

Portfolio LGP2

HCERES 2025



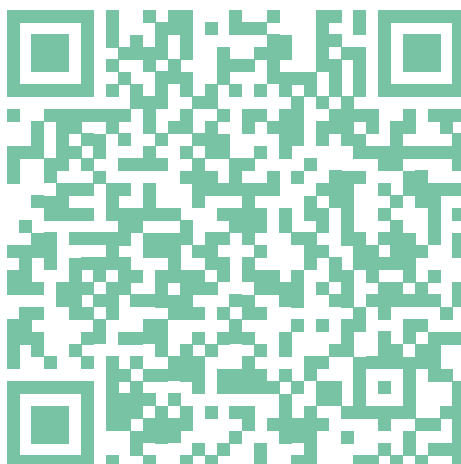


TABLE DES MATIÈRES

ÉLÉMENT 1	6
Valorisation de la biomasse lignocellulosique / Bioraffinerie, mise en évidence des propriétés prébiotiques des hémicelluloses	
ÉLÉMENT 2	8
PULP and FUEL, Development of next generation biofuels and alternative renewable fuel technologies for road transport	
ÉLÉMENT 3	10
FOX process, Nouveau système oxydant pour la production de MFC dans l'industrie papetière	
ÉLÉMENT 4	12
PEPR recyclage, recyclabilité et réutilisation des matières, axe Papiers-Cartons	
ÉLÉMENT 5	14
Compréhension des phénomènes physiques relatifs à l'apparition de plis générés lors de la fonctionnalisation de surface par enduction des matériaux fibreux de faible grammage	
ÉLÉMENT 6	16
La Cellulose Valley, Développement d'emballages en cellulose, performants et recyclables pour remplacer les plastiques	
ÉLÉMENT 7	18
Développement de mousses lignocellulosiques recyclables et biodégradables pour remplacer les matériaux pétro-sourcés dans les domaines de l'emballage et des produits d'hygiène	
ÉLÉMENT 8	20
Mise en forme en voie sèche de matériaux lignocellulosiques	
ÉLÉMENT 9	22
Bionanocomposite, Films à gradient de composition pour des actionneurs sensibles à des stimuli obtenus par co-précipitation interfaciale	
ÉLÉMENT 10	24
Fonctionnalisation de la cellulose : applications aux nanocelluloses	
ÉLÉMENT 11	26
Structuration des papiers et cartons par impression : une approche bio-inspirée pour réduire la consommation d'énergie et de ressources naturelles	
ÉLÉMENT 12	28
Formulation de fluides complexes pour l'industrie, application aux encres	
ÉLÉMENT 13	30
Impression de circuits électroniques 3D avec robot 6 axes	
ÉLÉMENT 14	32
Fin de vie des dispositifs électroniques imprimés sur papier : recyclage et valorisation des matériaux biosourcés et des encres fonctionnelles	

INTRODUCTION

Le portfolio du LGP2 est constitué de 14 éléments. Leur choix reflète les recherches menées au laboratoire, qui intègrent les principes d'écoconception et les enjeux du développement durable pour contribuer à réduire l'impact des activités humaines sur l'environnement. Il tient compte de la spécificité de chacune des trois équipes de recherche (BioChip, MatBio et FunPrint) et met aussi en évidence des actions transversales. C'est pourquoi il est organisé de manière logique suivant les thématiques des équipes : les éléments 1 à 5 et 14 concernent l'équipe **BioChip**, les éléments 5 à 11 concernent l'équipe **MatBio**, les éléments 11 à 14 concernent l'équipe **FunPrint**. Les éléments 5, 11 et 14 sont situés aux interfaces des équipes **BioChip/MatBio**, **MatBio/FunPrint** et **FunPrint/BioChip**, respectivement, montrent comment sont combinées les expertises propres à chaque équipe. Cette organisation est illustrée schématiquement sur la figure 1.



Figure 1 : résumé graphique du portfolio du LGP2

Les 14 éléments choisis mettent en exergue les domaines d'excellence du LGP2, c'est-à-dire :

- **La valorisation rationnelle de la biomasse végétale** (éléments 1, 2, 3) : la raréfaction annoncée des ressources fossiles a entraîné au cours des dernières années un regain d'intérêt pour les matières premières renouvelables. Dans ce contexte, le fractionnement de la biomasse végétale en vue d'isoler des constituants valorisables constitue un sujet prioritaire. Une part importante des recherches du laboratoire s'intéresse à la valorisation de la biomasse forestière et à la bioraffinerie intégrée à une usine de pâte à papier (élément 2). De nombreuses actions sont menées en vue de la valorisation des différentes molécules issues du fractionnement : valorisation des hémicelluloses (contribution au développement d'une plateforme sucres pour la production de biocarburants, de tensioactifs et pour des applications prébiotiques – élément 1), valorisation de la lignine (dépolymérisation, fonctionnalisation pour des applications matériaux) et valorisation de la cellulose en produits à haute valeur ajoutée en optimisant des procédés de production/dérivation pour divers usages (celluloses textiles, microfibrilles de cellulose pour applications matériaux – élément 3).

- **L'élaboration de matériaux et composites biosourcés** (éléments 5, 6, 7, 8, 9, 11) : depuis le début des années 2000, le LGP2 a acquis une expertise reconnue dans le génie des procédés d'élaboration de matériaux biosourcés, allant des briques élémentaires issues de la biomasse végétale jusqu'aux composites et matériaux fibreux pour des applications dans les secteurs de l'emballage, de la santé ou du bâtiment. Le laboratoire se concentre sur les procédés d'élaboration transférables à l'échelle industrielle et mène des travaux alliant des compétences en mécanique des solides (modélisation des comportements thermo-hygro-mécaniques) et en chimie des matériaux.
- **Les micro- et nano-celluloses** (éléments 3, 5, 6, 9 et 10) : les traitements spécifiques de la cellulose permettent d'obtenir des nanomatériaux (nanocristaux, nano- et micro-fibrilles) qui suscitent un intérêt croissant dans le domaine de la bioéconomie. Le LGP2 est un laboratoire pionnier dans le domaine des nanocelluloses et de leur fonctionnalisation par des procédés propres ainsi que dans la mise en œuvre de matrices biosourcées par des techniques sans solvant et industrialisables.
- **Les procédés de recyclage** (éléments 4 et 14) : les procédés de séparation physico-chimique sont mis en œuvre pour le recyclage des nouveaux matériaux fonctionnels développés par l'équipe Funprint. BioChip et Funprint collaborent pour anticiper la fin de vie de dispositifs électroniques imprimés sur supports lignocellulosiques, en séparant les éléments cellulotiques des métaux précieux (Ag) présents dans l'encre (élément 14). L'équipe BioChip est aussi impliquée dans un projet d'envergure lié au recyclage, où les matières recyclées sont valorisées en produits de haute valeur ajoutée. Il s'agit notamment de développer des procédés de rupture pour valoriser et upcycler les composants des papiers et cartons récupérés, qui deviennent une source fibreuse utilisée en bioraffinerie au même titre que les fibres vierges (élément 4).
- **Les procédés d'impression pour la fonctionnalisation** des surfaces (éléments 11, 12, 13, 14) : ces procédés constituent un moyen efficace et économique de déposer des couches minces de fluide, d'épaisseur contrôlée, sur de grandes surfaces et à grande vitesse. L'utilisation de fluides aux propriétés particulières permet de fonctionnaliser des surfaces et ouvre des perspectives de développement de produits à haute valeur ajoutée, en particulier dans le domaine de l'électronique imprimée, en combinant les techniques de dépôt 2D et 3D.
- **L'efficacité et l'impact environnemental des procédés de production** (éléments 2, 3, 5, 6, 7, 8, 13) : cette démarche sous-tend tous les projets précédemment décrits. Elle inclut l'optimisation des procédés industriels associés à la séparation physique et physico-chimique pour la valorisation de la biomasse végétale; l'optimisation des procédés chimiques pour délignifier, blanchir, purifier les fibres vierges et recyclées; l'accroissement de l'efficacité énergétique des procédés tout en contrôlant leur impact sur l'environnement, que ce soit dans le domaine de la production et du recyclage des papiers et cartons, mais aussi lors de la fragmentation de la biomasse végétale vierge; et les nouvelles utilisations des procédés de fabrication additive (procédés d'impression 2D et 3D) dans la réalisation de dispositifs électroniques.

Cette sélection permet également d'illustrer la diversité de production scientifique et de types de projets ou d'actions : les éléments **1, 5, 9, 10, 11, 13** et **14** présentent des publications représentatives du positionnement scientifique de l'unité; les éléments **2** (projet européen) et **4** (PEPR), **6** et **13** (chaires industrielles) décrivent des projets structurants d'envergure; les éléments **3, 6** et **12** correspondent à des actions de valorisation/transfert; des exemples de projets ANR sont illustrés par les éléments **7, 8** (ANR Jeune Chercheur) et **14**; les collaborations internationales apparaissent au travers des éléments **2, 9** et **14**, notamment.

Le portfolio met en évidence aussi bien des thématiques historiques du LGP2 et des disciplines rares (éléments **5** et **12**), que des thématiques de pointe, et des sujets très innovants en phase avec les attentes sociétales et celles de nos secteurs industriels. Enfin, certains éléments soulignent l'implication de l'unité dans des activités d'encadrement et de formation (éléments **4, 6** et **13**). De manière générale et depuis de nombreuses années, la conception de la formation d'ingénieurs de Grenoble INP - Pagora se nourrit de tous les apports de l'activité scientifique du LGP2.

La lecture du portfolio pourra être complétée par la consultation du recueil des sujets de thèses actuels du LGP2 : <https://lgp2.grenoble-inp.fr/fr/vie-scientifique/yearbook-projets-des-jeunes-chercheurs>

ÉLÉMENT 1

ÉQUIPE BIOCHIP

PUBLICATION

Valorisation de la biomasse lignocellulosique / Bioraffinerie, mise en évidence des propriétés prébiotiques des hémicelluloses

Contexte de publication

Un des axes de recherche de l'équipe BioChip est de développer des procédés qui permettent de mieux valoriser tous les constituants de la biomasse dans le cadre des bioraffineries intégrées à l'industrie de la cellulose (voir figure 2). En effet ces usines ne valorisent aujourd'hui que la cellulose, qui ne représente que 40 à 45 % en masse du bois, et pour certaines une partie des extractibles du bois. La lignine (30 % du bois) et les hémicelluloses (20 à 25 % du bois) se retrouvant dans l'effluent du procédé sont le plus souvent brûlées. Les hémicelluloses ne sont donc valorisées que sous forme d'énergie (chaleur et électricité).

L'axe 1 présenté sur la figure 2 concerne l'extraction, la caractérisation, la purification et la valorisation des hémicelluloses du bois. Dans la période évaluée, il concerne deux thèses soutenues (V. Guigon 2019 et J. Francillon 2021) et une thèse en cours (N. Safari, soutenance prévue fin 2026), qui font suite à 6 autres thèses et postdoctorat dans les périodes précédentes.

Un des résultats importants a été la mise en évidence des propriétés prébiotiques des hémicelluloses du bois extraites et purifiées sous forme d'oligosaccharides.

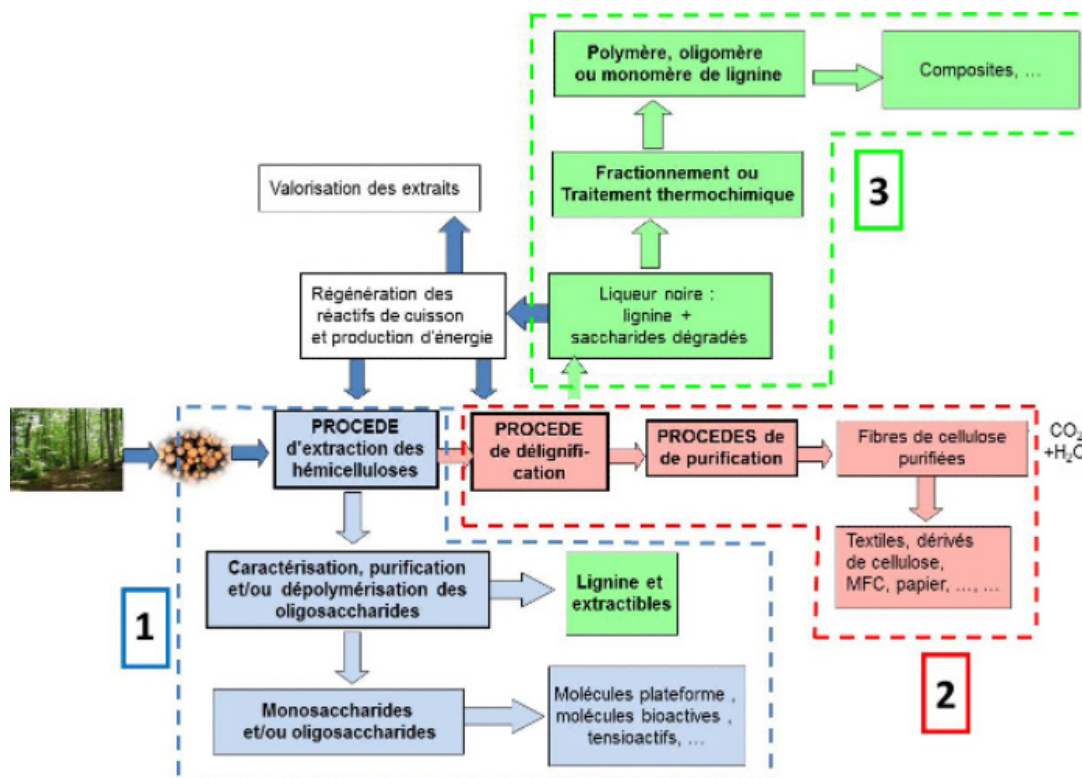


Figure 2 : Procédés de bioraffinerie intégrée au procédé de production de cellulose

Ceci a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe ThereX (Thérapeutique Recombinante Expérimentale) du TIMC-IMAG (Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité - Informatique, Mathématiques et Applications, Grenoble) et avec le service de chromatographie du CERMAV (Centre de Recherche sur les Macromolécules Végétales), initiée dans le cadre de la thèse de V. Deloule (2017) et qui se poursuit avec la thèse de N. Safari (en cours).

Principaux apports de la publication

Cette étude présente différentes voies d'obtention d'oligosaccharides issus des hémicelluloses de bois résineux (extraction chimique, purification par ultrafiltration et par adsorption sur du charbon actif, précipitation dans des solvants). Les effets biologiques de différentes fractions d'oligosaccharides obtenues ont été étudiés par des tests in vitro et in vivo (tests sur des souris) et la relation entre la structure des oligosaccharides issus des hémicelluloses et l'activité prébiotique a pu être mise en évidence. Ceci nous a confortés dans la poursuite des recherches dans ce domaine avec le TIMC (thèse de N. Safari, en cours).

Pertinence / retombées

Cette publication est une production représentative du positionnement du LCP2 dans le domaine des bioraffineries intégrées à l'industrie de la cellulose, thématique historique de l'unité. En particulier les travaux qui sont menés sur les hémicelluloses du bois sont originaux, cette fraction du bois étant assez peu étudiée. Or les hémicelluloses représentent entre 20 et 30 % en masse du bois et sont constituées de plusieurs saccharides, i.e. hexoses (glucose, mannose, galactose) et pentoses (xylose et arabinose), partiellement substitués par des groupements acétyl et méthylglucuronique. Elles représentent ainsi des sources potentiellement importantes d'oligosaccharides ou de monosaccharides pour diverses applications, et très prometteuses comme les prébiotiques.

DOCUMENT À CONSULTER

- Deloule, V., Boisset, C., Hannani, D., Suau, A., Le Gouellec, A., Chroboczek, J., Botte, C., Yamario-botte, Y., Chirat, C., Toussaint, B., Prebiotic role of softwood hemicellulose in healthy mice model, Journal of Functional Foods, Volume 64, January 2020, 103688 : <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103688>



ÉLÉMENT 2

ÉQUIPE BIOCHIP

PROJET EUROPÉEN

PULP and FUEL, Development of next generation biofuels and alternative renewable fuel technologies for road transport

Contexte

Le transport routier est le secteur le plus contributeur à la production de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il repose aujourd'hui pour l'essentiel sur la combustion de ressources fossiles. La part des énergies renouvelables dans le transport routier n'est que de 5,5 % au niveau mondial, dont environ 4,5 % pour les biocarburants (9 % en France) et 1 % pour l'électricité (2 % en France) (chiffres 2022). La quasi-totalité des biocarburants produits et incorporés dans les carburants routiers (essence et diesel) est issue de biomasses alimentaires (maïs, blé, sucre, huiles végétales).

La dernière directive européenne sur les énergies renouvelables (RED II) impose d'atteindre en 2030 une part d'énergie renouvelable dans le transport routier de 14 % (10 % aujourd'hui), dont 3,5 % d'énergie sous la forme de biocarburant de nouvelle génération (advanced biofuel) issu de biomasses non alimentaire (0,1 % aujourd'hui). **Le projet «Pulp and Fuel» répond à l'appel à projet européen LC-SC3-RES-21-2018 : Development of next generation biofuels and alternative renewable fuel technologies for road transport.**

Parmi les gisements de matières premières non alimentaires susceptibles d'être mobilisés pour produire des biocarburants de nouvelle génération figurent les déchets et sous-produits de l'industrie de la cellulose (200 MT de cellulose par an dans le monde), principalement les écorces et la liqueur de cuisson (liqueur noire) contenant les constituants du bois, autres que la cellulose, qui ont été dissous au cours de la préparation des fibres de cellulose. Valoriser ces déchets et sous-produits sous forme de biodiesel offrirait également aux usines de cellulose des revenus complémentaires.

Description

L'objectif principal du projet Pulp and Fuel est de **développer un procédé original de production de biodiesel, intégré à une usine de production de cellulose, en valorisant les écorces du bois utilisé et la liqueur de cuisson.** Le procédé comprend la gazéification par voie sèche des écorces et la gazéification en eau supercritique des constituants du bois dissous dans la liqueur, suivi d'une purification des gaz (CO et H_2) et de la synthèse Fischer Tropsch pour la production d'hydrocarbures constituants du diesel.

Durée et moyens

Le projet Pulp and Fuel (European Union's Horizon 2020 Research and innovation program - Grant agreement No 818011), coordonné par le CEA LITEN, a pu être mené à bien grâce à la mise en commun de l'expertise de **10 partenaires** (Figure 3) dans les traitements thermiques de la biomasse (CEA LITEN, RISE), la purification des gaz et la synthèse Fischer Tropsch (SINTEF), la modélisation des procédés (EPFL), l'ingénierie et construction (SOFSID, Top Industrie), l'évaluation technico-économique et environnementale (IVL), **le génie de la fabrication des fibres cellulosiques et la chimie des constituants du bois (LGP2)**, et la production de fibres cellulosiques kraft (Fibre Excellence). Le projet a reçu une aide totale de 5 millions d'euros sur 4,5 ans (2018-2023).

Pertinence / retombées

Ce projet **est représentatif du positionnement scientifique de l'équipe BioChip dans le domaine de la bioraffinerie intégrée à l'industrie de la pâte à papier et atteste de sa reconnaissance au niveau européen et de son implication dans des projets de recherche d'ampleur à l'international.**

Originalité / caractère innovant

L'originalité du projet réside dans une approche de la bioraffinerie intégrée à l'industrie de la cellulose, plus précisément dans la synergie existant entre le traitement des écorces et celui de la liqueur noire. En effet la gazéification par voie sèche de la biomasse végétale (ici les écorces) produit un mélange gazeux ($\text{CO} + \text{H}_2$) déficitaire en hydrogène pour une synthèse Fischer Tropsch. Le complément en hydrogène est fourni ici par la gazéification en eau supercritique de la liqueur noire qui génère des quantités importantes de H_2 du fait de la réaction de l'eau avec CO (Figure 4).

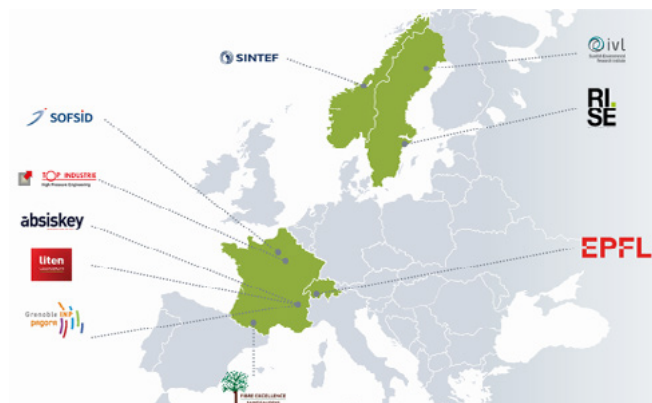


Figure 3. Consortium international Pulp and Fuel

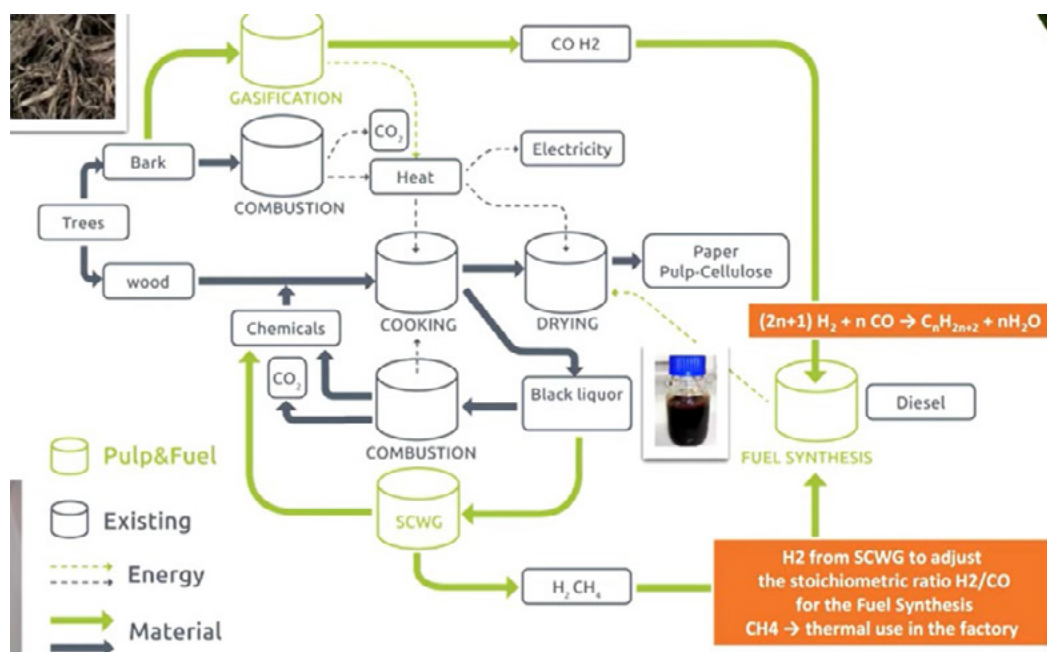


Figure 4. Intégration de la gazéification des écorces et de la gazéification de la liqueur noire en milieu supercritique (SCWG) dans une usine kraft pour la synthèse de biodiesel par le procédé Fischer Tropsch

DOCUMENTS À CONSULTER

- Annexe : Résumé des résultats du projet – focus sur l'apport du LGP2
- Site web du projet Pulp and Fuel : <https://pulpandfuel.eu/>
- Curmi, H., Chirat, C., Roubaud, A., Peyrod, M., Haarlemmer, G., Lachenal, D., "Extraction of phenolic compounds from sulfur-free black liquor thanks to hydrothermal treatment before the production of syngas for biofuels" J. Supercritical Fluids. Volume 181, February 2022, 105489. : <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105489>
- Hamzeh, Y., Chirat, C., Haarlemmer, G., Lachenal, D., Ashori, A., Mortha, G., Cedeno, H. D. "Extraction of phenolic compounds from hydrothermal processing of black liquor: Effect of reactor type and pH of recovered liquid phase". Chem Eng. J. Volume 470, 15 August 2023. : <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144269>

FOX process, Nouveau système oxydant pour la production de MFC dans l'industrie papetière

Contexte

L'industrie papetière européenne souffre de la concurrence de l'Asie et de l'Amérique du Sud, où de grandes unités de production de pâte à papier se développent. Aujourd'hui, cette industrie cherche une utilisation plus diversifiée des fibres papetières, notamment la production de produits à haute valeur ajoutée, pour aller vers de nouveaux marchés et rester compétitive. La production industrielle de microfibrilles de cellulose (MFC), éléments de très petite taille extraits de la paroi cellulosique des plantes, est devenue une réalité et nombreuses sont les industries papetières qui se sont orientées dans cette voie prometteuse.

Les MFC sont obtenues à partir des fibres cellulosiques extraites du bois par l'industrie papetière qui produit classiquement des gros volumes de papier d'emballage, de papier journal, de papier hygiénique, etc. Candidates solides au remplacement des plastiques, les MFC possèdent des propriétés remarquables et sont **aujourd'hui considérées comme un additif biosourcé de choix pour la formulation des matériaux**.

Actuellement la production des MFC est réalisée par broyage, opération fortement consommatrice d'énergie et nécessitant des traitements répétés qui dégradent la qualité du produit final. Pour réduire la dépense énergétique et obtenir des MFC de qualité, un procédé chimique peut être appliqué en amont du broyage. Il nécessite l'utilisation de réacteurs et de produits chimiques polluants et chers, ce qui rend le procédé encore peu exploité industriellement. Le LGP2 a développé un procédé d'obtention de MFC facilement implantable dans les infrastructures existantes de l'usine de pâte, avec l'utilisation des produits chimiques déjà présents sur le site ou facilement intégrables, et avec peu d'investissement ou modification de procédé. L'industrie papetière peut ainsi s'ouvrir à un nouveau marché d'avenir. Ce procédé peut également permettre l'installation par un équipementier d'unités clés en main directement chez l'utilisateur de MFC.

Le procédé FOX fait l'objet d'une **pré-maturation** en partenariat avec la **SATT Linksiium Grenoble Alpes**.

Description

Le procédé FOX est un pré-traitement chimique de la cellulose permettant d'enrichir la cellulose en groupements carboxyles, introduisant des charges négatives au sein des chaînes cellulosiques ce qui engendre des répulsions entre ces chaînes. Ceci permet de faire diminuer l'énergie requise par les traitements mécaniques ultérieurs, nécessaires pour extraire les MFC de la paroi fibreuse fragilisée. Les produits chimiques utilisés dans le procédé FOX sont déjà présents dans les usines de bioraffinerie papetière ou facilement intégrables. L'oxydation de la cellulose est réalisée par le système TEMPO/ClO₂/NaClO, très proche du système TEMPO¹/NaClO/NaBr développé par Isogai² et bien connu des chimistes de la cellulose. Le principe de ce nouveau procédé repose sur le remplacement du NaBr par du ClO₂ pour activer le TEMPO qui oxyde la cellulose, mais aussi pour délignifier le substrat cellulosique, et cela en un seul traitement (Figure 5). En plus d'être blanchie, la pâte produite par le traitement est oxydée à un niveau identique à celui des pâtes blanchies oxydées par un stade TEMPO/NaClO/NaBr classique.

¹ Radical 2,2,6,6-Tétraméthylpipéridin-1-yl)oxy

² Isogai, A., Saito, T., Fukuzumi, H., TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *Nanoscale* 2011, 3, 71–85

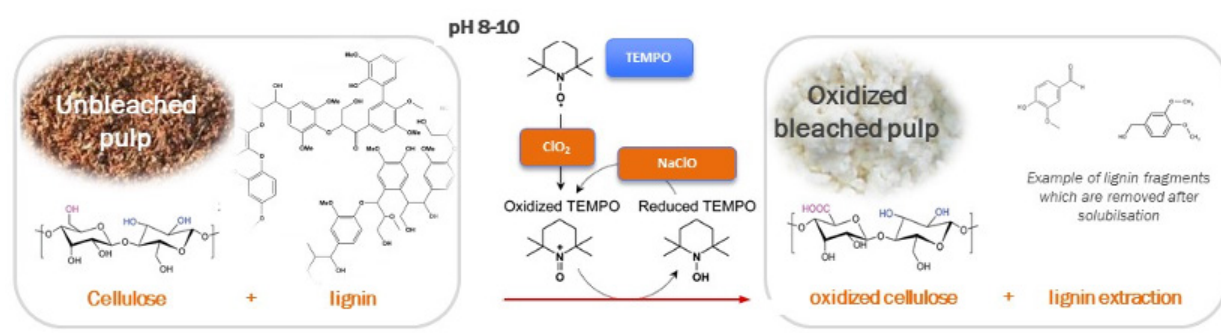


Figure 5. Mécanisme d'oxydation de la cellulose par le système TEMPO/ClO₂/NaClO

Durée et moyens

C'est un projet de TRL 3-4, financé sur une durée de 20 mois, qui a débuté en octobre 2023 pour un budget total de 238 060 euros. Il comprend le recrutement d'une ingénieure de recherche sur 18 mois, les frais de fonctionnement, de mission et de PI, l'achat d'un réacteur, une étude de marché et l'accompagnement d'une équipe projet de la SATT Linksiium. La SNA Bioscale (Stratégie Nationale d'Accélération, France 2030, <https://www.pui-impulse.fr/sna/bioscale>) soutient également le projet à hauteur de 50 % de son budget total.

Pertinence / retombées

Le projet FOX process illustre une des actions de valorisation et de transfert menée par l'équipe BioChip. Le procédé FOX s'inscrit dans le contexte de la transition énergétique et de la bioéconomie, avec la volonté de développer des alternatives aux pétro-ressources en utilisant la biomasse végétale dans les matériaux, et constitue une opportunité industrielle et économique réelle.

Le projet a été présenté à plus de 10 industriels en France, mais aussi à l'international, en lien avec l'industrie papetière. L'objectif est de vendre une licence du procédé. Nous travaillons actuellement avec 4 industriels papetiers sous NDA et MTA (tests en cours sur leurs pâtes).

DOCUMENTS À CONSULTER

- Résumé du programme de recherche du projet de maturation FOX process
- Brevet FR315224, déposé le 23/12/2019 « procédé d'oxydation catalytique de pâte cellulosique », délivré le 06/06/2023, Mortha C., Marlin N., Dollié L., extension PCT Europe en cours, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04416072>
- Site web de la SNA Bioscale : <https://www.pui-impulse.fr/sna/bioscale>

ÉLÉMENT 4



ÉQUIPE BIOCHIP
+ PARTICIPATION MATBIO ET FUNPRINT

PROJET STRUCTURANT
PEPR

PEPR recyclage, recyclabilité et réutilisation des matières, axe Papiers-Cartons

Contexte

Le PEPR¹ Recyclage, Recyclabilité et Ré-Utilisation des Matières a été lancé le 31 mai 2023 dans le cadre de la Stratégie Nationale d'Accélération (SNA) France 2030. Son objectif est de conduire à l'émergence d'un modèle français dans le domaine des matières premières de recyclage et leur réincorporation dans de nouveaux produits. Ce programme, qui relève d'une approche systémique et holistique, regroupe plus de 70 équipes sur l'ensemble du territoire français et se divise en 11 axes de recherche : 5 axes « Matériau » (Plastiques, Métaux Stratégiques, Matériaux Composites, Textiles et Papiers/Cartons), 4 axes transverses « Filière » (Batteries, Nouvelles Technologies de l'Énergie, DEEE, Déchets Ménagers), 1 axe « SHS » (Société du Recyclage et de la Réutilisation) et 1 axe « Numérique » (Numérique pour le recyclage). Le CNRS coordonne ce PEPR doté d'un budget total de 40 millions d'euros sur 6 ans.

Cette SNA vise des gains environnementaux, la création de valeur sur le territoire, une réduction de la dépendance extérieure de la France et des créations d'emplois. **La recherche et le développement ont un rôle majeur à jouer pour soutenir l'innovation et le déploiement des filières industrielles actuelles et futures du recyclage.** Ainsi, de nombreux laboratoires publics ont été impliqués dans la construction de ce programme de recherche, dont le LGP2 qui coordonne l'axe Papiers-Cartons avec le Centre Rapsodee à Albi. Via des projets ciblés lancés en début de programme et dotés de 40 % du budget du PEPR, l'idée est de structurer la communauté scientifique autour des enjeux du recyclage en développant une recherche faible TRL (inférieur à 4). D'autres actions sont en cours de déploiement (AMI lancé en novembre 2024 pour de nouveaux projets financés à partir de septembre 2025; création de lieux Totem rassemblant des expertises; dissémination auprès du grand public, actions de formation...).

Description

N. Marlin (LGP2) et F. Espitalier (Centre Rapsodee, Albi), portent l'axe Papiers-Cartons et sont membres du comité opérationnel de ce PEPR. À ce titre, le LGP2 participe à des actions de coordination, de recherche et de dissémination à l'échelle nationale et internationale, tout en priorisant l'industrie française du recyclage. Le LGP2 coordonne également le projet ciblé PAC3R (Figure 6) lancé en début de programme, qui vise à améliorer le recyclage et la réutilisation des emballages cellulotiques peu ou pas recyclables. Ce projet ambitionne (i) de développer de nouveaux procédés durables pour améliorer les propriétés des fibres recyclées (upcycling), (ii) de valoriser les rejets solides et liquides issus du procédé de recyclage conventionnel en produits d'intérêts, (iii) de développer de nouveaux procédés pour valoriser les matériaux composites difficiles à recycler et (iv) de fournir une analyse environnementale et sociétale globale des procédés et des nouveaux produits développés.

Durée et moyens

Le projet ciblé PAC3R rassemble **6 partenaires** : LGP2 à Grenoble, Rapsodee à Albi, CERMAV à Grenoble, CEMEF de Mines Paris, UniLasalle à Beauvais, GEO/MSE/MRI à Saint-Étienne. Il a permis le recrutement de 5 doctorants (2 au LGP2) et 2 postdoctorants (1 au LGP2) qui travaillent sur 5 tâches scientifiques. Le budget du projet est de 2,8 M€, avec une aide allouée de 1,5 M€ sur 48 mois (du 01/06/2023 au 31/05/2027). L'établissement coordinateur est Grenoble INP-UGA, tutelle du LGP2.

¹ Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche

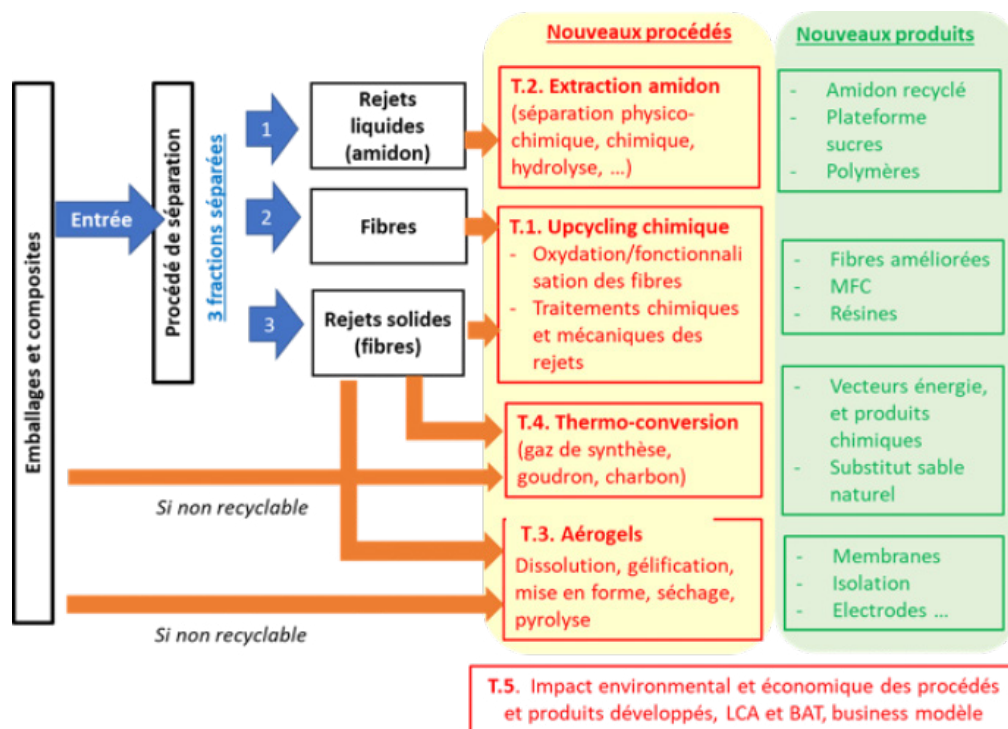


Figure 6. Projet PAC3R – 5 tâches scientifiques

Pertinence / retombées

Le PEPR recyclage est un projet structurant, de grande envergure et très ambitieux. C'est un projet soutenu par une SNA qui permet au LGP2 d'être visible et reconnu pour son expertise à l'échelle du territoire et à l'international. Ce projet permet également au LGP2 de développer de nouveaux partenariats et de travailler sur une thématique de recherche forte, en lien avec les attentes sociétales actuelles.

Le PEPR recyclage a été lancé officiellement le 31 mai 2023. L'axe Papiers-Cartons a ensuite organisé le 30 novembre 2023 une première **journée scientifique ouverte**, à laquelle plus de **90 personnes** (industriels et chercheurs) ont participé. Les actions du PEPR et de l'axe Papiers-Cartons y ont été présentées et une table ronde ayant pour sujet «les verrous et enjeux du recyclage des papiers-cartons» a été organisée (présence d'acteurs du recyclage sur toute la chaîne de valeur : CITEO, Essity, Centre Technique du Papier, DS Smith, L'Oréal).

DOCUMENTS À CONSULTER

- Site web du PEPR Recyclage : <https://www.pepr-recyclage.fr>
- Vidéo de la journée scientifique de l'axe Papiers-Cartons (30 novembre 2023) : https://www.youtube.com/watch?v=0bS_NHSMCjc
- Présentation de l'axe papier carton lors de la journée de lancement du PEPR recyclage, le 23 mai 2023

ÉLÉMENT 5

ÉQUIPES BIOCHIP ET MATBIO

PUBLICATION
COMMUNICATION DANS CONFÉRENCE

Compréhension des phénomènes physiques relatifs à l'apparition de plis générés lors de la fonctionnalisation de surface par enduction des matériaux fibreux de faible grammage

Contexte de publication

La PPFRS (Pulp and Paper Fundamental Research Society), organisation caritative indépendante enregistrée en Grande-Bretagne pour la promotion de la recherche et de l'éducation dans l'industrie de la pâte et du papier, organise tous les quatre ans, alternativement dans les universités d'Oxford et de Cambridge, le «Fundamental Research Symposium», qui compte parmi les principaux événements de recherche et de développement de l'industrie des pâtes et papiers dans le monde.

Proposant des articles classiques et des analyses approfondies de la part de chercheurs de premier plan, **ce symposium de recherche fondamentale** constitue un forum précieux et une collection de recherches sur les pâtes et papiers depuis 1957. Il s'adresse aussi bien au monde académique (chercheurs, étudiants) qu'à l'industrie et aux fournisseurs de l'industrie papetière.

Ce symposium traite des sujets suivants :

- La structure et la chimie des fibres et des liaisons dans le matériau fibreux
- Les principes fondamentaux des propriétés de résistance et la mécanique de la formation des structures avancées
- La dynamique de la formation de la feuille, du pressage, du couchage et de l'impression
- Le développement des nano-celluloses et des produits fonctionnels

L'article présenté ici a été publié dans l'acte de congrès du «17th Fundamental Research Symposium» qui s'est tenu à Cambridge en août-septembre 2022 (programme disponible sur le lien : <https://www.ppfrs.org/about-1>). Cet article a également fait l'objet d'une communication orale lors de ce symposium.

Principaux apports de la publication

Lors du couchage des papiers légers avec une sauce de couchage aqueuse, des plis peuvent apparaître sur le système de couchage (Figure 7). Cette étude aborde, d'un point de vue fondamental et théorique, ce phénomène. Sa meilleure compréhension peut permettre de réduire le coût des non-conformités, ainsi que la consommation des matières premières.

Pertinence / retombées

Cette publication est une production représentative du positionnement du LGP2 dans le domaine du **Génie des Procédés Papetiers**, thématique historique de l'unité. Le Génie des Procédés Papetiers est aujourd'hui labellisé comme une discipline rare par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Le LGP2 conduit toujours une **recherche fondamentale et active** dans ce domaine. Cette publication reflète l'expertise mondialement reconnue du LGP2 en Génie Papetier.

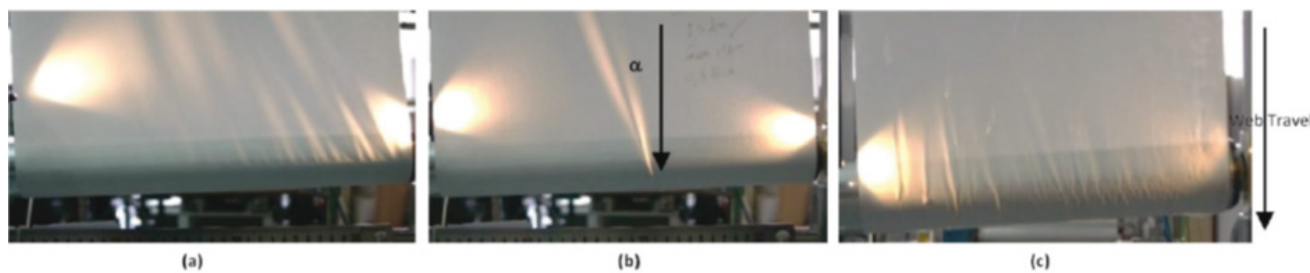


Figure 7. (a) Observation de creux sur la face du papier non couchée; (b) Rides sur la face non couchée; (c) Rides sur la face couchée humide

DOCUMENT À CONSULTER

- Programme du 17th Fundamental Research Symposium : <https://www.ppfrs.org/about-1>
- Le Gallic, F., Teil M., Viguié J., Martin C., Passas R., "Wrinkles formation and origins: from theory of web handling to coating pilot scale experimentation", 17th Fundamental Research Symposium, 2022 : <https://doi.org/10.15376/frc.2022.1.391> [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04418095>]

ÉLÉMENT 6

ÉQUIPE MATBIO
+ PARTICIPATION BIOCHIP ET FUNPRINT

CHAIRE INDUSTRIELLE

La Cellulose Valley, Développement d’emballages en cellulose, performants et recyclables pour remplacer les plastiques

Contexte

Les plastiques ont des propriétés fantastiques pour l'emballage en ce qui concerne leur mise en forme, le contact alimentaire, la transparence ou les barrières aux liquides et aux gaz. Ils sont extrêmement utiles dans notre société pour limiter le gaspillage alimentaire. Malheureusement, leur utilisation généralisée entraîne une augmentation annuelle du nombre de déchets générés mondialement et la gestion de la fin de vie de ces matériaux reste un problème environnemental majeur. Seulement quelque 9 % de ces déchets sont recyclés. Lorsqu'ils ne sont ni collectés ni recyclés, les déchets plastiques sont incinérés ou se retrouvent dans la nature engendrant ainsi des conséquences critiques pour l'environnement.

Cet état des lieux a stimulé l'élaboration de nombreuses réglementations visant à réduire l'utilisation des emballages plastiques et à promouvoir des solutions de remplacement respectueuses de l'environnement. La loi AGECL (Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire), prenant effet en 2020, est une loi française qui repose sur 5 axes pour sortir progressivement du plastique jetable d'ici 2040. Au niveau européen, la loi SUP (Single Use Plastic) ainsi que la directive PPWR (Packaging and Packaging Waste Regulations) ont été adoptées respectivement en 2019 et en 2024 dans la même optique de proposer des solutions plus vertueuses pour l'environnement.

Il est donc urgent de trouver une matière première alternative aux plastiques, et la cellulose apparaît être la meilleure candidate, car elle est biosourcée et disponible en grande quantité, biodégradable dans la nature, recyclable et recyclée. Malheureusement, la cellulose ne possède pas toutes les propriétés adaptées au domaine de l'emballage, comme les propriétés barrières aux gaz et aux liquides ou la mise en forme 3D.

Description

Pour toutes ces raisons, la chaire d'excellence industrielle (hébergée au sein du laboratoire LGP2) La Cellulose Valley a été créée en 2021 pour une durée de 5 ans, en collaboration avec 8 industriels (Marie, Decathlon, Chanel, Ahlstrom, CITEO, DS SMITH, Aptar, Guillin) afin d'approfondir les défis et proposer des alternatives biosourcées aux emballages plastiques (de préférence en cellulose), efficaces et recyclables.

1. La cellulose dans tous ses états : de la tradition à l'innovation

La thématique des emballages cellulosiques performants a permis de combiner les expertises historiques du LGP2 dans le domaine des papiers et cartons aux nouvelles compétences dans le domaine. Elle se décline en projets d'étude sur toutes les formes de cellulose : fibres, nanofibres, gels de cellulose régénérée, dérivés de cellulose, mousses, cellulose thermoformée, airlaid, billes de cellulose, etc.

2. Du traitement de surface...

Une attention particulière a été portée sur les propriétés barrières aux liquides et aux gaz en travaillant sur de nombreuses stratégies d'enduction. En particulier des travaux ont été réalisés sur les couchages de produits naturels : cires, protéines, biopolymères, microfibrilles de cellulose selon divers procédés (couchage lame, slot die, barre, sur pilote, etc.). À côté de la chaire Cellulose Valley, trois projets France Relance et deux thèses CIFRE ont travaillé sur ces thématiques, notamment. De nouveaux procédés de traitement de surface comme le spray ou l'ALD (Atomic Layer Deposition) ont également été testés, au sein de la chaire et d'une thèse ADEME avec la start-up Cilkoa.

3. ... aux objets 3D

Parallèlement, la problématique de la mise en forme 3D de la cellulose a été explorée. Comme le décrit une récente revue, l'intérêt pour la cellulose moulée a augmenté de façon exponentielle grâce à de nouvelles adaptations de matières premières et de procédés. De nombreux brevets sur la production d'emballages à base de cellulose existent et de plus en plus de recherches se concentrent sur l'adaptation de la cellulose à des procédés issus du monde du plastique. Par exemple, une thèse (qui se poursuit par un projet de valorisation dans le cadre du Pôle Universitaire de l'Innovation) se focalise sur l'injection de la cellulose. Une autre thèse de la chaire travaille sur les nouveaux procédés de mise en forme de la cellulose en voie sèche, pendant que d'autres travaux se concentrent sur l'impression 3D de pâtes cellulosiques.

Durée et autres projets connexes

- Projet Chaire Cellulose Valley Jan 2022 – Sept. 2026
- Projet Twilight & Injectose Sept 2021 – Déc. 2026
- Projet UniPak Févr. 2023 – Déc. 2026
- Projet C-Five Oct. 2023 – Sept. 2026
- Projet Barbara Oct 2023 – Sept. 2026

Pertinence / retombées

Une spécificité de cette thématique est le fort lien avec les attentes sociétales et industrielles. Chaque projet est en forte connexion avec un ou plusieurs partenaires industriels. Plusieurs transferts technologiques (par ex. Injectose ou Cilkoa) et de nombreuses actions vers la société ont été réalisées dans ce contexte. Dans le cadre de la chaire, des preuves de concept d'emballages biosourcés sont mises au point tous les ans pour permettre aux partenaires industriels un transfert technologique vers une échelle pilote. Des actions de diffusion du savoir autour des problématiques sur la transition vers des emballages durables ont été concrétisées (création d'un jeu sérieux, par exemple).



Figure 8.

DOCUMENTS À CONSULTER

- Review 3D : Freville, E., Pescheux-Sergienko, J., Mujica, R., Rey, C., Bras, J., Novel technologies for producing tridimensional cellulosic materials for packaging: A review, Carbohydrate Polymers, Volume 342, 2024, 122413, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122413> [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04961498>]
- Vidéo Chaire cellulose Valley : <https://www.youtube.com/watch?v=drd67CXXH-tc>
- Lien site internet et preuve de concept : <https://fondation-grenoble-inp.fr/nos-actions/cellulose-valley/>
- Lien vers mid-term report : https://fondation-grenoble-inp.fr/wp-content/uploads/2022/05/Reducit-mid-term-rapport_Cellulose_Valley_diffusion-externe.pdf

ÉLÉMENT 7

ÉQUIPE MATBIO

PROJET ANR

Développement de mousses lignocellulosiques recyclables et biodégradables pour remplacer les matériaux pétro-sourcés dans les domaines de l'emballage et des produits d'hygiène

Contexte

Chaque année, environ 24 millions de tonnes de plastique finissent dans la nature, soit 32 % de la production mondiale annuelle. Les plastiques pétro-sourcés utilisés pour les emballages et les produits à usage unique représentent 40 % de la consommation totale. Face à l'urgence environnementale, les matériaux fibreux lignocellulosiques, biosourcés, recyclables et biodégradables, apparaissent comme une alternative prometteuse. Dans cette perspective, l'équipe MatBio développe des mousses de fibres lignocellulosiques à très faible densité pour remplacer les plastiques pétro-sourcés dans deux applications importantes :

- **Les produits de calage** pour emballages, encore majoritairement fabriqués à partir de matériaux pétro-sourcés (polystyrène, polyéthylène, polypropylène expansé ou polyuréthane).
- **Les serviettes menstruelles**, qui contiennent jusqu'à 50 % de matériaux pétro-sourcés, dont des super-absorbants (SAP's, polyacrylates de sodium en général) parmi les plastiques les plus lents à se dégrader lorsqu'ils se retrouvent dans la nature ou les océans.

Description

Les mousses de fibres celluloses sont obtenues par un procédé simple consistant à agiter une suspension fibreuse en présence d'un tensioactif afin de former une mousse liquide, qui est ensuite drainée et séchée. La structure cohésive et très peu dense ($20\text{-}60\text{ kg/m}^3$) de la mousse solide obtenue la rend particulièrement adaptée à l'absorption et la dissipation d'énergie mécanique. La structure ultra-poreuse (porosité $> 96\%$) peut également être mise à profit pour l'absorption et la rétention de liquides. Les performances de la mousse solide sont principalement déterminées par sa densité, son homogénéité, la taille et la distribution des pores, ainsi que la cohésion du réseau fibreux formé. Ces propriétés résultent des paramètres des procédés : la quantité de tensioactif, le temps et la vitesse d'agitation, ainsi que la concentration de la pâte qui influencent la stabilité de la mousse liquide et son retrait au séchage, ainsi que des paramètres matériaux : la composition chimique des fibres (teneur en lignine), leur nature (résineux, feuillus ou plantes annuelles) et leur morphologie.

Projet StoroCell

Le projet StoroCell a permis de réaliser des mousses à partir d'une large gamme de pâtes à papier et d'optimiser leurs propriétés pour les applications de calage. Ces matériaux ont été principalement évalués en compression quasi-statique, afin de mesurer leur résistance mécanique, leur capacité d'absorption d'énergie et leur résilience. Bien que leurs performances ne rivalisent pas encore avec celles des matériaux de calage pétro-sourcés existants, leur faible coût, leur procédé de fabrication simple et leur caractère 100 % biosourcé, recyclable et biodégradable en font une alternative prometteuse.

Projet Biopad

Le projet Biopad a démontré la faisabilité de l'utilisation de mousses lignocellulosiques, en particulier celles issues de fibres de plantes annuelles, pour l'absorption et la rétention des liquides. Les études menées ont révélé que la présence de lignine dans les fibres favorise une porosité élevée et limite l'effondrement de la structure lors de l'absorption d'eau. La mousse de fibres de bambou (riches en lignine) a montré une capacité d'absorption surpassant celles des pads commerciaux. Toutefois, sa capacité de rétention reste à améliorer. Le raffinage de la pâte et l'ajout de microfibrilles de cellulose pourraient être des solutions en réduisant la taille

des pores et en renforçant les liaisons entre fibres. Ces travaux sont actuellement poursuivis dans le cadre du projet ANR Napkins, lancé en 2024. Ils seront étendus à une plus large gamme de matières premières issues de la biomasse. Grâce à son procédé simple et peu coûteux, cette technologie ouvre la voie à la fabrication locale de serviettes menstruelles 100 % biosourcées et biodégradables, particulièrement adaptées aux pays où ces produits restent difficilement accessibles. Dans cette perspective, le LGP2 a rejoint le consortium international PlantPad, qui vise à développer des solutions absorbantes durables à partir de ressources locales.

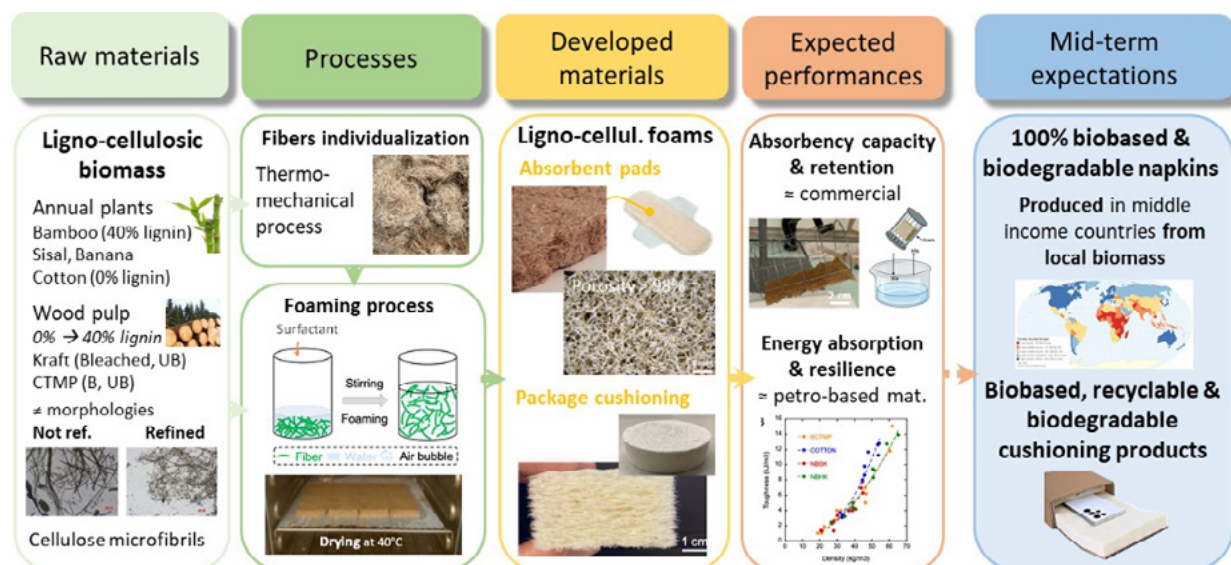


Figure 9. Développement du projet Biopad

Durée et collaborations, projets associés

- Projet StoroCell Sept. 2022 – Août 2024
- Projet BioPad Févr. 2022 – Août 2023
- Intégration dans le consortium international PlantPad "to develop and deploy materials for sustainable menstrual pad : <https://www.plantpad.org/consortium>.
- Projet ANR Napkins lancé en 2024, coordonné par le LGP2 et regroupant 3 autres laboratoires français : le LERMAB, le CEMEF et le 3SR : <https://anr.fr/Projet-ANR-24-CE43-6826>

DOCUMENTS À CONSULTER

- Deville, M., Marietti, N., Viguié, J., Sillard, C., Charlier, Q. (2024). « Liquid Absorbent Bamboo Fiber Foams : Towards 100% Ligno-cellulosic Menstrual Absorbent Pads. » BioResources, 19(4). <https://doi.org/10.15376/biores.19.4.9036-9048> [<https://hal.science/hal-04772488>]
- Sillard, C., Marietti, N., Deville, M., Cossus, L., Viguié, J. Development of 100% bio based and biodegradable women's sanitary napkins from lignin rich fibers. EPNOE Conference 2023 : <https://www.tugraz.at/events/epnoe2023/home/> [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04388450>]

ÉLÉMENT 8

ÉQUIPE MATBIO

PROJET ANR JEUNE CHERCHEUR

Mise en forme en voie sèche de matériaux lignocellulosiques

Contexte

Un des axes thématiques de l'activité de l'équipe MatBio concerne **les méthodes de mise en forme en voie sèche pour la fabrication de matériaux lignocellulosiques**. La période couverte par l'évaluation a été riche sur ce sujet, incluant des projets portant sur l'utilisation de procédés traditionnels, innovants et de rupture.

Les matériaux à base de matières premières lignocellulosiques les plus courants sont généralement obtenus en voie humide. C'est le cas par exemple des papiers et cartons, pour lesquels la fabrication requiert de mettre les fibres en suspension dans l'eau afin de les redistribuer en un matelas fibreux homogène, puis ensuite d'évacuer cette eau (successivement par égouttage, pressage et séchage). En conséquence, leur fabrication est coûteuse en énergie (2,9 MWh par tonne de papier) et en eau (15-25 m³/tonne). Pour ces matériaux, l'obtention en voie humide est néanmoins indispensable puisque c'est le retrait de l'eau lors du séchage qui, par l'intermédiaire des forces de capillarité créées par ce retrait, permet la mise en place d'un contact intime des fibres cellulosiques et conduit au développement des propriétés mécaniques du réseau fibreux. Compte tenu du contexte environnemental ainsi que des enjeux de demain, il semble intéressant de se pencher sur d'autres stratégies de mise en forme de la biomasse mettant en jeu une moindre quantité d'eau et d'énergie.

Description

Au sein de l'équipe MatBio, les **procédés en voie sèche** sont définis comme **l'ensemble des méthodes permettant la mise en forme ou la transformation de matériaux sans ajout d'eau**, par opposition à la voie humide historiquement utilisée par les procédés papetiers. La motivation principale est d'aboutir à la fabrication de matériaux biosourcés performants et à impact environnemental réduit. Les principaux procédés au cœur de cette thématique sont le **moulage par compression ultrasonore** (UCM), le **soudage par ultrasons** (US), la thermocompression (TCM), et le dry molded fiber (DMF).

Le **soudage US** est un procédé permettant d'assembler des matériaux par l'application d'une vibration acoustique haute-fréquence sous contrainte. Depuis 2013, plusieurs travaux portés par des acteurs de la recherche grenobloise (LGP2, 3SR, CTP, FCBA) se sont concentrés sur l'utilisation de ce procédé, principalement pour l'assemblage des papiers-cartons sans ajout d'adhésif. Son utilisation pour les papiers-cartons est innovante et présente un clair potentiel. L'**UCM** est un procédé de rupture, dérivé du soudage US et inspiré du frittage, qui consiste à former des matériaux par soudage de bioéléments comprimés dont l'échauffement résulte de frottements inter-particules et de dissipations visqueuses.

Activités autour l'axe thématique

L'ensemble des différents projets de recherche autour de la thématique sur la période évaluée est présenté en Figure 10, incluant le financement d'une presse à ultra-sons pour le LGP2, 2 thèses (M. David, A. Julien), 1 mission d'ingénieur de recherche (L. Caban), 2 postdoctorats (C. Monot, Q. Charlier) et des stages. Dans ces différents projets sont impliqués des chercheurs permanents de l'équipe MatBio (Q. Charlier, J. Viguié, J. Bras, M. Quesada-Salas) en collaboration avec d'autres chercheurs du LGP2, du 3SR, ainsi que des ingénieurs et chefs de projets des centres technologiques CTP et FCBA.

La Chaire Cellulose Valley intègre également cet axe thématique avec les travaux de thèse de M. Bernard-Catinat qui s'intéressent à la mise en forme 3D de matériaux cellulosiques par DMF.

Années	Projet	Intitulé	Budget	Partenaires
2018-2021	ANR PRCE : Ultracell	Soudage ultra-sons des papiers et nanocelluloses	494 k€, 2 postdocs, 12 - 30 mois	CTP, 3SR, Sonimat
2022-2025	Bourse ADR : BioCompUS	Élaboration de matériaux biosourcés par compression ultrasonore	1 thèse	
2022-2023	Carnot Polynat : Ultrabois	Soudage du bois par ultra-sons	90 k€, 2 stages	CTP, FCBA
2022	G-INP AAP Équipement	Achat presse à ultra-sons	25 k€	
2023-2027	ANR JCJC : DRYBIOMAT	Développement de procédés de mise en forme en voie sèche pour la fabrication de matériaux biosourcés à empreinte environnementale diminuée	242 k€, 1 thèse 2 stages	3SR
2024	Carnot Polynat : Mwoolding-0	Matériaux lignocellulosiques à formes complexes obtenus par moulage en voie sèche	15 k€ 1 stage	FCBA
2024-25	Carnot Polynat : BoardToComp	Du réseau fibreux au matériau composite : renforcement des cartons plats et des boîtes pliantes par compression ultrasonore	100 k€ 1 IR, 12 mois	CTP, 3SR

Figure 10 : Résumé des projets de recherche actuels et terminés autour de l'axe thématique Mise en forme en voie sèche de matériaux lignocellulosiques

Projet ANR JCJC DRYBIOMAT (2023-2027)

Ce projet a pour objectif d'aboutir à la fabrication de matériaux biosourcés performants, économes en énergie et en coût, durables, économiquement viables et transposables à l'échelle industrielle via deux procédés en voie sèche (UCM et TCM). DRYBIOMAT est construit en quatre axes de recherche : (i) le développement de procédés à l'échelle laboratoire adaptés aux spécificités de la biomasse; (ii) l'évaluation de la capacité des bioressources à être mises en forme en voie sèche; (iii) l'étude des mécanismes d'adhésion conduisant à la formation des matériaux; (iv) la caractérisation des matériaux biosourcés obtenus et l'analyse de leurs performances au regard de leur empreinte environnementale. DRYBIOMAT a pour ambition de prouver l'existence de méthodes alternatives pour produire des matériaux depuis la biomasse et d'accélérer le développement de solutions durables en ingénierie.

Projet Carnot PolyNat : BoardToComp (2024-2025)

Ce projet a pour objectif d'utiliser les procédés de compression ultrasonore et de thermocompression sur des cartons plats pour densifier localement ou entièrement le réseau fibreux afin d'en améliorer les propriétés mécaniques en créant des structures type composite (matrice/fibre). Les cartons plats, matériaux commercialisés et disponibles, possèdent une quantité élevée de pâte mécanique, contenant lignines et hémicelluloses dans les couches centrales. Ces composés, mis sous contrainte avec apport de chaleur, sont capables de fluer pour former l'équivalent d'une matrice autour des fibres de cellulose, générant ainsi une structure composite. Les enjeux principaux sont donc de vérifier s'il est possible de fabriquer des matériaux composites à partir des cartons plats et si les structures obtenues conduisent à des propriétés mécaniques équivalentes pour des grammages plus faibles.

DOCUMENTS À CONSULTER

- Page internet du projet ANR DRYBIOMAT : <https://anr.fr/Projet-ANR-23-CE43-0002>
- Webinaire Carnot Polynat : le collage sans colle : <https://www.youtube.com/watch?v=hh7QzPmQWFs>

ÉLÉMENT 9

ÉQUIPE MATBIO

PUBLICATION
COLLABORATION INTERNATIONALE

Bionanocomposite, Films à gradient de composition pour des actionneurs sensibles à des stimuli obtenus par co-précipitation interfaciale

Contexte

Les matériaux sensibles aux stimuli présentent un fort potentiel dans des domaines tels que les actionneurs biomimétiques, les muscles artificiels et la robotique, en raison de leurs actions programmables en réponse à divers stimuli. Ces stimuli externes peuvent être la température, la lumière, le pH, l'humidité, la force ionique ou un champ magnétique. Les matériaux stimuli-réactifs à base de polymères flexibles sont capables de changer de forme, de taille et de position. La déformation des actionneurs polymères est générée par une structure hétérogène préprogrammée. Il peut s'agir d'une structure à double couche, une distribution graduelle de composants, des gradients de vides, etc. L'assemblage couche par couche, la sédimentation par gravité, et l'induction de champ électrique sont utilisés pour construire des structures anisotropes à l'intérieur du matériau.

Cependant, la lourdeur du processus de mise en œuvre, le risque de délamination dû à une mauvaise liaison et les propriétés mécaniques médiocres limitent l'application de ces techniques.

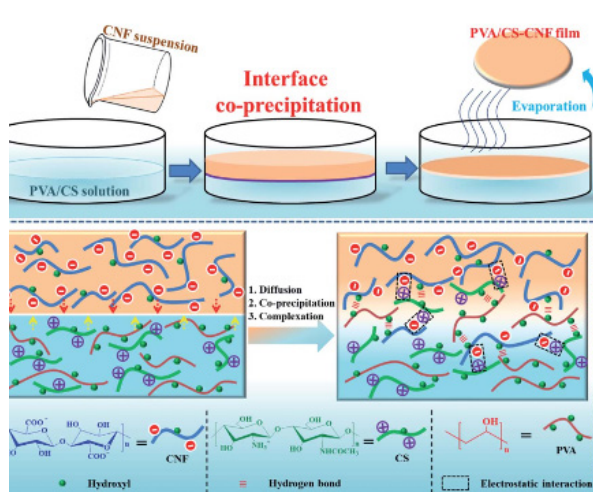


Figure 11.

Description, originalité, retombées

Nous avons proposé une méthode simple et efficace de co-précipitation interfaciale pour préparer des actionneurs composites à gradient de polymères basés sur des polysaccharides naturels. Le processus de co-précipitation a été induit de manière innovante à l'interface entre une solution d'alcool polyvinylique et de chitosane et une suspension de nanofibrilles de cellulose (CNFs) oxydées. Le processus de diffusion mutuelle des deux systèmes, en particulier la diffusion des ions H^+ et OH^- , détruit leur stabilité respective, assurant ainsi l'apparition de la co-précipitation interfaciale.

Les films composites préparés peuvent subir une déformation rapide avec une grande courbure sous l'effet de l'eau. Ils peuvent être déformés de manière cyclique en étant alternativement immergés dans l'eau et dans une solution saline. Ces films présentent également d'excellentes propriétés mécaniques, en termes de résistance mécanique et de ténacité. Plus intéressant encore, le rétrécissement induit par le séchage provoque l'alignement des CNFs, ce qui confère aux films composites la capacité de se déformer en une forme tridimensionnelle complexe.

Cette méthode de co-précipitation interfaciale facile à mettre en œuvre ouvre de nouvelles perspectives pour les actionneurs polymères flexibles basés sur des polysaccharides naturels et devrait promouvoir leur application dans le domaine des actionneurs intelligents.

Collaboration

School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, P.R. China

China Scholarship Council - Co-supervision de thèse de B. Huang (CSC, grant no. 202006150056)
Oct. 2020 – Mars 2022

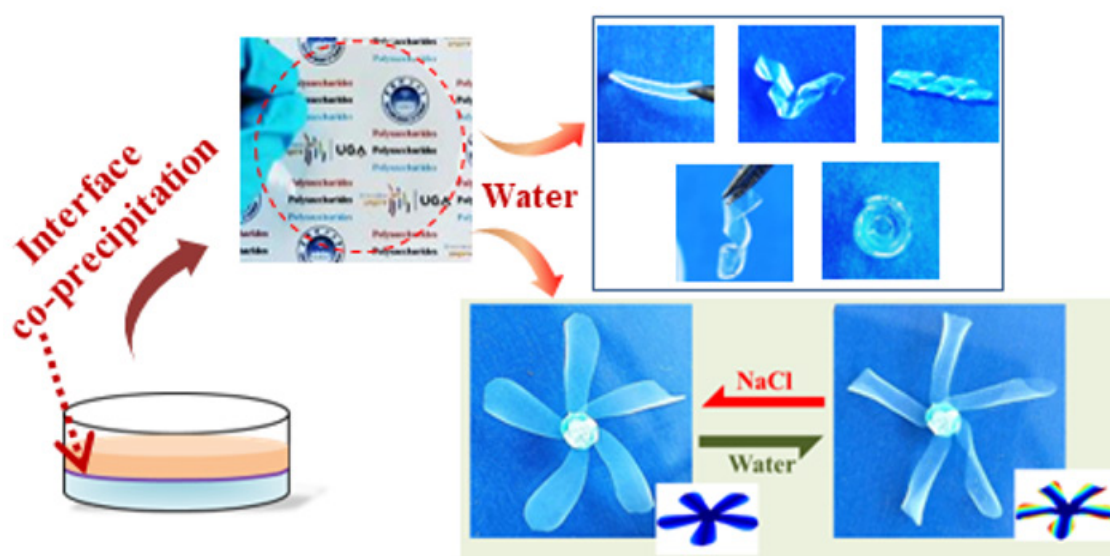


Figure 12.

DOCUMENTS À CONSULTER

- Huang, B., Zhu, G., Wang, S., Li, Q., Viguié, J., He, H., Dufresne, A. (2021). « A gradient poly(vinyl alcohol)/polysaccharide composite film towards robust and fast stimuli-responsive actuators by interface co-precipitation. » *Journal of Materials Chemistry A*, 9(40), 22973-22981. : <https://doi.org/10.1039/D1TA06885G> [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04102518>]

Vidéos :

- <https://www.rsc.org/suppdata/d1/ta/d1ta06885g/d1ta06885g1.mp4>
- <https://www.rsc.org/suppdata/d1/ta/d1ta06885g/d1ta06885g2.mp4>
- <https://www.rsc.org/suppdata/d1/ta/d1ta06885g/d1ta06885g3.mp4>
- <https://www.rsc.org/suppdata/d1/ta/d1ta06885g/d1ta06885g4.mp4>
- <https://www.rsc.org/suppdata/d1/ta/d1ta06885g/d1ta06885g5.mp4>
- <https://www.rsc.org/suppdata/d1/ta/d1ta06885g/d1ta06885g6.mp4>

Fonctionnalisation de la cellulose : applications aux nanocelluloses

Contexte de publication

Dans les années 1960 et 1980, des chercheurs ont produit un nanomatériau nommé nanocellulose. En fonction du prétraitement, deux types de nanocellulose (extraits de la cellulose du bois ou d'autres sources végétales) sont disponibles, à savoir les nanocristaux de cellulose (CNC) et les nanofibrilles de cellulose (CNF), également appelées cellulose nanofibrillée (NFC) ou cellulose microfibrillée (MFC). Les CNC sont obtenus par hydrolyse chimique des régions amorphes de la cellulose, tandis que les CNF sont obtenues en soumettant une suspension de cellulose à un processus mécanique. Cette publication sous forme de revue se concentre sur les nanofibrilles de cellulose. Depuis 2008, les nanofibrilles de cellulose suscitent une attention accrue et constituent désormais une priorité de la bioéconomie européenne. Les CNF ont été décrites dans de nombreux livres et revues (notamment issus du LGP2) et présentent plusieurs propriétés supplémentaires par rapport aux fibres de cellulose, ce qui les rend utiles dans des applications telles que l'emballage, la peinture, l'électronique imprimée, le papier, les composites et la médecine. En effet, comme les CNF ont au moins une dimension nanométrique, elles possèdent une surface spécifique élevée. Les CNF sont transparentes, biocompatibles et présentent des propriétés barrières et mécaniques intéressantes. Malgré la connaissance de ces caractéristiques, leur industrialisation n'a commencé que très récemment grâce à l'amélioration de la consommation énergétique lors du traitement mécanique. Traditionnellement produite à l'aide d'un homogénéisateur, d'un microfluidiseur ou d'un broyeur ultra-fin, la production de CNF consomme une énergie importante. Au cours de la dernière décennie, de nombreuses études ont permis de réduire la consommation d'énergie et de faciliter la nanofibrillation, notamment en travaillant sur la modification chimique des fibres cellulosiques.

Description

De nombreuses techniques de prétraitement chimique ont été rapportées pour modifier les fibres de cellulose, comme l'approche enzymatique, l'oxydation TEMPO, la cationisation ou l'oxydation au périodate. De plus, ces prétraitements ont conduit à des CNF fonctionnalisées présentant diverses propriétés supplémentaires et à des CNF de qualité différente. Le premier objectif de cette revue était de synthétiser les différents prétraitements chimiques des fibres cellulosiques pour optimiser la nanofibrillation, et de les classer selon leur consommation énergétique et leurs qualités CNF évaluées selon les mêmes critères.

Par ailleurs, les nanofibrilles de cellulose sont utilisées dans plusieurs domaines, mais en raison de leur forte hydrophilie et de leur comportement gélifique, leur exploitation reste limitée. Une solution pour augmenter leur compatibilité ou modifier leur comportement est de modifier chimiquement les CNF en postproduction. Grâce au greffage chimique ou à l'adsorption, l'hydrophilie peut être réduite et de nouvelles propriétés peuvent être conférées afin d'élargir la gamme d'applications des CNF. Ainsi, le deuxième objectif de cette revue a été de fournir un rapport détaillé de la modification du CNF par adsorption et greffage moléculaire et polymère.

Pertinence / Retombées

Cette revue s'est appuyée sur une longue expertise du domaine de la fonctionnalisation de la cellulose au sein de l'équipe. Les co-auteurs ont été invités dans ce journal à fort IF (IF=26). Elle a été citée environ 700 fois et de nouvelles thèses se sont lancées en s'appuyant sur cette expertise. Par exemple, la thèse de L. Douard sur la fonctionnalisation par les solvants eutectiques profonds, la thèse de M. Le Gars sur la fonctionnalisation des nanocristaux de cellulose, la thèse de J. Pescheux-Sergienko sur l'utilisation de la mécano-chimie.

Une conférence sur le domaine (titre : Cellulose Chemistry for Renewable Materials) a été proposée à l'académie des sciences en 2024, en l'honneur du prix de l'académie des sciences reçu par un des auteurs.

Les chercheurs de l'équipe MatBio sont reconnus mondialement par la communauté pour leurs travaux sur la production, la fonctionnalisation et l'utilisation des nanocelluloses, comme en attestent les prix et reconnaissances obtenus au cours de ces six dernières années.

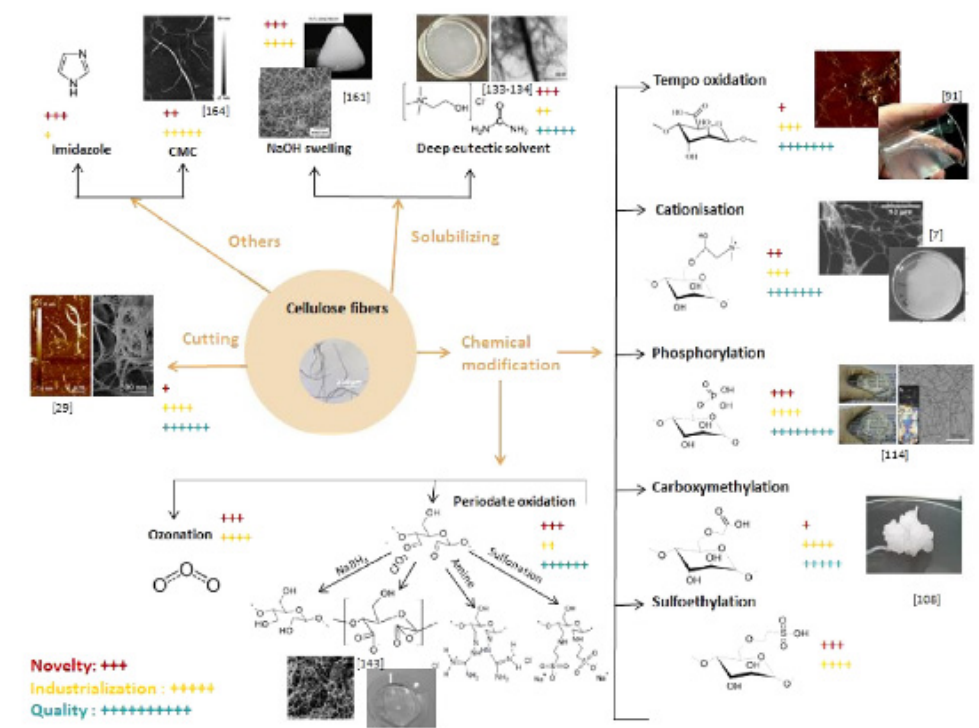


Figure 13.

DOCUMENTS À CONSULTER

- Rol, F., Belgacem, M. N., Gandini, A., Bras, J., Recent advances in surface-modified cellulose nanofibrils, Progress in Polymer Science, Volume 88, 2019, Pages 241-264, ISSN 0079-6700 : <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.09.002> [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04106077>] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670018300327>

Structuration des papiers et cartons par impression : une approche bio-inspirée pour réduire la consommation d'énergie et de ressources naturelles

Contexte

La réduction de l'empreinte écologique des matériaux dans les domaines de l'emballage, de l'hygiène, des transports ou de l'habitat nécessite le développement d'alternatives aux plastiques, tout en diminuant la consommation de ressources et d'énergie. Dans ce contexte, le papier s'impose comme une alternative biosourcée, recyclable et biodégradable particulièrement prometteuse. On estime que la demande de papier pourrait doubler au cours des trente prochaines années. Pour répondre à cette demande croissante tout en limitant son impact environnemental, il est indispensable de réduire la consommation d'énergie (4 à 6 MWh par tonne de papier) et de ressources naturelles (3 à 6 tonnes de bois et 10 à 17 m³ d'eau par tonne de papier) nécessaires à sa production. Depuis plusieurs années, le LGP2 travaille au développement de solutions innovantes, bio-inspirées et économiquement accessibles pour réduire l'utilisation des ressources naturelles et les coûts énergétiques. Ces solutions consistent à alléger les papiers-cartons d'emballage ou à réaliser des structures en papier aux propriétés nouvelles sans procédé électromécanique, en s'appuyant notamment sur le dépôt de matière par procédés d'impression.

Description, originalité, retombées

L'un des leviers pour alléger les papiers-cartons d'emballage est d'augmenter leur rigidité à la flexion. Cette propriété est essentielle pour conférer aux parois des emballages la résistance au flambement nécessaire pour résister aux sollicitations auxquelles elles sont soumises lors des opérations de stockage, transport et distribution des produits (en étuis, caisses cartons ou sachets papier). Une solution pour accroître la rigidité à la flexion d'une structure plane est d'augmenter le moment quadratique de la section par formation d'un réseau de « nervures » en surface ou par structuration géométrique 3D. Ces structures sont largement présentes dans la nature et utilisées par l'homme dans la construction ou les transports.

(i) Des travaux réalisés en 2021 au LGP2 ont montré que l'impression en FDM de nervures en PLA à la surface d'un carton plat permettait de réduire de l'ordre de 30 % le poids des boîtes d'emballage¹, notamment lorsque les panneaux étaient imprimés à l'intérieur et les boîtes exposées à l'humidité (85 % HR). Les travaux sont actuellement poursuivis dans le cadre du projet LéGP2 (thèse de M. Legay) pour une application aux caisses en carton ondulé.

(ii) En parallèle, des travaux réalisés en collaboration avec le CTP ont permis d'élaborer des papiers architecturés par impression en sérigraphie de motifs à partir d'une solution aqueuse d'amidon² ou de microfibrilles de cellulose. L'amidon est très utilisé en papeterie. Il est biosourcé, biodégradable, très peu cher et disponible en quantité. Le gain de rigidité obtenu permet d'envisager un allègement également de l'ordre de 30 %. Les travaux menés actuellement dans le cadre de la thèse de C. Turpin en collaboration avec le 3SR permettent de mieux maîtriser les phénomènes à l'origine de la génération du relief 3D structuré. Ils permettront à très court terme d'étendre l'utilisation du procédé à une large gamme de papiers-cartons (sachets, étuis, gobelets, etc.).

¹ Bonnet, N., Viguié, J., Beneventi, D., & Chaussy, D. (2023). Reinforcing folding board boxes by printing a PLA patterned grid on their panels: A new approach for lightweighting stiff packaging. *Packaging Technology and Science*, 36(3), 211-218.

² Viguié, J., Thalhoffer, R., Gourgeon, W., Crowther-Alwyn, L., Lamontagne, K., Abderrahmen, R., ... & Guérin, D. (2021). Forming architected paper by printing a starch patterned grid: a new low-cost approach for lightweighting packaging. *Cellulose*, 28(10), 6607-6617.

(iii) Enfin, d'autres travaux ont montré qu'il était possible d'obtenir une courbure locale marquée en déposant par impression à la surface d'un papier une quantité contrôlée d'hydrogels à base de nanocristaux de cellulose. Les phénomènes observés dépendent du retrait au séchage du gel induisant une déformation locale du support papier. Ces résultats tout à fait inédits obtenus dans le cadre de la thèse de L. Oudinot permettent d'envisager le développement d'un nouveau procédé d'auto-plier des papiers pour obtenir de nouvelles structures architecturées 3D biosourcées. Ce procédé d'impression 4D autoriserait par exemple la réalisation aisée d'âmes pliées complexes pour structures sandwich, difficilement réalisables à l'échelle industrielle.

Ces approches permettent de combiner les compétences du laboratoire en élaboration de matériaux biosourcés avec celles en procédés d'impression. Le tout s'articule autour d'un enjeu majeur : la réduction de l'utilisation des ressources et de la consommation d'énergie.

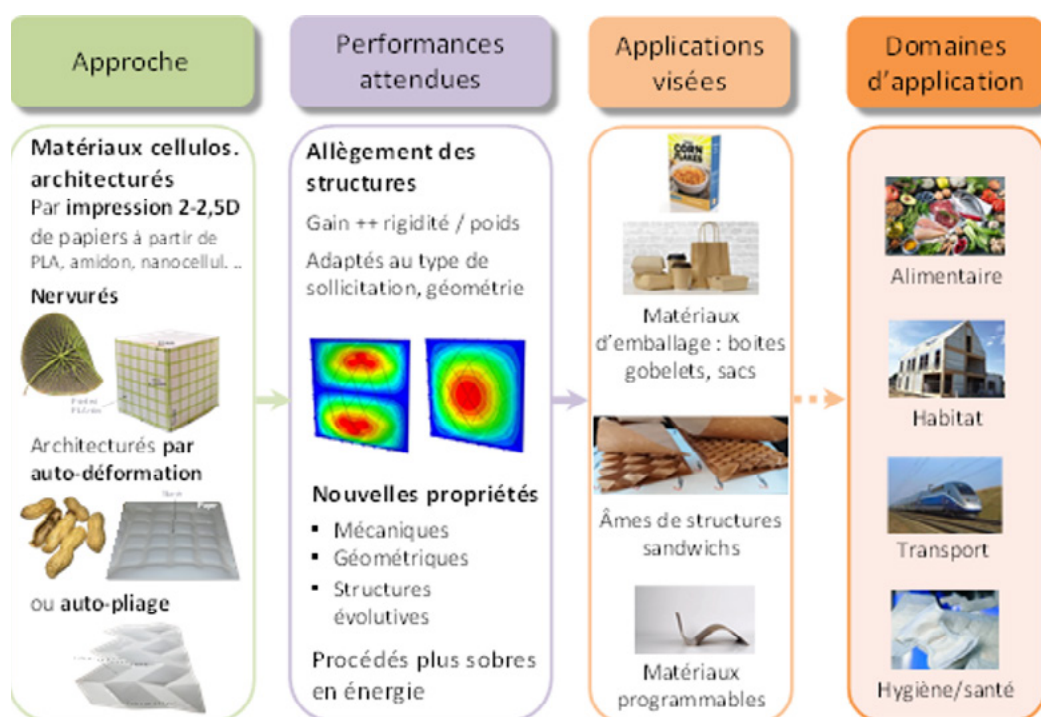


Figure 14.

Durée et collaborations, projets associés

- Projet Print&Fold Oct. 2022 – Sept 2025
- Projet ArchiPop Févr. 2023 – Jan 2026
- Projet LéGP2 Oct. 2023 – Sept 2026
- Projet RESIST3 Nov. 2023 – Mai 2025

DOCUMENTS À CONSULTER

- Publication : Viguié, J., Thalhofer, R., Gourgeon, ... , Guérin, D. (2021). "Forming architected paper by printing a starch patterned grid: a new low-cost approach for lightweighting packaging". *Cellulose*, 28(10), 6607-6617., <http://doi.org/10.1007/s10570-021-03933-4> [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03602864>]
- Prix : 3^e Prix du BIOMIM'CHALLENGE 2024 du salon du Biomimétisme et des Innovations Bio-inspirés avec le projet LéGP2 "Lightweighting paper & board by printing: a bio-inspired approach to save water, energy & natural resources".

ÉLÉMENT 12

ÉQUIPE FUNPRINT

TRANSFERT / VALORISATION

Formulation de fluides complexes pour l'industrie, application aux encres

Contexte

L'activité de l'équipe FunPrint s'est déclinée autour de la thématique de la formulation de fluides complexes pour l'industrie. La période couverte par l'évaluation a été particulièrement riche sur ce sujet, et un ensemble de projets a été sélectionné pour en illustrer les principaux développements, portant sur des fluides destinés à l'impression graphique durable, l'impression fonctionnelle, notamment l'électronique imprimée et l'impression 3D. Cinq thèses, dont quatre ont été soutenues, deux postdoctorats et sept stages de master sont rattachés à cette thématique durant la période 2019-2024.

IMPRESSION GRAPHIQUE – Projet Latency [2021-24, 36 mois, Thèse CIFRE Tarkett avec collaborations internationales : Centre I-Print, Suisse / Centre ChemStream, Belgium]

Ce projet a étudié les corrélations entre la formulation des fluides aqueux et leur éjectabilité en jet d'encre afin d'améliorer la fiabilité industrielle. Le procédé exige un contrôle strict des paramètres physico-chimiques des encres. Les industriels souhaitant intégrer cette technologie exigent un meilleur contrôle et une plus grande fiabilité de leurs équipements d'impression. Comprendre le lien entre la formulation, les propriétés rhéologiques et physico-chimiques des fluides, et leur comportement lors de la génération de gouttelettes pico-volumétriques (éjection, morphologie des gouttes éjectées, phénomènes de latence, etc.) constitue un enjeu majeur. L'étude des paramètres critiques en mode dynamique (tension superficielle dynamique, cinétique de séchage, paramètre rhéologique, etc.) a constitué une approche originale pour élaborer des modèles de sensibilité des paramètres et d'explicitier davantage les phénomènes de latence, source fréquente de défauts d'impression en milieu industriel.

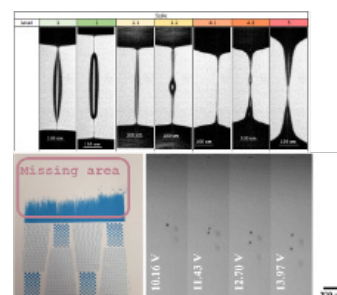


Figure 15.

IMPRESSION FONCTIONNELLE – Projet PolyMED [2022-25, 36 mois, Thèse CIFRE Encres DUBUIT]

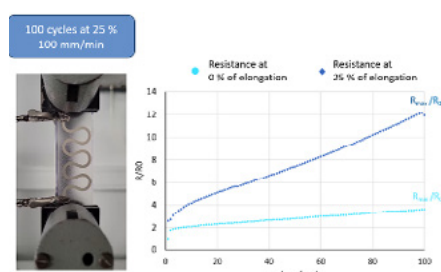


Figure 16.

L'électronique imprimée est un domaine en plein essor, qui exige des encres conductrices dotées de nouvelles propriétés, telles que l'étirabilité pour des applications comme les textiles intelligents ou les patches médicaux conformables. Ces applications requièrent des pistes imprimées capables de résister à des déformations, parfois importantes et répétées. Le défi majeur est de maintenir la percolation du réseau conducteur tout en assurant une adhésion optimale de l'encre lors des déformations des pistes imprimées. Ce projet a adopté une approche innovante en utilisant une matrice cellulosique en milieu aqueux et des particules d'argent comme éléments conducteurs.

IMPRESSION FONCTIONNELLE – Projet E-transparent / Vink-e / Eternité [2019-23, 36+36+18 mois / 2 Thèses + 1 Postdoc.]

S'appuyant sur des travaux antérieurs portant sur le développement d'encres fonctionnelles pour l'impression d'électrodes transparentes, le projet e-Transparent, financé par un PIA IDEX, a approfondi

l'impression de réseaux de nanowires métalliques pour développer des dispositifs antennaires transparents, notamment dipolaires et 5G. Le projet a optimisé les formulations pour améliorer la conductivité électrique des systèmes et conçu les motifs adaptés. Menée dans le cadre d'une thèse, cette première phase a abouti au dépôt d'un brevet et à un programme de valorisation avec la SATT Linksium pour la délivrance de licences (Vink-e). Parallèlement, le projet Eternité (Pack Ambition Recherche de la région AuRA), en collaboration avec le laboratoire LMGP, a permis d'approfondir l'étude des phénomènes de dégradation des réseaux de nanowires et leur optimisation.

IMPRESSION GRAPHIQUE – Projet Bio-4-Inks [2022-26, 48 mois / 1 thèse, 1 Ing. Rech. 24 mois]

Ce projet, financé sur quatre ans par le ministère de la Culture et par CITEO a pour but de formuler des encres 100 % biosourcées. Outre le remplacement des huiles d'origine pétrolière (communément appelées «huiles minérales») par des équivalents biosourcés («huiles végétales»), il s'agit aussi d'identifier des pigments issus de ressources renouvelables susceptibles de se substituer aux pigments pétro-sourcés actuellement utilisés. Le projet a donc pour objectif de formuler des encres ayant un impact réduit sur l'ensemble du cycle de vie de l'imprimé, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au recyclage. Les analyses sont conduites afin de mesurer les éventuels transferts d'impacts vers d'autres étapes de la vie de l'imprimé ou d'autres critères environnementaux.

FABRICATION ADDITIVE 3D – Projet ThermoBioCOMP3D [2021-24, 36+18 mois, Thèse et Postdoc.]

La fabrication additive s'est imposée comme une technologie clé. Parmi les nombreuses techniques qu'elle englobe, l'écriture directe à l'aide d'une encre ou d'une pâte requiert une formulation complexe, nécessitant une expertise avancée. Cette méthode de Liquid Deposition Modelling (LDM) permet d'imprimer divers matériaux sous forme de pâtes rhéofluidifiantes à seuil d'écoulement. Dans un contexte où le développement durable est devenu un enjeu central, le projet ThermoBioComp3D a innové en développant une pâte biosourcée imprimable à base de résine furannique thermosettable et biosourcée, de charges cellulosiques et éventuellement de charges fonctionnelles comme des nanotubes de carbone pour assurer respectivement stabilité, rhéologie optimisée et conductivité électrique. Ces recherches, opérées au cours d'une thèse, ont abouti à un brevet et à un programme de maturation technologique avec la SATT Linksium.



Figure 17.

Pertinence et Retombées

Ces activités positionnent le LGP2 comme un acteur reconnu par les partenaires académiques et industriels pour la conception et l'écoconception de fluides destinés à l'industrie graphique, l'électronique imprimée et la fabrication additive. Elles contribuent également à renforcer l'expertise du laboratoire dans la caractérisation des fluides multi-constituants, dont le comportement rhéologique est complexe et évolutif. Par ailleurs, le LGP2 mène des opérations de transfert technologique afin de favoriser l'industrialisation des innovations développées.

DOCUMENTS À CONSULTER

Brevets

- EP4323460 (A1) - AQUEOUS SUSPENSION AND ASSOCIATED PRINTING INK AND RF PATTERN : https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=1&ND=3&adjacent=true&locale=fr_EP&FT=D&date=20240221&CC=EP&NR=4323460A1&KC=A1
- US2023347584 (A1) - THERMOSETTING COMPOSITE MATERIAL AND ASSOCIATED PRINTING METHOD: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=fr_EP&FT=D&date=20231102&CC=US&NR=2023347584A1&KC=A1

Vidéos

- Webinar - Les encres fonctionnelles biosourcées, Carnot Polynat, 10/03/2022 (~35pers. live + YouTube) <https://www.youtube.com/watch?v=49VczZkJpdM>
- SCIENCE // ExpeLab #3 Les encres conductrices au LGP2, UGA (réseaux sociaux et YouTube, Nov. 2022) <https://www.youtube.com/watch?v=ulqydb7Wd5Y>
- Compilation d'éléments sur les actions de valorisation (Datasheets produits / Flyers décrivant les technologies, Rapport d'activité)

Impression de circuits électroniques 3D avec robot 6 axes

Contexte

Ces dernières années, la plastronique, souvent désignée par l'acronyme 3D-MID (pour Tridimensional Molded Interconnected Device), a suscité un intérêt croissant en tant que technologie visant à intégrer des fonctions électroniques sur des objets thermoplastiques tridimensionnels. Cette technologie combine les avancées de la plasturgie et de la fabrication de circuits électroniques pour concevoir des objets intégrant des fonctionnalités électroniques tout en réduisant significativement le volume, le poids ainsi que le nombre d'étapes nécessaires à leur fabrication et assemblage. Cependant, malgré ces avantages, les technologies plastroniques actuelles présentent des limitations en termes de flexibilité, et notamment des difficultés à intégrer simultanément des circuits électroniques dans la masse et à la surface d'objets 3D. Le LGP2 propose une approche novatrice reposant sur des procédés de fabrication additive utilisant des robots industriels à 6 axes. L'impression robotisée permet de déposer des encres conductrices sur la surface d'objets 3D préexistants tout en rendant possible la fabrication complète d'objets 3D intégrant des circuits électroniques à la fois dans leur masse et sur leur surface. Cette méthode ouvre de nouvelles perspectives pour la conception et la production d'objets fonctionnels, simplifiant le processus de fabrication et permettant la création de dispositifs aux géométries innovantes et complexes.

Description

Les activités de recherche sur cette thématique se sont structurées autour de trois projets majeurs :

- **La Chaire d'Excellence Industrielle MINT – Innovating for molded and printed electronics** (2016-2022, portée par la Fondation Grenoble INP et avec pour mécène Schneider Electric), dédiée à l'étude des procédés d'impression de pistes conductrices et à la modélisation de dispositifs radiofréquence imprimés sur des substrats 3D (Figure 18.a)
- **Le projet 3DPapEI** (2018-2022, Région AuRa Pack Ambition Recherche), visant à développer un procédé de fabrication additive permettant l'impression de circuits électroniques sur des substrats 3D génériques grâce à l'utilisation de robots 6 axes (Figure 18.b)
- **Le projet FlexFab IOT3D** (2021-2023 (Région AuRa Booster), orienté vers le développement d'un procédé complet de fabrication d'objets 3D intégrant des circuits de type PCB en surface (Figure 18.b-c).

Pertinence /Retombées

Les compétences développées au LGP2 dans le cadre de cette activité s'inscrivent pleinement dans la thématique de l'électronique 3D et des procédés de fabrication additive multi-matériaux. En particulier, de nouvelles expertises en automatisation, en robotique industrielle et en conception/assemblage d'imprimantes à 6 axes ont permis d'élargir le champ de recherche du LGP2 à des domaines d'application qui, jusqu'à présent, étaient en dehors de son périmètre d'expertise. Ces projets ont permis de développer des compétences clés de manière transversale, notamment dans la conception, la modélisation et la fabrication de dispositifs 3D. Ils ont également conduit à l'élaboration d'un nouveau procédé de fabrication additive multi-matériaux, intégrant une cellule robotique à 6 axes ainsi que des applications logicielles innovantes pour la génération du code de fabrication

Les applications logicielles et la cellule robotique ont été sélectionnées et seront répliquées pour créer une imprimante 3D à 6 axes, destinée à une plateforme expérimentale. Cette dernière aura pour objectif d'explorer

l'utilisation du machine learning afin d'optimiser le procédé d'impression 3D dans le cadre du PEPR DIADEM et du projet ADAM.

À ce jour, les résultats de ces recherches ont été valorisés de plusieurs manières : la publication de 5 articles scientifiques, 1 brevet, la participation à 5 conférences internationales, 1 projet de préparation à la maturation (OutOfLabs Linksiium) et l'introduction des procédés d'impression 6 axes dans le programme d'un nouveau parcours international de Master en électronique imprimée (Master e-PEPS) au sein de Grenoble INP - Pagora.

Par ailleurs, plusieurs échanges sont en cours avec des instituts académiques pour développer des projets de recherche axés sur l'utilisation de la fabrication additive à 6 axes. Ces partenariats incluent le Politecnico di Torino (Italie), l'Université de Yamagata (Japon), la Simon Fraser University (Canada) et l'Université de Nantes.

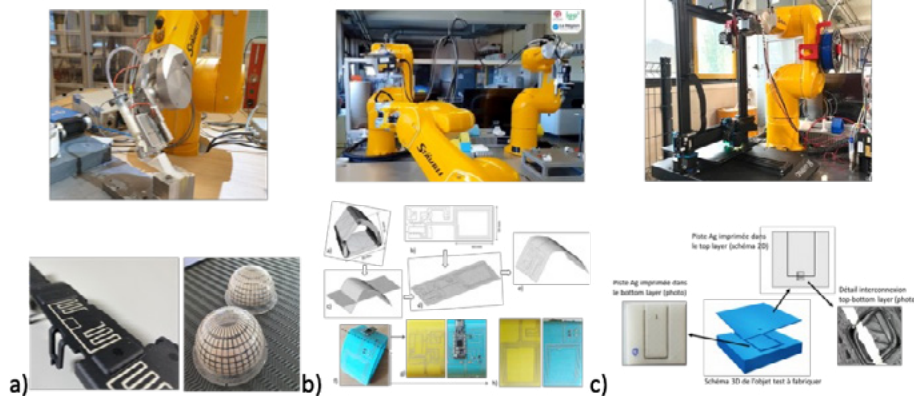


Figure 18. a) Impression d'antennes sur substrats 3D par apprentissage direct des trajectoires.

b) ligne robotisée et approche utilisés pour la génération des trajectoires de fabrication.

c) Couplage du procédé d'impression 3D FDM avec le dépôt de pistes conductrices avec robot 6 axes pour l'intégration de circuits dans la masse d'objets 3D.

DOCUMENTS À CONSULTER

Article Scientifique

- Beneventi D. et al. Optimization of trajectory processing algorithms to print 3D circuit boards using piezo ink jet and 6-axis robots. J. Manuf. Process. 101, 1497–1507 (2023) : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.020> [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04294566>]

Vidéos illustrant les développements :

- 1 - Vidéo présentation de la Chaire MINT (duo Schneider Electric) et perspective de création du Master : <https://www.youtube.com/watch?v=uDhmYWDz23M> (17 mai 2022)
- 2 - Vidéo présentation des technologies développées dans le cadre de la Chaire MINT : <https://www.youtube.com/watch?v=7419ZBq1ICI> (17 mai 2022)
- 3 - Programmation offline : génération des trajectoires et simulation offline du procédé d'impression sur calotte sphérique : <https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/NvDBtQdwlvsZM2Z>
- 4(a) - Intégration procédé 1 : impression de pistes en Ag pour PCB 3D par jetting sur calotte en ABS : <https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/OgXEWXNo56tvvhv>
- 4(b) - Intégration procédé 2 : placement de composants électroniques de surface sur substrat 3D en ABS imprimé <https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/67IWldreVZprLKV>
- 3 - Procédé complet pour la fabrication d'un PCB 3D - Intégration du procédé d'impression 3D FDM et logiciel de slicing 2D et 2.5D : <https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/ltuMjuzRbIRvCf4>

Plaquette Master 2 e-PEPS

- Site internet : <https://pagora.grenoble-inp.fr/en/education/master-sustainable-printed-and-integrated-electronics>

Fin de vie des dispositifs électroniques imprimés sur papier : recyclage et valorisation des matériaux biosourcés et des encres fonctionnelles

Contexte

Les dispositifs électroniques imprimés sur des substrats cellulosiques se développent rapidement. Ces produits peuvent se trouver sur les emballages, les magazines ou les étiquettes et, après utilisation, ils sont éventuellement éliminés dans le cadre d'un tri sélectif conventionnel. Ces dispositifs électroniques sont constitués à plus de 90 % de cellulose, une bioressource naturelle et renouvelable, qui est également bon marché et recyclable. Cependant, ils contiennent également des encres fonctionnelles à base de métaux nobles conducteurs, des polymères conducteurs ou isolants et des composants issus du silicium.

Dans le contexte de la croissance de la production de ces dispositifs, de nouvelles questions se posent concernant la fin de vie de ces produits et en particulier leur recyclabilité et leur impact sur l'environnement et la santé. Les objectifs des travaux de recherche sont de :

- (i) développer des processus de recyclage éco-efficaces pour séparer sélectivement tous les matériaux récupérés (fibres cellulosiques et composants d'encre à valeur ajoutée),
- (ii) quantifier les matériaux récupérés afin d'évaluer leur impact environnemental sur les rejets solides et liquides,
- (iii) valoriser et de réutiliser les rejets récupérés composés d'un mélange de fines cellulosiques, de minéraux et de composants d'encre à valeur ajoutée (en majorité de l'argent) en étudiant deux voies de valorisation.

Afin d'atteindre les objectifs du Green Deal européen et d'inclure le développement de ces nouveaux matériaux électroniques biosourcés dans une économie circulaire, la finalité est également de travailler sur l'écoconception des dispositifs fonctionnels fabriqués qui peuvent être complexes selon les performances visées (simple étiquette RFID à des dispositifs multicouches de types Printed Circuit Boards).

Description

Les activités de recherche sur cette thématique ont été initiées à travers deux projets de fin d'études de niveau master 2, en février 2017 et février 2018, dans un domaine encore très peu documenté. Un projet financé par l'IDEX a été obtenu en 2020 – **projet SAVE** – et la première thèse a débuté sur le sujet au LGP2 (J. da Conceicao, 2020-2024). Puis deux projets ont été déposés en 2021 et financés fin 2022 : l'**ANR REVeBIO** (porté par un chercheur du laboratoire) dans laquelle 1 postdoctorat a été recruté (R. Kiari, 2023-2025, et plusieurs masters) et le **projet européen CircEI-Paper** (porté par le Fraunhofer, en Allemagne, pour lequel un chercheur du laboratoire est Work Package leader et responsable scientifique) dans lequel un doctorant a été recruté (A. Brzovic, 2022-2026), et plusieurs masters.

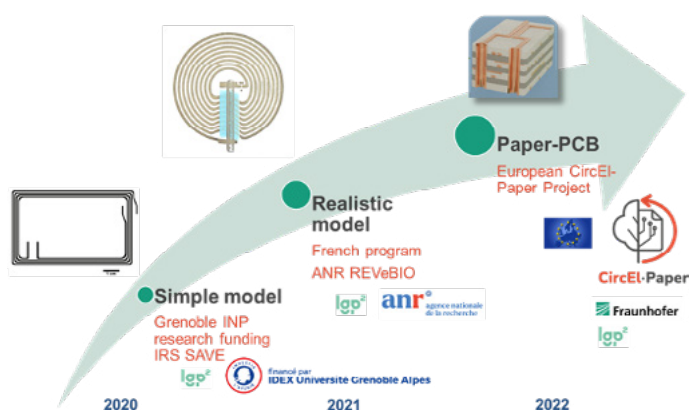
Pertinence

Cet élément s'inscrit dans les thématiques d'intérêt majeur du laboratoire - le recyclage et l'électronique imprimée - tout en permettant des liens entre les équipes de recherche. D'autre part, les projets ont débuté à **une échelle locale** (masters intra Pagora/LGP2) se sont poursuivis avec des financements de Grenoble INP (projet SAVE), puis à **l'échelle nationale** avec un projet ANR et enfin à **l'échelle européenne** (CircEI-Paper). Cette progression donne une visibilité européenne, mais aussi internationale avec la valorisation des travaux de

recherche, notamment dans des salons internationaux dédiés à l'électronique imprimée (LOPEC 2022, 2024 et 2025). Le développement de nouveaux procédés a également donné lieu à l'introduction d'enseignements dans la maquette des élèves ingénieurs (TP recyclage d'électronique imprimée).

Originalité / caractère innovant

L'originalité des travaux de recherche est attribuée au fait de développer des procédés de recyclage et de valorisation de déchets qui ne sont pas encore réellement présents dans les filières conventionnelles de traitement des déchets. La valorisation des rejets – fibreux et métalliques – permet d'envisager une diminution de l'empreinte carbone notamment en économisant les ressources et en récupérant les matériaux à forte valeur ajoutée pour fabriquer de nouveaux systèmes fonctionnels.



Retombées

Les travaux pourraient donner lieu à la mise en place de nouvelles filières de recyclage pour le traitement des déchets d'électronique imprimée sur supports biosourcés.

En outre, cette thématique porteuse a ouvert des horizons nouveaux vers le monde de l'électronique :

- plusieurs chercheurs du laboratoire sont membres du GRD DEFIE sur les Dispositifs Electroniques à Faibles Impacts Environnementaux (piloté par P. Xavier du laboratoire Croma, Grenoble INP) lancé en janvier 2025
- un chercheur du laboratoire représente l'école Grenoble INP - Pagora et le laboratoire dans ACSIEL, Alliance Électronique, organisation professionnelle qui fédère tous les acteurs de la chaîne de valeur de la filière industrielle électronique en France et qui a intégré l'AFELIM (Association Française pour l'Électronique Imprimée) fin 2024.

Durée et collaborations, projets associés

- Projet IDEX IRS SAVE Oct. 2020 – Sept. 2023
- Projet ANR REVeBIO Oct. 2022 – Nov. 2026
- Projet Européen CircEl-Paper Sept 2022 – Feb. 2026

DOCUMENTS À CONSULTER

Publication :

- Conceição J. H. F., Party M., Curtil D., Svecova L., Marlin N., Reverdy-Bruas N. (2023) "Investigation of methods to quantify silver screen-printed onto cellulosic substrate: towards recycling of printed electronics", Flexible and Printed Electronics : <https://doi.org/10.1088/2058-8585/acf142> [<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04245189>]
- CircEl-Paper stand posters avec 10 autres projets européens pendant LOPEC 2024 à Munich : https://www.linkedin.com/posts/nadege-reverdy-bruas-75434a71_last-week-in-munich-the-2-days-conferences-activity-7173216323911581696-ayoq
- CircEl-Paper Workshop pendant MécaPlasTronic 2024 à Lyon : <https://www.mecaplastronic-connection.com/fr/conferences-tables-rondes>

LinkedIn posts :

- LinkedIn Post - First day at MecaPlasTronic 2024 in Lyon : https://www.linkedin.com/posts/nadege-reverdy-bruas-75434a71_yesterday-was-our-first-day-at-mecaplastronic-activity-7267453669690810370-gyKZ/
- LinkedIn Post - How can circular materials meet the technical requirements of printed circuit boards ? : https://www.linkedin.com/posts/nadege-reverdy-bruas-75434a71_how-can-circular-materials-meet-the-technical-activity-7270405796092366848-4yX-/



**Laboratoire de Génie des Procédés pour la Bioraffinerie, les
Matériaux Bio-sourcés et l'Impression Fonctionnelle**

*Laboratory of Process Engineering for Biorefinery,
Bio-based Materials and Functional Printing*

461 rue de la Papeterie - CS 10065
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
France

lgp2.contact@grenoble-inp.fr

lgp2.grenoble-inp.fr

+33 (0)4 76 82 69 00