graphique 2 : Variation de l'énergie consommée et du CO2 émis pour les secteurs logement et mobilité selon le taux de rénovation du parc locatif

Le gain de la mesure RLE semble varier selon le taux de rénovation par rapport à la situation de référence : Si aucun logement n'est rénové, le gain est de l'ordre de 8%, au fur-et-à-mesure que le taux de rénovation croît, le gain augmente jusqu'à atteindre 9,9% pour l'énergie et 10,6% pour le CO2 pour un taux de rénovation de 50%. À partir de 50%, l'effet diminue jusqu'à atteindre, pour 100% de rénovation, quasiment le même gain sans rénovation.

L'explication de la première partie de la courbe est évidente : plus on rénove, plus on réduit la consommation et les émissions. En revanche, la seconde partie de la courbe est moins évidente. Elle peut s'expliquer par un effet de seuil : à partir de 50% de rénovation, la taille du parc de logements augmente plus fortement, faisant évoluer sa structure jusqu'à ce que l'ensemble des logements G, F et E passe en classe D, la classe modale du scénario de référence qui devient la plus énergivore.

Les gains marginaux se retrouvent donc mécaniquement plus faibles et sensibles à des effets de seuil : ainsi, **il suffirait de rénover 50% du parc locatif classé E, F ou G pour obtenir des résultats significatifs du point de vue du bilan énergétique global.** Cette lecture éclaire le graphique 3 : la rénovation du marché locatif, entraînant un changement de structure énergétique de l'offre locative, affecterait aussi le prix de l'immobilier. Sans rénovation, le retrait des logements trop énergivores conduit à une pression de 2% sur le prix de l'immobilier locatif par rapport au scénario de référence. L'impact positif le plus fort sur les prix se situe de 50% à 80% de rénovation du parc EFG en D illustrant la valorisation du marché locatif. Lorsque 100% du parc locatif est rénové en D, la structure énergétique du marché immobilier reste proche de celle du scénario de référence, affectant peu les prix.



Graphique 3 : Variation du prix de l'immobilier selon le taux de rénovation du parc locatif

En somme, la rénovation de 50% du parc locatif classé E, F, G en D conduit à (1) une valorisation du prix de l'immobilier, (2) réduit l'impact environnemental global et (3) entraîne une hausse de la mobilité, qui pourrait se traduire par des stratégies de relocalisation des ménages.

Références

- S. Gorecki, S. Zerguini, N. Gaussier, et M. K. Traore, «Development of a Transport Model Dedicated to an Agent-Based Simulation of Land Use », in *Agents and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications 2022*, Rhodes, Greece, 2022, p. 301-311.
- S. Zerguini et N. Gaussier « MUST-B : Un modèle LUTI multidisciplinaire au service de la complexité du phénomène urbain ». *Canadian Journal of Regional Science*, No. 2, Vol. 43, pp. 50-59, 2020.

Contribution à la modélisation de la Supply Chain pour le pilotage, l'évaluation de la performance et l'intégration des technologies de l'industrie 4.0 : Application au cas automobile de PSA Maroc

Yousra El kihel¹

yousa.el-kihel@u-bordeaux

Anne Zouggar-Amrani³

anne.zouggar@u-bordeaux.fr

Yves Ducq²

yves.ducq@u-bordeaux.fr

¹ IUT de Bordeaux, Université de Bordeaux

Département Management de la Logistique et des Transports (MLT), 33072 Bordeaux, France
Laboratoire de l'intégration du Matériau au Système, UMR 5218 CNRS, 33405 Talence, France

² IUT de Bordeaux, Université de Bordeaux

Département Hygiène Sécurité Environnement (HSE), 33170 Gradignan, France
Laboratoire de l'intégration du Matériau au Système, UMR 5218 CNRS, 33405 Talence, France

³ Collège Sciences et Technologies, Université de Bordeaux

Laboratoire de l'intégration du Matériau au Système, UMR 5218 CNRS, 33405 Talence, France

Thèmes – Génie Industriel – Logistique.

Résumé – *Le terme Supply Chain (SC) vient de l'anglais qui signifie littéralement « chaîne d'approvisionnement ». La SC est un réseau de partenaires dans lequel circule un ensemble des flux et s'opère plusieurs processus et activités, depuis l'approvisionnement, la fabrication jusqu'à sa livraison au client final. La modélisation et la mesure de la performance des supply chains ont été largement abordées par les chercheurs et les entreprises. Aucun des modèles développés n'est spécifiquement orienté pour le pilotage de la conception et de l'exploitation de la SC. Cet article présente une nouvelle méthodologie de recherche utilisant un modèle de référence appelé GRAILOG pour saisir les décisions et les KPI associés pour contrôler la SC. Ensuite, la méthodologie PPTech IP est décrite et appliquée pour accompagner l'entreprise sur la transformation digitale pertinente pour améliorer ses performances. Cette méthode a été appliquée à PSA qui entre dans l'ère de l'industrie 4.0. Les résultats obtenus fournissent plusieurs informations intéressantes sur les indicateurs de contrôle de PSA.*

Mots-Clés – Modélisation, Supply Chain, Industrie 4.0, Indicateur de performance

1 Introduction

Compte tenu de la complexité de la SC actuelle, il est nécessaire de modéliser la SC de la manière la plus complète et structurante possible afin de la concevoir, et de l'exploiter de la manière la plus cohérente possible. La modélisation de la SC doit permettre entre autres le meilleur contrôle de la SC afin d'améliorer les performances. L'objectif de ce papier est de montrer un travail de recherche qui a permis de développer des modèles de référence de pilotage pour la conception, l'exploitation, la mesure de performance et l'implantation des technologies de l'industrie 4.0 pour les SC. Le document est structuré comme suit, la première partie présente l'état de l'art sur la modélisation et le suivi de la SC, puis une méthodologie pour mesurer le Potentiel de Progrès (PP) lors de la conduite de la transformation 4.0 est construite sur la base des modèles de référence de pilotage. Ainsi, finalement, la mise en œuvre du modèle PPTechIP est fournie dans l'industrie automobile avec une application dans PSA - site marocain.

2 Revue littérature

Dans cette section, nous présentons la nécessité de modèle pour faciliter l'évaluation des performances et nous concentrons cette partie sur les modèles existant pour cette évaluation.

2.1 Modeles d'évaluations de performance de la SC

Les modèles d'évaluation de la performance sont considérés comme des outils de gestion qui permettent d'évaluer l'existant d'un système afin d'orienter les changements stratégiques futurs.

D'après la revue de la littérature [1 ; 2 ; 3], de nombreuses méthodes ont déjà été développées sur la base de modèles pour mesurer la performance des grandes entreprises industrielles. Parmi les modèles les plus connus en logistique (Tableau 1), on peut citer : Le modèle SCOR , le modèle ECOGRAI , le modèle EVALOG , le guide logistique ASLOG et le VRM. De cette étude il en ressort que tous ces modèles proposent un modèle de processus et des indicateurs, mais à l'exception de GRAI, aucun d'entre eux ne présente un modèle de référence décisionnel. Plus précisément ECOGRAI a été le modèle qui était le plus susceptible de répondre aux problématiques de pilotage, conception et évaluation de la SC automobile internationale.

3 Méthodologie

Dans ce travail, La méthodologie propose de construire un modèle d'aide à la décision de SC pour aider les

entreprises à surmonter leurs faiblesses en matière de technologies de l'industrie 4.0. Cette approche est basée sur une analyse de la contribution des technologies aux différentes décisions, fonctions et Key Performance Indicators (KPIs).

Tableau 1– Comparaison des modèles d'évaluations de la SC

Critères de comparaison		SCOR	AFNOR	SCM	ASLOG	BSC	EVALOG	GRAI	VRM
Secteur	Industrie						×		
	PME			×					
	Tous les secteurs	×	×		×	×		×	×
	Distribution					×			×
Modélisation	Processus	×			×				×
	Décisionnel								
	Indicateurs	×			×				×
Niveau décisionnel	Niveau stratégique		×	×		×			
	Niveau tactique	×	×	×	×		×	×	×
	Niveau opérationnel	×			×		×	×	×
Flux d'analyse	Flux physique	×	×						
	Flux information	×	×	×	×	×	×	×	×
	Flux financier	×	×		×	×	×		×
Benchmarking	Interne	×	×	×	×	×	×		×
	Externe	×					×		
Indicateurs de référence	×	×		×	×				

SCOR: Supply Chain Operations Reference
 SCM: Supply Chain Master
 VRM: Value Chain Group
 BSC: Balanced Scorecards
 AFNOR: L'association Française de NORMALISATION
 EVALOG: EVALOG GLOBAL
 GRAI: Graphs with Results and Actions Inter-related
 ASLOG: Association Française de la Supply Chain et de la logistique

La figure 1 présente la méthodologie PPTechIP qui signifie « Potentiel de Progrès des Technologies 4.0 afin de smartiser les Indicateurs de Performance ». La partie suivante présente la méthodologie en détaillant chaque étape.

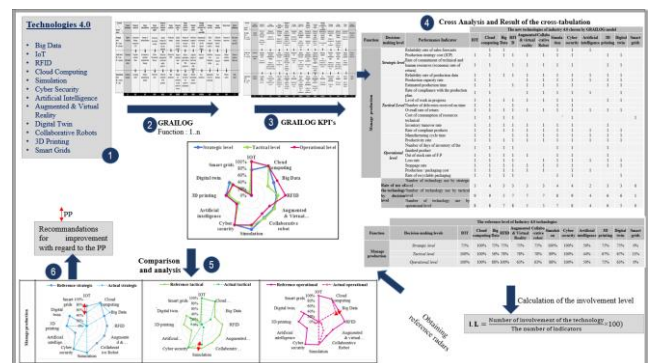


Figure 1 – Méthodologie du PPTechIP : Étapes et résultats attendus

Étape 1 – Établir l'ensemble des technologies d'industrie 4.0 : La première étape consiste à établir l'ensemble des technologies I4.0 jugées les plus pertinentes dans l'industrie [4]. Les technologies sélectionnées sont les suivantes : big data/Intelligence Artificielle, RFID, jumeau numérique, cloud computing, réalité augmentée et virtuelle, cybersécurité, Internet des objets, réseaux intelligents, robots collaboratifs, fabrication additive, apprentissage automatique, simulation.

Étape 2 – GRAILOG : modèle décisionnel de SC : Pour le pilotage et le suivi des activités de la SC, nous

avons proposé pour tout type d'entreprise un modèle de référence appelé GRAILOG construit sur la base de la méthode GRAI.

Étape 3 – Identification des KPIs : Grille KPI GRAILOG : La troisième étape consiste à construire une grille de KPI qui a été définie sur la base de la grille GRAILOG. Les KPI ont été définis en utilisant ECOGRAI et sont ainsi liés aux décisions et aux objectifs. Les indicateurs sont aussi sélectionnés sur une recherche approfondie des trois modèles de mesure de la performance (SCOR, ASLOG, BSC).

Étape 4 – L'étude de croisement : technologies et

Indicateurs : L'objectif de cette étape est de proposer une analyse de contribution de chaque technologie 4.0 à la fiabilisation de l'indicateur KPI considéré sous l'hypothèse suivante : « *Certaines technologies 4.0 sont plus adaptées à la construction, la fiabilisation et la smartisation de certains KPI plutôt que d'autres* »

Étape 5 – Comparaison et analyse : Dans cette étape on identifie un niveau de référence de l'usage de technologie 4.0 par une représentation radars.

Étape 6 – Analyse de la marge de progression par le calcul du PP : la dernière étape consiste en un comparatif entre l'état de référence et le niveau d'intégration actuel de l'entreprise qui sera mené pour déduire le « potentiel de progrès » que l'entreprise pourra espérer. Un algorithme a été construit qui permet l'automatisation de la méthodologie PPTech IP et une analyse plus approfondie. Nous présentons par la suite l'application de notre modèle au sein d'un constructeur automobile.

4 Application

La méthodologie PPTech IP a été appliquée au sein du constructeur automobile français PSA (maintenant appelé Stellantis) site Kenitra Maroc construit en 2015, qui emploie environ 600 personnes et qui assemble 200000 véhicules par ans dont la 208. La validation du modèle est réalisée et suivi par une équipe d'ingénieurs. Les entretiens, échanges et validations ont eu lieu en étroite collaboration avec le Responsable production et le responsable logistique.

La collaboration avec PSA a duré 4 mois. Le déploiement s'est effectué sous forme d'interviews qui ont eu lieu à distance (dans le contexte sanitaire Covid19).

4.1 Résultats et discussions

L'étude de cas menée chez PSA a révélé plusieurs retours positifs relatifs à PPTech IP :

- La possibilité de modéliser le juste nécessaire (traiter le volet pilotage de la SC qui intéressait PSA) : GRAILOG-Exp
- La possibilité de traiter les priorités pour PSA :

choix des fonctions pivots

- La possibilité de concevoir des KPI en accord avec les besoins et l'aisance avec laquelle, le manager peut sélectionner les KPI adéquats.
- La possibilité de disposer d'outils simples, pertinents et visuels grâce à la représentation en radars pointillés, et plein.
- La possibilité de disposer d'un TDB de pilotage de PP rendu possible avec le tableau d'alerte.
- La possibilité d'identifier les marges de progrès (PP) pour faire évoluer les investissements en technologies de l'industrie 4.0 et réaliser une transition numérique.

5 Conclusions

Dans ce travail de recherche, une méthodologie a été mise au point, en commençant par la modélisation des décisions de SC, déduisant les fonctions prioritaires et construisant les KPI requis pour le suivi et la surveillance. Un modèle de référence pour la SC nécessite : la structuration, l'exhaustivité, la couverture, la reproductibilité et la duplicabilité. Ensuite, ce travail présente la méthodologie PPTech IP et propose un algorithme pour soutenir la sélection des technologies de l'industrie 4.0 en relation avec la fiabilité des KPI. PSA Kenitra, connu pour sa SC complexe, son contexte international et pour ses ambitions de progrès et de développement, a été choisi pour vérifier et valider PPTech IP et représentait un champ d'application favorable et intéressant. Ce modèle a été apprécié par le Groupe PSA pour sa capacité structurante, son approche modulaire et son aptitude de duplication par des KPI clés.

6 Remerciements

Nous remercions chaleureusement l'équipe de PSA Kenitra qui a permis le déploiement et la validation du modèle PPTech IP et de la grille GRAILOG.

Références

- [1] DUCQ, Yves. *Evaluation de la performance d'entreprise par les modèles*. 2007. Habilitation à diriger des recherches. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- [2] FENDER, Michel et PIMOR, Yves. *Logistique & supply chain*. Dunod, 2016.
- [3] MAJUMDER, Debasish, BHATTACHARJEE, Rupak, et DAM, Mrinmoy. *Modèle de mesure de la performance de la chaîne d'approvisionnement floue basé sur SCOR 12.0*. Dans : *L'informatique intelligente en ingénierie*. Springer, Singapour, 2020. p. 1129 à 1139.
- [4] EL KIHHEL, Yousra. *Contribution à la Modélisation de la Supply Chain pour le Pilotage, l'Evaluation de la Performance et l'Intégration des Technologies de l'Industrie 4.0: Application au cas Automobile de PSA Maroc*. 2021. Thèse de doctorat. Bordeaux.

La perception des femmes sur les motivations de choix de carrières en logistique et supply chain

Blandine Ageron ¹

Blandine.ageron@univ-grenoble-alpes.fr

Dorsaf ZOUARI ²

dorsaf.zouari@univ-grenoble-alpes.fr

^{1,2} IUT, de Valence Université Grenoble Alpes
CERAG, EA 7521

Thèmes –: *Sciences de Gestion* –

Résumé

Notre article a pour objectif de comprendre les motivations des femmes pour continuer ou commencer une carrière dans les métiers de la logistique et de la Supply Chain (SC). Une étude qualitative exploratoire a été menée. Neuf femmes aux profils riches par leur diversité et prêtes à répondre à nos questions ont été sélectionnées pour effectuer cette étude. Les résultats ont montré que les motivations pour faire une carrière dans les métiers de la logistique et de la SC concernent non seulement les femmes qui veulent commencer leurs carrières dans ces domaines mais aussi celles qui occupent actuellement des postes dans ces domaines et souhaitent continuer à évoluer. Nos résultats ont permis de ressortir et expliquer les différentes motivations pour chacune des catégories. Ces motivations peuvent être liées à l'environnement (entreprise, secteur) ou à l'individu (valeurs, compétences). Le mentorat et l'image de ces métiers sont deux principaux résultats qui motivent respectivement les femmes de continuer ou de commencer leurs carrières dans les métiers de la logistique et de la supply chain.

Mots-Clés – *Supply chain management, logistique, carrières des femmes, motivations de carrière.*

1 Introduction

Notre étude vient d'un constat sur le manque de la représentativité des femmes dans les métiers de la logistique et de SC alors qu'il existe des opportunités dans ces domaines.

Il est donc important d'étudier les motivations des femmes pour mieux comprendre comment attirer et retenir les talents féminins pour faire leurs carrières dans les métiers de la logistique et de SC. En effet, ceci peut favoriser la diversité et l'inclusion au sein des entreprises. Nos résultats ont montré que les femmes étaient motivées par plusieurs facteurs dont l'environnement de travail, le dynamisme qui caractérise ces métiers et qui offrent des opportunités de carrière variées et stimulantes. Le mentorat et l'image de ces métiers sont deux principaux résultats qui motivent respectivement les femmes de continuer ou de commencer leurs carrières dans les métiers de la logistique et de la supply chain.

2 Revue de la littérature

Malgré des décennies de lutte pour l'égalité des genres, de grandes différences subsistent entre les hommes et les femmes sur le marché du travail et notamment dans les métiers de la logistique et supply chain. Bien qu'il existe une importante ségrégation horizontale, les femmes étant plus susceptibles d'occuper des emplois de bureau ou de soutien et les hommes sont plus visibles dans le secteur industriel (Weeden, 2004). La ségrégation verticale au sein d'un secteur est particulièrement frappante et qui a été soulignée particulièrement quand il s'agit des métiers de la logistique et supply chain (Zinn et al., 2018).

En effet, les métiers de la logistique et supply chain sont souvent décrits par des stéréotypes comme impliquant de lourdes charges dans des installations sombres et dangereuses. De plus, ces métiers sont considérés par beaucoup comme dominés par les hommes et peu attrayant - voire hostile - pour les femmes. Ils ont également été caractérisés comme étant des métiers particulièrement difficiles pour les femmes d'accéder à des rôles de direction (Zinn et al., 2018).

Plusieurs études sur la place des femmes dans les métiers de la logistique et supply chain ont été réalisées par des cabinets de conseils (McKinsey & Company, Gartner, Deloitte). Selon une enquête récente menée par Gartner en 2021 sur la place des femmes dans les métiers de la supply chain, « Les femmes représentent en moyenne 41 % de la main-d'œuvre dans la gestion des SC dans notre enquête de 2021, un point culminant depuis le lancement de cette étude en 2016. Ce rapport indique en outre : « Au total, 73 % des entreprises qui ont répondu, la proportion la plus élevée jamais enregistrée, ont un

objectif de diversité, d'équité et d'inclusion (DEI) lié à l'attraction, au développement, à la rétention et à l'avancement des femmes » Là où le besoin d'amélioration est plus clair et qui rejoint les propos de (Zinn et al., 2018), c'est au niveau de la place des femmes en tant que cadres dirigeants dans la gestion des SC. Selon Gartner, "il est important de savoir que malgré les améliorations de la représentation par rapport à 2020, une tendance persiste depuis le lancement de cette enquête en 2016 : à mesure que l'échelle de l'entreprise progresse, la proportion de femmes dirigeantes diminue. Les femmes ne représentent que 23 % des postes de vice-président dans l'organisation moyenne de la chaîne d'approvisionnement, et en dehors des chaînes d'approvisionnement du secteur de la consommation, ce nombre continue de baisser à mesure que nous examinons des segments spécifiques de l'industrie. »

Il est donc important de comprendre, selon les femmes, quelles sont les motivations de choix de carrières en logistique et supply chain ?

3 Méthodologie de recherche

Une étude qualitative exploratoire a pour objectif de comprendre les comportements qui ont été peu (ou pas) étudiés dans un groupe de personnes réduit. Nous avons pris le parti de faire ce type d'étude car nous nous sommes rendu compte que la recherche en France sur ce sujet est relativement limitée. De plus, une étude qualitative permet la collecte d'informations riches afin de répondre à notre problématique. A l'aide des entretiens effectués, nous avons pu collecter des informations sur les éléments pouvant influencer les choix de carrières des femmes en supply chain.

Nous avons cherché à avoir un échantillon hétérogène en termes de durée de carrière, d'activités en Supply Chain et de type de poste occupé actuellement afin d'avoir une vision d'ensemble et un aperçu des contextes influençant les carrières des personnes interviewées. D'autre part, nous avons cherché à avoir des profils travaillant dans des entreprises industrielles ou commerciales. Quant à la durée de carrière en Supply Chain, nous avons décidé de nous tourner vers des profils hétérogènes afin d'analyser les différents ressentis en fonction de leur durée de carrière et leur positionnement dans leur vie personnelle (vie de famille, contraintes personnelles...). Nous avons finalement sélectionné neuf femmes aux profils riches par leur diversité et prêtes à répondre à nos questions.

4 Résultats de l'étude

Suite à l'analyse textuelle des entretiens, nous pouvons distinguer deux catégories de motivations :

–*Les motivations pour rester et continuer sa carrière dans les métiers de la logistique et de SCM*

- **Equilibre vie professionnelle et vie personnelle** : Les métiers de la logistique et de SCM peuvent offrir des opportunités de travail flexibles, ce qui peut être attrayant pour les femmes qui cherchent à concilier vie professionnelle et vie personnelle.
- **Valeur de l'entreprise** : En mettant en place des programmes et des politiques qui reflètent les valeurs tels que l'égalité du genre, la diversité et l'inclusion, les entreprises peuvent contribuer à promouvoir la représentation des femmes dans les carrières logistiques et
- **Acquérir de nouvelles connaissances et compétences** : Les métiers de la logistique et SCM peuvent offrir des défis stimulants, ce qui peut être motivant pour les femmes qui aiment relever des défis et apprendre de nouvelles compétences.
- **Saisir les opportunités d'évolution en interne et en externe (changement d'entreprise)** : Les femmes peuvent être attirées par les opportunités de carrière variées et stimulantes offertes dans les métiers de la logistique et de la chaîne d'approvisionnement en saisissant des opportunités internes ou en changeant d'entreprise.

Pour la majorité des personnes interviewées, les programmes de mentorat peuvent aider les femmes à se connecter avec des professionnels expérimentés dans ces domaines et à obtenir des conseils sur la façon de progresser dans leur carrière.

–*Les motivations pour commencer sa carrière dans les métiers de la logistique et SC*

- **Opportunités de carrière variées en termes des métiers, niveaux hiérarchiques et secteurs** : Les métiers de la logistique et de la SC offrent des opportunités de carrière variées, allant de la planification des opérations à la gestion des relations avec les fournisseurs, ou des managers SC pour une équipe internationale. Ceci qui peut être attractif pour les femmes qui cherchent à explorer différents aspects de ces domaines et monter les échelons.
- **La notion internationale de SCM / multiculturelle** : ces notions sont présentes par le biais des entreprises multinationales ou les équipes de travail se caractérisent par une diversité importante. Aussi, ces notions peuvent être présentes dans le cadre de la gestion des fournisseurs.
- **Secteur dynamique qui recrute de manière régulière** : Les perspectives de croissance professionnelle et les opportunités d'évolution de

carrière offertes par ces fonctions peuvent inciter les femmes à se lancer dans ces métiers. En outre, les tendances actuelles et les développements futurs dans les fonctions logistique et SCM montrent comment ces fonctions sont cruciales pour les entreprises et comment elles évoluent, cela peut également être un facteur d'attraction pour les femmes. Les témoignages d'employées femmes actuellement en poste dans ces fonctions peuvent également aider à montrer les réalisations possibles et les opportunités d'épanouissement professionnel, ce qui peut être un facteur décisif pour les femmes pour envisager une carrière dans ces métiers.

- En raison de la possibilité de contact humain qu'ils offrent, ces métiers peuvent attirer les femmes qui aiment les échanges et le travail en équipe.
- **Les dimensions techniques en termes de savoir-faire et de connaissances peuvent attirer les femmes à travailler dans les métiers de la log et SCM**

Afin de sensibiliser les femmes aux opportunités de carrière dans ces domaines, il est important de leur montrer les différents rôles et les avantages de ces carrières. Les modèles de rôles féminins dans ces domaines peuvent aider les femmes à s'imaginer eux-mêmes dans des rôles similaires et à se sentir plus confiantes dans leur capacité à réussir dans ces domaines.

5 Conclusions

Nos résultats sur les motivations des femmes pour continuer ou commencer une carrière en logistique et en SCM viennent compléter des études antérieures qui ont étudié la place de la femme dans ces domaines (Ruel et Fritz., 2020 ; Hoareau et al.,2020 ; Zinn et al., 2018). En comprenant les motivations des femmes, les entreprises peuvent mettre en place des programmes et des politiques qui répondent à leurs besoins et à leurs intérêts, et ainsi les inciter à postuler pour ces emplois et à continuer à progresser dans leur carrière. En comprenant les motivations des femmes, les entreprises peuvent également mettre en place des programmes de mentorat et de soutien pour les aider à surmonter les obstacles spécifiques auxquels elles peuvent être confrontées dans ces carrières et à progresser dans leur carrière. Cela peut aussi aider les entreprises à attirer et à retenir les talents féminins, à améliorer leur performance globale et à promouvoir l'égalité des sexes dans les entreprises.

Références

Charles & D. B. Grusky (Eds.), Occupational ghettos: The worldwide segregation of women and men (pp. 131-178). Stanford, CA: Stanford University.
Gartner-AWESOME survey data:

<https://www.gartner.com/en/supply-chain/trends/2021-women-in-supply-chain-survey-highlights>

Hoareau, É., Chaze-Magnan, L. & Ageron, B. (2022). Les compétences en logistique et Supply Chain Management sous le prisme du genre. *Question(s) de management*, 41, 29-56.

Salomé Ruel & Morgane M. C. Fritz (2021) Gender diversity in supply chains: towards more sustainable decisions? evidence from interviews, *Supply Chain Forum: An International Journal*, 22:3, 205-222

Weeden, K. A. (2004). Profiles of change: Sex segregation in the United States, 1910-2000. In M.

Zinn, W., Goldsby, T. J. & Cooper, M.C. (2018). "Researching the Opportunities and Challenges for Women in Supply Chain." *Journal of Business Logistics*, 39(2), 84-86.

Liste des participants

- Achard Jocelyn
- Aguibi Kawther
- Aimene Yamina
- Akimowicz Mikaël
- Alvarez Sandra
- Andriamanantena Mahery
- Aouichak Ismail
- Azemar Fabrice
- Bamdad Mahchid
- Bartier Olivier
- Battie Yann
- Baujeu Marine
- Benamar Ahmed
- Bigey Magali
- Bornes Stephanie
- Bory Devisme Olivia
- Boufkhad Yacine
- Buisson Elise
- Caillet Hélène
- Caly Simbou Eva
- Campo Eric
- Carbonnel Anne
- Checchin Paul
- Chetto Maryline
- Chin Choi Maude

- Coudre Loick
- Cristofari Christian
- Daran Xavier
- Dedessus-Le-Moustier Nathalie
- Djemia Philippe
- Doyen Périne
- Duché David
- Ducq Yves
- Duflo Hugues
- El Soufi Ghina
- Ferblantier Gérard
- Fereol Sophie
- Ferrari Anne-Laurence
- Fevre Corwin
- Fevre Nollet Valérie
- Forest Virginie
- Fougeroux Tristan
- Gaitan Patricia
- George Amandine
- Gonçalves Olivier
- Gong Xiaojing
- Gorecki Simon
- Gouard David
- Gouty Quentin
- Grosdidier Thierry
- Guérandel Carine
- Guguen-Gicquel Inès
- Haddadi Kamel
- Hemadi Miryana
- Hernot Xavier
- Jannel Samuel
- Juban Jean-Yves

- Julien Mathilde
- Kamtchueng Dolorès
- Laamech Nouha
- Laborie Sebastien
- Larroque Benoit
- Laurent Philippe
- Le Bunetel Jean-Charles
- Le Saux Wiederhold Elisabeth
- Lebègue Patrick
- Ledjou Jean-Michel
- Leklou Nordine
- Lengrand-Jacoulet Sophie
- Levi Timothée
- Loustau Thomas
- Luthon Franck
- Marc Olivier
- Marguerès Philippe
- Marrot Benoit
- Massenzio Michel
- Massion Roxane
- Mateus Tiago
- Mauvoisin Gérard
- Milland Laurent
- Mouline Aziz
- Moustapha Mai Tchougoune
- Murad Nour Mohammad
- Nomenjanahary Marie Veronique
- Orioli Romain
- Ottaviani-Spella Marie Madeleine
- Page Jonathan
- Pasquet Paul-Loup
- Patte-Rouland Beatrice

- Pereira Rodrigues Elisabeth
- Petit Thomas
- Petit Isabelle
- Pithon Shamsia
- Pouvreau Cédric
- Ramenah Harry
- Ramin-Mangata Stéphane
- Reisberg Steeve
- Rio Florence
- Rohr Olivier
- Rolland Thierry
- Royon Laurent
- Sari Ali
- Schwartz Christian
- Sibille Julie
- Simon Jj
- Sophie Szymkowiak
- Spalletta Alexis
- Specogna Antonietta
- Subrin Kévin
- Tan Melissa
- Valerio Eric
- Vanhove Yannick
- Vauquelin Romain
- Vieyres Pierre
- Villain Maud
- Vimbert Raphaëlle
- Wallet Clémentine
- Watier Denis
- Yang Fan
- Zerguini Seghir
- Ziouche Katir

Liste des auteurs

- Abbou Rosa, 154–156
Achard Jocelyn, 208–210
Adelard Laetitia, 151–153
Agbessi Eric, 17–19
Ageron Blandine, 314–317
Aguibi Kawther, 211–213
Ahmine Nassim Anis, 58–60
Akimovicz Mikaël, 142–144
Akimowicz Mikaël, 287–289
Alicalapa Frédéric, 145–147
Alsaleh Nawal, 199–201
Alvarez Sandra, 64–66
Ammami Mohamed-Tahar, 124–126
Andriamanantena Mahery, 88–93, 100–102
Aouichak Ismail, 172–174
Aubert Pascal, 178–180, 196–198
Azemar Fabrice, 26–28
Azzaro-Pantel Catherine, 115–117
- Bamdad Mahchid, 29–31
Bao Huikangyue, 217–219
Bartier Olivier, 229–231
Bascaules Julie, 151–153
Baujeu Marine, 48–51
Benamar Ahmed, 124–126
Bermudes Marc, 97–99
Bernard Simon, 220–222
Beysens Daniel, 121–123
Bigey Magali, 269–271
Bischoff Armin, 109–111
Biétry Franck, 302–304
Blaya Romane, 109–111
Blight Olivier, 109–111
Boltoeva Maria, 14–16
Bonnardot Frédéric, 5–7
Bonnet Muriel, 41–44
Bornes Stéphanie, 41–44
Bory Devisme Olivia, 145–147
Boufkhad Yacine, 103–105
Briand-Decré Gwenaëlle, 293–295
Briandet Romain, 61–63
Buisson Elise, 109–111
Bédé Didier, 272–274
- Caffin Céleste, 32–34
Caillet Hélène, 151–153
Caly Simbou Eva, 45–47
Camarès Olivier, 41–44
Campo Eric, 163–165
Carbonnel Anne, 299–301
Caro Stéphane, 202–204
Caro Yanis, 88–102
Chane Kuang Sang Laurent, 106–108
Charrier Bertrand, 214–216
Chassard Christophe, 41–44
Chaïb Iseline, 8–10
Checchin Paul, 175–177
Chetto Maryline, 160–162
Chin Choi Maude, 130–132
Chéron Jean-Jacques, 85–87
Creusier Jordane, 302–304
Cristofari Christian, 115–117, 130–132
- Darracq Bruno, 178–180, 196–198
Daumar Pierre, 29–31
Deblieck Marie, 32–37
Dedessus-Le-Moustier Nathalie, 296–298
Delattre Guillaume, 229–231
Delbès Céline, 41–44
Denis Eva, 35–37
Depresle Marie, 29–31
Desplanque Ludovic, 202–204
Djelal Chafika, 232–237
Djemia Philippe, 238–240
Dossat-Letisse Valérie, 73–75, 142–144
Douyère Alexandre, 106–108
Doyen Périne, 8–10
Dubard Jean-Lou, 106–108
Dubois Clémence, 29–31
Duché David, 187–189
Ducq Yves, 311–313
Duffo Hugues, 184–186, 220–222
Dulom Arnaud, 2–4
Dumarcay Stéphane, 14–16
Durbecq Aure, 109–111
Duriez Eva, 32–34
Dutoit Thierry, 109–111

- El Baba Halim, 169–171
 El Kihel Yousra, 311–313
 El Osta Rola, 160–162
 El Soufi Ghina, 23–25, 82–84
 Eldrogi Nawal, 55–57
- Faure Pierre-Marie, 67–69
 Fausti Lillia, 112–114
 Ferrari Anne-Laurence, 275–277
 Fevre Corwin, 181–183
 Fevre-Nollet Valérie, 52–54
 Finel Angèle, 8–10
 Fodil Redouane, 58–60
 Forest Virginie, 290–292
 Fougeroux Tristan, 106–108
 Foulon Julie, 73–75
 François Jean-Marie, 94–96
 Furet Benoit, 169–171
 Féréol Sophie, 58–60
- Gachinat Marylise, 41–44
 Gaussier Nathalie, 308–310
 Gauthier Lucas, 205–207
 Gay Elodie, 29–31
 Genon-Catalot Denis, 145–147
 Gifuni Imma, 2–4
 Girbal-Neuhauser Elisabeth, 73–75
 Glay David, 202–204
 Goisnard Antoine, 29–31
 Goncalves Olivier, 2–4
 Gong Xiaojing, 223–225
 Gorecki Simon, 308–310
 Gouard David, 251–253
 Gougeon Raphaël, 205–207
 Gouty Quentin, 214–216
 Graur Irina, 148–150
 Gravier-Pelletier Christine, 61–63
 Gries Thomas, 241–243
 Grondin Rudy, 154–156
 Grosdidier Thierry, 241–243
 Guennouni Nabila, 157–159
 Guguen-Gicquel InÈs, 293–295
 Guignard Nathan, 118–120
 Guitton Antoine, 241–243
 Guo Xiaofeng, 103–105
 Guérandel Carine, 260–262
- Haddadi Kamel, 199–204
 Hadna-Bremand Saliha, 272–274
 Hammadi Slim, 181–183
 Hemadi Miryana, 61–63
 Hembert Agathe, 32–34
- Herbaut Rémy, 121–123
 Hernault Camille, 8–10
 Hernot Xavier, 229–231
 Hitmi Adnane, 76–78
 Hugot Laetitia, 112–114
- Ichard Floriane, 85–87
 Issaoui Riadh, 208–210
- Jannel Samuel, 97–99
 Javegny Stéphanie, 45–47, 85–87
 Jemei Samir, 130–132
 Joly Nicolas, 20–22
 Julien Mathilde, 290–292
- Kamtchueng Dolorès, 281–283
 Kubien Sarah, 109–111
- Laamech Nouha, 193–195
 Laborie Sebastien, 157–159
 Langelez Manon, 85–87
 Larroque Benoit, 55–57, 190–192
 Lavayssiere Camille, 190–192
 Lavergne Christophe, 88–90
 Le Bunetel Jean-Charles, 172–174
 Lebègue Patrick, 52–54
 Ledjou Jean-Michel, 254–256
 Lefeuvre Sonia, 248–250
 Leklou Nordine, 133–135
 Lenoir Clément, 199–201
 Leroyer Léo, 214–216
 Levi Timothée, 67–72
 Libessart Laurent, 232–234
 Lomas John, 61–63
 Louis Florent, 52–54
 Loustau Thomas, 23–25, 79–84
 Loyez Christophe, 202–204
 Lucas De Peslouan Pierre-Olivier, 145–147
 Lucas Marthe, 109–111
 Luthon Franck, 55–57, 190–192
 Lépine Olivier, 2–4
- Mahaman Youssefou, 151–153
 Maligne Laura, 163–165
 Manon Dijoux, 88–90
 Marc Olivier, 151–156
 Marcato-Romain Claire-Emmanuelle, 73–75, 142–144
 Margueres Philippe, 217–219
 Martin Jean-François, 151–156
 Martin Patrick, 20–22
 Maréchal Pierre, 184–186, 220–222
 Masse Alexandra, 29–31

Masse Anthony, 2–4
 Masselot Cyril, 275–277
 Mateus Tiago, 278–280
 Mathieu Philippe, 181–183
 Mauvoisin Gérard, 226–231
 Maxime Dubois, 29–31
 Melloul Emile, 109–111
 Mesléard François, 109–111
 Milhamont Lh ea, 32–34
 Milland Laurent, 275–277
 Mille Vianney, 208–210
 Mongruel Anne, 121–123
 Moquet Laura, 48–51
 Mouline Aziz, 284–286
 Mouline Jean Pierre, 305–307
 Mounetou Emmanuelle, 29–31
 Moussa Charbel, 229–231
 Moustapha Mai Tchougoune, 115–117
 Munier Manuel, 193–195
 Murad Nour, 106–108, 154–156
 Murad Nour Mohammad, 136–138
 Mutillod Clémentine, 109–111

 Negro Olivier, 163–165
 Nguyen Tuan, 2–4
 Nomenjanahary Marie Veronique, 85–87
 Nouaille Laurence, 205–207

 Olivier Philippe, 217–219
 Orioli Romain, 244–247
 Ottaviani-Spella Marie Madeleine, 112–114

 Page Jonathan, 232–234
 Paquet Elodie, 169–171
 Pascal Julien, 175–177
 Pasquet Paul-Loup, 11–13
 Pecrix Yann, 45–47, 85–87
 Penault-Llorca Frédérique, 29–31
 Pereira Rodrigues Elisabeth, 112–114
 Petit Thomas, 88–102
 Pham Congduc, 193–195
 Pithon Shamsia, 88–93, 100–102
 Poisson Léa, 205–207
 Polonais Valérie, 76–78
 Pomorski Denis, 199–201
 Poussier Stéphane, 45–47, 85–87
 Provost Virgile, 14–16

 Quilichini Yann, 112–114

 Raingeaud Yves, 172–174
 Rajoharisoa L. A., 136–138
 Rakotovahiny Marie-Andrée, 272–274

 Ramenah Harry, 139–141
 Ramin Mangata Stéphane, 45–47
 Ramone Hervé, 109–111
 Randriatefison N., 136–138
 Rasoamanana Hasina, 45–47
 Ravelomanantsoa Santatra, 85–87
 Reisberg Steeve, 103–105
 Reiter Alan, 305–307
 Relaix Frédéric, 58–60
 Remy Simon, 100–102
 Renault Jean-Hugues, 100–102
 Reynaud Bernard, 48–51
 Rio Florence, 244–247
 Robles Eduardo, 64–66
 Rocher Léo, 109–111
 Rodriguez Florez Sergio Alberto, 178–180
 Rodriguez Sergio, 196–198
 Rohr Olivier, 23–25, 82–84
 Rolland Thierry, 266–268
 Rousset Patrick, 151–153
 Roux Manon, 29–31
 Royon Laurent, 61–63, 103–105, 121–123
 Rumeau Pierre, 163–165

 Saby L ea, 109–111
 Sallaberry Christian, 157–159
 Sallen Antinea, 85–87
 Sauvage Elise, 8–10
 Savane Assa, 35–37
 Schwartz Christian, 23–25, 82–84
 Sebbache Mohamed, 199–204
 Sibille Julie, 106–108
 Spalletta Alexis, 20–22
 Specogna Antonietta, 275–280
 Subrin Kévin, 169–171
 Szymkowiak Sophie, 302–304

 Taamalli Sonia, 52–54
 Taglietti Valentina, 58–60
 Tan Melissa, 94–96
 Tassart Caroline, 35–37
 Thevenon L ea, 35–37
 Thuilot Benoit, 175–177
 Tixier-Mita Agn es, 67–69
 Tkhayyare Sa id, 272–274
 Torrero Taskeen, 272–274
 Tralongo Stéphanie, 257–259
 Trebouet Dominique, 11–16, 23–25, 82–84
 Trichet Valérie, 2–4
 Troseille Joachim, 121–123

 Valentin Audrey, 208–210

Valério Eric, 148–150
Van Assche Jeanne, 23–25, 82–84
Van Den Bossche Adrien, 163–165
Vanhove Yannick, 235–237
Vauquelin Romain, 38–40
Veisseire Philippe, 41–44
Vella Frédéric, 163–165
Vidaller Christel, 109–111
Vieyres Pierre, 205–207
Vigouroux Nadine, 163–165
Villain-Gambier Maud, 11–16, 23–25, 82–84
Vimbert Raphaëlle, 263–265
Vincke Bastien, 178–180, 196–198
Viudes Florence, 8–10

Wallet Clémentine, 23–25, 82–84
Watier Denis, 32–37
Weiss Pierre, 2–4
Wolf Moritz, 148–150

Yang Fan, 166–168
Yildiz Hélène, 305–307

Zein-Eddin Ahmad, 124–126
Zerguini Seghir, 308–310
Zgaya-Biau Hayfa, 181–183
Ziegler Isabelle, 14–16
Ziouche Katir, 127–129
Zouari Dorsaf, 314–317
Zouggar Amrani Anne, 311–313



REMERCIEMENTS

Partenaires et soutiens :

Université de la Réunion :

Frédéric MIRANVILLE, Gilles LAJOIE, Alain BASTIDE, Patrick MAVINGUI

Région Réunion :

Huguette BELLO, Jean-Pierre CHABRIAT, Aymeric GIRARDET, Stéphane LAW-HANG

Mairie de Saint-Pierre et CIVIS :

Michel FONTAINE, Béatrice SIGISMEAU, Marie QUINOT

Députée de la 4^{ème} circonscription :

Emeline K/BIDI

Technopôle de La Réunion :

Laurent GABORIAU, Jérôme Beaudemoulin

Qualitropic :

Jérôme VUILLEMIN, Graziella TOSTAIN

Laboratoire PIMENT :

Mathieu DAVID, Vanessa DIJOUX

Entreprises innovantes :

Camille Legrand (OLICA) et Marc Bermudes (Green Mascareignes)

Partenaires Financiers :

Région Réunion, Technopôle de La Réunion, Laboratoire Piment, CIVIS, Mairie de Saint-Pierre, Université de La Réunion, CROUS de La Réunion, FrenchBee, Exsel Authentic Hotels, Nouloutou.

Services de l'Université :

Direction du soutien à la recherche, innovation, valorisation et partenariats (DRIVE), Direction de l'Audiovisuel, du Multimédia et de l'Accessibilité Numérique (DAMAN), Direction de la Logistique et de la Reprographie (DLR), Direction de la Santé et de la Sécurité au Travail (DSST).

Commission RTI de l'ADIUT :

Antonietta SPECOGNA, Gérald FERBLANTIER, Cédric POUVREAU, Yann BATTIE, Roxanne MASSION, Sébastien LABORIE, Carine GUÉRANDEL, Eric CAMPO, Jean-Yves JUBAN, Olivier ROHR, Sonia LEFEUVRE, Michel MASSENZIO, Magali BIGEY, Olivier MARC, Isabelle PETIT, Thierry GROSDIDIER, Jean-Jacques SIMON, Stéphanie TRALONGO, Olivier GONÇALVES, Jean-Charles LEBUNETEL, Timothée LEVI, Tiago MATEUS.

ADIUT

Martial MARTIN, Olivier AUBRETON, Yann GAUDEAU, Stéphane LAUWICK, Christophe MILLET, Laurent MILLAND, Xavier DARAN, Anne-Laurence FERRARI, Louise COUGOULAT, Amandine DESMAISON, Aline DIEU,

Équipe IUT :

Richard LORION, Olivier MARC, Jasmine ENDELIN-LURÇON, Manon JOLY, Nour MURAD, Hélène CAILLET, Melissa TAN, Philippe BRUN, Laetitia ADELARD, Edouard LEBON, Nadine MOTAIS de NARBONNE, Jean François MARTIN, Sophie JOVIN, Patricia FONTAINE, Cécile PAULO-RAMOS, Kenji FUNG LUCK MIN, Nina BARBIER, Cyril ROBERT, Sébastien KRAMARTZ, Amandine GEORGE, Jérémy ALVAREZ, Gilles KLEITZ.

Étudiants Départements Techniques de Commercialisation et Génie Civil Construction Durable :

Lucile DUBARD, Cheryl GRONDIN, Léo CARVALHO, Léa CAMBOUR, Emma LOUISE, Inès CHIRON, Nour PEREZ-SANCHEZ, Léo BISCOU, Damien TOUSSAINT, Adeline TAOCHY.