



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
RECYCLAGE

NO.2

---

# NEWSLETTER PEPR RECYCLAGE

LINKEDIN : @PEPR RECYCLAGE

WWW.PEPR-RECYCLAGE.FR



*Silicium pur, extrait d'un ancien panneau photovoltaïque usagé*  
© Cyril FRESILLON / Simap / SOLAR / CNRS Images

# ÉDITORIAL

## Alain Schuhl

Directeur général délégué à la science du CNRS

C'est avec grand plaisir que j'écris ces quelques lignes d'éditorial pour un programme lancé au milieu de l'année 2023 et qui a désormais trouvé son régime de croisière avec des partenaires nombreux et mobilisés.

Ce programme PEPR au pilotage confié au CNRS par France 2030 démontre en effet la capacité de la recherche académique de se mobiliser pour contribuer à résoudre un des enjeux de notre société, celui de la circularité des matières en déployant une approche holistique sur cette question vitale, puisque liée aux ressources non infinies dont nous disposons. Les travaux engagés étaient déjà tout à fait en phase avec le Contrat d'Objectifs et de Performance 2019-2023 du CNRS, puis du Contrat d'Objectifs, Moyens & Performance récemment signé avec le Ministère de la Recherche, qui s'articulent parfaitement avec la volonté pour le CNRS d'être un acteur de la transition environnementale et de la responsabilité sociétale. Cet objectif a été rappelé dans son schéma directeur Développement Durable et Responsabilité Sociétale mis en place en Février dernier. L'engagement de l'organisme dans la transition environnementale et la politique sociale est déclinée à travers de ses actions structu-



©Frédérique PLAS - CNRS Photothèque

rantes à toutes les échelles et dans toutes les activités de l'établissement, bien entendu dans les recherches menées et/ou coordonnées comme celles de ce PEPR.

Le PEPR recyclage est donc désormais un réseau de recherche pluridisciplinaire à forte visibilité permettant de travailler au cœur des disciplines scientifiques mais aussi de manière interdisciplinaire et est amené à fédérer de nouvelles expertises scientifiques et équipes dans la Phase II de ses projets. Des projets collaboratifs d'envergure impliquent des unités du CNRS bien-sûr mais aussi celles de différents partenaires (universités, écoles, CNRS, CEA, IFPEN, BRGM, INRAE) mobilisant l'ensemble des sciences de la matière, de l'ingénierie, du numérique et des sciences humaines et sociales. Cette pluridisciplinarité permet à ce réseau d'identifier et de traiter des questions de

recherche fondamentale originales sous-jacentes à des problématiques technologiques des différentes filières industrielles et traversant la Société. La revendication du CNRS de développer « *une recherche fondamentale au service de la Société* » ne peut ainsi pas trouver plus direct écho ! Le lien avec les industriels, animé par la Direction des Relations avec les Entreprises du CNRS, est alors évident et a été fort utile pour construire la vague de projets Phase II en cours d'évaluation. Gageons que des pré-maturations et maturations portées par les participants du PEPR et construites par le consortium CIRCLE (CNRS Innovation - PLUSALYS, voir page 30) seront nombreuses dès que les travaux lancés auront donné leurs fruits.

Le programme PEPR Recyclage, c'est aussi un réseau de formation par et pour la recherche pour de nombreux jeunes

chercheurs, doctorants et post-doctorants, qui sont impliqués dans des consortia scientifiques leur offrant une grande richesse de contacts et une ouverture scientifique précieuse pour leur avenir. Enfin, la déclinaison territoriale originale du PEPR Recyclage à travers ses lieux-totem (voir page 12) ne manquera pas de rapprocher les différents partenaires et équipes des sites pour partager la science produite, mais aussi aller au plus près des acteurs socio-économiques comme les entreprises, les collectivités et les citoyens.

Nul doute que les journées prochaines du PEPR Recyclage, en particulier celle du 12 juin, ouverte à l'ensemble des acteurs du domaine du recyclage, seront une belle opportunité pour décliner et échanger sur toutes ses activités.

---

---

# SOMMAIRE

---

- 5** L'ÉTAPE FONDAMENTALE DU RECYCLAGE  
Axes Déchets ménagers & Papiers-cartons
- 10** RENCONTRE AVEC LA PILOTE DE L'AXE NUMÉRIQUE  
Axe Numérique
- 12** LES LIEUX-TOTEM  
Axes SHS & Matériaux composites
- 16** LES ENJEUX CRUCIAUX DU GRAPHITE  
Axe Batteries
- 19** LE PEPR RECYCLAGE À GFP 2025  
Axe Plastiques
- 20** CHANGER DE PARADIGME  
Axe Textiles
- 22** LA MINE URBAINE DES D3E : DES PÉPITES À EXTRAIRE  
Axes D3E
- 25** À LA RECHERCHE DES TERRES-RARES  
Axe Métaux stratégiques & NTE
- 30** LE CONSORTIUM CIRCLE  
CIRCLE (CNRS Innovation - SATT Pulsalys)
- 33** ACTUALITÉS DU PEPR  
Structure et contacts

## Tri des déchets

# L'ÉTAPE FONDAMENTALE DU RECYCLAGE

**Le tri est la première étape du cycle de vie des déchets, qui permet de leur donner une seconde vie. Il est donc indispensable d'étudier comment améliorer cette étape ou comment la mettre en place d'une manière efficace pour assurer la viabilité des chaînes de valeurs en aval. Dans le cadre du PEPR Recyclage, l'étape de tri est étudiée sur ses différentes facettes, du comportement déterminant des citoyens, aux technologies les plus avancées.**

*Par Mathieu Durand (ESO Le Mans), membre de l'axe Déchets ménagers*

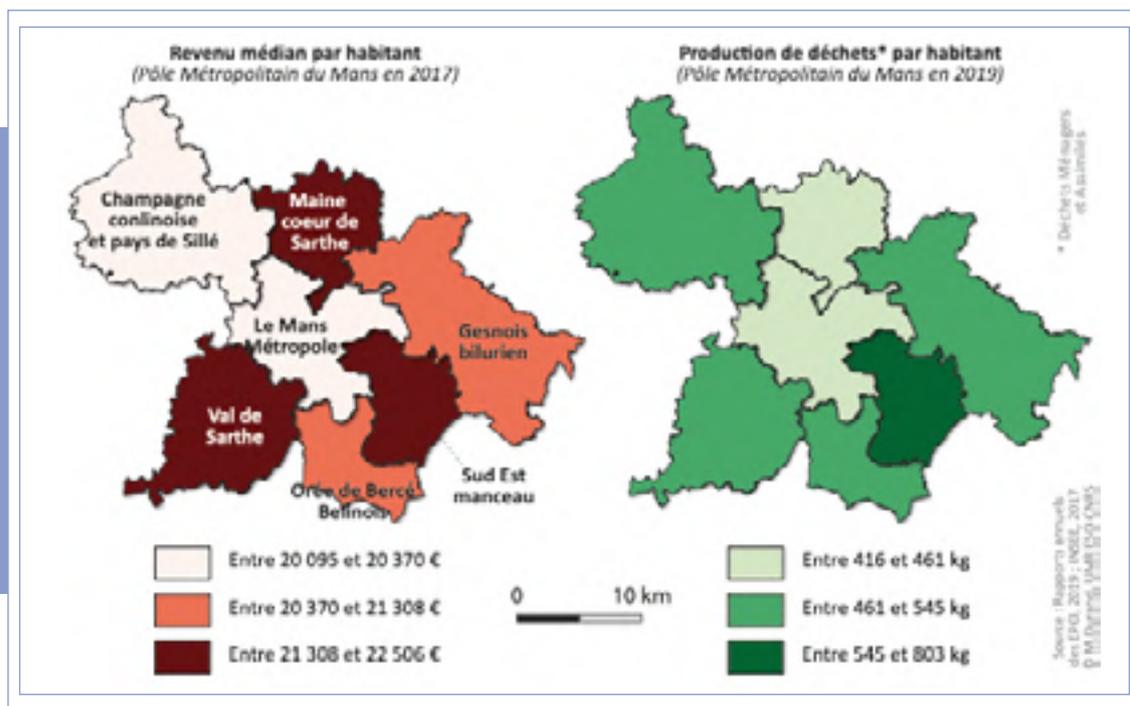
Le tri des déchets est l'acte de base permettant ensuite leur recyclage, puisque, bien isolés les uns des autres, presque tous les matériaux peuvent être recyclables. La principale limite à leur recyclabilité réside donc en apparence dans leur bon tri à la source. Sauf que ce geste est en réalité contraint d'une part par la composition des objets (imbrications fines de nombreux matériaux), d'autre part par le modèle économique-organisationnel de la filière destinée à les collecter. Au-delà de la com-

## BIEN ISOLÉS LES UNS DES AUTRES, PRESQUE TOUS LES MATÉRIAUX PEUVENT ÊTRE RECYCLABLES

préhension des ressorts sociaux, culturels ou pratiques du geste du trieur (ménage ou entreprise), il est donc important de travailler à la fois sur l'écoconception des objets afin de permettre leur tri et leur démantèlement, ainsi que sur l'organisation

de la collecte, largement structurée par les filières REP (Responsabilité Élargie du Producteur) selon bientôt 23 catégories d'objets (emballages, déchets d'équipements électriques et électroniques, ameublement, bâtiment, jouets, etc.).

Au sein du PEPR Recyclage, les équipes de recherche du s'intéressent à l'ensemble de ces dimensions. Le laboratoire REGARDS (Université de Reims) cherche par exemple à comprendre l'histoire de la massification de l'usage des emballages jetables entre les années 1970 et 1990, constituant aujourd'hui 59% des plastiques envoyés vers le recyclage, aboutissant à la structuration d'une filière de collecte et de recyclage, allant jusqu'à aujourd'hui accepter tous les emballages plastiques ménagers (extension des consignes de tri) malgré la non recyclabilité de la plupart d'entre eux. Le geste de tri est ici largement contraint par l'organisation des filières et le choix de faire porter les investissements financiers sur le recyclage (à travers la REP) et non sur la réduction de



Convergence spatiale entre les niveaux de richesses et la forte production de déchets.

ces emballages (qui devrait pourtant légalement être la priorité).

Le PEPR permet également d'avoir un regard spatialisé sur la production de déchets, montrant que si les quartiers d'habitat collectif contenant de nombreux logements sociaux ont une pratique de tri légèrement inférieure à la moyenne (ils produisent souvent en proportion plus d'OMR – Ordures ménagères résiduelles), ces territoires produisent en réalité moins de déchets (DMA – Déchets Ménagers et Assimilés) que les communes pavillonnaires péri-urbaines plus aisées. La réduction des déchets étant légalement prioritaire à leur recyclage, ces quartiers populaires peuvent être qualifiés de plus vertueux. Ce constat est, comme le montre le laboratoire ESO-CNRS (Université du Mans), à la fois lié aux modes de vies (forte production de déchets dans le périurbain aisé car présence de jardins, d'activité de bricolage, accès à une voiture pour de

nombreux voyages en déchetterie, etc.) et aux représentations (préservation de la planète dans les quartiers aisés vs économie de la débrouille et du réemploi dans les logements populaires).

Il ne s'agit là que de quelques-unes des illustrations de la façon dont le PEPR cherche à faire avancer la connaissance sur le tri des déchets. Le tri des déchets constitue donc un enjeu de recherche important, pour les sciences et techniques (développer de nouveaux procédés de tri ou éco-concevoir les objets en amont pour permettre leur tri ultérieur), ainsi que pour les sciences humaines et sociales (analyse des mécanismes organisationnels et financiers permettant une pratique facilitée du tri ou compréhension contextualisée du rapport philosophique aux déchets). Ce qui est qualifié de « mauvaises pratiques » est ainsi généralement le résultat de facteurs systémiques qu'il est important d'analyser (l'objectif de la rudologie).

## PLONGÉE AU COEUR DES CENTRES DE TRI

*Par Adrien Stolidi (CEA), membre de l'axe Déchets ménagers*

Les recycleurs utilisent diverses technologies pour trier les déchets ménagers. Par exemple, il y a des approches de tri qui se basent sur le gabarit des déchets. Le tri granulométrique classe les matériaux selon leur taille à l'aide de tamis. Le tri par flottation permet quant à lui de séparer les matériaux en fonction de leur masse volumique en utilisant des liquides pour faire flotter ou couler les déchets selon leur densité.

Il est aussi possible d'exploiter des caractéristiques physiques des déchets. Le tri magnétique est efficace pour extraire les métaux ferromagnétiques des autres déchets. On retrouve également des méthodes de tri électrostatique, particulièrement utiles pour séparer les matériaux non conducteurs des conducteurs. Enfin, des méthodes de tri optique utilisent des capteurs pour identifier et séparer les différents types de plastiques et de verres.

Ces techniques, combinées à un tri manuel, optimisent le recyclage en garantissant une séparation précise des matériaux, facilitant ainsi leur réutilisation et réduisant l'impact environnemental. Cependant, on observe une augmentation préoccupante des indésirables dans les flux de déchets ménagers, notamment des piles boutons, petites batteries ou bouteilles de protoxyde d'azote. Ces éléments, souvent jetés par négligence ou méconnaissance, posent des défis majeurs pour les centres de traitement des déchets. Pour le cas des piles et petites batteries, en France, plus de 1,5 milliard

sont mises sur le marché chaque année, mais seulement 50,8 % sont collectées pour recyclage, laissant une grande quantité se retrouver dans les déchets ménagers. Les piles boutons, contenant des métaux lourds toxiques comme le mercure et le cadmium, posent un risque environnemental majeur en polluant l'air, le sol et l'eau. De plus, les piles au lithium présentent un risque élevé d'incendie lorsqu'elles sont endommagées, causant des dangers dans les centres de traitement des déchets et des difficultés vis-à-vis des assureurs. Les études montrent que les risques d'incendie liés aux batteries à lithium sont sous-estimés, nécessitant des mesures urgentes pour améliorer la sécurité.

Une des solutions est l'identification et le tri des piles et batteries, vues comme indésirables dans le flux. Un des axes de travail du PEPR porté par le CEA, vise à développer des méthodes utilisant l'apprentissage profond et l'imagerie spectrale par rayons X multivues pour détecter et identifier ces indésirables. En effet, la prise d'images selon plusieurs points de vue permet d'améliorer l'apparence d'un objet, amenant un gain de détection. Couplée à l'utilisation de l'information spectrale des rayons X, permettant une identification et séparation des matériaux plus fine, et des approches d'intelligence artificielle pour gagner en sensibilité et efficacité dans le tri, ces solutions en développement vont vers une meilleure gestion des déchets et une réduction des risques associés à ces indésirables dans les flux de déchets ménagers.

# État des lieux et enjeux du tri papier-carton

Par Josue Madama Malende, Fernando Cezar (Mines St-Etienne), membres de l'axe Papiers-cartons

Dans un contexte où les territoires engagent leur transition vers une économie circulaire, la production de papier-carton est fortement influencée par l'évolution des habitudes des consommateurs, la réglementation et les procédures administratives. En effet, dans une société de plus en plus numérisée, la dématérialisation et la montée du e-commerce ont fortement impacté les modes de consommation des papier-carton.

Alors que la production de papier à usage graphique a baissé de 66% entre 2010 et 2020, celle du papier-carton pour l'emballage a, quant à elle, augmenté de 42 % sur la même période. Par ailleurs, l'apparition de nouvelles réglementations sur les

plastiques à usage unique a fait progresser la production de cartons composite, difficiles à valoriser. Dans ce contexte, le tri devient alors un élément essentiel à mi-chemin entre la consommation et la valorisation des papier-carton. En effet, si le flux papier-carton fait partie des flux les mieux recyclés actuellement (95% pour les cartons d'emballage et 70% pour les papiers à usage graphique), il fait néanmoins face à des défis considérables au moment de l'opération de tri.

Avec la REP (Responsabilité Élargie du Producteur) sur les emballages ménagers et l'extension des consignes de tri, il est plus facile pour les ménages de trier à la source



La production du papier-carton pour l'emballage a augmenté de 42 % entre 2010 et 2020.

les emballages. La collecte sélective de ces déchets, envoyés en centre de tri, permet d'extraire le papier-carton, mais la qualité de ce flux est souvent moindre car souillé par le mélange avec d'autres flux, comme souligne un membre de COPACEL, l'Union française des industries des cartons, papiers et celluloses : « *Dans nos usines, le carton reçu contient 3 à 8 % d'impuretés [...] Nous payons donc pour du poids inutile, consommons plus d'énergie et d'eau pour l'enlever, puis devons encore financer son élimination en décharge ou par incinération avec les taxes associées.* »

Les metteurs sur le marché sont quant à eux soumis à des contraintes réglementaires, notamment celle sur les cinq flux (papier-carton, verre, bois, plastique, métal), les obligeant à séparer ces flux et limiter les contaminations. Certains metteurs sur le marché installent directement des presses à balles sur leurs sites, afin d'assurer eux-mêmes la massification et la mise en balle des déchets avant leur envoi vers les centres de recyclage. Par ailleurs, les prestataires privés qui collectent le papier-carton, encouragent de plus en plus les entreprises à trier davantage et former leurs employés aux gestes de tri : « *Nous accompagnons nos clients dans la mise en place du tri des cinq flux en leur fournissant des attestations de tri à la source et des explications réglementaires, mais certains ne comprennent pas et préfèrent rester chez la concurrence* », affirme un responsable de

SECAF, une entreprise familiale spécialisée dans la collecte et le traitement des déchets. Si des erreurs de tri sont identifiées lors de la collecte, un déclassement de la benne collectée est effectué, entraînant des coûts supplémentaires pour le producteur. Par contre, si ces erreurs ne sont pas identifiées lors de la collecte, les coûts de sur-tri et de traitement des indésirables reposent entièrement sur le repreneur. Ce dernier observe alors un manque à gagner, sinon une perte.

Pour d'autres, comme c'est le cas chez certains acteurs de la grande distribution, le principe de la logistique inverse est mis en place : les camions servant à la livraison de marchandise, récupèrent les balles de papier-carton sur les sites pour les ramener vers les entrepôts logistiques, optimisant ainsi les collectes en limitant les coûts et les transports à vide après livraison de marchandises.

Enfin, la filière papier-carton reste une filière en pleine expansion avec des perspectives prometteuses. La substitution des emballages en plastique par des emballages en carton mais aussi la REP sur les Emballages Industriels et Commerciaux, sont autant d'opportunités de mieux capter les flux de papiers et de cartons en vue de leur recyclage. Tout cela passe par un meilleur tri à la source et donc une meilleure sensibilisation des acteurs économiques et des ménages.

## Développement du réseau

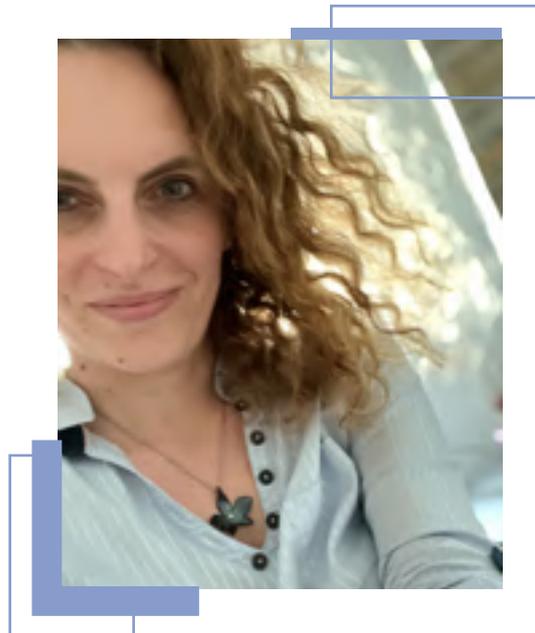
# RENCONTRE AVEC LA PILOTE DE L'AXE NUMÉRIQUE

**Pascale Marangé est une spécialiste de la modélisation selon différents points de vue et de l'ingénierie des systèmes complexes. Depuis quelques années, la chercheuse au Centre de recherche en automatique de Nancy (CRAN) se focalise sur les systèmes de régénération dans le cadre de l'économie circulaire. Pilote scientifique du nouvel axe Numérique du PEPR, sa formation lui offre le bagage parfait pour dégager une vision systémique de la filière du recyclage.**

*Par Etienne Morisseau, chargé de communication du PEPR Recyclage*

« La régénération correspond à tous les processus qui permettent de prolonger la durée de vie d'un produit, d'un composant ou d'une matière », explique Pascale Marangé, maître de conférences à l'Université de Lorraine. « Cela nécessite une vision holistique d'un système, afin de prendre les bonnes décisions. Par exemple, le recyclage fait partie de ce processus, mais n'est pas seul. Il arrive au bout d'une chaîne qui comprend la réintégration des sous-ensembles d'un produit, le re-manufacturing ou la resynthèse par exemple. C'est pourquoi la structure du PEPR, déclinée en axes « matériau » et « filière » m'a paru particulièrement adaptée à ce type de vision. »

Dès la réception de l'appel à manifestation d'intérêt du PEPR pour constitution d'un nouvel axe transverse dédié au numérique, Pascale Marangé a contacté les pilotes des axes préexistants pour évaluer leurs besoins par rapport à l'ajout du numérique dans ces filières. « Les problématiques sont



quasiment toujours les mêmes », explique la chercheuse. « Comment suivre les flux de matières et identifier leur composition, pour appliquer ensuite le procédé de recyclage adapté en fonction de la quantité et de la qualité des déchets. » Mais cela nécessite également de prendre en compte les différences pour chaque filière ; par exemple la collecte des plastiques passe notamment par les consommateurs, là où la récupéra-

tion des batteries est plus industrialisée. « Si on arrivait à avoir une vue d'ensemble de ce système, cela permettrait d'accompagner la prise de décision et d'améliorer les processus », poursuit-elle. « Il faudrait réussir à faire collaborer les acteurs au sein d'une filière (du recyclage en tant que tel, mais aussi de la logistique, la collecte, le suivi...), ainsi que les filières entre elles. »

## **NOUS DEVRONS ABSOLUMENT ESTIMER L'IMPACT DES COÛTS ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES SOLUTIONS NUMÉRIQUES PROPOSÉES.**

Pour Pascale Marangé, l'axe Numérique doit avoir une vision à plusieurs niveaux : nano (matière), micro (produits, entreprises, acteurs) et macro (stratégies, territoire), car les trois se nourrissent mutuellement. Dans un premier temps, il s'agira de comprendre les problématiques de chaque filière de recyclage pour identifier leurs points communs et leurs différences. Partir d'un cas pratique pour décliner ensuite les solutions sur les autres axes. Puis, il faudra concevoir la chaîne de valeur et la méthode de choix des acteurs pour créer une filière robuste et adaptable, avec par exemple l'utilisation de jumeaux numériques pour suivre les données utilisateurs, prédire l'utilisation des pro-

duits et leur état d'arrivée, ou encore l'utilisation de traitement d'images pour avoir une connaissance minutieuse de l'état de santé de la matière. Enfin, la dernière étape sera le pilotage de ces chaînes de valeurs, via des outils de tri des matériaux et d'aide à la décision par intelligence artificielle.

Pour la future pilote du nouvel axe transverse, deux éléments sont également essentiels dans la réalisation de ce programme : « D'une part, nos travaux devront impliquer un échange mutuel. Servir aux autres axes tout en dégageant des problématiques pertinentes pour les sciences du numérique. Par exemple, le fait de se baser sur des données incertaines, incomplètes et hétérogènes relève d'un véritable défi scientifique. D'autre part, nous devons absolument estimer l'impact des coûts économiques et environnementaux des solutions numériques proposées, en comparaison de l'absence de ces solutions. Les jumeaux numériques sont une solution tentante par exemple, mais si le stockage des informations provoque une pollution trop importante, ce n'est peut-être pas la solution adaptée. L'axe numérique devra regrouper une multitude de compétences et donc une diversité de laboratoires français pour répondre à ces questions. C'est vraiment quelque chose qui me tient à cœur », conclut-elle.

## Déclinaison territoriale du PEPR

# LES LIEUX-TOTEM

**Les lieux-totems du PEPR Recyclage sont des sites établis de concert avec ses partenaires académiques et socio-économiques, permettant d'accueillir à l'échelle locale des activités liées à la circularité des matières. Bâties autour de thématiques transverses, ils favoriseront les relations interdisciplinaires et les interactions entre les différents acteurs du domaine. Près d'une vingtaine de ces lieux seront créés dans les prochains mois sur l'ensemble du territoire.**

## Consolidation du lieu-totem du Mans

Par Charlotte Rousseau (Le Mans Université) et Mathieu Durand (ESO Le Mans), membre de l'axe SHS

Les lieux-totem sont destinés à favoriser, dans un même endroit, les interactions entre les travaux de recherche du PEPR, les formations portées sur ses équipes, et le dialogue avec les acteurs opérationnels du réemploi, du recyclage et de la gestion des déchets. C'est dans cet état d'esprit qu'a été créé, fin 2024, le lieu-totem pionnier de l'Université du Mans.

Ce lieu-totem s'appuie sur une implication de plusieurs de ses laboratoires dans différents axes du PEPR : sciences humaines et sociales, plastiques, et déchets ménagers. Il s'agit à la fois de l'UMR ESO (Espaces et Socié-

tés) du CNRS qui cherche à caractériser les inégalités environnementales et écologiques inhérentes à toute gestion des déchets, en France comme dans le monde, ou qui travaille à l'identification du métabolisme et de la gouvernance de la matière dans une optique d'économie circulaire. Il s'agit également de l'UMR CNRS Institut des Molécules et des Matériaux du Mans (IMMM) qui caractérise l'impact environnemental des plastiques ou d'ArguMans (Laboratoire de recherche en Gestion) qui s'intéresse aux comportements des consommateurs face aux déchets, aux recyclats et à la réutilisation.



2èmes Doctoriales de Rudologie : « Ce que l'immonde dit du monde », Lieu-totem du Mans, 2024

Ces travaux de recherche s'appuient sur des formations bien ancrées dans le paysage institutionnel et sur une approche méthodologique structurée depuis plusieurs décennies : la *rudologie*, en tant que « *qu'approche systématique des déchets* », entendue aujourd'hui comme « *systémique* », telle que définie par son fondateur, le géographe Jean Gouhier en 1985.



Ce concept envisage les déchets comme la trace matérielle des modes de production et de consommation, le résultat de régimes organisationnels, le fruit d'un ordre public « *rudologique* » (Barbier, 2021). Il s'agit de comprendre l'organisation des sociétés et de leurs territoires à travers l'étude des déchets, des recyclats et des objets réemployés.

La rudologie est, tout comme le lieu-totem, étroitement liée aux enjeux sociétaux et aux professionnels des déchets, du recyclage et du réemploi. Ce regard sociétal sur les déchets fait aujourd'hui le succès des étudiants et étudiantes issues des deux formations proposées au Mans sur le sujet : le Master MIDEC (Déchets et Économie Circulaire) et le Master à distance TREDECA (Transitions Écologiques, Déchets et Économie Circulaire en Afrique) ; prochainement complété par plusieurs DU (Diplômes Universitaires) de Rudologie montés dans le cadre d'un projet France 2030-CMA (Compétences et Métiers d'Avenir) avec les entreprises du recyclage.

Le lieu-totem de Rudologie du Mans permet de faire dialoguer le PEPR avec l'ensemble de la société, en organisant des journées d'études régulières (sur les plastiques en 2024,

les travailleurs et travailleuses de la propreté et du recyclage en avril 2025, les filières REP de recyclage à l'automne 2025, etc.), ou des Cafés RUDO sous forme de visioconférences liées à l'actualité de la recherche (philosophie des déchets, les ressourceries, les mines urbaines) et des acteurs opérationnels (les déchets du bâtiment, dans la grande distribution, les impacts de la loi AGECE, etc.).

Des événements d'ampleur internationale sont également organisés tel que le colloque « *Opening the bin* » 4ème édition qui réunira au Mans, en décembre 2025, le réseau international des chercheurs et chercheuses en sciences humaines et sociales spécialistes des déchets. L'ensemble de ces activités ont lieu dans un bâtiment en cours d'aménagement à l'Université du Mans, afin de constituer une véritable plateforme expérimentale permettant de porter à connaissance des professionnels et du grand public l'actualité de la recherche. L'objectif est, comme le mentionne la co-porteuse de ce projet Adeline Pierrat, de « *favoriser le décloisonnement entre deux mondes [...] pour favoriser des échanges décomplexés et bienveillants* », permettant d'avancer vers une prise en compte plus soutenable de la matérialité des sociétés.

# Création d'un lieu-totem à Bordeaux

Par Philippe Evon (Toulouse INP-LCA) et Cyril Aymonier (ICMCB), membre et pilote de l'axe Matériaux Composites

Accueillis par des établissements de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, les lieux-totems permettront au PEPR Recyclage d'apporter ses expertises :

- Pour des actions d'animation scientifique (journées recherche, écoles),
- Pour interagir avec les entreprises, les collectivités et les associations (journées techniques, présentations d'activités, vulgarisation),
- Pour de la formation (initiale ou tout au long de la vie), en collaboration avec les établissements accueillants et leurs équipes pédagogiques (écoles doctorales par exemple).

C'est ainsi qu'un lieu-totem en lien notamment avec l'axe Composites est en cours de mise en place au sein de Bordeaux INP. Ce lieu-totem s'appelle l'Atelier Durable. Au-delà du lieu-totem du PEPR Recyclage, l'Atelier Durable est un lieu dédié à l'innovation et à son évaluation environnementale, situé à l'ENSMAC - Bordeaux INP. Adossé à l'équipe de recherche CyVi de l'Institut des Sciences Moléculaires, partenaire du PEPR Recyclage, l'Atelier Durable sensibilise, forme et accompagne à la prise en compte des enjeux et impacts environnementaux tout au long du cycle de vie du produit ou du service étudié ainsi qu'à leur évaluation et à leur réduction, le tout grâce à des méthodes scientifiques robustes et actuelles. La transition écologique étant l'enjeu

de tous, l'Atelier Durable est également le lieu de rencontres et d'échanges autour de cette thématique et de sa mise en œuvre.

Imaginé comme un espace collaboratif entre praticiens et usagers (étudiants, enseignants-chercheurs, personnels, start-ups & entreprises, etc.), l'Atelier Durable, dont l'inauguration se tiendra en Octobre 2025, vise à faciliter la montée en compétence et la prise d'autonomie via différentes formules :

- Sensibiliser et faciliter la mise en action à travers des ateliers tels que la Fresque du climat, la Fresque de la biodiversité ou encore des jeux ludo-éducatifs,



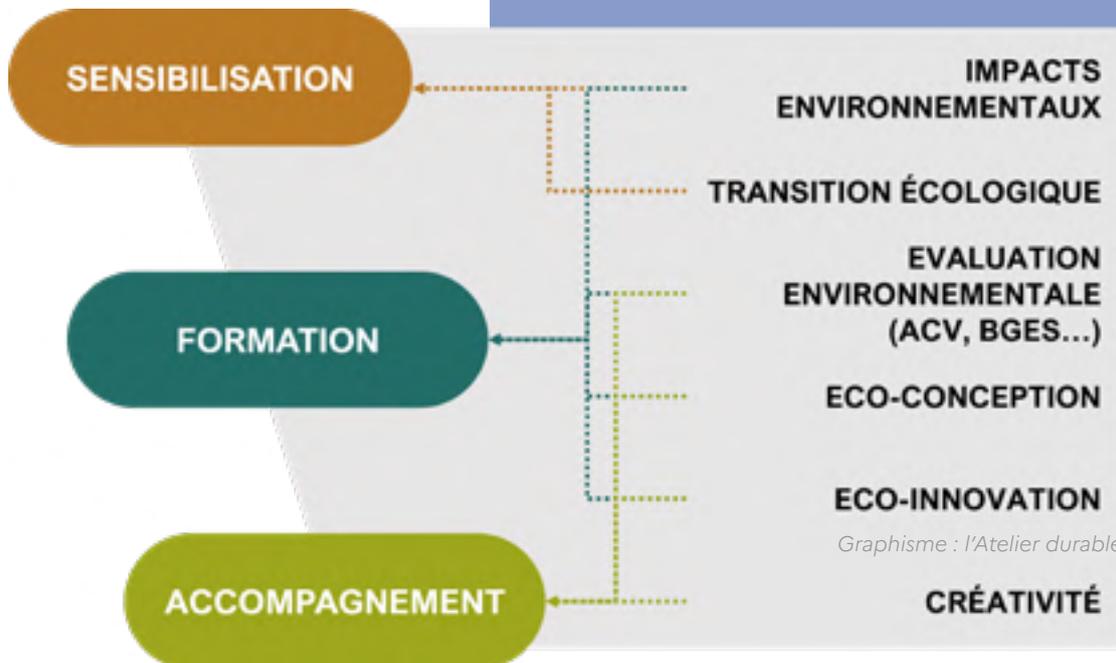
Semaine de l'innovation 2024  
Photo : Alizée Robert (ENSMAC)

- Former à l'évaluation environnementale, à l'éco-conception et à l'éco-innovation,
- Accompagner à la mise en œuvre de ces méthodes dans des projets d'innovation.

Ainsi, l'Atelier Durable s'organise autour de la prise en compte du développement durable le plus en amont possible des processus d'innovation et de conception de produits ou procédés. Si les méthodes proposées sont déclinables à tous les secteurs d'activité, diverses thématiques en lien avec les matériaux, l'agro-alimentaire ou la chimie sont particulièrement développées dans ce lieu-totem compte tenu de son environnement académique et institutionnel.

Au-delà des moyens logistiques, des actions d'accompagnement et de formation et de l'organisation d'évènements, le PEPR Recyclage va pouvoir bénéficier de l'écosystème en enseignement, recherche et innovation, développé autour du lieu-totem l'Atelier durable : licence Pro REMED (Élaboration, caractérisation et recyclage des matériaux pour une transition énergétique durable), master international AMIR (Advanced Materials Innovative Recycling), la chaire pour l'émergence, la science et la société DREAME (Durabilité et recyclabilité des matériaux pour l'énergie), le projet BATTENA pour se former aux métiers de la filière batterie, le projet REMANA (Recyclage des Matériaux en Nouvelle-Aquitaine), la création de start-ups, etc.

## STRUCTURE DES SERVICES DE L'ATELIER DURABLE



# LES ENJEUX CRUCIAUX DU GRAPHITE

**Parmi les matériaux critiques nécessaires aux technologies actuelles et futures de stockage d'énergie, le graphite est au cœur d'un marché opaque et unilatéral. Pour déverrouiller l'accès à ce composant, notamment essentiel à l'essor des technologies de mobilité électrique, le projet LULABAT de l'axe Batteries vise à offrir une meilleure compréhension de son marché, de sa chaîne de valeur, ainsi que des impacts environnementaux de son approvisionnement.**

*Par Mathieu Leguerinel, Aina Mas Fons et Frederic Lai (BRGM), membres de l'axe Batteries, et Alexandre Chagnes (Université de Lorraine), coordinateur de l'axe Batteries (projet LULABAT)*

Les batteries lithium-ion, commercialisées pour la première fois à l'échelle industrielle en 1991 par Sony, présentent d'excellentes propriétés en matière de capacité d'accumulation d'énergie par unité de masse par rapport aux technologies précédentes et concurrentes, et la réduction de leurs coûts de fabrication a permis leur expansion à grande échelle, des petits appareils électroniques portables jusqu'aux véhicules électriques.

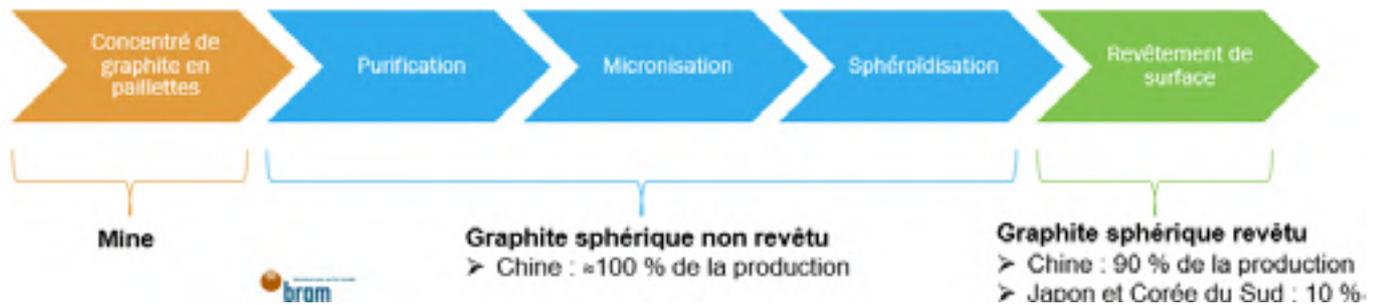
La grande majorité des batteries Li-ion sur le marché aujourd'hui sont constituées d'un électrolyte liquide à base de lithium, faisant l'interface entre une anode, le plus souvent en graphite, et une cathode. S'il existe plusieurs technologies de cathodes basées sur le choix de métaux, qui influent sur les performances de la batterie, les plus répandues sont les batteries de type NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt) et de plus en plus LFP (Lithium-Fer-Phosphate). Or, le développement de ces nouvelles technologies à déjà, et aura, un impact sur la demande en métaux utilisés par ce secteur ainsi que sur les technologies de recyclage à mettre en place.

Tous les métaux des batteries NMC et LFP, hormis le fer pour le moment, sont considérés comme critiques par de nombreux États (France, Australie, États-Unis, Japon, Union européenne, etc.), c'est-à-dire qu'ils combinent les facteurs « *risques sur les approvisionnements* » et « *importance économique pour le pays* ». La position particulière de l'UE, qui est relativement peu présente sur le secteur extractif (minier) et du raffinage, mais qui consomme de grandes quantités de métaux des batteries, doit s'accompagner d'une vigilance extrême concernant sa politique d'approvisionnement et l'analyse de ses vulnérabilités quant à l'accès à ces métaux. Ainsi, le projet LULABAT de l'axe Batteries du PEPR doit permettre, entre autres, d'améliorer la compréhension des enjeux autour de ces métaux, et en particulier du graphite.

### **Le rôle clé du graphite dans les batteries**

S'il est communément admis que les batteries contiennent du nickel, du lithium, du cobalt ou encore du plomb, la présence du graphite est plus rarement mentionnée. Or, plusieurs types de piles et de batteries contiennent des

Chaîne de valeur simplifiée du graphite naturel, de la mine au graphite sphérique revêtu, précurseur de l'anode des batteries lithium-ion (source : BRGM, 2024).



quantités non négligeables de graphite naturel ou synthétique. C'est en particulier le cas batteries lithium-ion dont l'anode est composée en grande majorité de ce matériau, dans des quantités bien plus importantes que celles de lithium (de 10 à 20 fois suivant la cathode utilisée) : 5 g dans une batterie de smartphone, 90 g pour un ordinateur portable, une dizaine de kilogrammes en moyenne pour une voiture hybride et plus de 50 kg dans un véhicule tout électrique. Le marché de la mobilité électrique est donc celui pour lequel les projections de croissance de la demande mondiale en graphite, passant d'environ 1/3 des usages du graphite en 2024 à 2/3 en 2040.

### Une production de graphite diversifiée...

Le graphite peut être divisé en trois grandes classes : naturel, traité et synthétique.

Le graphite naturel résulte du métamorphisme (haute température et haute pression) de composés carbonés organiques (charbons, bitumes) contenus dans les roches, généralement présent sous la forme de palettes, amorphe et en veine. Si la Chine est non seulement le plus gros consommateur de graphite, c'est aussi de loin le premier producteur et exportateur mondial de graphite

naturel avec de nombreuses mines situées principalement dans le nord du territoire. Le service géologique étatsunien, l'USGS, estime la production chinoise à 1,27 Mt en 2024, soit 79 % de la production mondiale. Les producteurs miniers suivants sont Madagascar (89 000 t), le Mozambique (75 000 t) et le Brésil (68 000 t). La production mondiale, chahutée en 2020 par la pandémie puis en 2022 par la guerre en Ukraine, devrait afficher une hausse de quasiment 5 % en 2024 avec l'ouverture de mines au Brésil et en Tanzanie.

Le graphite synthétique est, quant à lui, issu du traitement à haute température d'un précurseur carboné amorphe (charbon, pétrole, etc.). A l'issue de sa transformation via un procédé long et complexe, le graphique synthétique se présente sous forme d'électrodes, de poudre ou en granulés. La production mondiale est de plus de 2,8 Mt en 2024, et largement dominée par la Chine (75 % du marché mondial), loin devant le Japon et les États-Unis.

Enfin, les graphites traités sont obtenus par modification physique du graphite naturel et peuvent se présenter la forme de graphite expansé, de graphène, colloïdale, etc., et sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels.

### **Une chaîne de valeur dominée par la Chine**

En plus de la production de graphite naturel et synthétique, la Chine maîtrise l'ensemble de la chaîne de valeur de cette substance. Pour être utilisé sous la forme d'anode dans les batteries, le graphite va devoir sphéroïdisé pour obtenir une plus grande surface de contact au sein de cette anode et donc accroître la conductivité et le rendement. Ce graphite sphérique, d'abord non revêtu, est produit à plus de 97 % en Chine, dans la province du Shandong et est principalement utilisé dans le pays par les fabricants d'anodes de batteries Li-ion. La production de graphite sphérique revêtu d'une couche de carbone dur (autrement dit « *matériau actif* » de l'anode) est réalisée à hauteur de 90 % en Chine, en raison d'une maîtrise technique, d'une main d'œuvre moins onéreuse et de restrictions environnementales qui restent encore assez souples. Si les autres producteurs historiques se situent majoritairement au Japon et en Corée du Sud, plusieurs compagnies ont pour projet de fabriquer du graphite sphérique revêtu, favorisant une diversité des acteurs et géographique, comme Novonix ou Syrah aux États-Unis ou encore NMG au Canada.

### **Un marché opaque**

Si les informations sur le graphite naturel sont difficiles d'accès, celles sur le graphite synthétique sont encore plus rares. Pourtant, le graphite est considéré comme une substance critique pour de nombreuses institutions. Le marché du graphite est ainsi cloisonné et opaque, si bien que les données chiffrées concernant l'offre, la demande, ainsi que les échanges commerciaux, mais aussi la situation en Chine, restent très approximatives et variables en fonction des sources, en particulier dans le secteur confidentiel du graphite synthétique. A titre d'exemple, la part utilisée par le secteur des batteries entre le graphite naturel et synthétique

est difficile à affirmer avec précision, de même que la consommation mondiale qui se situerait entre 3,5 et 4 Mt. Ce manque d'informations concerne également les aspects environnementaux, dont les enjeux restent aujourd'hui relativement méconnus, malgré que le graphite apparaisse comme un élément clé pour permettre l'essor de la mobilité électrique.

### **Objectifs LULABAT**

La Chine continue toujours de dominer la production de graphite naturel et synthétique et reste de loin le premier consommateur mondial mais une diversification s'établit petit à petit au niveau de l'offre minière et métallurgique. Plusieurs projets voient le jour, notamment en Afrique (Madagascar, Mozambique, Namibie ou Tanzanie), en Australie mais aussi en Europe, bien soutenus par la demande croissante pour la fabrication de graphite sphérique à destination des batteries Li-ion et la prise de conscience du caractère critique et stratégique de cette substance.

Dans ce cadre et sur cette partie liée au graphite, le projet de phase I de l'axe Batteries, « *LULABAT* » a pour objectif d'offrir une meilleure compréhension du marché et de la chaîne de valeur du graphite, dans un horizon temporel actuel et futur afin de pouvoir mieux appréhender les enjeux d'approvisionnement. Au-delà du graphite primaire, le projet vise également à offrir une meilleure vision des projets actuels autour du recyclage du graphite issu des batteries Li-ion, clé pour réduire la dépendance aux imports chinois. Enfin, les travaux de LULABAT intègrent une dimension environnementale, visant à fournir des éclairages sur les impacts environnementaux des différentes chaînes d'approvisionnement du graphite actuellement établies (graphite naturel et synthétique) ou en développement (graphite recyclé).

## Colloque national

# LE PEPR RECYCLAGE À GFP 2025

**La section Nord du Groupe Français des Polymères (GFP) organise la 53<sup>ème</sup> édition de son colloque national du 24 au 28 novembre 2025 au Learning Center Innovation sur le campus cité scientifique de l'Université de Lille, situé à Villeneuve d'Ascq. Pour l'occasion, une demi-journée sur le recyclage des polymère sera animée par Sophie Duquesne, co-porteuse de l'axe Plastiques du PEPR**

*Par Valérie Gaucher (UMET) et Sophie Duquesne (Centrale Lille), membre et co-pilote de l'axe Plastiques*

Le GFP est une société savante qui vise à rassembler l'ensemble de la communauté des chercheurs, académiques et industriels, qui travaille sur les polymères. Cette édition sera dédiée aux thématiques suivantes :

- Polymères & Environnement,
- Polymères & Santé,
- Polymères & Energie,
- Ingénierie Macromoléculaire,
- Relations structure-propriétés physiques,
- Procédés Innovants,
- IA & Machine Learning.

Dans le cadre de cette édition, une demi-journée est co-organisée avec le PEPR Recyclage sur les problématiques liées au recyclage des polymères. Elle aura lieu le mercredi 26 novembre 2025. A cette occasion,

Yvan Chalamet, professeur au Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP) de Saint Etienne et co-porteur de l'axe Déchets ménagers du PEPR, donnera une conférence sur le « *développement de procédés innovants pour proposer des nouvelles solutions dans les domaines du recyclage.* » Elle sera suivie par une intervention de Gilles Dennler, directeur de la Recherche du Centre technique industriel de la plasturgie et des composites IPC à Bellignat, sur le rôle de la réglementation dans le domaine du recyclage des plastiques. Une visite de la plateforme technologique POLYREC dédiée au développement et à l'optimisation de procédés de recyclage pour différents polymères sera également proposée au cours de la journée.

*Plus d'informations : [gfp2025.sciencesconf.org](https://gfp2025.sciencesconf.org)*



## Design et ingénierie

# CHANGER DE PARADIGME

**Au sein du laboratoire de design EnsadLab, acteur du projet de phase I de l'axe Textiles, design et sciences des matériaux s'allient pour proposer de nouveaux outils de conception textile : en utilisant les changements de couleur des teintures naturelles lors de leur exposition au soleil, il est possible de concevoir des textiles faisant apparaître ou disparaître des motifs. Ce changement de paradigme proposé par la designer Lou Ramage floute les frontières entre disciplines et fait dialoguer les outils de chacune.**

*Par Camille Fuzier (EnsadLab), membre de l'axe Textiles*

Les colorants textiles de synthèse, pétrosourcés, représentent un problème majeur de pollution des eaux usées. Leur essor s'étant inscrit dans la naissance de la société de consommation et la standardisation de la production industrielle, ce sont leurs propriétés qui valent comme norme pour les attentes actuelles d'une couleur : reproductible à l'infini, conservant teinte, saturation et luminosité dans le temps. À l'opposé, les colorants bio-sourcés (issus de végétaux, animaux, mais aussi champignons, minéraux ou bactéries), sont connus depuis des siècles mais plusieurs leviers freinent leur utilisation massive. Parmi eux, les coûts plus élevés, mais aussi leur reproductibilité, et leur solidité pour certains.

Notre recherche propose d'opérer un changement de paradigme vis à vis de ces propriétés : concevoir en utilisant la variabilité temporelle des teintures naturelles comme un atout, et non plus un défaut. On déplace la contrainte vers la propriété : on ne parle plus de décoloration, mais de couleur évolutive. L'interdisciplinarité devient alors levier de problématisation scientifique ; comment la construction de travaux à cheval entre

design et sciences des matériaux force les orientations de recherche de la discipline scientifique vers de nouveaux paradigmes ?

Si l'on se saisit de la méthode de conception telle que proposée par la designer, plusieurs apports scientifiques sont envisageables : accélérer ou ralentir l'évolution d'un colorant, rechercher des colorants à effets par exemple. Ces pistes, les premières qui ont émergé dans le cadre de notre collaboration, témoignent d'un réflexe intellectuel qui amène la scientifique à penser en premier lieu la modification et l'optimisation de la matière pour prétendre à des propriétés qu'elle n'atteint pas sans cette étape de transformation.

Ainsi, ces premières pistes de recherche ont été exclues ; plutôt que d'essayer encore d'optimiser la fabrication, on choisit de mettre les outils scientifiques au service de la matière telle qu'elle est pour la valoriser avec ses propriétés intrinsèques. Il s'agit d'optimiser la gestion des contraintes autour de la matière, et non directement sa structure physico-chimique. Dans notre cas précis, les outils statistiques de gestion de la reproduc-

tibilité vont permettre d'exploiter des mesures colorimétriques pour permettre une visualisation, une compréhension et à terme une appropriation des variations colorées.

## ON NE PARLE PLUS DE DÉCOLORATION COMME D'UN DÉFAUT, MAIS DE COULEUR ÉVOLUTIVE.

Travailler comme physico-chimiste dans une école d'art pose des problèmes d'accès à des équipements scientifiques, mais le fait de s'inscrire dans un programme interdisciplinaire national devrait pouvoir pallier à une partie de ces problèmes. L'environnement enrichissant et les modalités pédagogiques en workshop permettent de tester auprès d'étudiant.es en design une partie de nos postulats et méthodes.

Ce positionnement permet, par ailleurs, un retour vers une forme d'humilité vis-à-vis du travail millénaire de teinture naturelle qui a donné lieu à une somme conséquente de connaissances sur la fibre textile et les colorants naturels, sans pour autant régler définitivement les enjeux de reproductibilité parfaite. Se placer au niveau des contraintes à lever pour permettre une conception plus fonctionnelle et écologique, plutôt qu'au-dessus de la matière à contrôler à tout prix, nous semble plus pertinent au vu de l'urgence actuelle à repenser nos systèmes industriels. Dans le cas de recherches à l'intersection entre design et sciences des matériaux, l'intérêt apparaît rapidement : les outils des deux disciplines peuvent être mobilisés pour inscrire la démarche conjointe au plus proche de la fonctionnalité et de l'éco-conception.



---

*Camille Fuzier est docteure en physico-chimie et post-doctorante à l'EnsadLab, laboratoire de design de l'ENSAD (Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs).*

*Après une formation d'ingénieure à l'ESPCI Paris, elle commence une thèse au LCMCP (Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris) où elle développe un biomatériau versatile et biomimétique pour servir d'alternative au cuir dans le cadre d'un contrat CIFRE avec Hermès. Durant son premier post-doctorat sur le même sujet, elle s'interroge sur les enjeux de design que pose sa recherche et rejoint ensuite le PEPR Recyclage au sein de l'EnsadLab dans le groupe Soft Matters co-dirigé par Jean-François Bassereau où elle travaille en collaboration avec Lou Ramage, doctorante en design textile.*

## Analyse et caractérisation

# LA MINE URBAINE DES D3E : DES PÉPITES À EXTRAIRE

**Les métaux issus des déchets d'équipements électriques et électroniques (D3E) constituent un nouveau gisement de matières premières, une « mine urbaine » dont l'exploitation permettrait d'économiser des ressources. Au sein du PEPR, l'objectif du projet ReviWEEE de l'axe D3E est de mieux comprendre ces gisements potentiels et de développer des procédés permettant de maximiser leur valorisation, notamment via une meilleure caractérisation.**

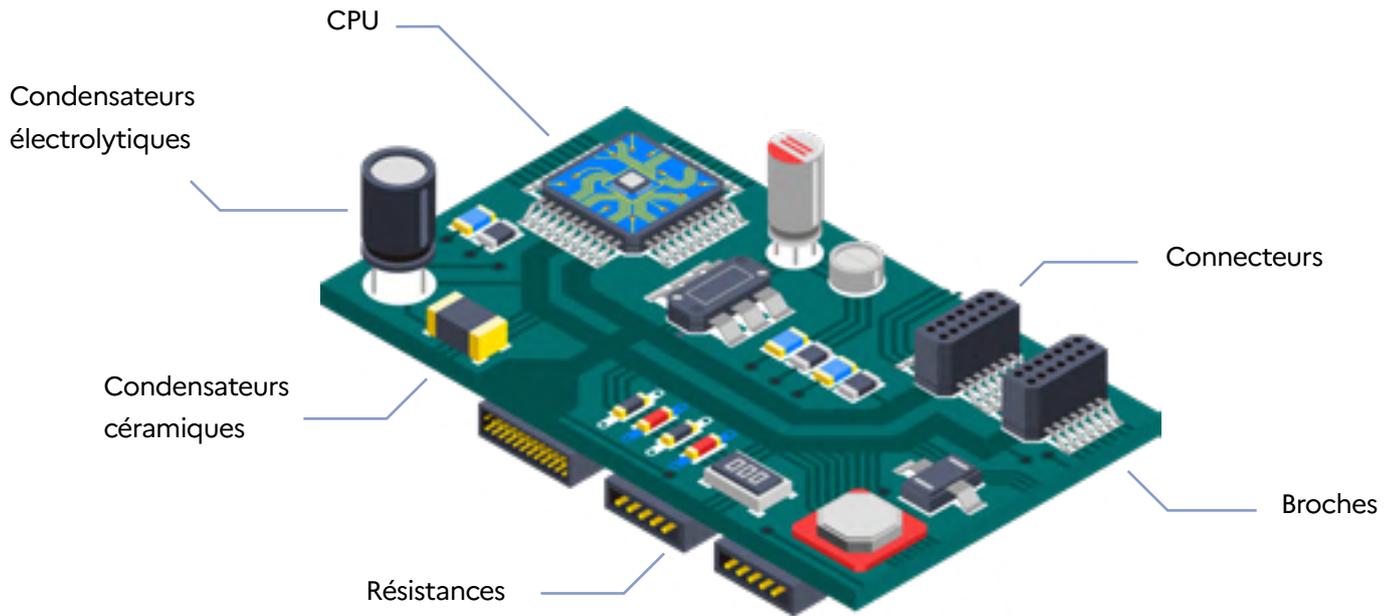
*Par Solène Touze (BRGM) et Jean-Christophe P. Gabriel (CEA), pilotes de l'axe D3E*

Dans le domaine du recyclage, les lots à caractériser ont des masses conséquentes. Il est par exemple impossible de caractériser et analyser la totalité d'un lot de 5 tonnes de cartes-mères, car on introduit dans un outil d'analyse que quelques grammes. C'est la méthodologie d'échantillonnage, le passage de la tonne au gramme qui est primordial et complexe. Quand il est bien fait, l'échantillon d'analyse est « presque » représentatif du lot initial, avec malgré tout une marge d'erreur.

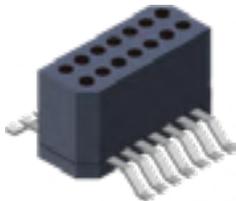
La préparation de cet échantillon est compliquée pour les déchets électroniques car ils ont des compositions très hétérogènes. Les teneurs en métaux entre différents D3E peuvent beaucoup varier, et cette différence peut également être importante sur un même déchet. C'est par exemple le cas des teneurs en or et palladium d'un ordinateur des années 80 comparé à aujourd'hui. De plus, les métaux peuvent prendre beaucoup de formes dans le déchet ; le cuivre peut être sous forme de fils dans des bobines, d'alliages cuivre-étain ou inclus dans un composant électronique. Idem pour l'or qui peut être sous forme de fils ou de surcouches sur des broches de connexion.

Le projet de phase I de l'axe D3E « ReviWEEE » vise à développer une méthodologie d'échantillonnage efficace et à estimer les incertitudes associées, des teneurs en métaux des cartes électroniques issues des D3E. Les travaux se concentrent sur ce type de déchets, car c'est un exemple typique de déchet complexe qui concentre une large palette de métaux. Par ailleurs, la filière de recyclage existante ne ciblant que quelques métaux (principalement le cuivre et les métaux précieux), il existe un enjeu important sur la récupération des métaux critiques actuellement non-valorisés.

Prenons l'exemple d'une carte-mère d'ordinateur, chacun des composants peut être vu comme une pépite de quelques métaux, mais ce mix de métaux diffère d'un composant à l'autre. Cette variabilité spatiale, appelé « effet pépite » explique la difficulté de l'échantillonnage, mais elle peut aussi être un avantage si l'on est capable de les trier selon leurs compositions respectives. On aboutit ainsi à des sacs de tris simplifiés en composition et surtout enrichis en métaux constitutifs de chaque type de composants. Rendre possible ce tri élémentaire des composants individuels est l'objectif d'une des autres tâches du projet ReviWEEE.



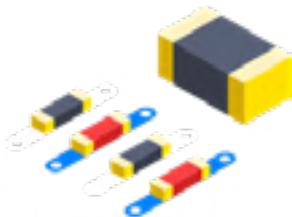
Les broches et contacts des composants sont généralement riches en cuivre, ou un de ses alliages, protégés de la corrosion par un plaquage en étain, nickel, argent, palladium ou or. De ce fait, les composants électroniques contiennent quasi-systématiquement du cuivre et des traces de l'un de ces métaux



Les connecteurs sont principalement formés de broches (voir ci-dessus) et peuvent aussi être riches en résines plastiques spécialisées et formulées notamment pour leur stabilité à hautes températures (les procédés de fabrication des circuits imprimés les exposent à plus de 200°C pendant plusieurs dizaines de secondes voire minutes). Ils sont ainsi chargés d'additifs, notamment retardateurs de flammes à base d'antimoine ou de brome.



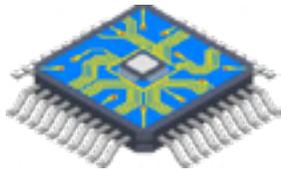
Les condensateurs électrolytiques en aluminium cylindriques sont riches en aluminium et son oxyde avec éventuellement la possibilité de présence de bore ou de manganèse.



Les condensateurs céramiques: peuvent avoir des chimies très variées mais des aspects quasi-identiques ce qui rend leur séparation particulièrement difficile. Selon les cas on peut y trouver des métaux critiques comme le palladium, niobium, le tantale, le molybdène ou des terres rares (comme le néodyme), mélangés avec du zinc, du titane et/ou du barium.



La composition des résistances est extrêmement variable selon leur spécifications, âge, type et fabricant, pour des aspects extérieurs identiques au sein d'un même type. Le cuivre y est quasiment toujours présent, mais on peut y trouver aussi du nickel, chrome, tantale, molybdène, ruthénium, silicium, aluminium, manganèse, gallium ou de l'argent.



Au niveau du CPU (unité centrale de calcul), la puce elle-même contient principalement du silicium avec des traces de nombreux autres éléments (cuivre, tungstène). Ce sont souvent les composants les plus recherchés car la connectique est souvent à base d'or, d'argent et/ou de palladium. L'argent est utilisé dans la formulation de la colle conductrice connectant la base de la puce au boîtier. L'or est utilisé comme plaquage ou sous forme de fils micrométriques connectant la puce au boîtier.

Enfin pour la soudure, plus de 200 compositions différentes sont répertoriées formées d'alliages pouvant contenir des métaux toxiques comme plomb et cadmium, maintenant bannis, mais aussi étain, bismuth, argent, indium, zinc, cuivre, nickel, chrome, aluminium, silicium voire même plus rarement de l'or.

### POURQUOI BIEN MAITRISER SON ÉCHANTILLONNAGE ?

La première étape, incontournable pour une valorisation efficace des métaux, est d'acquérir du savoir sur la composition de ces déchets. Il faut, entre autre, savoir quantifier les métaux contenus dans le déchet. Cela concerne aussi bien les métaux présents à une concentration supérieure au pourcent que ceux présents à une concentration de l'ordre du mg/kg.

Cette connaissance est essentielle pour toute la chaîne du recyclage, elle permet d'estimer la valeur marchande du déchet, de quantifier les flux de métaux à l'échelle locale ou nationale, de quantifier les pertes de métaux dans les chaînes de recyclage, d'explorer de nouveaux procédés et marchés, d'adapter les procédés de recyclage à l'évolution des déchets et enfin, de traquer les métaux potentiellement polluants.

	Métaux de base				Précieux		Terres-rares	
	Cuivre	Aluminium	Nickel	Molybdène	Or	Palladium	Néodyme	Dysprosium
Unité	%	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Valeur moyenne	23	5,3	5190	27	65	3,6	35	9,2
Valeur min*	19	4,7	3270	8	54	2,7	25,3	4,6
Valeur max*	26	6,1	8250	88	77	4,7	48,5	11,2

Exemple de composition d'un lot de cartes mères (métaux principaux)

\*Calcul intervalle de confiance à 95%

## Aimants-permanents

# A LA RECHERCHE DES TERRES RARES

**Les « mines urbaines » de D3E (voir article précédent) contiennent pour beaucoup des terres rares, notamment les aimants permanents issus entre autres de l'éolien, de l'électronique et de véhicules notamment électriques. Ces aimants peuvent être recyclés par différents procédés de métallurgie extractive (pyrométallurgie, hydrométallurgie ou bio-métallurgie). Les membres des axes Métaux stratégiques et Nouvelles technologies de l'énergie (NTE) du PEPR, travaillent à la fois sur l'étude de ces procédés de recyclage par voie longue et par voie courte.**

*Par Yannick Ménard (BRGM) et Stéphane Pellet-Rostaing (ICSM), pilotes de l'axe Métaux stratégiques*

Les terres rares (REEs) sont un groupe de dix-sept éléments chimiques qui doivent leur nom à leur faible concentration dans des gisements exploitables à bas coût. Parmi elles, le néodyme, le dysprosium, le praséodyme, le terbium et le samarium possèdent une configuration électronique qui confère aux aimants permanents NdFeB, commercialisés dès le début des années 1960-1970, d'excellentes performances magnétiques. Sous forme d'alliage matriciel  $Nd_2Fe_{14}B$ , leur rapport puissance-poids élevé les rend indispensables aux disques durs, smartphones, lecteurs portables, IRM, véhicules électriques et hybrides ainsi qu'aux générateurs d'éoliennes offshore. Les moteurs et générateurs absorbent 34 % de la production mondiale, le stockage de données 14 %, la traction électrique 11 % et la gestion d'énergie 7 % (voir page 27). Selon l'usage, la masse varie de 1-30 g dans l'électronique à 1-2 t dans une éolienne offshore, la durée de service passant de 2-5 ans à 20-30 ans, avec un intermédiaire de 16 ans pour les véhicules électriques.

Au-delà de l'identification et de la caractérisation des gisements de D3E (voir article précédent), le recyclage des aimants types NdFeB s'articule en trois séquences : démontage et séparation physique des aimants, enrichissement des métaux par traitements thermo- ou hydrométallurgiques et conversion et mise en forme des éléments triés. Les filières actuelles se concentrent sur les petits équipements faciles à démonter, mais la prochaine décennie verra affluer des volumes issus des secteurs éolien et automobile. Une fois les aimants extraits, deux technologies coexistent, la « voie courte » refond l'alliage pour produire directement un nouvel aimant, la « voie longue » associe pyro- puis hydrométallurgie afin d'isoler sélectivement les terres rares. Cette seconde option nécessite un grillage préalable, l'alliage est oxydé, la poudre gagne en réactivité et une lixiviation douce récupère les terres rares, plus solubles que les oxydes de fer ou de cobalt.

# Recyclage des aimants permanents par voie longue.

Par Alain Seron et Nouredine Menad (BRGM), Stéphane Pellet-Rostaing et Clément Fleury (ICSM)

## **Des réactifs de chimie douce pour extraire sélectivement les terres rares**

Les procédés d'extraction des REEs à partir de déchets de la mine urbaine habituellement mis en œuvre utilisent des acides forts puis des étapes de séparation liquide/liquide pour concentrer sélectivement ces éléments. Dans un objectif de minimiser les impacts environnementaux et sanitaires du recyclage des terres rares des aimants permanents, le BRGM a développé un procédé mettant en œuvre des réactifs de chimie douce. Ce procédé utilise l'acide acétique et l'acide oxalique comme agents de lixiviation et de précipitation, respectivement. Les taux de récupération des REEs sont en adéquation avec un développement industriel, de même que la pureté des produits obtenus. Pour autant, les analyses réalisées sur les poudres d'oxydes de REEs ainsi obtenues révèlent la présence de traces de fer, dont la réduction est souhaitable afin d'accroître la valeur marchande des produits finaux.

Dans ce contexte, le BRGM explore deux options distinctes de pré-traitement des aimants afin soit d'éliminer la fraction ferreuse avant la lixiviation des REEs, soit d'en modifier la spéciation afin de rendre le fer insoluble en milieu acétique. La première option, qui a d'ores et déjà été travaillée dans le cadre de l'axe Métaux Stratégiques, met en œuvre la lixiviation sélective du fer de l'alliage NdFeB à l'aide d'acide formique. Le procédé développé est particulièrement efficace et permet une lixiviation préalable du fer et du

bore en limitant ainsi la mise en solution du fer conjointement avec les REEs. Ce procédé a donné lieu au dépôt d'un brevet. Une autre solution est actuellement à l'étude afin de modifier, par traitement thermique, sous atmosphère contrôlée, la spéciation du fer de telle manière à rendre celui-ci insoluble en milieu acétique. En effet, des travaux menés au BRGM ont permis de démontrer que l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) est insoluble en présence d'acide acétique. Dans le cadre de l'axe Métaux Stratégiques, différentes collaborations ont par ailleurs été initiées avec des industriels tels que Chimie-Circuit (collaboration au travers d'un projet de transfert technologique), MagReesource et Solvay (filiales), Environment-recycling (fournisseur) et pour la soumission d'une proposition dans le cadre d'un appel à projets européen.

## **Des hydrotropes pour un recyclage des terres rares raisonné :**

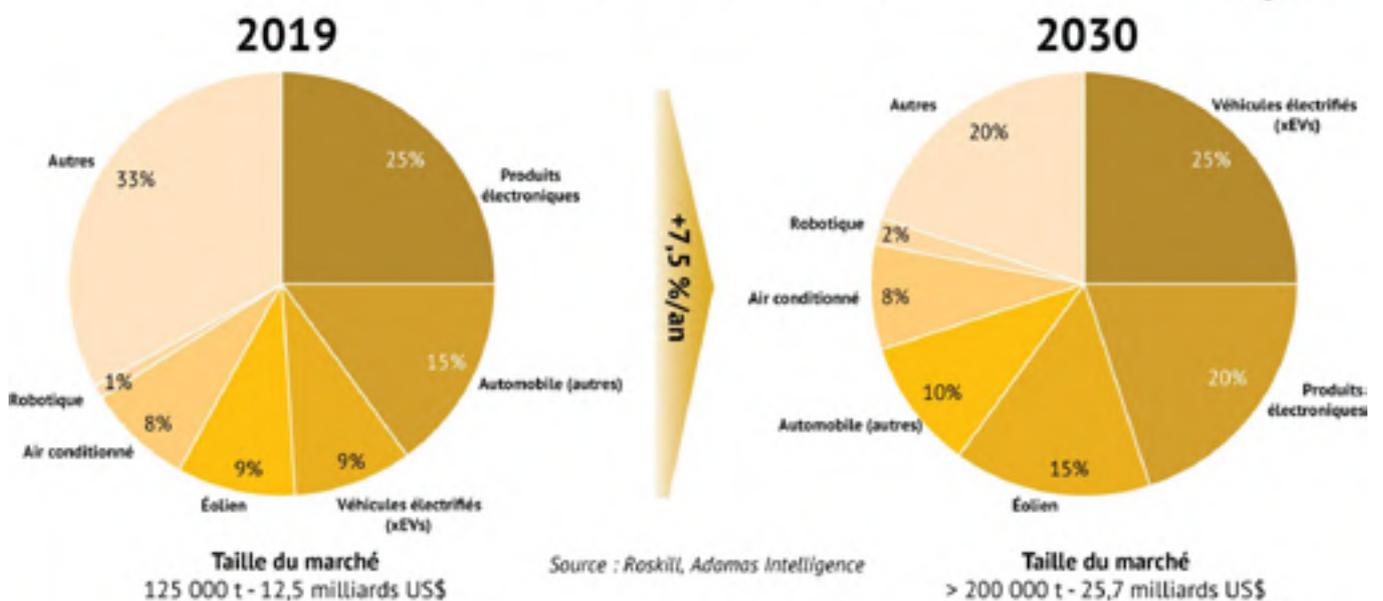
Le procédé d'extraction et de récupération des REEs par voie longue, actuellement le plus avancé et basé sur l'extraction liquide-liquide, constitue néanmoins une charge environnementale importante. Outre l'émission de solvants volatils et de gaz résiduels comme l'ammoniac, les acides inorganiques utilisés dans les procédures de lixiviation complète et d'extraction liquide-liquide contribuent de manière significative à la destruction de la couche d'ozone, à la toxicité potentielle pour l'homme, à l'écotoxicité potentielle pour les milieux aquatiques marins,

à l'eutrophisation, aux émissions de gaz à effet de serre et au coût des matériaux dans l'ensemble du procédé.

Une des méthodes proposées par l'ICSM à Marcoule consiste à remplacer les acides classiquement utilisés dans les processus de lixiviation par des formulations ternaires à base d'hydrotropes, qui permettent d'une part une lixiviation sélective et d'autre part rendent superflue l'étape d'extraction liquide-liquide. Comme les métaux ciblés sont dissous sélectivement à partir des matériaux solides, leur précipitation est alors possible, rendant inutile le processus d'extraction liquide/liquide, et ouvrant ainsi la voie à des procédés plus compacts et éco-compatibles, réduisant drastiquement les déchets chimiques secondaires. Les systèmes ternaires composés d'une molécule amphiphile à chaîne courte appelée « hydrotrope » et de deux fluides initialement non miscibles sont considérés ici comme de puissants milieux de solubilisation.

Dans cette étude, nous considérons différents mélanges ternaires d'eau, d'hydrotropes ioniques et de diluants éco-compatibles dont le mélange Eau/salicylate de sodium (NaSal)/acétate d'éthyle (AcOEt) qui permet, après précipitation à l'acide oxalique, de récupérer une phase enrichie à 99,4% en oxyde de Dysprosium et une phase enrichie en oxyde de Didymium (Nd + Pr)<sup>1</sup>. Le NaSal étant un électrolyte largement utilisé comme agent solubilisant dans les industries pharmaceutique, l'AcOEt étant un solvant « vert » biosourcé également utilisé comme solvant non toxique dans l'industrie pharmaceutique, l'utilisation en hydrométallurgie du ternaire H<sub>2</sub>O/NaSal/AcOEt présente ainsi de nombreux avantages ouvrant une toute nouvelle voie générale pour réduire l'empreinte environnementale des procédés de recyclage. Enfin, la compatibilité de l'acide oxalique avec le mélange ternaire NaSal/H<sub>2</sub>O/AcOEt permet une précipitation séquentielle des terres rares, permettant par ailleurs le recyclage du mélange ternaire de lixiviation.

### Évolution des secteurs d'utilisation des aimants permanents Nd-Fe-B



# Recyclage des aimants permanents par voie courte.

Par Ryan Sedek (GPM-UMR 6634 CNRS), membre de l'axe NTE

Contrairement au recyclage par voie longue, le recyclage par voie courte a pour objectif de permettre la fabrication directe d'un nouvel aimant au cours du procédé de recyclage. Par ce biais, il est possible d'établir une boucle fermée de recyclage des aimants. Deux types de recyclages par voie courte sont étudiés dans le cadre du PEPR, le recyclage par voie hydrothermale et la décrépitation à l'hydrogène.

## **Recyclage par voie Hydrothermale:**

Pour cette première méthode, l'aimant Néodyme-Fer-Bore (ou NdFeB) en fin de vie est placé dans un réacteur contenant généralement de l'eau, de l'alcool ou un mélange des deux et est chauffé à quelques dizaines, voir centaines, de degrés. L'aimant et le mélange vont réagir et former de l'hydroxyde de néodyme  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  et de l'hydrogène gazeux. Cet hydrogène produit est alors absorbé par  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  et le néodyme présent dans l'aimant. La formation de ces hydrures et hydroxydes de  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  et Nd a pour effet de fragiliser et réduire l'aimant en poudre. Des études sont réalisées à l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB) dans le but d'éviter le maintien de ces oxydes et hydroxydes au cours du procédé. De nouveaux solvants sont aussi à l'étude évitant directement la formation d'hydroxydes et d'oxydes.

## **Recyclage par décrépitation à l'hydrogène:**

La décrépitation à l'hydrogène (ou HD pour Hydrogen Decrepitation) consiste à placer

un aimant NdFeB directement en présence d'hydrogène gazeux pour former de l'hydrure de néodyme  $\text{NdH}_{2+x}$  et l'hydrure  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{BH}_x$ . Pour cela, l'aimant en fin de vie est soumis à une pression de 1 bar d'hydrogène à la température ambiante (ou à une température légèrement supérieure). L'absorption d'hydrogène a pour effet d'augmenter le volume du matériau et ainsi le fragiliser et le réduire en poudre fine. Cette poudre est ensuite déshydrurée avant d'être broyée puis mélangée avec une poudre de NdFeB nouvellement élaborée. Ce mélange de poudre est compacté et chauffé afin d'obtenir à nouveau un aimant dense dont la microstructure est favorable aux propriétés magnétiques requise pour un aimant permanent. Cette technique est quant à elle étudiée au CEA Liten de Grenoble.

La start-up française MagREESource, créée en 2020 par des chercheurs de l'institut Néel-CNRS à Grenoble, a pour objectif de recycler les aimants permanents en fin de vie par décrépitation à l'hydrogène. Leurs procédés de recyclage s'appuient sur les travaux réalisés par Sophie Rivoirard, à l'initiative de la Start-up, et Daniel Fruchart son ancien directeur de thèse. Une usine de recyclage devrait ouvrir d'ici 2027 et atteindre une capacité de production d'aimants recyclés de 1000 tonnes par an d'ici 2031 [1][2].

D'un autre côté, par son association avec différents partenaires (Daimantel, CEA Liten,

Valeo), Orano a pour objectif de se positionner comme un producteur d'aimants permanents frittés NdFeB de hautes performances issus du recyclage par décrépitation à l'hydrogène [3]. Chaque partenaire ayant une place bien spécifique, allant du démantèlement à la réutilisation en passant par la production et l'apport de technologies.

Dans le cadre du PEPR Recyclage, l'un des points clés est la compréhension de la diffu-

sion du Dysprosium (Dy) au cours du procédé de densification dans le cas d'un mélange de poudres comprenant en partie de la poudre d'un aimant en fin de vie décrépit. Le Dy étant présent dans les aimants pour augmenter la coercitivité (sa résistance à la désaimantation en présence de champs magnétiques), il est nécessaire de déterminer les conditions favorables à la re-formation d'une microstructure similaire à celle des aimants avant le processus de recyclage.

[1] ADEME infos, *Recyclage des aimants permanents: une filière stratégique*, 2024.

[2] Le journal CNRS, Martin Koppe, *Des avancées pour le recyclage des aimants à terres rares*, 2023.

[3] Orano, Benoit Richebé, 2023.

## PORTRAIT DE CHERCHEUR - RYAN SEDEK



Ryan Sedek, post-doctorant au Groupe de Physique des Matériaux (GPM-CNRS) et membre de l'axe NTE.

### **Quel a été votre parcours académique et professionnel ?**

J'ai d'abord effectué mes stages de master à l'ICMPE-CNRS de Thiais sur la synthèse et la caractérisation de matériaux magnétiques pour la réfrigération magnétique et les aimants permanents. J'ai ensuite réalisé une thèse au CEA Liten et à l'Institut Néel à Grenoble portant sur le développement des propriétés magnétiques du matériau  $Nd(Fe,Mo)_{12}N$ , sous la direction de Patricia de Rango et Sorana Luca.

### **Sur quoi portent vos travaux au sein du PEPR ?**

Dans le cadre du PEPR Recyclage, je travaille au GPM-CNRS à Saint-Etienne-Du-Rouvray avec Virginie Nachbaur et Samuel Jouen. Je suis en charge de la caractérisation d'aimants recyclés par microscopie électronique à balayage et spectroscopie Mössbauer, afin de déterminer si les conditions de recyclage permettent d'obtenir un aimant dont la microstructure est optimisée.

### **Qu'est-ce qui a motivé votre participation au programme de recherche ?**

Ayant une certaine expérience et affinité pour la synthèse et la caractérisation des matériaux magnétiques, je souhaitais poursuivre mon travail dans ce domaine tout en ayant la possibilité de développer de nouvelles compétences, comme la caractérisation par microscopie électronique à balayage. Le PEPR m'offre également la possibilité de développer un large réseau scientifique et professionnel, dans des domaines aussi bien connexes qu'éloignés.

## Valorisation de la recherche

# LE CONSORTIUM CIRCLE

**Le consortium CIRCLE, lauréat de France 2030, dispose d'un financement global de 24 millions d'euros pour soutenir les phases de prématuration et de maturation dédiées à la Stratégie Nationale d'Accélération Recyclage, Recyclabilité et à la Réincorporation de Matériaux Recyclés. Il peut ainsi prendre le relais sur la valorisation des résultats obtenus dans le cadre des projets financés par le PEPR.**

*Par CIRCLE (CNRS Innovation - SATT Pulsalys)*

La valorisation technologique joue un rôle clé dans le transfert de la recherche vers le monde socio-économique. En transformant les résultats de la recherche en solutions concrètes innovantes, elle soutient le développement de produits, procédés et services. Pour répondre aux enjeux du recyclage, de la recyclabilité et réincorporation de matériaux, l'État accompagne spécifiquement cette dynamique par des dispositifs de financement dédiés à la création de valeur issue de la recherche publique : le financement des phases de prématuration et maturation.

Les programmes d'accompagnement proposés par le consortium CIRCLE, spécifiquement dédié au recyclage, à la recyclabilité et à la ré-

incorporation des matériaux, visent à soutenir l'émergence de technologies contribuant à la transition du monde économique vers l'usage croissant des matières premières recyclées, de manière à réduire d'une part la consommation de ressources naturelles et d'autre part à contribuer à l'essor d'une offre française compétitive sur la production de ces matières premières.

Son objectif est de faciliter le développement d'innovations issues des laboratoires académiques et le processus qui leur permet d'atteindre la maturité nécessaire à leur transfert au monde socio-économique au travers des étapes de prématuration et maturation, notamment en lien avec le PEPR Recyclage.



En matière de recyclabilité, recyclage et réincorporation des matériaux, les projets identifiés devront concerner les axes matériaux suivants, ainsi que les technologies de tri associées :

- Plastiques et élastomères
- Textiles
- Papiers et cartons
- Métaux stratégiques
- Composites

Le financement par le programme sera attribué en fonction de la maturité et de l'état d'avancement du projet au regard de son potentiel de valorisation et de transfert. Il pourra atteindre 80 000 € en pré-maturation et 400 000 € en maturation\*. Il nécessitera une part de cofinancement de l'établissement ou de la SATT partenaire.

\*Le programme bénéficie d'un financement France 2030 portant la référence ANR-21-MATP-0801 et ANR-21-MATP-0802.



## INFORMATIONS PRATIQUES

Votre projet sera présenté au dispositif CIRCLE par l'intermédiaire de la structure de valorisation qui vous accompagne.

**Les critères de sélection sont les suivants :**

- Avoir déjà des résultats préliminaires
- Adresser le développement d'un produit, procédé ou service dans les domaines cités plus haut

**Pour des informations complémentaires sur le programme CIRCLE, contactez :**

- [contact.premat-mat@cnrsinnovation.fr](mailto:contact.premat-mat@cnrsinnovation.fr)
- [circle@pulsalys.fr](mailto:circle@pulsalys.fr)



Pré-tri manuel des bouteilles en plastique en vue de leur recyclage.  
© Mélanie Rateau, Lima, Pérou, 2014. Membre de l'axe Plastiques.

# ACTUALITÉS DU PEPR

## Actualités récentes

### **Restitution de l'expertise scientifique collective ESCo Plastiques**

L'INRAE et le CNRS ont été sollicités pour conduire une expertise scientifique pluridisciplinaire et européenne, afin d'obtenir un éclairage sur l'utilisation des plastiques le système agricole et alimentaire, et la pollution qu'elle engendre. Les trois pilotes scientifiques de cette ESCo sont membres de l'axe Plastiques du PEPR.

### **Exposition photo « La mise en image du rebut »**

Cette exposition du réseau de recherche SUD comporte une quarantaine de panneaux présentant des histoires de femmes et d'hommes vivant de leur travail avec les déchets dans une vingtaine de pays à travers le monde. Après avoir été affichée au siège du CNRS, c'est l'Université Catholique de Lyon qui l'accueille tout au long du mois de mai.

### **Journées annuelles du PEPR**

Les journées annuelles du programme se dérouleront les 10, 11 et 12 juin au Double-Mixte à Lyon. Après deux journées internes visant à développer la collaboration au sein du programme, la troisième journée ouverte aux acteurs socio-économiques permettra de mettre l'accent sur les collaborations entre le PEPR et ses partenaires extérieurs. Enfin, le 13 juin sera une journée dédiée aux jeunes chercheurs et chercheuses du programme.

## À venir

### **Création du label « Lieu-totem du PEPR Recyclage »**

La consultation sur la création des lieux-totem du PEPR (*voir page 12*) a reçu près d'une vingtaine de réponses positives de partenaires académiques et industriels souhaitant participer à cette initiative. Le label « lieu-totem » devrait voir le jour au deuxième semestre 2025.

### **Lancement des projets phase 2 du programme**

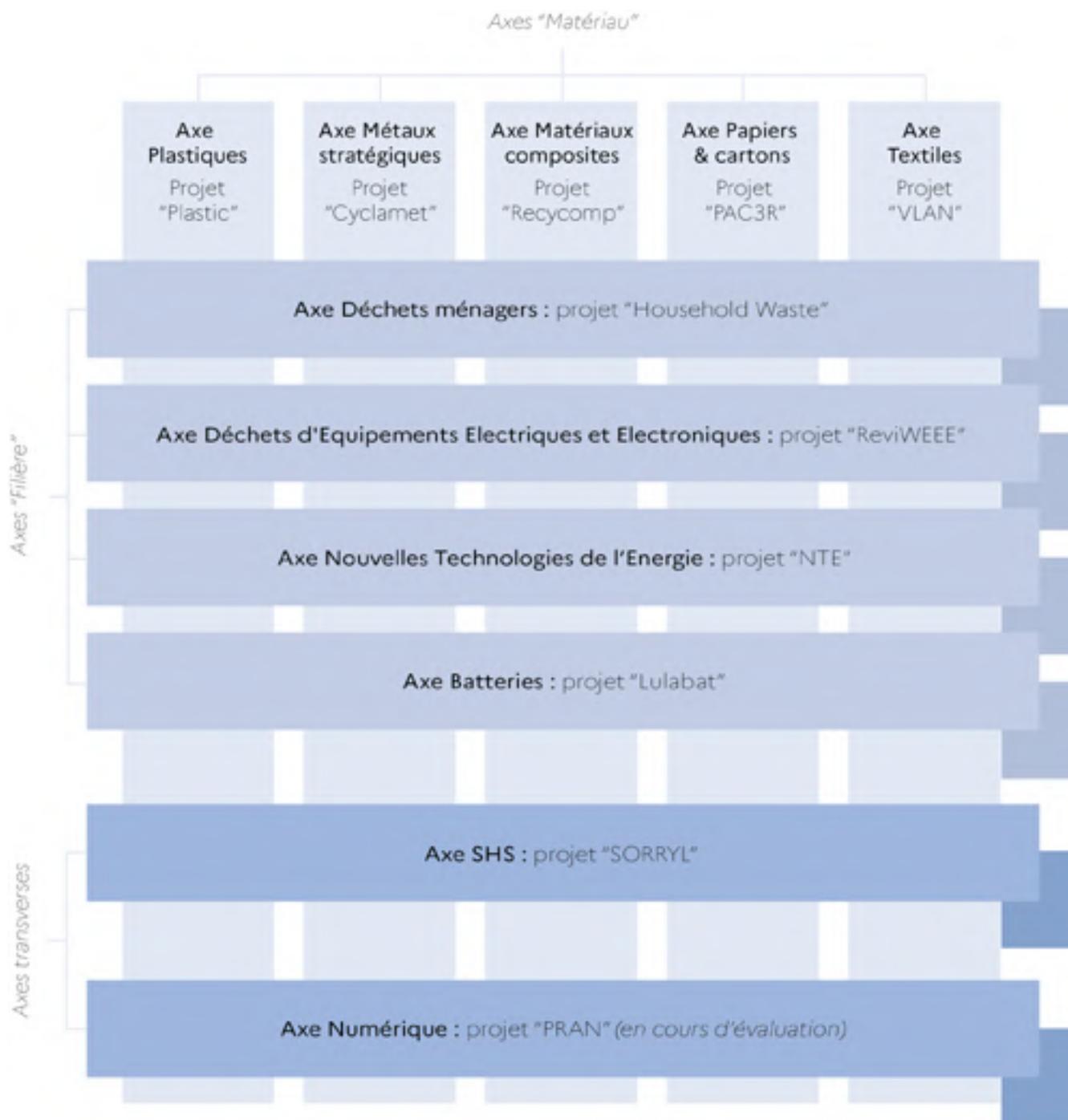
Sous couvert de la validation du dossier par l'ANR, dix nouveaux projets et un nouvel axe Numérique (*voir page 10*) devraient venir compléter le programme de recherche en septembre 2025, doublant le réseau et portant à près de 120 le nombre de laboratoires partenaires.

### **Préparation d'un congrès international sur le recyclage**

Les premières réunions d'organisation d'un grand congrès international sur le recyclage devraient se tenir à la rentrée, pour un événement prévu au deuxième semestre 2026 à Lille.

# Structure du PEPR

11 axes de recherche - Projets phase I



## 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 / marlene.chapuis@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 / pascale.marange@univ-lorraine.fr  
*Jumeaux numériques - Traitement du signal et des images - Internet des objets - Optimisation - Intelligence artificielle - Ingénierie système*



*S'inscrire à  
la newsletter*

*An English version of the newsletter will be available  
on the forthcoming PEPR website at [www.pepr-recyclage.fr](http://www.pepr-recyclage.fr)*

Contact

**Jean-François Gérard, Directeur de Programme PEPR**  
[jean-francois.gerard@cnrs.fr](mailto:jean-francois.gerard@cnrs.fr)

**Amélie Martin, Cheffe de projet**  
[amelie.martin@cnrs.fr](mailto:amelie.martin@cnrs.fr)

**Etienne Morisseau, Chargé de communication**  
[etienne.morisseau@cnrs.fr](mailto:etienne.morisseau@cnrs.fr)

**Comité Stratégique :**

Monique AXELOS - INRAE  
Patrick D'HUGHES - BRGM  
Thierry GAUTHIER - IFPEN  
Christophe DERAİL - UPPA  
Frédéric SCHUSTER - CEA

