

NEWSLETTER PEPR RECYCLAGE

LINKEDIN : [@PEPR_RECYCLAGE](#)

WWW.PEPR-RECYCLAGE.FR



« Black Mass », matière première issue du recyclage des batteries
© Cyril FRESILLON / Mecaware / CNRS Images

ÉDITORIAL

Mathieu Brandibat

Coordinateur national des stratégies d'accélération
'Recyclabilité' et 'Biosourcés'

Secrétariat Général Pour l'Investissement (SGPI)



Depuis l'émergence et la course internationale engagée vers la décarbonation, de nouveaux secteurs ont nourri à divers degrés le concept de 'dématérialisation', promesse de s'affranchir de certains flux physiques, de capturer l'énergie du vent et du soleil, d'électrifier les mobilités plutôt que de faire un plein d'essence. Ces secteurs ont accéléré la hausse de consommation de matières et accru la pression sur la biomasse. La totalité des usages pressentis excèdent la capacité de régénération, sur les métaux : nous devrions en consommer plus dans les 35 prochaines années que pendant toute l'histoire de l'humanité. Enfin sur les plastiques, la consommation de matière devrait plus que doubler d'ici 2050.

Dans le monde, 'l'empreinte matière' moyenne, notion qui comptabilise l'ensemble de la matière qu'il a fallu manipuler pour répondre aux besoins d'un individu, se situe autour de 12 t/hab/an. Si la France est dans une norme européenne avec près de 14,1 t/hab/an, il ne faut pas perdre de vue que le monde devrait doubler son empreinte matière d'ici 2030, avec près de 20 t/hab/an. Cette

accélération de la consommation des matières induit une hausse des déchets. Or, l'essoufflement de certaines chaînes de valeur d'approvisionnement ont été mis en lumière avec les bouleversements post-COVID et les récents conflits. Les déchets constituent désormais de nouveaux horizons à explorer, en tant que ressources secondaires, que ce soit pour améliorer notre souveraineté ou pour développer de nouvelles filières et chaînes de valeurs.

Dans le cadre du plan d'investissement France 2030, c'est tout l'enjeu du programme de recherche dédié au 'Recyclage, Recyclabilité & Ré-Utilisation des Matières', que de coordonner et accompagner le volet amont de recherche. « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » : ce programme, porté par le CNRS et opéré pour le compte de l'Etat par l'Agence Nationale de la Recherche, revu par un collège scientifique international, soutient des sujets ambitieux sur divers matériaux : plastiques, métaux pour la transition énergétique, composites, textiles, papier et carton. Autre élément innovant : un volet dédié

aux sciences humaines et sociales a été inclus pour une approche systémique et ainsi investiguer des notions jusqu'alors peu explorées telles que l'acceptabilité et la sensibilité à ces nouvelles matières.

En pratique, le soutien de France 2030 a débuté dès 2023 avec le démarrage de projets ciblés. Ces projets ont permis de lancer les écosystèmes sur de premiers travaux. Plus récemment fin 2024, un nouvel appel à projets a été lancé et doit permettre aux écosystèmes et chercheurs de faire de nouvelles propositions d'approfondissement des axes clés du programme ou de contribuer à faire émerger de nouvelles thématiques en lien avec le numérique. En parallèle des projets, des 'lieux-totem' sont en cours de labellisation. Déjà plusieurs villes, avec le soutien des régions et collectivités territoriales enthousiastes, ont lancé leur initiative pour rendre plus visibles leur programmes de recherche et faire résonner entre elles les problématiques à résoudre : Le Mans dont le lieu-totem est déjà en place, Orléans, Grenoble, Bordeaux, Lyon, Albi, Lille-Douai, Rouen, Limoges, Nantes, Saclay, Clermont-Ferrand mais aussi Elanova (Centre et Ecole des Industriels du Caoutchouc près de Paris), Renault à Flins. Ces lieux-totem pourraient être sur certains sites

coordonnés avec les activités 'Développement Durable' du CNRS.

Ce programme est à la fois un outil de recherche et d'animation autant qu'un maillon du continuum de financement que l'Etat a mis en œuvre via France 2030 pour accompagner la recherche jusqu'aux premières industrielles. Les programmes de recherche font écho à d'autres dispositifs, tels que le projet de prématuration et maturation porté par des sociétés d'accélération de transfert technologique (SATT) et organismes de transfert de technologies (OTT) et les outils de soutien à l'innovation. Dans le secteur du recyclage, il faut mentionner le PEPR exploratoire DIADEM (Dispositifs Intégrés pour l'Accélération du Déploiement de Matériaux Emergents), ainsi que le projet de prématuration/maturation CIRCLE porté par le CNRS Innovation et la SATT PULSALYS.

L'enjeu est immense pour que la France continue à jouer un rôle international en valorisant ses savoir-faire et propriétés intellectuelles pour contribuer à relever le défi que représente la sécurisation de l'accès aux ressources nécessaires pour les transitions écologiques et énergétiques et industrielles.

[Cliquez ici pour vous inscrire à la liste de diffusion et recevoir les prochaines newsletters.](#)

SOMMAIRE

- 5** À L'ÉCOUTE DES ACTEURS DE LA FILIÈRE
Axe Textiles
- 7** SPÉCIALISTE DES FLUIDES SUPERCRITIQUES
Axe Composites
- 10** LES BESOINS GRANDISSANTS DU PHOTOVOLTAÏQUE
Axe Métaux Stratégiques
- 13** LA BOUCLE ENTRE RECHERCHE ET SOCIÉTÉ
Axe Déchets Ménagers
- 15** COLLABORER AVEC LES ÉCO-ORGANISMES
Axe D3E
- 17** EXPOSER NOS DÉCHETS
Axe SHS
- 20** QUAND LA GÉOGRAPHIE RENCONTRE LA CHIMIE
Axe Plastiques
- 22** LA NOUVELLE VAGUE
Axe NTE
- 24** LE GRAND ENJEU DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE
Axe Batteries
- 28** AU-DELÀ DE LA TECHNIQUE
Axe Papiers-Cartons
- 30** ARCHITECTE DU NOUVEL AXE NUMÉRIQUE
Axe Numérique
- 33** FAITS MARQUANTS ET CALENDRIER
Structure du PEPR et contacts

L'axe Textiles

À L'ÉCOUTE DES ACTEURS DE LA FILIÈRE

Retour sur la consultation d'acteurs au plus près de l'industrie textile menée par les co-porteuses de l'axe de recherche 'Textiles' du PEPR, Jannick Duchet-Rumeau, directrice de l'UMR Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP) et professeure à l'INSA Lyon, et Anne Perwuelz, enseignante-chercheuse à l'École nationale supérieure des arts et industries textiles (ENSAIT), en collaboration avec Ludovic Koehl, également professeur à l'ENSAIT. Cette consultation visait à identifier les verrous scientifiques qui devront faire l'objet de recherches au sein du PEPR Recyclage.

Par Jannick Duchet-Rumeau

Les textiles sont des matériaux multi-échelles. Des fibres de différentes natures chimiques sont associées selon des assemblages en étoffes très variées et traitées avec différents additifs fonctionnels, tels les colorants et les apprêts. Ceci induit une complexité spécifique de ces matières.

La problématique de leur recyclage peut soulever des questions de recherche communes à d'autres types de matériaux comme les plastiques ou les matériaux composites. Cependant, identifier les verrous technologiques et donc les questions scientifiques associées au cas des textiles ne peut se faire sans être en constante proximité avec les industriels et les acteurs confrontés directement au recyclage des objets. Aussi, industriels, pôles de compétitivité, centres techniques et éco-organismes

ont été interrogés dans le cadre de l'Appel à Manifestation d'Intérêt du programme, qui visait à compléter les travaux déjà enclenchés au sein du PEPR.

Voici quelques-unes des diverses propositions qui sont ressorties de cet exercice de consultation pour le recyclage des produits post-consommation comme les vêtements :

- Les traitements de surface présents sur les textiles destinés au recyclage sont indéniablement un point critique pour les adhérents du pôle Techtera et l'éco-organisme Refashion. Ces enductions devront être retirées pour une valorisation de la matière elle-même. Pour l'IFTH (Institut Français du Textile et de l'Habillement), c'est aussi plus largement dans les matériaux textiles en fin de vie, la présence

de tous les polluants ou petites molécules comme les contaminants ou les additifs de type PFAS qui doit être abordée, ainsi que la recherche de procédés d'élimination aux empreintes environnementales les plus respectueuses qui doit être privilégiée.

- La complexité des textiles, qui se composent le plus souvent de combinaisons de matières différentes, nécessite de travailler sur la séparation et purification des matières, comme le souligne le pôle Techtera en prenant l'exemple de l'Elasthane® ou l'IFTH, avec le cas de la séparation et le déliassage des complexes multi-couches. Résoudre ces verrous permettra alors d'assurer une valorisation des matières y compris en boucle fermée (recyclage textile à textile).

- Tous les acteurs de la filière, pôles de compétitivité Techtera et Euramaterials mais aussi

l'éco-organisme Refashion, mettent également l'accent sur le développement d'outils d'aide à la décision pour déterminer les voies optimales de valorisation des textiles en fin de vie, en prenant en compte les approches d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). La traçabilité aux différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement et l'intégration des problématiques sociétales apparaissent comme incontournables. Des solutions sont attendues avec l'intervention d'outils d'Intelligence Artificielle tout au long de la chaîne de valeur, notamment dans la filière habillement.

Ces riches échanges ne manqueront pas d'enrichir les futurs travaux de recherche de l'axe 'Textiles' du PEPR Recyclage et pourront être partagés avec les autres axes du PEPR lorsqu'ils développent une réflexion de ce type avec des problématiques communes.



Tri des vêtements dans une usine de recyclage

© Nuala - Flickr

Cyril Aymonier

SPÉCIALISTE DES FLUIDES SUPERCRITIQUES

Directeur de recherches CNRS et directeur de l'ICMCB (CNRS/Univ. Bordeaux/Bordeaux INP), Cyril Aymonier a bâti au fil des ans une expertise remarquable dans l'utilisation des fluides supercritiques. Ces fluides permettent entre autres de décomposer les matériaux composites qui sont notoirement difficiles à recycler. Ces travaux s'inscrivent notamment dans le PEPR, dans l'axe dédié au recyclage des matériaux composites.

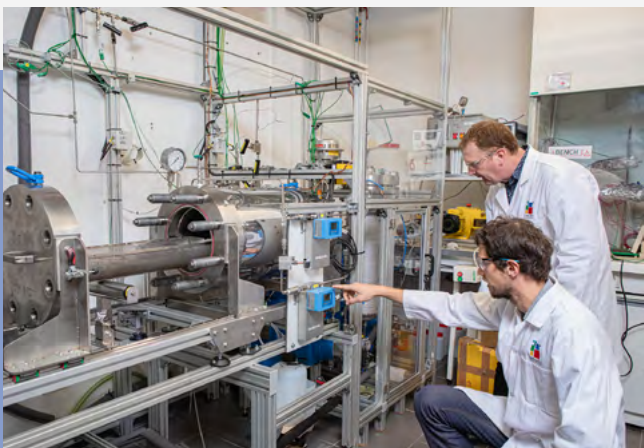
Par Martin Koppe

De sa thèse à l'obtention de deux médailles du CNRS, Cyril Aymonier travaille sur la synthèse, la mise en forme et le recyclage des matériaux en milieux fluides supercritiques. Ce directeur de recherches est en effet un spécialiste mondial de la chimie dans ces milieux, qu'il a étudié à l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux, un laboratoire qu'il dirige à présent. Il travaillait alors sur leur utilisation dans des procédés d'oxydation pour le traitement d'effluents aqueux dangereux, une technologie inventée au MIT (États-Unis). Après deux années de post-doctorat en Allemagne, Cyril Aymonier a rejoint le CNRS en 2002 et s'est intéressé à la synthèse de matériaux dans les milieux fluides supercritiques.

Le chercheur a ensuite considéré le raisonnement inverse face aux matériaux composites. Conçus à partir de fibres noyées dans une matrice polymère, ils combinent robus-

tesse et légèreté et ont trouvé beaucoup de succès dans les filières automobile et aéronautique. Leur cohésion a pour corollaire qu'il est extrêmement difficile de les décomposer une fois en fin de vie.

«Mon intérêt pour le recyclage de matériaux composites s'est développé à partir de 2009, quand j'ai été sollicité par Airbus et Safran suite à mes travaux sur l'hydrolyse de matrices époxy, décrit Cyril Aymonier. Nous avons donc travaillé ensemble sur le recyclage de matériaux composites à base de fibres de carbone. Ce projet a été extraordinaire tant sur la forme que sur le fond. À l'époque, les laboratoires s'intéressaient encore peu au recyclage, mais les partenaires industriels étaient particulièrement motivés. Ça m'a amené à réfléchir et à ajouter le recyclage à mes activités de recherche, un volet qui a pris beaucoup d'essor depuis. Aujourd'hui, on ne fabrique plus de matériaux



C. Aymonier devant le dispositif de recyclage de la start-up IDELAM. © Frédérique PLAS - CNRS Images

FLUIDES SUPERCRITIQUES ?

Amenés à des conditions de température et de pression au-delà de certaines valeurs, différentes pour chaque composé, les solvants adoptent un comportement intermédiaire entre le gaz et le liquide : on parle alors de fluides supercritiques. Ces conditions non conventionnelles changent radicalement certaines de leurs propriétés.

Par exemple, et à l'inverse de son comportement normal, l'eau portée à plus de 374°C et de 221 bars solubilise les huiles, mais ne parvient plus à dissoudre les sels.

sans penser à leur fin de vie et à leur recyclage, voire leur recyclabilité.»

La richesse des applications des fluides supercritiques s'illustre bien par la cinquantaine de brevets déposés par Cyril Aymonier au cours de sa carrière, dont nombre d'entre eux ont été issus de collaborations avec des partenaires industriels. Une avalanche de résultats originaux qui ont valu au chercheur de recevoir à la fois la médaille de bronze et celle de l'innovation du CNRS.

Cyril Aymonier est aussi à l'origine de la création de la startup IDELAM, spécialisée dans le recyclage de matériaux complexes. L'utilisation de fluides supercritiques pour le recyclage des matériaux composites passe par des réactions de solvolyses : c'est le solvant qui permet de rompre les liaisons chimiques qui assurent la cohésion du multimatériau qu'est le composite. «La solvolyses existe également à basse température, mais elle pose ensuite des problèmes

de recyclage du solvant organique utilisé, précise Cyril Aymonier. La question disparaît dans des conditions supercritiques, car on peut employer de l'eau comme milieu de réaction. Elle permet d'hydrolyser la matrice polymère dans un solvant qui se comporte comme de l'hexane.»

L'eau fait même mieux, puisqu'elle dissout des matrices organiques en quelques dizaines de minutes, là où les procédés traditionnels prennent plusieurs heures. D'autres solvants, comme de l'éthanol, peuvent également être utilisés pour réaliser la décomposition des matériaux. Un contrôle précis des paramètres de pression et de température permet en effet d'amener d'autres solvants que l'eau dans des conditions supercritiques.

L'approche de Cyril Aymonier a donc d'abord trouvé le succès parmi les composés issus de l'aéronautique, un domaine particulièrement gourmand en matériaux composites de pointe. Le chercheur a depuis élargi ses

horizons aux énergies renouvelables et s'intéresse par exemple au recyclage des pales d'éoliennes et des réservoirs à hydrogène.

NOUS BÉNÉFICIONS D'UN CONSORTIUM EXTRAORDINAIRE POUR ADRESSER TOUS CES DÉFIS.

«Les matériaux composites trouvent tout un tas d'applications; ils diminuent notamment l'impact environnemental des automobiles et des avions en permettant de les alléger, explique Cyril Aymonier. Mais leur principale limitation tient dans leur recyclage. Une fois décomposés, il faut trouver des débouchés à ces matières premières de recyclage.» Le chercheur mène par exemple des travaux pour retirer les fibres de carbone de la matrice sans les abîmer, afin de maximiser les possibilités de leur donner une seconde vie. Le problème se

pose également pour les fibres de verre qui sont plus fragiles.

Ces travaux ont logiquement conduit Cyril Aymonier à s'impliquer dans le volet du PEPR Recyclage dédié aux matériaux composites (projet Recycomp), coporté par Cyril Aymonier et Isabelle Capron, directrice de recherche à l'Inrae. Neuf laboratoires y sont réunis, chacun avec ses compétences, afin d'élaborer des matériaux composites plus faciles à recycler, de caractériser les produits après solvolysé et les valoriser dans de nouveaux matériaux. Des travaux plus fondamentaux, par exemple sur les interfaces entre les fibres et leur matrice, s'y déroulent également.

«Nous bénéficions d'un consortium extraordinaire pour adresser tous ces défis, se réjouit Cyril Aymonier. Recycomp veut faire entrer les matériaux composites dans une économie circulaire où chaque ingrédient se recycle dans des matériaux à leur tour plus aisément recyclables.»



© Frédérique PLAS - CNRS Images

MÉDAILLE DE L'INNOVATION

Cyril Aymonier a reçu le 12 décembre dernier, la médaille de l'innovation du CNRS pour ses travaux sur les fluides supercritiques.

Cette distinction honore des femmes et des hommes, dont les recherches exceptionnelles ont conduit à une innovation marquante, valorisant la recherche scientifique française.

Métaux stratégiques

LES BESOINS GRANDISSANTS DU PHOTOVOLTAÏQUE

Au sein du Laboratoire interdisciplinaire des Energies de Demain (LIED, CNRS/Univ. Paris Cité), une série de travaux aborde les besoins concrets en matériaux pour développer le photovoltaïque. Les différents scénarios aboutissent tous à la nécessité recycler davantage les métaux, y compris ceux qui ne sont actuellement pas considérés comme stratégiques, comme le cuivre ou l'aluminium.

Par Martin Koppe

Bien qu'elle vise à mieux utiliser les ressources naturelles, la transition écologique en a elle-même besoin. Les métaux sont par exemple essentiels à la construction d'un parc éolien et photovoltaïque à la hauteur des ambitions fixés pour répondre aux enjeux climatiques. José Halloy, professeur à l'université Paris Cité et membre du Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain (LIED, CNRS/Univ. Paris Cité), qu'il a cofondé en 2013, place ces questions au cœur de sa recherche.

«Nous avons créé le LIED afin d'aborder la transition énergétique de manière transdisciplinaire, alliant les sciences naturelles et techniques aux sciences humaines et sociales, décrit José Halloy. Cela nous permet par exemple d'étudier la problématique des matériaux critiques aussi bien sous l'angle des flux physiques que de la géopolitique. Alors que les stocks physiques diminuent, la demande continue d'augmenter, y compris pour assurer la transition écologique et tandis que les pays en développement sont en pleine phase

de construction d'infrastructures. Nous en concluons, que, même à court terme, le recyclage massif des matériaux sera nécessaire pour atteindre ces objectifs.»

José Halloy estime ainsi la quantité de matériaux requise, à l'échelle planétaire, pour faire fonctionner les systèmes techniques et de production d'énergie. Il a notamment mis en évidence qu'il était plus utile de considérer l'énergie en termes de puissance plutôt que de quantité. Certains secteurs, comme la métallurgie, ont en effet besoin d'une grande puissance pour allumer et maintenir des infrastructures telles que des hauts fourneaux. L'éolien et le photovoltaïque ne sont pas capables d'offrir des pics aussi forts et aussi brefs, malgré la quantité d'énergie qu'ils peuvent fournir. C'est pourquoi José Halloy insiste sur cette distinction, plus conforme aux usages concrets.

Son équipe a récemment œuvré sur les contraintes de la filière photovoltaïque. Trois

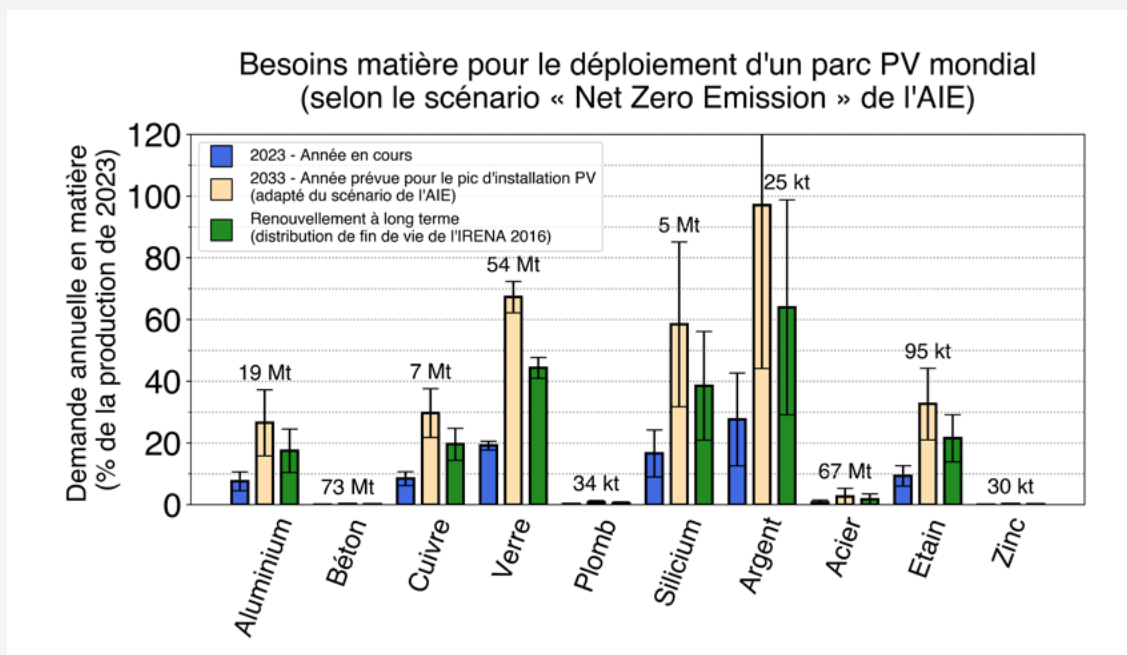
articles scientifiques sont en cours de parution, tous issus des travaux de thèse de Joseph Le Bihan, qui réalise son doctorat au LIED. Sa problématique traite de l'évaluation des besoins réels en matériaux pour réaliser différents scénarios fournis par l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) sur les perspectives du photovoltaïque.

«Sa principale conclusion est que le recyclage sera nécessaire, y compris pour des matériaux qui ne sont généralement pas considérés comme rares ou exotiques, explique José Halloy. Prenons le cuivre par exemple. Si ce dernier est produit par millions de tonnes chaque année, la demande va finir par poser la question de son approvisionnement. C'est un cas fascinant, car le cuivre est facile à réutiliser : il est parfois même plus intéressant de le recycler que de l'extraire. Mais pour généraliser cela, il faudra amener toute une industrie du recyclage du cuivre à maturité d'ici à l'horizon 2050-2060, notamment pour récupérer

le cuivre déjà présent dans les panneaux solaires en fin de vie.»

LE RECYCLAGE SERA NÉCESSAIRE, Y COMPRIS POUR DES MATÉRIAUX QUI NE SONT GÉNÉRALEMENT PAS CONSIDÉRÉS COMME RARES OU EXOTIQUES

De la même manière, le développement des centrales photovoltaïque doit prendre en compte le renouvellement de celles déjà en place et qui s'usent comme n'importe quelle infrastructure. «Ces modèles montrent des choses contre-intuitives, comme le fait que la montée vers la capacité énergétique voulue n'a rien de monotone », poursuit José Halloy. En cause le forçage, la nécessité de produire



Joseph Le Bihan : « Long-term renewal of world PV capacity » - Présentation aux JNPV 2024



« Les différents scénarios technologiques et socio-économiques donnent l'impression qu'une fois la transition énergétique effectuée, on est tranquille. Mais il faut se rendre compte que ce n'est pas juste une étape qui se termine en 2050, c'est un objectif qui implique des enjeux sur le long terme. Entretenir et maintenir un système énergétique reposant sur des technologies renouvelables est un défi important dont on n'a pas encore considéré toute la mesure »

Joseph Le Bihan, lors de la présentation de ses travaux de recherche aux Journées Nationales du PhotoVoltaire (JNPV) en décembre 2024.

de nouveaux équipements en prévision de la fin de vie des équipements actuels.

Ces travaux sur les flux de matière et d'énergie sont couplés avec des analyses géopolitiques menées avec Florian Vidal et la thèse de Thomas Lapi sur les métaux stratégiques, également au LIED. Ses recherches se concentrent sur les industries de recyclage des métaux critiques dans les pays nordiques. Pour l'instant, ces pays concentrent leurs efforts sur les métaux des batteries avec des succès contrastés, notamment en raison de certaines difficultés structurelles au niveau européen, marquées par un accroissement de la rivalité sino-américaine. Un premier article de géopolitique a été soumis à une revue scientifique et deux autres sont en cours de parution sur les pays

nordiques. L'objectif de ces travaux est de tirer les enseignements du cas nordique pour favoriser l'émergence de futures filières de recyclage en France.

Ces études vont également alimenter le projet Métaux stratégiques du PEPR. Ce projet traite du recyclage des métaux de l'électronique et des aimants permanents. Les chercheurs du LIED souhaitent y développer la question de la transition par l'éolien et le photovoltaïque, ainsi que le recyclage des batteries, notamment à partir du cas nordique, ce qui fait le lien avec ce secteur du PEPR Recyclage et des liens avec le PEPR TASE sur les renouvelables. « Sans le recyclage, notamment des métaux, il sera difficile d'atteindre nos objectifs de transition écologique », prévient José Halloy.

Economie circulaire

LA BOUCLE ENTRE RECHERCHE ET SOCIÉTÉ

Les matières premières s'épuisent, et le recyclage, bien qu'essentiel, ne suffit pas à répondre à nos besoins. Pour relever ce défi, l'AIFREC, société savante dédiée à l'économie circulaire, joue un rôle clé de connecteur entre les disciplines et les acteurs académiques, économiques et politiques.



Par Anaïs Culot

« Au cours des dix dernières années, les quantités de matières premières extraites au niveau mondial n'ont pas diminué malgré une prise de conscience croissante de l'épuisement des ressources et de l'impact environnemental de leur extraction », constate Pascal Guiraud, enseignant-chercheur en génie des procédés, impliqué dans le PEPR Recyclage. Dans ce cadre, le recyclage contribue à réduire l'extraction des matières premières et à renforcer notre souveraineté autour de matériaux recyclés, mais sa part n'est pas suffisante. Et bien que des avancées techniques et organisationnelles soient nécessaires pour améliorer ses performances, ce dernier ne saurait combler à lui seul les besoins croissants de notre société en matériaux.

Afin d'inverser cette tendance, un modèle plus durable s'impose. C'est le principe de l'économie circulaire. « Celle-ci vise à transformer nos modes de production et de

consommation, pour qu'ils ne soient plus dans une logique linéaire où des ressources sont extraites, transformées en produits, utilisées et jetées », décrit Ligia Barna, responsable de l'axe Déchets ménagers du PEPR Recyclage. Ce modèle promeut par exemple la réparation des objets, le réemploi des emballages et la sobriété dans nos usages. Bien que le recyclage en soit une partie intégrante, il ne doit intervenir qu'en dernier recours, car il reste exigeant en technicité et énergivore.

La recherche menée au sein du PEPR Recyclage mobilise des expertises interdisciplinaires pour promouvoir des avancées notamment techniques et comportementales en gestion des déchets. Par-delà son cadre de financement, il a la chance de pouvoir s'appuyer sur l'Association interdisciplinaire française pour la recherche en économie circulaire (AIFREC). « Les sciences sont au

cœur de l'association. Elle est animée et portée par des chercheurs, dont beaucoup sont également impliqués dans le PEPR », souligne Ligia Barna qui est aussi co-présidente de l'AIFREC avec Pascal Guiraud.

Fondée en 2023, cette société savante regroupe déjà 150 chercheurs adhérents et plus de 40 laboratoires, entreprises et associations, créant ainsi un réseau unique de collaborateurs à travers la France. Son objectif ? Favoriser les échanges entre scientifiques aux expertises diverses et assurer la visibilité des travaux sur l'économie circulaire à l'échelle nationale et internationale. L'AIFREC organise en ce sens des congrès afin de diffuser plus largement résultat, savoir-faire et méthodologies.

L'AIFREC joue également un rôle d'intermédiaire entre les mondes académiques et

politico-économiques. Grâce à ses partenariats avec des acteurs locaux, des observatoires régionaux des déchets et des parlementaires, elle s'assure que les résultats scientifiques sont ancrés dans la réalité et répondent aux défis concrets des industriels et des collectivités. Des formations destinées aux décideurs et aux entreprises, par exemple en Nouvelle-Aquitaine, renforcent l'impact des avancées sur le terrain.

Enfin, elle permet à un programme à durée déterminée comme le PEPR Recyclage d'inscrire durablement ses fruits dans le paysage sociétal. « En tant que structure pérenne, l'AIFREC garantit la continuité des avancées et de leurs retombées. Elle contribue ainsi à asseoir la crédibilité de l'économie circulaire et à ancrer ses principes comme un modèle désirable aux yeux de la société », conclut Pascal Guiraud.



Image tirée de l'épisode 3 de l'émission Bienvenue dans l'écocercle : « Emballez, c'est pesé ! »

BIENVENUE DANS L'ÉCOCERCLE

Depuis la rentrée, François-Michel Lambert, fondateur de l'Institut national de l'économie circulaire et vice-président de l'AIFREC, propose de débattre sur un plateau des questions de l'économie circulaire, avec l'émission « Bienvenue dans l'écocercle ».

Chaque mois, une thématique est explorée en compagnie de plusieurs acteurs du domaine, en lien avec un événement d'actualité. La fashion week de Paris a donné le ton en septembre avec une émission spéciale textile. Ce fut ensuite au tour des véhicules électriques avec le Mondial de l'Auto, puis des emballages lors du Salon All4Pack. La dernière émission avec pour thème l'immobilier, est disponible depuis le 9 décembre sur la chaîne Youtube de l'Ecocercle.

Regards croisés

COLLABORER AVEC LES ÉCO-ORGANISMES

Dans le domaine du recyclage, les éco-organismes jouent un rôle central dans les filières à Responsabilité Elargie des Producteurs (REP). C'est à ce titre que le projet REVIWEEE (axe Déchets d'Équipements Electriques et Electroniques ou 'D3E') collabore avec Ecologic, éco-organisme spécialisé dans ce domaine. Pour mieux comprendre ces interactions, nous avons interrogé Victor François, responsable du pôle gestion des risques et R&D Recyclage chez Ecologic et Jean-Christophe Gabriel, coordinateur du projet REVIWEEE.

Par Etienne Morisseau

Aujourd'hui, quelles sont les problématiques principales rencontrées par les éco-organismes et la filière recyclage des D3E ?

VF : Notre objectif principal est d'optimiser la collecte des D3E pour les orienter vers la filière de traitement adaptée à leurs spécificités. Il est également nécessaire de continuer à développer le recyclage des plastiques, et leur intégration dans de nouveaux équipements, ainsi que le recyclage des substances critiques (tungstène, lithium, cobalt, nickel...)

JCG : Pour pouvoir recycler les D3E il faut avoir accès aux déchets, cela veut dire qu'ils doivent être collectés : les éco-organismes font d'énormes efforts de communication et de logistique pour inciter les particuliers à se défaire de leurs D3E mais c'est un point limitant important. Pour les déchets 'mixtes', c'est-à-dire qui contiennent de l'électronique (comme une voiture), vient le problème clé lié au démontage et à l'accès aux différents systèmes électroniques. Ces opérations sont sou-

vent manuelles et coutent souvent trop cher pour être rentable.

Quels sont les principaux verrous scientifiques à lever et les recherches prioritaires à aborder dans les prochaines années ?

JCG : Sauf cas particulier, la composition chimique des D3E n'est connue que de façon parcellaire et empirique, de ce fait on ne connaît que très mal la valeur intrinsèque du déchet. L'extrême variabilité de forme et de composition des D3E et des systèmes les utilisant est un verrou important. Cela va nécessiter de développer des stratégies d'écodesign, d'automatisation du démontage et du tri qui n'existent pas encore. Mais aussi des méthodes de purification plus flexibles, non polluantes et bas coûts.

VF : La connaissance du gisement reste en effet un problème crucial à résoudre, en particulier à l'échelle des substances critiques. La réponse à cette question passe par des levés de verrous sur l'échantillonnage et l'analyse de nos ma-

LE RECYCLAGE N'EST QUE LE DERNIER RECOURS, AVANT CELA IL FAUT TOUT FAIRE POUR RÉUTILISER, RÉPARER OU REVENDRE, POUR AUGMENTER LA DURÉE DE VIE DE NOS APPAREILS CONTENANT DU DÉCHET DE TYPE D3E. « VINTAGE » DOIT DEVENIR LA NOUVELLE MODE !

Jean-Christophe Gabriel, Directeur de recherche, Fellow du CEA et coordinateur du projet REVIWEEE

tières complexes. En parallèle, les procédés de tri et d'extraction des matières doivent progresser et mieux s'imbriquer, par exemple en associant spectroscopie et hydrométallurgie, pour permettre un recyclage plus qualitatif mais aussi plus efficace économiquement.

Quel rôle peuvent avoir les éco-organismes dans les recherches du PEPR, quels partenariats peuvent être mis en place ?

VF : Nous sommes là pour fournir des données, du contexte et des cas d'études directement issus des conditions réelles de gestion des déchets sur le territoire national et pour mettre en relation avec les industriels concrètement confrontés aux déchets.

JCG : Les éco-organismes ont l'expertise pour amener une vision précise et concrète sur la nature des déchets, et ainsi établir des priorités quant aux recherches menées sur leur recyclage, ainsi que dans le sourcing de déchets réels pour la montée en échelle des procédés développés. Enfin, ils ont idéalement un rôle à jouer dans la mise en relation entre les différents acteurs de la chaîne de valeur, du

constructeur au recycleur, pour favoriser les meilleures pratiques d'éco-design.

VF : En termes de partenariat, les possibilités sont larges. Aujourd'hui, Ecologic finance des thèses, post-doc et d'autres formes de contrats de recherche, et contribue sans partenariat formel à d'autres projets en partageant ses connaissances.

Quelle est la nature de la collaboration entre REVIWEEE et Ecologic et quelles sont vos attentes ?

JCG : Plusieurs contrats de collaboration existent entre les acteurs de l'axe D3E et Ecologic, par exemple pour permettre une meilleure connaissance de la composition des D3E de la mine urbaine, ou sur la mise au point de procédés pilotes pour leur recyclage. A terme, Ecologic pourra faciliter la mise en place des premières lignes industrielles intégrant ces nouvelles technologies et ainsi favoriser leur adoption.

VF : Ecologic gravite autour de REVIWEEE car nous avons des projets de recherche sur des thèmes similaires et avec des acteurs similaires. Pour nous REVIWEEE est l'opportunité d'aller plus vite et plus loin sur ces sujets.

Art et science

EXPOSER NOS DÉCHETS

Depuis presque dix ans, Bénédicte Florin et Pascal Garret profitent de leurs recherches et de leurs photos prises sur le terrain pour créer des expositions à destination du grand public, et sensibiliser sur la question des déchets. Les deux chercheurs ont déjà prévu de réaliser, au terme du programme, une exposition qui reprendra leurs travaux réalisés dans le cadre du PEPR Recyclage.

Par Etienne Morisseau

Un des objectifs affichés du PEPR Recyclage est de proposer des actions de médiation scientifique pour communiquer auprès du grand public. Plusieurs membres du programme ont déjà fait part de leur volonté de prendre en main ce type d'initiative, à l'image de Bénédicte Florin et Pascal Garret, membres de l'axe sciences humaines et sociales (SHS) du programme.

Dès le début du projet, l'objectif était clair : concevoir une exposition à partir des résultats de leurs recherches. « On ne peut pas uniquement participer à des colloques ou publier dans des revues scientifiques. Il faut aller plus loin vers le grand public », estime Pascal Garret, sociologue et photographe. Expert de l'image, Pascal Garret profite de ses terrains pour documenter en photo et vidéo les sujets qu'il étudie. Avec Bénédicte Florin, enseignante-chercheuse en géographie à l'Université de Tours, les deux scientifiques

ont pris l'habitude de réaliser des expositions à partir de leurs travaux. Depuis 2016, ils ont pu participer à l'élaboration d'expositions, dont deux au MUCEM, en collaboration avec



d'autres chercheurs et chercheuses en SHS. « La mise en image du rebut » tout d'abord, en 2016, organisée par les membres du réseau SUD (Sociétés Urbaines et Déchets). Cette première exposition découle d'une discussion entre scientifiques (géographes, sociologues, anthropologues...) et d'une mise en commun de photos de recherche, présentant des femmes et des hommes vivant de leur travail avec les déchets dans une vingtaine de pays à travers le monde. Pas de clichés volés, ni de mise en scène, l'objectif est d'éviter une vision misérabiliste ou esthétisante du sujet, et de rendre compte du désir de reconnaissance de ces travailleurs.

Ils participent ensuite au projet d'exposition « Vies d'ordures » en 2017 au MUCEM, par l'apport d'enquêtes-collectes réalisées auprès de récupérateurs de déchets à Casablanca et Istanbul. En 2022, ils conçoivent eux-mêmes l'exposition « Voyage au cœur de

nos poubelles » en collaboration avec la Ville de Tours, qui suit les trajets de nos déchets après que nous les ayons jetés dans la poubelle, avec d'autres supports, dont la vidéo. Puis en 2023, toujours avec le MUCEM, l'exposition « Barvalo » sur les populations romani ; une aventure particulièrement mémorable en raison du montage collaboratif qui associait dans son comité d'experts, des représentants de ces communautés et des scientifiques.

Ces expériences leur ont permis d'appréhender les défis de la médiation scientifique. Que montrer et comment le montrer ? Quel format est le plus propice pour toucher le plus grand nombre ? « On a dû apprendre au fur et à mesure à simplifier nos propos, à aller à l'essentiel pour en améliorer l'accessibilité », explique Bénédicte Florin. Au sein de l'axe SHS (projet 'SORRYL') du PEPR, Pascal et Bénédicte étudient les acteurs et les pratiques professionnelles des recycleurs de la filière



« Le parcours de Yunus », série de quinze photographies et une carte, réalisées par Pascal Garret à Istanbul pour l'exposition « Vies d'ordures », MUCEM, 2017



Bénédicte Florin présentant l'exposition « Voyage au cœur de nos poubelles » à Tours en 2022

ferraille, de la collecte formelle ou informelle à la matière première secondaire. « Il est encore un peu tôt pour parler du contenu de l'exposition, mais nous avons la volonté de tester des dispositifs, de mélanger les médias, photos, vidéos, structures... Et puis, nous pourrions aussi intégrer les autres membres de SORRYL qui ont exprimé leur intérêt pour ce projet », développe Pascal Garret.

D'ici là, d'autres initiatives se mettent déjà en place, comme l'exposition depuis décembre d'une quarantaine de photos très grand format, accompagnées de textes et de sons, sur les murs de la caserne Napoléon, rue de Rivoli à Paris, avec pour intention de mettre en lumière les travailleurs et travailleuses du recyclage. Par la suite, plusieurs autres expositions devraient avoir lieu dans les lieux-totems du PEPR.

LES LIEUX-TOTEMS DU PEPR

Les sites labellisés 'lieux-totems du PEPR Recyclage' sont des déclinaisons territoriales des activités d'animation du PEPR. Pouvant être accueillis par des universités, des écoles ou des entreprises, les lieux-totems sont des espaces d'échange, de médiation et de formation, répartis sur l'ensemble du territoire et organisés autour des grandes thématiques du programme.

Certains partenaires se sont déjà emparés du projet, à l'image de l'Université du Mans, au sein de laquelle a émergé le lieu-totem de la rudologie (étude des déchets et de leur élimination). L'équipe de chercheurs et de chercheuses porteuse de cette initiative, en partenariat avec l'université, a déjà pu organiser mi-octobre une journée d'étude interdisciplinaire sur les impacts environnementaux des déchets plastiques.

Interdisciplinarité

QUAND LA GÉOGRAPHIE RENCONTRE LA CHIMIE

Doctorante à Le Mans Université, Jeanne Perez étudie les flux plastiques en France pour analyser l'impact environnemental et sociétal de leur fin de vie. Cette thèse en interdisciplinarité se situe à la croisée de la géographie et de la chimie de l'environnement. Ses résultats viendront alimenter les recherches de l'axe Plastiques du PEPR, tant sur des travaux relevant de la chimie que ceux en sciences humaines et sociales (SHS).

Par Etienne Morisseau



Dès la création de l'axe Plastiques, Mathieu Durand, professeur en urbanisme à l'université du Mans propose d'incorporer les travaux de Jeanne Perez dans la tâche 1 du projet, qui se focalise sur les contaminants. Son étude, « Plastique en fin d'usage, matériaux et territoires : affiner les sous-catégories pour mieux les gérer », pourra ainsi apporter des éléments de contexte essentiels aux autres tâches du projet, en sciences dures comme en SHS.

Financé par la MITI (Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires) du CNRS, ce travail de recherche évolue aux interfaces de la géographie sociale, de la rugologie (l'étude des déchets) et de la chimie de l'environnement. Pour la mener à bien,

Jeanne Perez a réalisé ses travaux entre le laboratoire Espaces et Société (ESO) et l'Institut des Molécules et Matériaux du Mans (IMMM). De cette manière, elle a pu observer et comprendre les plastiques sous plusieurs facettes : à la fois leur composition physico-chimique, qui permet de comprendre leurs conséquences sur l'environnement et la société, mais aussi leur aspect social, en étudiant les dynamiques entre les acteurs qui composent la filière et leur influence sur le flux. Tout cela permettant de porter une réflexion plus large sur la structuration des filières de recyclage des plastiques et le bouclage de ces flux.

« Je ne peux pas travailler sur la fin de vie des plastiques, sans comprendre leur début

de vie », explique Jeanne Perez. Géographe de formation, la jeune chercheuse a dû apprendre les bases de la chimie des matériaux pour pouvoir travailler de concert avec des chimistes. C'est grâce à une combinaison entre lectures, cours du soir et interactions avec ses collègues de l'IMMM, qu'elle a ainsi pu entrer dans le monde de la chimie. « Je n'irai jamais faire des analyses en laboratoire. Je ne suis pas experte, mais je comprends les enjeux principaux », mesure-t-elle. De son côté, elle apporte également une vision SHS aux recherches du laboratoire : un vocabulaire technique, une connaissance du système, de ses acteurs, des réglementations...

Bien entendu, la recherche interdisciplinaire n'est pas sans défis. « Ça demande de l'énergie, de l'engagement, une véritable volonté des équipes de faire de l'interdisciplinarité. Si on ne veut pas s'ouvrir, ce n'est pas possible », estime Jeanne Perez. D'après la chercheuse, un des points importants d'attention est la communication. Il est essentiel de bien définir les sujets et de trouver des points de convergence pour réussir à avancer ensemble. « Mais ça permet aussi de s'entraîner à expliquer notre discipline, nos méthodes de recherche », nuance-t-elle en observant l'aspect enrichissant de cette pratique. « Ça m'a fait prendre conscience qu'on fait le même métier, même si notre

méthodologie est différente. On a une question de départ et une production de résultats ; on se comprend sur la manière de faire de la recherche. »

Cette mutualisation des connaissances a eu un impact au-delà des travaux de Jeanne Perez. Une collaboration qui passait au départ par le vecteur de la doctorante, a fini par créer des liens entre les deux laboratoires, qui se traduisent par la création de projets de recherche et d'actions de communication conjointes.

Selon Jeanne Perez, le contexte actuel autour du plastique amène de plus en plus à l'interdisciplinarité. Depuis 2020, la France a mis en place des réglementations sur l'économie circulaire des plastiques, une volonté politique qui pousse ce sujet originellement des SHS vers les sciences dures. Un élan qui permettra peut-être d'expérimenter de manière plus récurrente cette pratique, qui ouvre des perspectives nouvelles sur les travaux de recherche. La doctorante, qui souhaite continuer ses recherches par un post-doc au sein du PEPR Recyclage, conclue : « Ça vaut le coup de prendre du temps pour s'acculturer à de nouvelles disciplines et explorer des notions transverses ; mon étude ne serait pas aussi complète s'il n'y avait pas eu cette interdisciplinarité. »

**ÇA DEMANDE DE L'ÉNERGIE, DE L'ENGAGEMENT,
UNE VÉRITABLE VOLONTÉ DES ÉQUIPES DE FAIRE
DE L'INTERDISCIPLINARITÉ.**

LA NOUVELLE VAGUE



AGATHE VACHÉ

A la fin de son master ingénierie à l'ENSI Caen, avec une majeure en catalyse et chimie pour les énergies renouvelables, c'est au CEA-Liten de Grenoble qu'Agathe Vaché a réalisé son stage de fin d'étude. Elle travaillait alors sur le recyclage du platine et de l'iridium dans les piles à combustible par voie électrochimique dans des milieux non-conventionnels (liquides ioniques). C'est également dans ce laboratoire qu'elle a rejoint l'axe NTE du PEPR.

Son sujet de thèse, réalisé sous la direction Jean-Yves Hihn, professeur à l'université de Franche-Comté, porte sur le recyclage des métaux d'intérêt présents dans les cellules photovoltaïques en silicium, les plus communes sur le marché. Le procédé de recyclage étudié implique l'utilisation de solvants eutectiques profonds, formés par un mélange de deux composés qui, à une proportion exacte, abaisse le point de fusion du mélange par rapport aux réactifs qui le compose.

Plus précisément, la thèse d'Agathe se concentre sur la récupération de métaux tel que l'argent, le cuivre, l'étain ou le plomb, ainsi que les couches minces d'ITO (oxyde d'indium-étain). Le principe est effectuer la lixiviation des métaux (dissolution chimique) puis une récupération électrochimique (électrodépôt) sur les cellules en fin de vie, pour séparer puis récupérer les métaux purs. La jeune chercheuse garde en tête l'objectif principal de sa recherche : améliorer les processus de recyclage hydrometallurgique, tout en réfléchissant à une application viable pour l'industrie (réduire le nombre d'étapes et l'adapter à grande échelle dans un environnement non-contrôlé).

Au sein du PEPR, Agathe est au plus près des recherches menées sur le recyclage des cellules photovoltaïques et des batteries. Cet environnement de recherche, couplé à des visites de laboratoires, comme l'ICGM à Montpellier, qui travaille entre autres sur le recyclage pour les technologies de l'hydrogène, constitue un cadre d'échange scientifique sur des thématiques variées. Pour autant, ce qui lui plaît le plus reste l'aspect concret de son projet de recherche, qui explore des solutions impactantes pour la société, tant au niveau économique qu'écologique.

Un des objectifs du PEPR Recyclage est la formation par la recherche des jeunes scientifiques. Et c'est à travers ses jeunes chercheurs et chercheuses que l'axe NTE (Nouvelles Technologies de l'Energie) a souhaité présenter ses actions au sein du programme.

Par Etienne Morisseau

FERNANDO LEPRE

Fernando est originaire du Brésil. Après des études de chimie, il a passé son master et son doctorat dans le Laboratoire de Spectroscopie Moléculaire (LEM) de l'Université de São Paulo. Pendant sa thèse il fait un stage au laboratoire Thermodynamique et Interactions Moléculaires (TIM) à l'Institut de Chimie de Clermont-Ferrand. Son sujet de recherche concernait alors l'absorption et séparation du CO₂ par des liquides ioniques. Il continua l'étude de relations structure-propriété dans de solvants ioniques avec un premier post-doc au laboratoire de Chimie de l'ENS Lyon, puis un second au laboratoire Ingénierie de Matériaux Polymères (IMP) de Lyon, se concentrant sur les gels à réseaux dynamiques DIGs (Dynamic Ion Gels).

En Mars 2024, Fernando fait son arrivée au CEA-Liten à Grenoble pour un post-doc sous la direction de Pierre Piluso et d'Hakima Mendil-Jakani. Il reprend alors dans le cadre du PEPR, les travaux de deux thèses sur l'utilisation de liquide ioniques pour récupérer le platine et le Nafion des piles à combustibles via un mécanisme de gonflement du Nafion. Ses travaux visent la compréhension et le développement d'un procédé de recyclage du Nafion présent dans des pile à combustible viable pour l'industrie.



En plus de l'intérêt scientifique d'étudier la pollution engendrée par les polymères fluorés formant de potentiels polluants éternels, c'est l'aspect pluridisciplinaire qui intéresse Fernando dans le PEPR Recyclage. D'une part au sein de l'axe NTE, avec la rencontre du reste de l'équipe disséminée sur le territoire, mais aussi d'autre part, auprès des autres axes et disciplines. Composites et métaux stratégiques, les liquides ioniques sont utilisés dans le recyclage d'autres matériaux étudiés dans le cadre du programme. Le jeune chercheur est conscient du caractère global de la pollution engendrée par ces déchets, une problématique très présente au Brésil. C'est donc une opportunité pour lui de rencontrer des scientifiques travaillant sur d'autres aspects de la question, y compris au travers du prisme des sciences humaines et sociales.

Le recyclage des batteries

LE GRAND ENJEU DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Composante essentielle des véhicules électriques, la batterie lithium-ion est une technologie centrale de la décarbonation de nos moyens de transport. Pour faire face aux problématiques d'approvisionnement des métaux dits « critiques » qui la composent, la valorisation des matériaux présents dans les batteries en fin de vie apparaît comme une solution idéale. Une solution explorée au sein de l'axe Batteries du PEPR, le projet 'Lulabat', qui vise à améliorer leurs procédés de recyclage.

Chronique par les membres du projet Lulabat

La demande vertigineuse en batteries lithium-ion impose des besoins historiques pour bon nombre de matières (cobalt, lithium, graphite, etc.), considérées comme « critiques » par l'Union Européenne (UE). Dans un contexte géopolitique contraint, l'UE s'est munie d'une nouvelle réglementation, qui encourage la transition d'une économie linéaire vers une économie circulaire, comme en témoigne le principe de la responsabilité élargie du producteur. Le recyclage de ces objets est une nécessité sociétale et un enjeu de souveraineté pour l'accès aux matières et le développement d'une mobilité décarbonée.

Les procédés de recyclage des batteries au lithium existent et sont notamment industrialisés depuis quelques années en Chine pour le recyclage des batteries lithium-ion des véhicules électriques. L'Europe cherche à devenir indépendante vis-à-vis de la Chine

en produisant ses propres batteries lithium-ion et en les recyclant. Cela ne sera possible que si les procédés de production et de recyclage des batteries sont efficaces, peu impactant pour l'environnement, et économiquement viables. Il est donc nécessaire d'améliorer les procédés existants pour qu'ils répondent à ces objectifs. La recherche de nouvelles briques technologiques à intégrer dans ces procédés de recyclage est donc essentielle. Le projet Lulabat vise à contribuer à cela en apportant de nouvelles connaissances susceptibles de se transformer en innovations technologiques.

Des procédés actuels inefficients

Les premiers procédés de recyclage des batteries lithium-ion reposaient sur des opérations pyrométallurgiques, consistant à traiter les batteries à haute température (> 1000 °C)

afin de récupérer certains métaux, principalement le cobalt, le nickel et le cuivre, tandis que l'aluminium ou le lithium étaient perdus dans les scories, et le graphite, transformé en CO₂. Ces procédés présentent une consommation énergétique élevée, une faible capacité à récupérer les métaux sous la forme requise pour leur réutilisation dans la production de nouvelles batteries, et entraînent une perte totale du lithium.

Afin de produire des matériaux compatibles avec la production de batteries, de mieux gérer les impuretés, de réduire les impacts énergétiques et environnementaux, la pyrométallurgie doit être substituée par des procédés de recyclage combinant un traitement mécanique et hydrométallurgique :

- Le traitement mécanique des batteries lithium-ion permet de produire un

concentré qui pourra être traité par hydrométallurgie, en valorisant l'ensemble des matières.

- Les procédés hydrométallurgiques reposent sur l'utilisation d'agents de lixiviation (souvent des solutions acides) pour dissoudre les métaux contenus dans les matériaux des batteries usagées, puis d'opérations chimiques d'extraction, de purification et de séparation, afin de produire différents sels réutilisables pour fabriquer de nouveaux matériaux pour la production des batteries lithium-ion (électrodes, sels de l'électrolyte).

Réduire le coût opératoire de tels procédés consiste notamment à diminuer le nombre d'opérations unitaires et à minimiser les effluents, tout en réduisant la consommation de réactifs et d'énergie. D'autres stratégies

UNE CROISSANCE SANS PRÉCÉDENTE



Création d'une cellule de batterie lithium-ion par fabrication additive. Cyril FRESILLON / LRCS / CNRS Images

Les batteries lithium-ion jouent un rôle central dans le stockage de l'énergie, notamment issue d'une production intermittente (soleil, vent...), mais aussi dans la mobilité électrique, deux enjeux majeurs de la transition énergétique

D'ici à 2030, selon les scénarii, la demande mondiale en batteries lithium-ion devrait atteindre les 2-3 TWh dans le monde, dont 80-90% dédiés aux véhicules électriques (avec près d'un tiers en Europe), soit une augmentation de 30% chaque année. Sur la même période la quantité de déchets devrait connaître une multiplication par 10, qui se répercutera sur la filière de recyclage qui devra évoluer en conséquence.

sont également envisageables, basées plus particulièrement sur la science des matériaux pour régénérer la fonctionnalité des matériaux des électrodes sans avoir recours à l'hydrométallurgie.

Les recherches de l'axe Batteries

La première phase du programme de recherche LULABAT se concentre notamment sur le développement de briques technologiques originales et l'estimation de leur intégration dans un procédé hydrométallurgique. Ces briques technologiques illustrées dans la Figure 1 sont :

- **La lixiviation par attrition**

La première brique concerne l'étape de dissolution (ou lixiviation) de la poudre de batteries usagées. La matière à dissoudre, appelée black mass (BM), est préparée par des étapes de prétraitement physique (broyage, pyrolyse, séparation de l'anode, etc.). L'option technologique étudiée pour la lixiviation des métaux contenus dans la BM est celle de l'at-

trition-lixiviante. L'intérêt de ce procédé est de rafraîchir l'état de surface des particules par élimination continue des dépôts de surface susceptibles de ralentir ou bloquer leur lixiviation, grâce à la mise en suspension d'un media solide (typiquement des billes de silice de taille millimétrique) dans le réacteur de lixiviation. Dans cet environnement réactif complexe, l'étude porte sur l'exploration des conditions opératoires nécessaires pour une dissolution sélective de certains éléments des BM, en particulier le lithium.

- **L'électrodialyse**

L'électrodialyse, bien que peu utilisée dans les procédés hydrométallurgiques actuels, est une opération industrielle mature qui permet une séparation efficace des ions avec une consommation réduite de réactifs comparée aux méthodes traditionnelles d'extraction et de séparation. Dans cette partie du programme LULABAT, nous évaluons le potentiel de cette technologie pour le recyclage des batteries lithium-ion. Nous recherchons les conditions optimales pour intégrer

- *Contribution des phénomènes de lixiviation-attrition pour le traitement des NMC par dissolution / précipitation (LGC)*
- *Compréhension des mécanismes de précipitation oxydante pour l'amélioration de la séparation Mn, Co, Ni (CEA-Liten, LRGP)*
- *Mise en oeuvre de l'électrodialyse dans les procédés métallurgiques (Georessources, LRGP)*

l'électrodialyse dès la première étape du procédé, c'est-à-dire après la lixiviation. L'objectif est d'utiliser l'électrodialyse pour l'extraction sélective du lithium, afin de produire de l'hydroxyde de lithium de qualité dite « batterie ». Parallèlement, nous envisageons l'intégration d'autres opérations unitaires en aval de l'électrodialyse, telles que la précipitation, la cristallisation et l'extraction liquide-liquide, pour valoriser les autres métaux présents dans les batteries sous forme de sulfate, tout en réduisant la consommation de réactifs et la production d'effluents.

- **La précipitation oxydante**

Il s'agit d'une approche chimique qui vise l'extraction des métaux d'intérêt en complément ou substitution des méthodes ac-

tuelles. La précipitation oxydante présente des avantages vis-à-vis de la simplicité d'implémentation industrielle, mais aussi de sa complémentarité à l'extraction par solvant pour réduire le nombre d'étages d'extraction. La séparation est réalisable en absence de chlorure et sa capacité est démontrée dans les procédés d'oxydation avancée. Dans le cadre du programme LULABAT, le travail de R&D vise à comprendre les chemins de réactions et les mécanismes mis en jeu en fonction des paramètres de traitement, lesquels conditionnent l'efficacité et la sélectivité de la séparation. Ce travail doit permettre d'identifier des conditions opératoires optimales pour l'évaluation de l'intégration de la technologie dans les procédés de recyclage et la valorisation des métaux critiques.

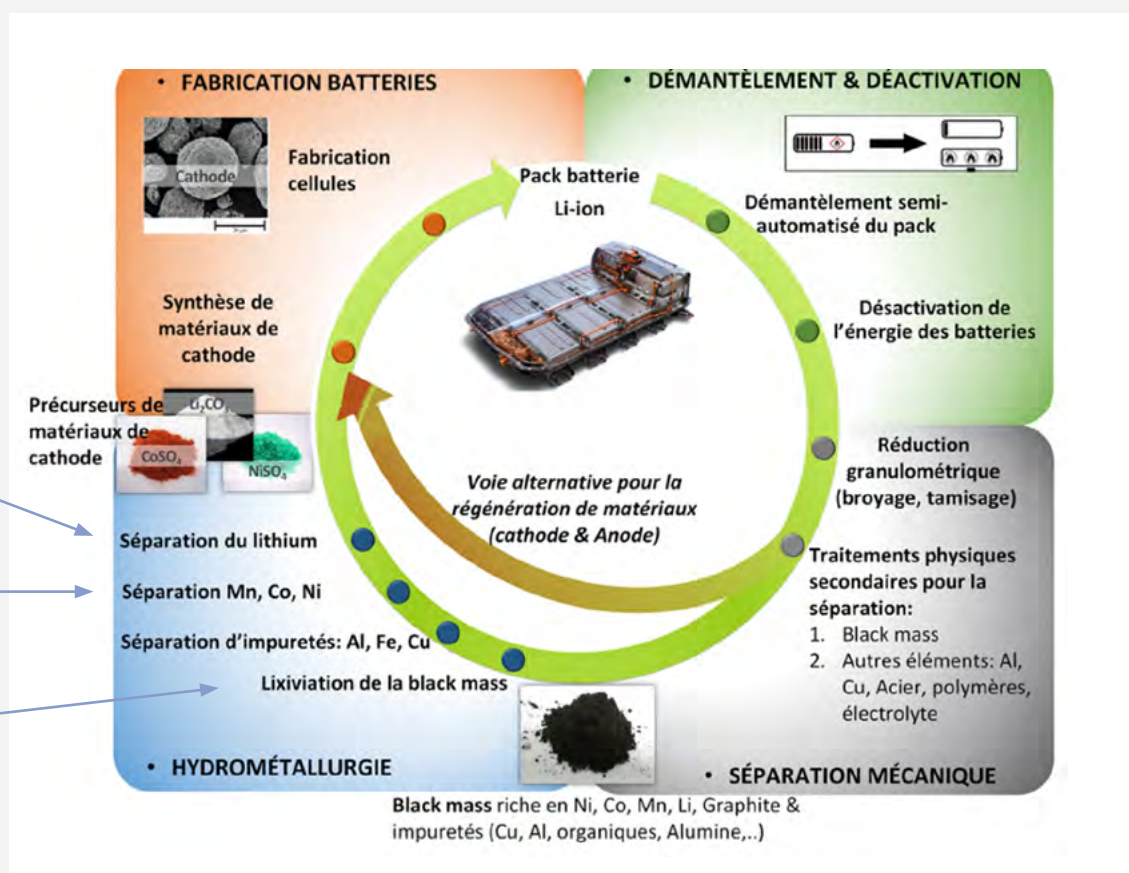


Figure 1 : Intégration du programme de recherche LULABAT dans la circularité des batteries.

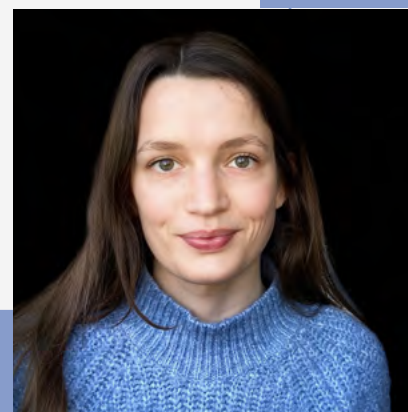
Communication scientifique

AU-DELÀ

DE LA TECHNIQUE

Parmi les matériaux étudiés par le PEPR, les papiers et cartons sont sans conteste ceux dont le taux de recyclage est le plus avancé. Pour parvenir à aller encore plus loin, il reste bien entendu de nombreux verrous scientifiques à débloquer, mais aussi un travail de recherche et de sensibilisation pour changer les pratiques des consommateurs.

Photo de Lorette Brault, membre du projet 'PAC3R'
Par Etienne Morisseau



Le recyclage des papiers et cartons a beaucoup progressé ces dernières décennies. Pourtant les procédés classiques ne permettent pas de recycler plus de 93% de la matière. Les 7% restants (rejets solides et liquides) ne sont pas valorisés et constituent un enjeu économique et environnemental. Ces quelques 7% de rejets représentent des quantités faramineuses de déchets, qui tendent à s'accroître au vue de la complexification des emballages (dérivés cellulosiques, assemblages complexes...)

L'axe Papiers-Cartons du PEPR (projet 'PAC3R'), concentre ses travaux sur les emballages, qui constituent environ 70% des papiers et cartons recyclés (4 millions de tonnes par an). Il ambitionne de développer de nouveaux procédés durables pour

améliorer les propriétés des fibres recyclées (upcycling) ; de valoriser les rejets solides et liquides issus du procédé de recyclage conventionnel ; développer de nouveaux procédés de recyclage et valoriser tous les éléments séparés dans le cas des matériaux composites, difficiles à recycler ; et de fournir une analyse environnementale et sociétale globale des procédés ciblés.

Ces aspects techniques ne sont pourtant pas les seuls à prendre en compte au niveau de la recherche, si l'on souhaite s'adresser de manière globale aux problématiques du secteur. « Il faut veiller à mieux gérer les déchets issus du recyclage papier carton, mais avant tout éviter au maximum leur production », souligne Lorette Brault, post-doctorante au LGP2 et chargée de la coordination et de la

communication de PAC3R. « Il y a aussi un effort de sensibilisation à réaliser. »

En effet, si le recyclage des papiers et cartons est particulièrement avancé en comparaison des autres matériaux étudiés au sein du PEPR, cela implique toutefois de relever de nouveaux défis sur l'ensemble de la chaîne, au niveau de la consommation, la collecte, le tri des usagers... Selon les objectifs posés par le Pacte Vert pour l'Europe, le taux de recyclage du papier doit atteindre 85% en 2030. Il est aujourd'hui à 78% - au-delà des 75% demandés pour 2025 - mais encore loin de l'ambition finale. « Les industries, comme les consommateurs, font déjà de gros efforts de recyclage », estime Lorette Brault, « Il faut donc réussir à trouver de nouveaux leviers pour parvenir à combler l'écart restant d'ici 2030. »

Sur ce point, l'axe papier-cartons pourra s'appuyer sur les recherches des autres projets du PEPR, à l'instar de l'axe déchet ménagers, qui analyse le comportement des ménages et étudie les leviers possibles pour motiver les individus au tri des déchets. Mais aussi l'axe SHS, qui a dédié une de ses tâches

à l'étude du rôle des acteurs, réglementations et modèles économiques dans la définition du comportement des consommateurs.

De leur côté, les membres de l'axe Papiers-cartons ont, en plus de leurs recherches, mis l'accent sur la communication en organisant dès le lancement du projet plusieurs actions de sensibilisation. Au près du grand public déjà, avec la conférence de vulgarisation Pint of Science en mai 2024. Mais aussi à destination des partenaires socio-économiques, au travers de tables rondes avec les industriels et de présentations lors de grands événements comme le WASTE Meetings à Lyon.

L'objectif est double : présenter les axes de recherches, tout en impliquant les industriels dans la construction du projet. « Nous sommes en attente de retours sur nos travaux, de perspectives, d'un dialogue constructif... », explique Lorette Brault. « Il faut se rendre compte que le PEPR Recyclage fait partie d'une stratégie d'accélération. Il vise à solutionner des problématiques concrètes, pour un impact direct sur la société. Il est donc essentiel de discuter tant avec les industriels, qu'avec le grand public. »



Table-ronde avec des représentants de l'industrie

PAC3R EN BREF

PAC3R : 'PACKaging, Recycling, Recyclability, Re-use of papers and cardboards'

*Piloté par Nathalie Marlin (LGP2)
et Fabienne Espitalier (RAPSODEE)*

- *Projet de 48 mois*
- *42 scientifiques impliqués*
- *6 laboratoires partenaires*

Thierry Divoux

ARCHITECTE DU NOUVEL AXE NUMÉRIQUE

L'appel à projet qui s'est achevé fin-novembre a été l'occasion d'ouvrir le dialogue sur l'organisation du onzième et dernier axe du PEPR, un axe transverse sur le numérique dont la création sera orchestrée par Thierry Divoux, directeur adjoint scientifique (DAS) chargé de la Programmation scientifique de CNRS Sciences informatiques. Son expérience en fait le profil idéal pour composer un consortium d'experts et établir la liste des priorités de recherche à adresser au sein du PEPR, en relation avec les travaux des dix autres axes.

Interview par Etienne Morisseau



Pouvez-vous nous parler de la genèse de cet axe ?

La nécessité de développer un axe transverse dédié au numérique s'est imposée dès la création du PEPR Recyclage. L'intérêt du numérique dans le recyclage est une évidence, et il va se positionner de manière transverse sur la structure 'matériaux' et 'filiales' du programme. On a fait appel à moi pour interroger les autres projets-ciblés du programme, afin d'identifier les besoins que ce nouvel axe pourrait satisfaire. L'objectif est de constituer un consortium de laboratoires, de chercheurs et de chercheuses qui sauront y répondre, en collaboration avec les autres organismes impliqués dans le PEPR (CEA, BRGM, IFPEN, INRAE...)

Pour quelles raisons vous a-t-on demandé d'organiser la construction de l'axe numérique ?

CNRS Sciences informatiques orchestre la politique scientifique du CNRS en matière de numérique. L'Institut fait le lien entre ses laboratoires, ses 16 groupements de recherche (GDR), mais aussi avec les autres partenaires majeurs de ce secteur. En tant que DAS, je suis en charge des relations de l'Institut avec les agences de programme 'Numérique, algorithmes, logiciels et usages' et 'Du composant aux Systèmes et Infrastructures numériques', respectivement pilotées par l'Inria et le CEA.

J'exerce un rôle de facilitateur pour lancer ce nouvel axe. Je suis là pour identifier le consortium qui complétera au mieux le programme actuel, en considérant l'articulation avec d'autres PEPR en gestation et en évitant la redondance avec d'autres programmes qui explorent des domaines de recherche connexes, comme 'Batteries' ou encore 'TASE' (systèmes énergétiques et énergies renouvelables).

Concrètement, comment s'articule cette mission ?

J'ai contacté les porteurs et porteuses des dix autres axes du PEPR, pour connaître leurs besoins et imaginer l'apport scientifique du numérique pouvant y correspondre. J'ai appelé cette séquence le 'PRAN dating' (Propositions de Recherche sur l'Apport du Numérique au domaine du recyclage, futur nom de l'axe numérique). Nous avons donc échangé pour préciser nos attentes mutuelles lors de visioconférences. Par 'mutuelles' j'entends que les chercheurs et chercheuses du numérique n'ont pas vocation à faire l'ingénierie informatique des 10 autres axes : les besoins de ces derniers doivent induire pour les numériciens des perspectives scientifiques originales issues des 'use cases' du secteur du recyclage.

Quelles sont les demandes principales qui émergent des entretiens préliminaires avec les porteurs et porteuses des autres axes du PEPR ?

Les besoins exprimés sont variés : modélisation des procédés, tri des intrants, traçabilité, logistique, traitement de données... Une vision globale, ou holistique, considérant tout le cycle de vie du produit, de son éco-conception à son démantèlement est attendue. Les sciences du numérique correspondantes et leurs mots-clés sont : jumeaux numériques, traitement du signal et des images, internet des objets, optimisation, intelligence artificielle, ingénierie système...

Quelles sont les prochaines échéances pour la structuration de l'axe numérique ?

Disposant maintenant des réponses à l'appel à manifestation d'intérêt, il convient d'écrire un projet cohérent en combinant les propositions, en vue de le présenter à l'ANR et au SGPI début mars.



Le moulage de lingots de zinc après la fonte
Photo : Pascal Garret, Istanbul, juin 2024

FAITS MARQUANTS DU PEPR

Actualités récentes

Inauguration de la plateforme FluSCritEx

FluSCritEx met à disposition équipements et compétences, pour les entreprises de l'industrie de la plasturgie et de la fabrication des matières plastiques ayant des besoins en recyclage et purification. Ce projet est piloté par Yvan chalamet, co-porteur de l'axe Déchets ménagers.

Appel à Manifestation d'Intérêt

L'AMI du PEPR a reçu plus de 70 réponses, sous la forme de lettres d'intention proposant des travaux complémentaires et de nouveaux sous-axes aux sujets de recherche actuels. Il a également permis de poser les bases du nouvel axe Numérique.

Médailles du CNRS

- Cyril Aymonier, co-porteur de l'axe Composites, a reçu la médaille de l'innovation du CNRS pour ses travaux sur les fluides supercritiques.
- Baptiste Monsaingeon, membre de l'axe SHS et de l'axe Plastiques, a reçu la médaille de bronze du CNRS pour ses travaux sur la société du déchet.

À venir

Recrutement de la cheffe de projet du PEPR

En 2025, l'équipe de gouvernance du PEPR s'agrandit avec l'arrivée d'Amélie Martin, ingénieure chimiste spécialisée en management de l'innovation, qui prendra le rôle de cheffe de projet.

Lancement du site internet

Le site web du PEPR Recyclage, recyclabilité et ré-utilisation des matières est en cours de construction et devrait voir le jour début 2025 à l'adresse : www.pepr-recyclage.fr

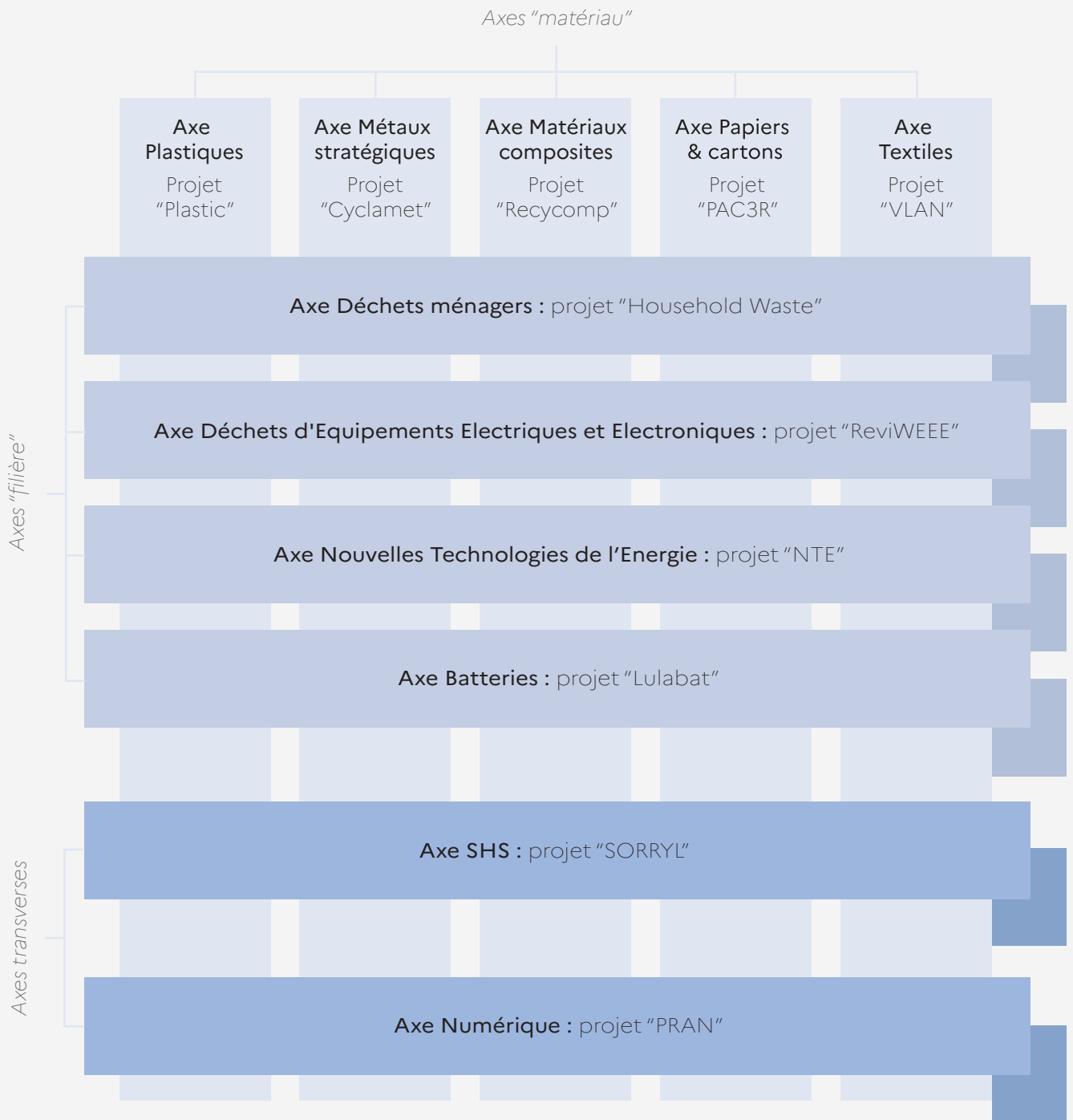
Séminaire annuel

Les journées annuelles du PEPR se tiendront en juin 2025, avec des ateliers en interne, mais aussi ouverts au public ou inter-PEPR. Ce sera également l'occasion pour l'équipe de présenter ses travaux avant l'organisation d'un congrès européen sur le recyclage début 2026.

Consultation sur les lieux-totems

Après une consultation et une première initiative à l'Université du Mans, les lieux-totems du PEPR verront le jour un peu partout en France courant 2026 (voir page 19).

Structure du PEPR - 11 axes de recherche



Lieux-totems

Les lieux-totems sont des sites accueillant les activités d'animation, internes ou externes du PEPR (formations, expositions, conférences...)

Présents sur l'ensemble du territoire chez les partenaires académiques et industriels, ils reçoivent le label : "Lieu-totem du PEPR Recyclage"

Ils ne relèvent pas d'un axe, mais sont organisés autour des grandes thématiques du programme (rudologie, énergie, consommation...)

- **Axe 'Plastiques'** : sophie.duquesne@centralelille.fr / khalid.lamnawar@insa-lyon
Contaminants - Désassemblage et démantèlement de structures complexes - Recyclage ternaire - Outils de caractérisation, méthodes et modélisation - Flux de matériaux, scénarii de recyclage et ACV - Conception de produits
- **Axe 'Métaux stratégiques'** : stephane.pellet-rostaing@cea.fr / y.menard@brgm.fr
Évaluation socio-économique et environnementale du recyclage des métaux stratégiques - Développement de méthodes de séparation - Opérations unitaires de traitement pour la dissolution et la récupération des métaux stratégiques - Modélisation des procédés
- **Axe 'Matériaux composites'** : cyril.aymonier@icmcb.cnrs.fr / isabelle.capron@inrae.fr
Recyclage par solvolysse de matériaux composites à matrice organique et fonctionnalisation des fibres recyclées dans un procédé en une seule étape - Fabrication et caractérisation d'une nouvelle génération de composites à partir de matières premières recyclées conçues pour leur recyclabilité
- **Axe 'Textiles'** : jannick.duchet@insa-lyon.fr / anne.perwuelz@ensait.fr
Approche d'éco-conception (materials by-design) à l'échelle moléculaire (polymères, biosourcés, mélanges) - Procédés de recyclage et de transformation des textiles sûrs et durables - Recyclage sûr et durable des textiles par le design à l'échelle de l'objet textile
- **Axe 'Papiers-cartons'** : nathalie.marlin@grenoble-inp.fr / fabienne.espitalier@mines-albi.fr
Upcycling de la fraction de fibres acceptées issues du recyclage de cartons et valorisation des rejets fibreux - Développement d'un nouveau type de bioraffinerie à partir de « forêt urbaine » : les papiers et cartons récupérés - Aérogels de cellulose et de carbone à partir des rejets du recyclage papier-carton - Valorisation des rejets du recyclage par thermo-conversion - Impacts environnementaux et économiques des nouveaux procédés et matériaux développés
- **Axe 'Batteries'** : alexandre.chagnes@univ-lorraine.fr / emmanuel.billy@cea.fr
Compréhension de la chaîne de valeur et du marché du graphite de qualité batterie et identification du rôle futur du graphite recyclé - Système de décision multicritères pour évaluer la durabilité des matières premières des batteries - Contribution de la lixiviation par attrition au traitement des NMC par dissolution/précipitation - Mise en œuvre d'opérations d'électrodialyse - Compréhension des mécanismes chimiques et catalytiques du processus de précipitation oxydante
- **Axe 'NTE'** : etienne.bouyer@cea.fr / virginie.nachbaur@univ-rouen.fr
Recyclage en boucle courte(et fermée)d'aimants permanents - Récupération et valorisation de polymère fluoré de membrane et du platine des piles à combustible - Récupération et recyclage des métaux valorisables de panneaux photovoltaïques
- **Axe 'D3E'** : jean-christophe.gabriel@cea.fr / s.touze@brgm.fr
Connaissance et analyse du gisement minier urbain - Procédés de traitement des DEEE - Implications des stratégies de recyclage des DEEE pour l'accessibilité aux ressources et les impacts environnementaux
- **Axe 'Déchets ménagers'** : ligia.barna@insa-toulouse.fr / yvan.chalamet@univ-st-etienne.fr
Tri innovant pour une séparation optimale des matériaux - Préparations innovantes pour une large réutilisation des matériaux : décontamination, désencrage - Modélisation et analyse systémique - Dynamique des acteurs et des organisations - Règlements, normalisation
- **Axe 'SHS'** : jeanbaptiste.bahers@univ-nantes.fr / mathieu.durand@univ-le-mans.fr
Écologie politique et territoriale du recyclage : Acteurs, territoires et usages - Comportement des consommateurs, acteurs, réglementation et modèles d'entreprise - Pratiques et représentations du recyclage dans l'anthropocène
- **Axe 'Numérique'** : thierry.divoux@cnrs.fr
Jumeaux numériques - Traitement du signal et des images - Internet des objets - Optimisation - Intelligence artificielle - Ingénierie système



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

An English version of the newsletter will be available
on the forthcoming PEPR website at www.pepr-recyclage.fr

[S'inscrire à la newsletter.](#)

Contact



Jean-François Gérard, Directeur de Programme PEPR
jean-francois.gerard@cnr.fr

Amélie Martin, Cheffe de projet
amelie.martin@cnr.fr

Etienne Morisseau, chargé de communication
etienne.morisseau@cnr.fr

Comité Stratégique :

Monique AXELOS - INRAE

Patrick D'HUGHES - BRGM

Thierry GAUTHIER - IFPEN

Eric PAPON - Université de Bordeaux

Frédéric SCHUSTER - CEA



NEWSLETTER **PEPR RECYCLAGE**

anr®