

#75
FÉVRIER 2023

clefs

LES VOIX
DE LA RECHERCHE



L'ÉCONOMIE
CIRCULAIRE

Penser « cycle de vie », un défi et une nécessité

— Par **Patrick d'Hugues**, Directeur de Programme Scientifique « Ressources Minérales et Économie Circulaire » au BRGM



« Le découplage entre croissance économique et utilisation des ressources doit s'appuyer sur des filières d'approvisionnement plus responsables et durables »

Le développement de la société de consommation dans les années 60 s'est appuyée sur l'accélération des progrès techniques et la croissance de l'industrie. Elle a transformé et amélioré la vie quotidienne de nombre d'entre nous. Mais ce modèle atteint aujourd'hui ses limites, avec l'accélération de la demande en ressources à l'échelle mondiale en lien avec la croissance démographique et l'évolution de nos modes de vie, notamment les transitions numériques ou énergétiques à forte « intensité matière ».

Dans ce contexte, le découplage entre croissance économique et utilisation des ressources devient un enjeu majeur et doit s'appuyer sur des filières d'approvisionnements plus responsables et durables. Ces questions sont à considérer dans toute leur complexité, à l'échelle des chaînes de valeur des objets consommateurs de métaux et matériaux. L'une des réponses réside dans le passage d'une économie linéaire à une économie circulaire, permettant ainsi la diminution de la pression anthropique sur l'environnement. Même s'il est aujourd'hui impossible d'aboutir à une circularité matière absolue face à la croissance des besoins et aux limites du recyclage (pertes, entropie, durée de vie des produits), la gestion responsable des ressources impose une nécessaire sobriété mais également l'optimisation du cycle de vie des produits à travers une gestion durable, responsable et rationnelle des flux et stocks de matières (de la production minière au recyclage).

Face à ces enjeux complexes, des organismes de recherche tels que le CEA ou le BRGM jouent un rôle majeur. Ils développent depuis de nombreuses années, des boucles de recyclage innovantes et vertueuses permettant, à partir de déchets miniers, industriels, urbains ou nucléaires, de maintenir la matière le plus longtemps possible dans l'économie et ainsi optimiser son

cycle de vie. Au-delà de cette réponse de « fin de chaîne », un autre axe majeur de leurs travaux concerne l'écoconception des produits et des procédés. Cette approche, basée sur la « pensée cycle de vie », embarque des enjeux associés aux approvisionnements responsables, à la criticité des métaux et matériaux et aux innovations frugales., sans oublier les dimensions économiques et créatrices de valeur de ces flux circulaires. Bien évidemment, cela impose de s'accorder sur ce que chacun d'entre nous mettra derrière les mots « responsable » ou « valeur ». Un ultime défi pour ce concept qui porte, au-delà des aspects techniques, des enjeux politiques et des questions philosophiques sur la durabilité et la soutenabilité de nos modes de vie. ●



DANS CE NUMÉRO

L'économie circulaire

**Le point de vue de Patrick d'Hugues****02****Sommaire****03****Contexte****04**

Outils et infrastructures

Outils et techniques**16****Infrastructures CEA****21****Plateformes partagées****29**

Applications

Énergies bas carbone**33****La maintenance prédictive de systèmes****39****Numérique durable****42****Fabrication additive****43****Startups****44**

Construire aujourd'hui la société de demain

Le CEA est un acteur majeur de la recherche, au service de l'État, de l'économie et des citoyens. Il apporte des solutions concrètes à leurs besoins dans quatre domaines principaux: transition énergétique, transition numérique, technologies pour la médecine du futur, défense et sécurité. Réunissant 20 000 collaborateurs et implanté, au cœur des territoires, sur 9 centres équipés de très grandes infrastructures de recherche, le CEA bénéficie d'un large éventail de partenaires académiques et industriels en France, en Europe et à l'international.

Perspectives

Vers un changement culturel de la recherche ?

Par Hervé Desvaux

49



« Aujourd’hui, l’économie circulaire est devenue un enjeu prioritaire au CEA. »

L’économie circulaire : une priorité du CEA

— Dans sa politique de développement durable, le CEA affiche depuis quelques années l’économie circulaire comme une priorité devant irriguer ses axes de recherche et de développement.

AUTEUR

**Armelle Mesnard**

Directrice du développement durable du CEA.

L’accélération et la densité accrue des phénomènes climatiques extrêmes comme la crise géopolitique autour des questions énergétiques, nous conduisent aujourd’hui à adopter des stratégies de sobriété dans nos usages comme dans l’ensemble du paysage économique. Notre prise de conscience de la rareté des ressources premières dans notre monde fini doit désormais s’inscrire dans les faits.

La nécessité d’agir sur tous les leviers de transformation sociale et économique est ainsi réaffirmée avec plus d’acuité que jamais. Parmi ces derniers, l’économie circulaire s’avère incontournable dans la recherche de solutions d’adaptation à ce contexte de raréfaction des ressources, mais aussi dans notre

conception même de l’économie de nos sociétés. Il s’agit en réalité d’une transformation profonde de nos modes de pensées.

Aujourd’hui, l’économie circulaire est devenue un enjeu prioritaire au CEA. Le CEA-Liten, institut de la Direction de la recherche technologique qui travaille sur les technologies des énergies, est engagé dans cette démarche depuis des années. Le CEA a également créé en 2020 l’Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone (ISEC) au sein de la Direction des énergies en 2020. Ses Directions de la recherche fondamentale comme des applications militaires consacrent de même nombre de leurs programmes aux matériaux et aux conditions de leur réutilisation et valorisation dans cette logique d’économie circulaire.

L’économie circulaire est ainsi devenue le socle de nombreuses actions pilotées par le CEA, dans le cadre de sa politique de développement durable et de son lien avec les objectifs de l’agenda 2030 de l’ONU. De nombreux projets de recherche y sont spécifiquement consacrés, tandis qu’elle offre également un large domaine de collaboration partenariale conduisant à des innovations impulsées notamment grâce à l’action originale du Y-Spot, centre d’innovation ouverte du CEA, à travers son nouveau Hub Industrie circulaire, outil d’innovation ouverte vers le monde industriel. L’économie circulaire s’inscrit ainsi au cœur de la mission de transfert technologique du CEA et de sa contribution au volet économique du développement durable, grâce au soutien apporté à la transition écologique et énergétique des entreprises. À travers ses actions de diffusion du savoir et d’éducation à l’économie circulaire, le CEA participe aussi activement à l’enseignement dans ce domaine, en lien avec ses partenaires académiques, que ce soit l’université de Paris Saclay ou d’Aix-Marseille. ●

La cohérence de la stratégie du CEA avec les objectifs de développement durable (ODD) de l’ONU

4 thématiques transversales*

1 La sûreté et la sécurité comme priorité et valeur communes



2 Les meilleures pratiques de recherche



3 Un ancrage renforcé dans la société avec les sciences humaines et sociales



4 Une forte intégration dans les écosystèmes innovants locaux, européens et internationaux



7 axes stratégiques*

1 Innover pour la compétitivité des entreprises et la souveraineté nationale



2

Répondre aux enjeux de la transition énergétique



3 Répondre aux enjeux de la transition numérique



4

Contribuer à l’émergence de la médecine du futur



5

Conforter une recherche fondamentale d’excellence



6 Maîtriser la sûreté et l’économie des projets d’assainissement-démantèlement



7

Surmonter les défis actuels et émergents avec ouverture et agilité



*Le contrat d’objectifs et de performance (COP) 2021-2025, signé le 23 juillet 2021 entre l’Etat et le CEA, est structuré autour de 4 thématiques transversales et 7 axes stratégiques. Sa cohérence avec les ODD de l’ONU est expliquée dans LE PORTAIL INTERNET. Le développement durable au CEA.

L'économie circulaire : un changement de paradigme

Bien avant la médiatisation de ce concept, le CEA s'est préoccupé d'économie circulaire qui s'inscrit comme une composante essentielle de ses activités, anciennes comme récentes, au service des grandes transitions en cours.

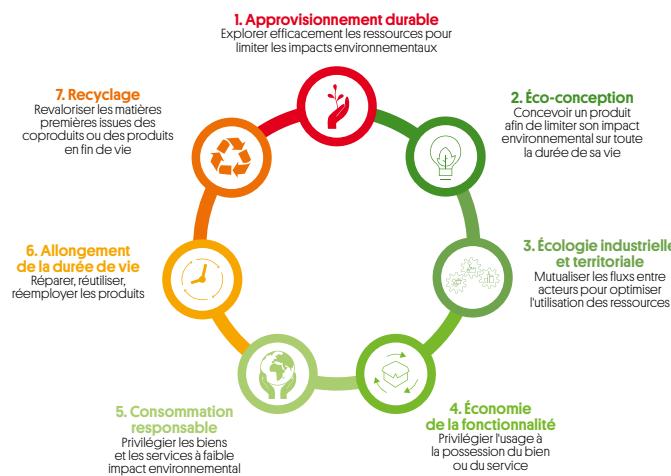
La formalisation de l'économie circulaire passe par sa définition : « L'économie circulaire consiste à produire des biens et des services de manière durable en limitant la consommation et le gaspillage des ressources et la production des déchets. Il s'agit de passer d'une société du tout jetable à un modèle économique plus circulaire ». On peut aussi la résumer à « faire plus avec moins ». Ce concept repose sur sept piliers, sur lesquels le CEA est positionné.

Cette notion d'« économie circulaire » s'est invitée depuis quelques années dans nos activités, des plus anciennes aux plus récentes, même si bien évidemment le CEA a été particulièrement actif sur certaines des thématiques de l'économie circulaire bien avant que nous fassions usage de cette terminologie. Cette économie circulaire s'inscrit surtout comme étant une composante essentielle du déploiement des grandes transitions, notamment énergétique et numérique, auxquelles contribue fortement le CEA.

La majorité des activités relevant de l'économie circulaire au CEA ont obtenu un soutien au travers de subventions internes, de financement externes sur la base d'appels à projets compétitifs (nationaux, européens) et de plus en plus en partenariat direct avec des industriels, preuve en est que l'économie circulaire imprègne l'économie réelle. Cette implication forte sur la maîtrise de l'ensemble du cycle de vie des produits, depuis l'éco-conception jusqu'à l'étape de recyclage est également très présente dans les nouveaux outils de recherche tels que les PEPR lancés tout au

long de l'année 2022 (DIADEM, recyclage, voir p. 49). Enfin, le CEA est à l'origine d'initiatives de collaboration internationale sur le sujet de l'économie circulaire, en particulier avec des acteurs de recherche de renommée mondiale, comme par exemple la création de l'alliance SCARCE (Singapore CEA Alliance for Research in Circular Economy) avec la Nanyang Technological University de Singapour.

Ce numéro de Clefs présente et décrit comment le CEA participe concrètement et d'une manière croissante à la mise en place de cette nouvelle économie au travers de ses différents métiers, activités et programmes, du nucléaire d'aujourd'hui et de demain aux nouvelles technologies de l'énergie en passant par le manufacturing avancé et SHM ou encore le numérique frugal. Les contributeurs de cet ultime numéro s'attacheront également à montrer combien cette approche holistique est fédératrice au CEA, comment elle active des compétences au sein de l'ensemble de l'organisme. ●



AUTEURS



Etienne Bouyer

[Direction financière et des programmes]

Directeur du Programme exploratoire «Bottom - Up» à la Direction déléguée aux programmes du CEA.



Anne-Sophie Lalleman

[Direction financière et des programmes]

Directrice du Programme transversal de compétences «Instrumentation et détection» à la Direction déléguée aux programmes du CEA.



Guillaume Colin de Verdrière

[Direction financière et des programmes]

Directeur du programme transversal de compétences «Simulation numérique» à la Direction déléguée aux programmes du CEA.



Frédéric Schuster

[Direction financière et des programmes]

Directeur du Programme transversal de compétences «Matériaux et Procédés» à la Direction déléguée aux programmes du CEA.



Pour une économie circulaire des énergies bas-carbone

AUTEURS

**Philippe Prené**

(Direction des énergies)

Directeur de l'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone [Isec] du CEA.

**Catherine Rabbe**

(Direction des énergies)

Assistante programme de l'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone [Isec] du CEA.

— Pour réussir la transition énergétique vers un mix énergétique bas-carbone, le CEA propose, avec l'Isec, une approche intégrée de l'économie circulaire des énergies bas-carbone afin de répondre aux enjeux des approvisionnements des matières à venir en France et en Europe.

Changer de paradigme pour réussir la transition énergétique

La transition énergétique se fera sur la base d'un mix énergétique bas carbone nécessitant des besoins croissants en éléments critiques, ce qui conduit à déplacer l'enjeu énergétique des énergies fossiles vers celui des matériaux. Plus particulièrement, l'effet cumulé de l'électrification massive et de l'intensité matière requise par les nouvelles technologies de l'énergie, sur un éventail d'éléments chimiques élargi, génère des tensions matières multisectorielles.

L'intensification de la production primaire, seule, ne permet pas d'y répondre. En effet, les mines et les procédés de raffinage demandent des investissements capitalistiques importants, mais également des besoins en énergie et potentiellement en eau considérables : 10 % de la production mondiale d'énergie est consacrée à l'extraction minière [1], besoin qui ne diminuera pas, les mines étant de plus en plus pauvres en éléments d'intérêt.

Le recyclage des matières, dans un marché en expansion, ne permet pas de gagner l'indépendance mais uniquement de réduire la dépendance. Le mode de recyclage (boucle longue/courte, ouverte/fermée, **figure 1**) doit être choisi en fonction de l'analyse du cycle de vie des matières, mais aussi des chaînes de

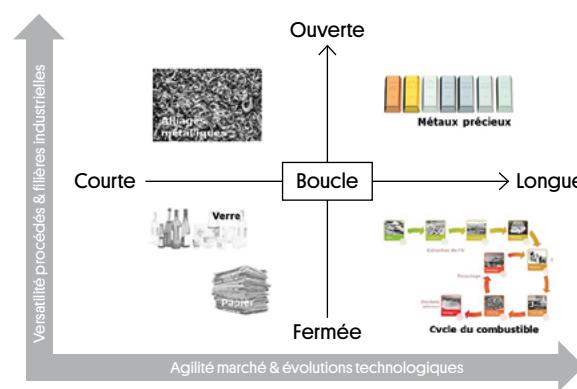
valeurs et des filières industrielles impliquées. Il doit également rester agile, en particulier vis-à-vis de technologies en forte évolution, pour lesquelles les besoins en matières vont changer au fur et à mesure des générations de produits mis sur le marché.

Ne disposant pas ou peu de ressources minières, la France et l'Europe possèdent une «mine cachée» : d'abondantes quantités de métaux contenus dans les déchets miniers et industriels mais aussi dans les produits en fin de vie qui s'accumulent dans nos décharges ou sites de stockage. La récupération pour valorisation de ces déchets locaux est une démarche d'économie circulaire qui peut contribuer aux enjeux d'approvisionnement des matières en développant de nouvelles filières industrielles sur toute la chaîne de valeur (minéraux, matière, composants & systèmes).

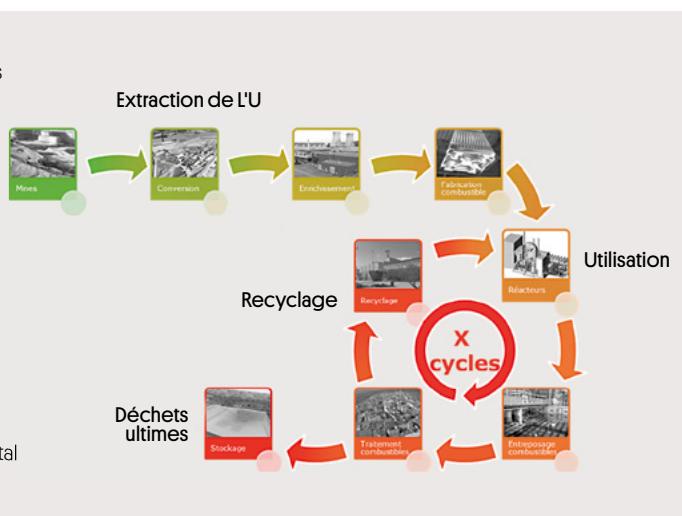
Les filières industrielles doivent aussi être repensées en changeant de paradigme : passer d'une stratégie guidée par le produit en fin de vie à recycler, à une stratégie guidée par le produit à fabriquer en identifiant les matières d'intérêt disponibles dans les déchets pour alimenter une industrie relocalisée et ainsi renforcer les filières industrielles actuelles. En d'autres termes, si nous ne maîtrisons pas l'aval de la chaîne de valeur, y a-t-il un intérêt à soutenir l'amont de la chaîne pour que la captation de la valeur se fasse en dehors de l'Europe ? Actuellement, la France investit dans la récupération de ses produits en fin de vie, mais pas dans leur traitement : elle vend à bas prix ses «rebus» à l'Asie qui en capte les composants de valeur pour les réintégrer dans de nouveaux produits à haute valeur ajoutée.

Pour ce faire, le recensement et la cartographie des ressources secondaires, en complément des ressources primaires, est indispensable pour proposer aux filières industrielles des solutions mixtes d'approvisionnement en matières (ressourcements primaires et secondaires) moyennant des transformations de déchets adaptées au juste besoin et le développement de têtes de procédés flexibles vis-à-vis de ces nouveaux intrants.

Figure 1: Les différentes boucles de recyclage des matières : courte (du composant aux matières), longue (de la matière à l'élément chimique), fermée (pour le même usage) et ouverte (pour un autre usage).



- > **Approvisionnement durable** : minimiser les ressources primaires utilisées (U) par son recyclage.
- > **Écoconception** : intégrer en amont du système le recyclage de l'U et du Pu.
- > **Écologie industrielle & territoriale** : filière nucléaire (22000 emplois directs & indirects, 3^e filière).
- > **Économie de la fonctionnalité** : l'exploitant reste propriétaire du combustible.
- > **Consommation responsable** : utilisation optimale de la ressource U et Pu.
- > **Allongement de la durée d'usage** : optimisation de l'utilisation du combustible en réacteur.
- > **Amélioration de la prévention, de la gestion & du recyclage des déchets** : recyclage de l'U et du Pu, minimisation des déchets ultimes, impact environnemental minimal sur tout le cycle de vie.



Maitriser ce cycle des matières pour réussir la transition énergétique, dans sa globalité, telle est la raison d'être, au CEA, de l'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas-carbone (**voir encadré**).

Le cycle du combustible nucléaire : une économie circulaire depuis 60 ans

Le CEA déploie depuis plus de 60 ans une R&D dans un contexte d'économie circulaire, avec le cycle du combustible nucléaire qui s'inscrit dans cette logique de circularité au travers des 7 piliers de l'économie circulaire (**figure 2**). Ainsi, ce dernier constitue la première ébauche d'économie circulaire des énergies bas-carbone à l'échelle industrielle, ébauche qui sera aboutie lors de la fermeture totale du cycle.

Pour mener cette R&D, le CEA s'appuie, depuis 2020, sur l'Isec qui dispose :

- d'une installation nucléaire de base, ATALANTE, dédiée à la R&D sur le traitement des combustibles nucléaires usés et la fabrication du combustible MOX. Dans cette installation unique en Europe, les équipes travaillent en soutien aux usines actuelles d'ORANO (MELOX et La Hague) mais aussi développent les procédés futurs pour répondre aux enjeux du multi-recyclage du combustible en REP et des réacteurs avancés (RNR, sels fondus...).
- d'installations de procédés de vitrification et de conditionnement des déchets, dont l'enjeu est de garantir l'absence d'impact environnemental, dans la durée, des déchets ultimes.

Du cycle du combustible nucléaire au cycle des matières dans la transition énergétique

Ce savoir-faire est transposable à la structuration des filières industrielles des énergies renouvelables pour lesquelles les enjeux matières à venir vont devenir prégnants en termes d'approvisionnement et de souveraineté.

Figure 2 : Le cycle du combustible nucléaire s'inscrit dans une logique d'économie circulaire.

Des outils et des méthodologies

Contrairement au nucléaire, les matières stratégiques pour les énergies renouvelables sont aussi utilisées pour d'autres usages dans la société, rendant la lecture de leur cycle de vie beaucoup plus complexe et diffuse. C'est pour intégrer l'économie circulaire dans la démarche de R&D sur toutes les énergies bas-carbone, que l'Isec développe deux outils dédiés :

- la méthodologie SIMPA : basée sur le datamining, elle permet d'extraire des informations d'une trentaine de bases de données publiques et privées, fiables et actualisées en temps réel. Un raffinement et une visualisation des données de manière automatique servent à reconstruire les chaînes de valeur des matières (acteurs clés, utilisations, brevets...) en lien avec les segments de marché, mais aussi à éclairer les enjeux technologiques associés. L'objectif est d'affiner le contexte «économie circulaire» actuel & futur et d'orienter la stratégie de la R&D dans le domaine des énergies bas-carbone. Par exemple, l'ISEC a appliquée cette approche pour la DGALN [2], afin de définir les enjeux matière associés à la transition énergétique en fonction de plusieurs scénarios d'usages et ainsi aider la puissance publique à identifier des leviers d'action ;
- La plateforme PEPS de simulation et de modélisation des procédés de transformation des matières : elle intègre l'analyse du cycle des matières et les analyses technico-économiques dans le but de pré-dimensionner des schémas de procédés afin d'identifier les plus pertinents et de les optimiser avec une vision économie circulaire.

Ainsi l'ISEC dispose d'outils pour objectiver le contexte économie circulaire et anticiper les besoins à venir dans son approche de R&D au service de la transition énergétique. ●

L'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone

Créé en 2020, l'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas-carbone est en charge, au CEA, de la R&D sur le cycle des matières en répondant aux enjeux du nucléaire et des nouvelles technologies de l'énergie. En proposant une approche intégrée des procédés avec des technologies adaptées au contexte technico-économique de l'économie circulaire depuis la recherche amont jusqu'au transfert industriel, l'ISEC est en capacité de répondre aux besoins des industriels au travers de 5 plateformes orientées vers les marchés de l'économie circulaire : la production de ressources minières et procédés miniers, la valorisation des ressources secondaires et le recyclage, les matériaux à propriétés contrôlées, le conditionnement et la gestion durable des déchets industriels, la dépollution et la déconstruction de sites industriels. Ces 5 plateformes sont complétées par 2 autres, plus transverses : l'ingénierie de systèmes et business model durables ainsi que le génie des procédés et l'instrumentation.

**Richard Laucournet**

[Direction de la recherche technologique]
Chef du Département des technologies des nouveaux matériaux du CEA-Liten.

**Etienne Bouyer**

[Direction financière et des programmes]
Directeur du Programme exploratoire «Bottom - Up» à la Direction déléguée aux programmes du CEA.



« Un regard vers le passé récent nous enseigne comment les composants des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) sont progressivement entrés dans l'ère de l'économie circulaire. »



L'économie circulaire au cœur des nouvelles technologies de l'énergie

— Réduire l'emploi des matériaux critiques, récupérer et réutiliser les matières à haute valeur ajoutée, engager des démarches d'écoconception... Des batteries aux panneaux photovoltaïques en passant par les piles à combustible, les technologies de l'énergie sont bel et bien entrées dans une démarche d'économie circulaire.

Un regard vers le passé récent nous enseigne comment les composants des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) sont progressivement entrés dans l'ère de l'économie circulaire. L'exemple des batteries Li-ion est illustratif. En 2009, dans le cadre d'un partenariat avec un grand manufacturier automobile français sur le développement de nouvelles générations de batteries Li-ion, une interrogation centrale de l'industriel nous a interpellée : « quid de la fin de vie des composants batteries ? ».

Cette question, évidente pour l'industriel de la filière automobile car motivée par les réglementations en vigueur, l'était sans doute un peu moins pour le CEA à l'époque. C'est ainsi que sur la base des connaissances nécessaires pour concevoir, élaborer et construire des batteries, les équipes se sont lancées sur leur déconstruction et la séparation des matériaux afin de pouvoir recycler les substances à haute valeur ajoutée.

Comme les partenariats (avec les acteurs variés de la filière) sur les batteries se multipliaient, ils ont conduit les équipes à s'impliquer sur d'autres piliers de l'économie circulaire comme l'écoconception (pour, par exemple, réduire la teneur en cobalt à la cathode ou encore substituer le graphite à l'anode). L'apport de ces partenariats tout comme la participation du CEA dans différents comités naissants (par exemple, le Comité pour les métaux stratégiques), groupes de travail (« Ressources et usages du sous-sol pour la transition énergétique » de l'alliance ANCRE) ont constitué une stimulation et une inspiration supplémentaires : ils nous ont permis de bâtir notre stratégie et d'intégrer des réseaux (académiques, industriels et institutionnels) au niveau national et européen. Cela s'est aussi traduit par des rapprochements avec nos homologues, comme le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Ces participations actives dans ces réseaux ont été pour beaucoup dans la genèse de nombreux projets collaboratifs.

Les autres technologies NTE et leurs composants ne sont pas en reste. Les panneaux photovoltaïques, les piles à combustibles et, plus récemment, les aimants permanents suivent une démarche similaire à celle appliquée aux batteries Li-ion. Avec une dynamique favorable portée par des initiatives aux échelles nationales et européennes, l'économie circulaire se trouve dorénavant au centre de préoccupations fortes tirées par la prise de conscience d'une nécessaire souveraineté énergétique à (re)conquérir. ●



Vers un numérique plus durable

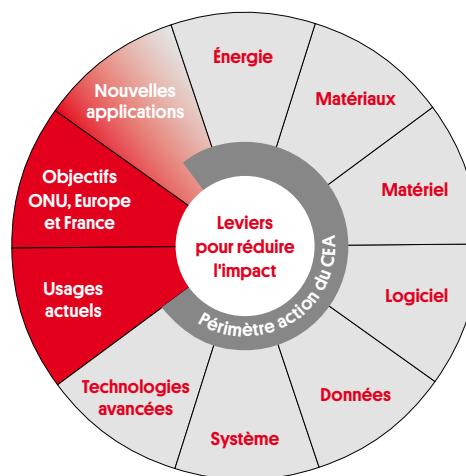
— Le numérique est riche de promesses pour réussir la transition environnementale. Pour autant, son propre impact en termes de matériaux, d'énergie, d'eau et de polluants doit être mesuré et maîtrisé pour une contribution positive.

Que feriez-vous si votre accès à l'eau courante était coupé pour que les usines de semi-conducteurs ne soient pas arrêtées ? Cette conséquence inattendue de l'impact environnemental du numérique s'est pourtant bien produite à Taïwan début 2021 [1] !

Selon deux études publiées en 2022 [2] les équipements et infrastructures numériques représentent 2,5 % de l'empreinte carbone de la France, ce qui rend nécessaire une approche multicritère dans la stratégie de réduction de l'impact environnemental afin d'éviter les transferts de pollution. Principale source de cet impact sur notre empreinte carbone : les terminaux utilisateurs (téléphones, ordinateurs et écrans TV), notamment du fait de leur processus de fabrication et de leur faible taux de recyclage. La consommation énergétique est également préoccupante du fait de son augmentation constante.

Le numérique est pourtant reconnu comme essentiel pour accompagner la transition énergétique, par exemple pour la gestion des énergies renouvelables ou la recherche de matériaux plus vertueux pour l'environnement. Il faut donc plus de numérique tout en réduisant son impact.

Le CEA a contribué au gain de douze ordres de grandeur de l'efficacité énergétique de la micro-électronique depuis 60 ans, constaté dans la loi de Koomey [3]. Mais le développement numérique de la société actuelle montre que cela ne suffit pas. L'exercice de prospective mené au CEA en 2020 sur ses activités dans le domaine du numérique s'est notamment concrétisé par des pistes d'ordre technologique, normatif et sociétal. Au-delà de l'extension des travaux d'efficacité énergétique et de l'utilisation limitée de métaux rares ou difficiles à recycler, l'introduction de démarches d'éco-innovation et d'ana-



lyse du cycle de vie permettent la prise en compte de l'enjeu de durabilité dans les projets. Le CEA pourrait également rejoindre des initiatives déjà lancées par d'autres organismes comme le CNRS ou Inria [4].

Depuis 2022, un groupe de travail transverse recense les différentes initiatives pour inscrire la contribution à un numérique durable dans les orientations programmatiques du CEA.

Le cycle de vie de la donnée, la conception logicielle et la simulation orientées faible consommation sont des axes transverses novateurs de même que la supraconductivité à température proche de l'ambiente même s'il s'agit là d'un sujet en rupture.

La transition numérique est à un tournant : 18 états européens ont appelé en juin 2022 à définir d'ici quatre ans des objectifs pour un numérique en faveur de la transition écologique tout en limitant son empreinte environnementale. Le CEA est légitime pour y contribuer grâce à ses travaux qui couvrent la globalité du cycle de vie du numérique. ●

AUTEUR



Benjamin Lucas-Leclin
(Direction financière et des programmes)

Adjoint au directeur délégué aux programmes et animateur du Groupe de travail transverse sur le numérique durable du CEA.

RÉFÉRENCES

[1] <https://gauthierroussilhe.com/articles/eau-et-puces-electroniques-l-avenir-climatique-et-industriel-de-taiwan>

[2] <https://www.arcep.fr/actualites/actualites-et-communiciques/draft/n/environnement-190122.html>
<https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec-reports/draft-berec-report-on-sustainability-assessing-berecs-contribution-to-limiting-the-impact-of-the-digital-sector-on-the-environment>

[3] <https://phys.org/news/2011-09-koomeys-law-power-efficiency-parallels.html>

[4] <https://ecoinfo.cnrs.fr/> et <https://quantum-energy-initiative.org/>

Pour aller plus loin...

> Efficacité des langages de programmation : <https://greenlab.di.uminho.pt/wp-content/uploads/2017/10/sleFinal.pdf>



Prendre en compte l'économie circulaire dans les innovations en microélectronique

AUTEUR

**Léa Di Cioccio**

[Direction de la recherche technologique]

Responsable du programme éco-innovation au Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Leti) du CEA.

— Grande consommatrice de ressources et d'énergie, la microélectronique doit se transformer pour réduire son impact environnemental et proposer des produits plus durables. Une mutation qui commence dès la R&D.

L'amélioration des facteurs de mérite, que ce soit la taille, la performance, la consommation électrique ou encore le coût, est au centre de nos travaux. Elle ne s'effacera pas d'un coup au profit d'une quête de vertu, de préservation de l'environnement et d'économie circulaire. En revanche, soyons acteurs et entendons ce que nous disent la société, l'Europe à travers ses appels à projets, et nos partenaires industriels.

L'écoconception, la consommation responsable, les usages s'imposent à nous... Autant de sujets auxquels la microélectronique, première industrie mondiale, est directement confrontée. En particulier, la fabrication de ses produits, qui représente 55 % de leur consommation totale d'énergie, voire 70 % pour un smartphone remplacé tous les deux ans.

La priorité étant de mesurer nos propres impacts, nous formons des dizaines de salariés à l'analyse de cycle de vie. Notre objectif : quantifier notre utilisation de matériaux rares, notre dépendance aux matériaux critiques ou difficiles à recycler, les dépenses d'énergie de nos salles blanches, de nos composants et de nos systèmes. En 2022, nous avons poursuivi une feuille de route ambitieuse pour le contrôle d'utilisation de l'énergie et de l'eau dans nos installations. Ainsi, des actions sont lancées et complètent celles déjà en cours : en 2021, nous avons réduit de 20% notre consommation d'eau ultra-pure, onze fois plus gourmande en énergie que celle du robinet ; en 2022 nous avons diminué de 5 % notre consommation énergétique sur la salle blanche.

La mesure des impacts environnementaux donne accès dans un premier temps à l'écoconception, qui consiste à rendre nos technologies existantes plus vertueuses. Nous avons ainsi créé une base de données microélectronique pour les analyses

de cycle de vie, une image de l'empreinte environnementale de notre salle blanche ainsi que de certaines technologies telles que l'électronique de puissance, le packaging, les résines bio-sourcées, les leds, certaines antennes, etc.

Dans un second temps, nous nous engagerons dans l'éco-innovation : repenser de A à Z des produits et des technologies, à partir de cahiers des charges où les objectifs d'impacts environnementaux et sociétaux seront abordés très tôt dans le cycle de développement, aux côtés de la viabilité économique et des performances. La circularité est également au cœur de nos analyses : nous augmentons le recyclage des métaux des substrats par exemple, nous réfléchissons aux moyens d'augmenter la durée de vie

Les technologies justes nécessaires

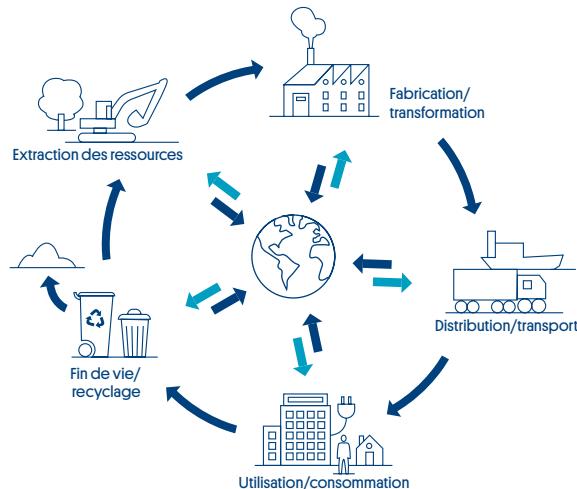
Au niveau du développement des technologies, les notions de technologies «justes nécessaires» sont apparues :

- **Frugalité** pour les matières premières et la production,
- **Sobriété** pour la consommation à l'usage,
- **Conception dépouillée** centrée usage,
- Prise en compte de la **durabilité** en analysant les aspects réparabilité, seconde vie et recyclage.

Plus que jamais ces notions sont à l'ordre du jour pour répondre aux besoins de la société et des partenaires industriels.

L'éco-innovation

C'est un **processus** dont la donnée de sortie est un produit, un service, une offre, ou un processus **nouveau grâce à l'intégration de l'environnement** qui apporte au client des valeurs d'usage, d'attrait particuliers et qui apporte au fournisseur de la **différentiation concurrentielle et de la valeur économique**.



←

Source : https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/cycle_de_vie_du_produit.php4

d'un composant ou d'un système qui pourraient être déclinés dans les phases amont de nos recherches.

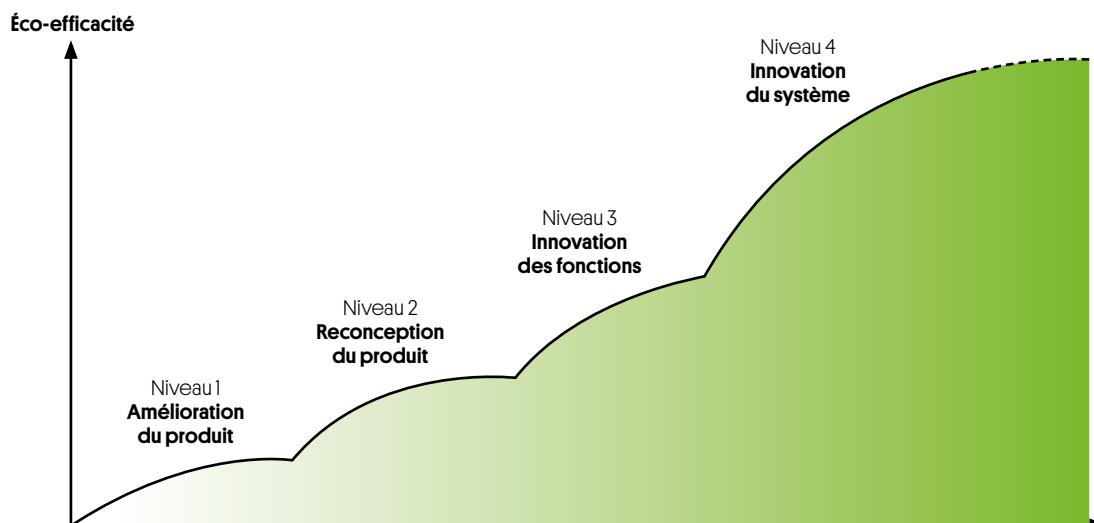
Le cycle de vie d'un produit est généralement illustré comme une série d'étapes, depuis la production (extraction et récolte des matières premières) de ce produit jusqu'à son évacuation finale (élimination ou valorisation), en passant par sa fabrication, son emballage, son transport, son usage par les ménages et les industries. L'analyse du cycle de vie d'un produit permet de dresser des écobilans et d'engager des démarches d'écoconception.

Il existe quatre niveaux pour un aboutissement concret de la démarche d'écoconception d'un produit :

1. l'amélioration progressive, incrémentielle du produit (optimisation courante) ;
2. la reconception du produit (repenser l'existant) ;
3. l'innovation des fonctions (créer un nouveau concept de produit) ;
4. l'Innovation du système (rupture totale avec l'existant, changement culturel, de modèle économique). ●

Source : <https://www.eco-conception.fr/static/leco-conception-pour-tous.html>

Schéma des 4 niveaux d'éco-conception ↓



Pour aller plus loin...

> J. Guérard et al., 'Toward Eco-Design of a 5G mmWave Transmitter-Antenna Based on Life Cycle Assessment', in 2022 EuCNC/6G Summit, Grenoble, France, Jun. 2022, pp. 440–445

> Workshop science environnement et société, replays : <https://youtu.be/LdmJ43H0YmM>

> Leti Innovation Days workshop sustainability, replay : <https://youtu.be/b4lYflIA9L4>



Eric Gadet
(CEA)

Directeur de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN).



Frédéric Schuster
(Direction financière et des programmes)

Fondateur de la chaire IMPACT.



Nihed Chaabane
(Institut national des sciences et techniques nucléaires)

Directrice adjointe en charge du projet pédagogique.



Fanny Balbaud-Célérier
(Direction des énergies)

Directrice adjointe en charge du projet de R&D.

[1] DIADEM : Dispositifs Intégrés pour l'Accélération du Déploiement de Matériaux Emergents.

[2] <https://www.materials-impact-chair.org/fr/>

[3] <https://www.universite-paris-saclay.fr/formation/master/energie/m2-materiaux-pour-lenergie-et-les-transports>

[4] <https://www.materials-ametis.org/>



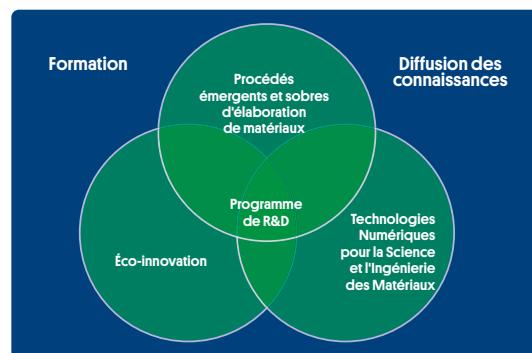
ENSEIGNEMENTS ET FORMATIONS

IMPACT : l'enjeu majeur des matériaux

— Réduire le temps de développement de matériaux innovants par des procédés émergents en intégrant les contraintes d'éco-innovation, de criticité et de souveraineté, tel est l'objectif de la chaire internationale d'enseignement et de recherche IMPACT. Celle-ci propose également un programme de formation visant à intégrer de façon pérenne l'économie circulaire dans les activités de recherche et industrielles.

Un objectif en totale cohérence avec l'initiative nationale DIADEM [1], le nouveau PEPR (Programme Et Équipement Prioritaire de Recherche) exploratoire dédié à la découverte accélérée des matériaux pour les grandes transitions (énergétique, numérique, santé) co-piloté par le CEA et le CNRS.

Le couplage fort entre les approches de synthèse et de caractérisation compatibles avec le haut-débit d'une part, et les approches numériques d'intelligence artificielle et de simulation d'autre part, permet cette accélération des développements nécessaires à la compétitivité dans un environnement de forte concurrence internationale.



Pour répondre à ces exigences de réactivité, la chaire IMPACT [2] propose un programme de recherche ciblé en collaboration avec des laboratoires renommés à l'international. Ce programme concerne, plus particulièrement, la mise au point de matériaux dans un contexte de sobriété environnementale, d'économie de ressources, d'économie de métaux stratégiques, de recyclabilité et également d'utilisation de procédés émergents sobres, tels que la fabrication additive, l'ingénierie des surfaces et l'apport des nanotechnologies.

IMPACT propose également un programme de formation dédié aux procédés émergents. S'inscrivant notamment dans le cadre du Master 2 MET [3] (Matériaux pour l'Energie et les Transports) de l'Université de Paris-Saclay, ce programme vise à contribuer au développement de l'attractivité des métiers de l'écoconception et d'élaboration des matériaux auprès des étudiants. Il a vocation à être étoffé et évoluer pour accentuer la prise en compte de l'économie circulaire dans la R&D et l'industrie.

Dans ce cadre, un programme international d'échanges d'étudiants est en cours de montée en puissance avec des partenaires académiques de renommée internationale (Singapour, Canada, Etats-Unis).

La chaire IMPACT est ouverte aux partenariats industriels et organise des séminaires scientifiques thématiques ainsi que des écoles internationales. Parmi elles, l'école internationale AMETIS [4] - Advanced Manufacturing for Energy and Transportation International School, partiellement financée par l'INSTN, l'école de spécialisation des énergies bas carbone et des technologies de la santé du CEA, a pour objectif de stimuler la dynamique d'éco-innovation. ●

ENSEIGNEMENTS ET FORMATIONS



Formation professionnelle : un levier d'accompagnement vers l'éco-innovation

— Le CEA souhaite que sa culture de l'innovation intègre les trois enjeux du développement durable (économique, environnemental et sociétal). Pour soutenir cette évolution culturelle vers l'éco-innovation et l'économie circulaire, des actions variées de formation professionnelle sont mises en place.

L'éco-innovation est notamment un des moyens existant pour promouvoir la transition d'activités industrielles ou de R&D vers une économie plus circulaire. Fort d'une expérience de plus de dix ans dans la conduite d'études environnementales (ACV) ou technico-économiques, le CEA-Liten, s'investit dans l'éco-innovation depuis 2017, en intégrant les contraintes environnementales via l'innovation et la créativité dans ses développements technologiques et ses pratiques de recherche. En plus de la mise en place d'une organisation en réseau, la formation professionnelle (sensibilisation, compagnonnage...) s'est avérée un levier important pour accompagner sa transformation. Les initiatives à succès du Liten ont été déployées à plus grande échelle au sein de la direction de la recherche technologique (DRT) du CEA.

Les formations professionnelles en éco-innovation

La DRT a ainsi choisi de conduire un programme d'acculturation à l'éco-innovation par le déploiement d'un cycle de trois formations en ligne, portées et développées par l'équipe ACV et Eco-innovation du Liten, du laboratoire G-SCOP et de l'INSTN :

- « **Monter des projets dans le contexte de l'économie circulaire** » : cette formation à destination des monteurs d'affaires, leur permet de maximiser les chances de succès dans les nouveaux appels à projets et contrats industriels qui se déroulent désormais dans le contexte de l'économie circulaire.
- « **Méthode et outils pour l'éco-innovation** » : destinée aux chercheurs, cette formation leur apporte des outils et savoir-faire pour adapter leur conduite de projets et leur processus d'innovation au contexte de l'économie circulaire [1].

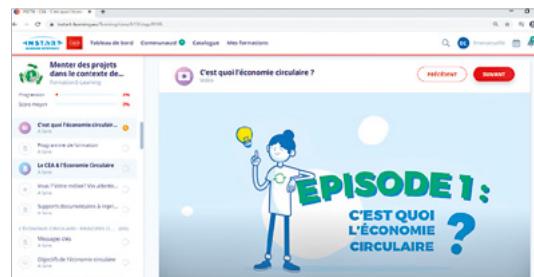
- « **Les fondamentaux de l'Analyse du Cycle de Vie** » : cette formation vise quelques spécialistes qui auront à réaliser ou encadrer des analyses du cycle de vie (ACV) en abordant, les méthodes et outils nécessaires à la réalisation et l'interprétation d'une étude ACV.

Au total, 159 salariés, dont 142 à la DRT, ont suivi une formation de ce cycle sur l'éco-innovation appliquée à la recherche technologique depuis son lancement en 2021, pour accompagner la transition de leurs activités vers plus de soutenabilité.

En couplant ces actions de formations avec des programmes de ressourcement (Carnot, thèses, PTC, Focus...) sur le thème de l'éco-innovation, la transition des instituts se concrétise grâce à des projets techniques et aussi méthodologiques. Dans un contexte où la société tend vers le développement durable, l'ambition de ces actions de formations professionnelles est de permettre une transformation en profondeur des pratiques de recherche et de montage d'affaire. ●

Figure 1: Copie d'écran présentant l'interface d'apprentissage pour ce cycle de formation à l'éco-innovation.

↓



AUTEURS

**Elise Monnier**

(Direction de la recherche technologique)

Responsable éco-innovation du Liten.

**Emmanuelle Cor**

(Direction de la recherche technologique)

Ingénierie-Chercheuse en éco-innovation au Liten.

RÉFÉRENCES

- [1] H. B. Rejeb, E. Monnier, M. Rio, D. Evrard, F. Tardif, et P. Zwolinski, «From Innovation to Eco-Innovation: Co-Created Training Materials as a Change Driver for Research and Technology Organisations», Procedia CIRP, vol. 105, p. 98-103, janv. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.017



Réglementer et encadrer pour mieux diffuser l'économie circulaire

AUTEUR

**Luc Aixala**

(Direction des énergies)

Chef de programme « Procédés de fabrication, recyclage et analyse cycle de vie » à la Direction des programmes énergies du CEA.

— Quelles sont les lois, feuilles de route et stratégies d'accélération mises en place par la France autour de l'économie circulaire et plus particulièrement sur les matières premières critiques ? Tour d'horizon des récentes avancées réglementaires.

De nombreux pays ont affiché leur volonté de changer leur trajectoire vers une économie qui soit plus circulaire. La France, dans le cadre du Plan Climat, a ainsi établi dès 2018 une feuille de route pour l'économie circulaire (FREC) qui décline de manière opérationnelle les transitions à opérer pour une économie 100 % circulaire, au travers de 50 mesures. Elle est ensuite devenue pionnière, avec le vote de la loi 2020-105 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire. Riche de plus de 130 articles, celle-ci renforce notamment l'information du consommateur (caractéristiques environnementales des produits, indice de réparabilité, disponibilité des pièces de rechange), la lutte contre le gaspillage et la responsabilité des producteurs. Plus récemment,

les plans France Relance (fin 2020) et France 2030 (octobre 2021) ont réaffirmé ces engagements, en définissant la transition écologique comme un objectif stratégique de la France [voir encadré].

La dépendance aux matières premières : un enjeu d'économie circulaire

L'Europe et les Etats-Unis ont pris conscience de l'impact de la transition énergétique sur la demande en matières premières. Ces matériaux sont en effet nécessaires pour construire les batteries, panneaux solaires, réseaux électriques, technologies hydrogènes et réacteurs nucléaires du futur. La demande mondiale pour ces matériaux va donc exploser dans les décennies à venir.

Or, certains de ces matériaux sont dit « critiques » parce qu'ils revêtent une grande importance pour notre économie et présentent le risque d'une rupture d'approvisionnement pour diverses raisons : tension sur la demande, géopolitique, absence de mines sur le sol français.... Un risque qui est devenu réalité pendant l'épidémie de Covid-19 et depuis la guerre en Ukraine avec des tensions sur le magnésium et le titane, voire des pénuries comme celles des semi-conducteurs. Couplés à une forte augmentation des prix de l'énergie et de certaines matières premières (nickel et le lithium), ces éléments fragilisent les filières industrielles (notamment l'énergie, les transports et le numérique) et peuvent retarder la transition vers une France neutre en carbone.

Dans ce contexte, les pouvoirs publics français veillent à améliorer la résilience des chaînes de valeur du pays. Ainsi, la mission Varin a rendu début 2022 au Ministère de la transition écologique et solidaire un rapport présentant plusieurs axes stratégiques pour ces filières. Ce rapport s'est notamment concrétisé par la création de l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI)

L'exemple des batteries

La mobilité électrique est le secteur de la transition énergétique qui représente le plus grand besoin en matériaux (nickel, cobalt, lithium et graphite). Constatant que la directive batteries de 2006 n'était plus adaptée, la commission européenne a proposé un règlement visant à mettre des batteries sur le marché qui soient compatibles avec une économie circulaire. Le projet de règlement s'attache notamment à ce que les matières premières soient fournies de manière responsable. Le règlement impose également des exigences progressives et contraignantes en termes d'empreinte carbone, ainsi que sur la gestion de la fin de vie des batteries : responsabilité élargie des producteurs, objectifs et obligations de collecte, rendements de recyclage et taux de matières valorisées.

porté par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et impliquant le CEA. L'objectif principal de l'OFREMI est de cartographier les vulnérabilités d'approvisionnement et d'anticiper les demandes en métaux associés au développement des filières industrielles.

L'enjeu est également d'accélérer la R&D pour développer de nouvelles technologies pour les énergies bas carbone moins gourmandes en matières premières critiques et améliorer la recyclabilité comme la valorisation de ces matières. Le PEPR « Recyclabilité, recyclage et réincorporation des matériaux » inscrit dans le cadre de France 2030, vient soutenir ces recherches et développements. Fort d'un savoir-faire et de compétences historiques dans le domaine du cycle du combustible nucléaire, le CEA intègre pour sa part cette démarche d'économie circulaire des matériaux critiques dans ses programmes de recherches depuis plus d'une dizaine d'années. ●

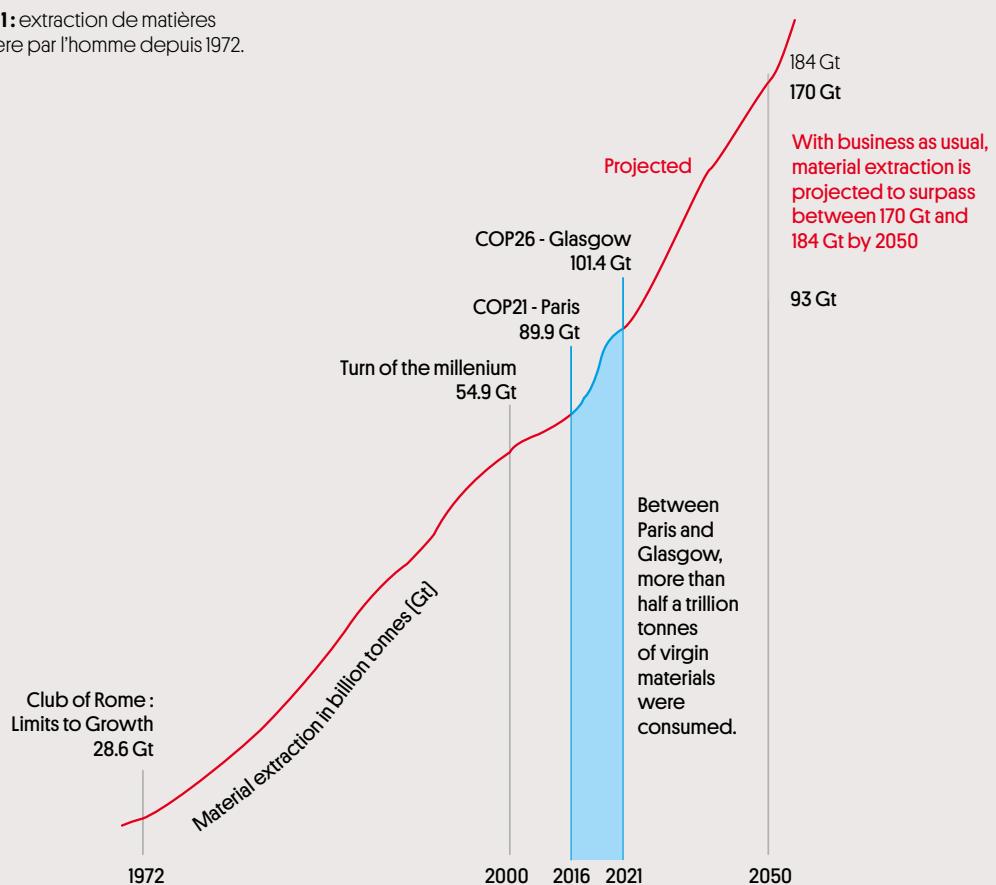
La France, précurseur de l'économie circulaire avec la loi 2020-105

Cette loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire inclut notamment :

- le recyclage à 100% des plastiques en 2025 ;
- l'interdiction de jeter les invendus alimentaires & non-alimentaires ;
- une taxe pour la fin de vie des produits [y compris les produits électroniques] ;
- un malus pour les fabricants n'intégrant pas une démarche d'écoconception dans leurs produits ;
- l'information des consommateurs [indice de réparabilité, affichage des caractéristiques environnementales...].

Figure 1: extraction de matières premières par l'homme depuis 1972.

↓





« Le CEA prend des initiatives en propre comme la création du réseau européen PROMETIA, qui fait la promotion de l'innovation dans le traitement des minerais ainsi que l'extraction et le recyclage des matières premières. »

AUTEURS

**Arnaud Witomski**

[Direction de la recherche technologique]

Responsable du programme Europe du Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux [Litén] du CEA.

**Etienne Bouyer**

[Direction financière et des programmes]

Directeur du Programme exploratoire «Bottom - Up» à la Direction déléguée aux programmes du CEA.

RÉFÉRENCES

[1] Renommé Processes4Planet en 2021.

[2] Projet CABRISS - Implementation of a CirculAr economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver materials for photovoltaic and other applications ; projet REE4EU - integrated high temperature electrolysis (HTE) and Ion Liquid Extraction (ILE) for a strong and independent European Rare Earth Elements Supply Chain.

[3] Projet SUPREME - Sustainable and flexible powder metallurgy processes optimization by a holistic reduction of raw material resources and energy consumption.

[4] Projet ACHIEF - Innovative high performance Alloys and Coatings for Highly Efficient intensive energy processes.

[5] Projet RESLAG - Turning waste from steel industry into a valuable low cost feedstock for energy intensive industry.

[6] Cluster 5 sur la mobilité, en particulier au sein du c-PPP sur les batteries BATT4EU ; cluster 6 autour de la bio-économie ; cluster 4 sur la décarbonation de l'industrie [cPPP Processes4Planet] ; enjeux de digitalisation de l'industrie manufacturière.



Une forte impulsion européenne

— L'Europe affiche une grande ambition pour la transformation de son économie vers une logique plus durable au travers de ses textes (EU Green Deal en 2019, Circular Economy Action Plan en 2015 puis 2020) ainsi que de ses programmes cadre pour la Recherche et l'Innovation.

Ces textes et programmes ont largement contribué à l'émergence et au développement d'activités relevant de l'économie circulaire à l'échelle du continent. L'effort a été particulièrement marqué à partir du programme de recherche Horizon 2020, pour s'amplifier ensuite.

Les toutes premières actions se sont focalisées autour des matières premières via la création de l'EIP (European Innovation Partnership) Raw Materials dès 2013, qui a pour objet de définir les actions puis les outils à mettre en place pour conduire la stratégie matières premières au sein de la Commission européenne. S'en sont suivis plusieurs instruments européens structurants comme le partenariat public privé SPIRE (Sustainable Process Industry through Resource and Energy Efficiency) [1] que le CEA a rejoint en 2013, ou l'ERMA (European Raw Materials Alliance). Ceci a permis aux équipes du CEA de participer à des projets, notamment comme coordinateurs, autour de technologies de recyclage [2], d'efficacité des ressources [3] ainsi que sur l'efficacité énergétique des procédés industriels [4] ou encore sur la symbiose industrielle [5].

Dans le programme Horizon Europe en cours, l'économie circulaire est désormais une dimension transversale diffusant sur plusieurs clusters [6]. Un nombre croissant d'appels à projets requiert d'intégrer des principes de circularité, ce qui nécessite de revoir la manière de construire les projets et d'avoir une réflexion globale sur les impacts économiques, environnementaux et sociétaux des technologies développées.

Le CEA prend des initiatives en propre comme la création du réseau européen PROMETIA, qui fait la promotion de l'innovation dans le traitement des minerais ainsi que l'extraction et le recyclage des matières premières. PROMETIA a généré des projets dans Horizon 2020 puis Horizon Europe, les projets SCREEN 1 & 2 (Solutions for CRITICAL Raw materials - a European Expert Network), tous deux pilotés par le CEA, étant emblématiques de l'activité de ce réseau. ●



Outils et infrastructures

Le CEA dispose d'un éventail d'outils et de plateformes qui consacrent son positionnement dans le domaine de l'économie circulaire



Clara Desgranges

[Direction des énergies]
Chargée de mission pour la conception numérique des matériaux à l'Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone [Isas] du CEA.



Franck Tancret

Franck JEANROUX
[Université de Nantes]
Professeur à l'université
de Nantes et chercheur
à l'Institut des Matériaux
de Nantes Jean-Rouxel
[CNRS/Université de Nantes]

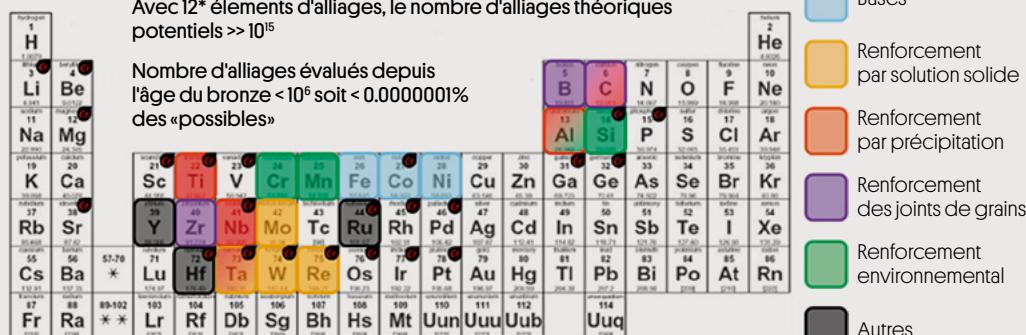
La métallurgie combinatoire : innover sous contrainte

— De nouvelles méthodes faisant appel aux calculs massifs permettent aujourd’hui de concevoir de nouveaux matériaux en intégrant, dès les premières étapes de développement, la minimisation des impacts environnementaux au même titre que l’optimisation des propriétés d’usage en service.

Un «terrain de jeu» largement sous-exploré et des cr matières premières «critiques»...

Avec 12* éléments d'alliages, le nombre d'alliages théoriques potentiels >> 10^{15}

Nombre d'alliages évalués depuis
l'âge du bronze < 10^6 soit < 0.0000001%
des «possibles»



*Les alliages industriels contiennent aujourd’hui jusqu'à une douzaine d'éléments d'alliages.

Pour aller plus loin...

- > «Conception d'alliages par optimisation combinatoire multi-objectifs : thermodynamique prédictive, fouille de données, algorithmes génétiques et analyse décisionnelle», thèse d'Edern Menou, Université Bretagne Loire [2016] : <https://wwwtheses.fr/2016NANT4011>

> Site Internet de l'IMN : www.cnrs-imn.fr

> Le livre blanc de la Société française de métallurgie et des matériaux [SF2M] :
<https://sf2m.fr/livre-blanc>
[chapitre 5 - l'optimisation des matériaux : la base de l'économie circulaire]

Depuis une dizaine d'années, ont émergé des méthodes accélérant notablement les montées **TRL** dans le domaine du développement d'alliages. En particulier, la « conception numérique d'alliages » permet de mettre au point, dès les premières étapes de développement et par le biais de calculs massifs, des alliages aux caractéristiques multiples et pré-optimisées en termes de propriétés thermomécaniques et chimiques, de coût mais également de réduction de l'impact environnemental [1].

Mathématiquement, il s'agit donc de résoudre un problème d'optimisation multi-objectifs.

La démarche utilisée est celle de la « métallurgie combinatoire théorique » qui repose notamment sur des modèles capables de prédire les caractéristiques d'intérêt des alliages en fonction de leur composition et appartenant à trois catégories plus ou moins distinctes selon les cas :

- les modèles pouvant être mis en équation « simplement ». C'est, par exemple, le cas du coût ou de l'impact environnemental [2] des éléments d'alliages :

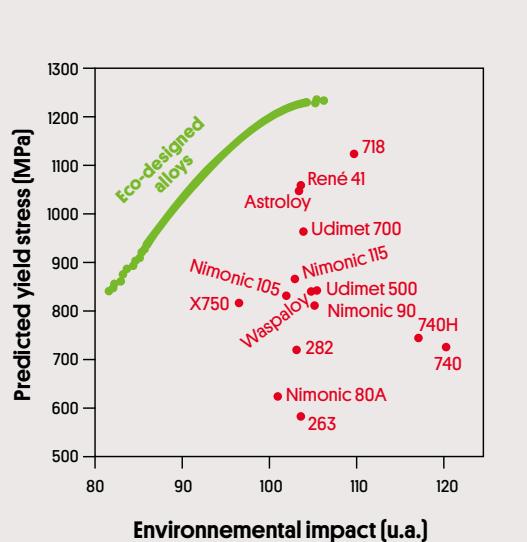
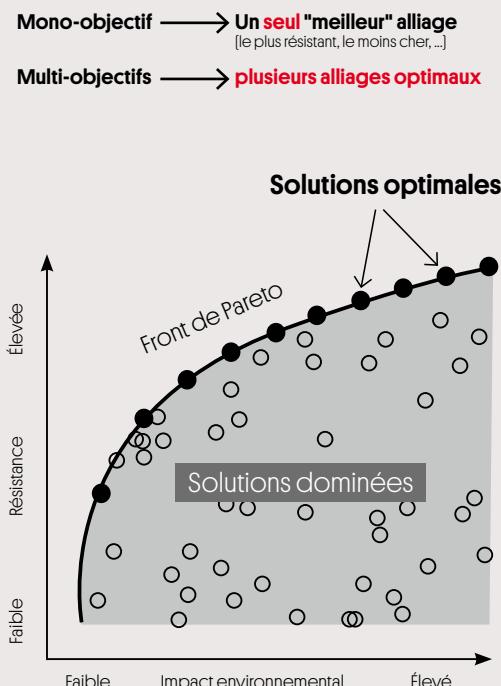


« Depuis une dizaine d'années, ont émergé des méthodes accélérant notablement les montées TRL dans le domaine du développement d'alliages. »

- les prédictions issues de logiciels de thermodynamique prédictive par l'approche « CALPHAD » (CALculation of PHAse Diagrams) pour estimer la nature et la fraction des phases constituant un alliage à une température donnée, la concentration des différents éléments dans ces phases, etc. ;
- les modèles issus du *data mining*, consistant à opérer des régressions à partir de bases de données regroupant la composition et les caractéristiques de nombreux alliages différents.

Grâce à ces modèles « rapides », on peut évaluer les propriétés désirées [3] en explorant toute l'étenue théorique du domaine de composition. L'un des problèmes est la taille gigantesque du domaine des compositions possibles : par exemple, avec une douzaine d'éléments d'alliages et une cinquantaine de

niveaux de concentration possibles pour chacun d'eux, le nombre d'alliages potentiels est de 50^{12} , soit plus de $2,10^{20}$ alliages ! Il est alors impossible, même par le calcul, d'explorer systématiquement l'intégralité du domaine de composition. On peut soit réduire le domaine exploré, soit utiliser des algorithmes d'optimisation tels que les algorithmes génétiques [4] pour réaliser une « fouille intelligente » de cet espace, en convergeant progressivement, grâce à des processus itératifs vers le **front de Pareto**, c'est-à-dire vers les seules zones du domaine de compositions « intéressantes » vis-à-vis des objectifs définis. ●



Exemple d'optimisation simultanée de la limite d'élasticité de superalliages à base de nickel [prédite par *machine learning*] et de leur impact environnemental. Les alliages conçus [en vert] présentent des caractéristiques plus intéressantes que les superalliages commerciaux [en rouge].

RÉFÉRENCES

- [1] Les quatre grands principes de l'écoconception :
- Réduire les ressources et l'énergie impliquées dans la fabrication ;
 - Utiliser des matériaux et ressources avec le minimum d'impact sur l'environnement ;
 - Limiter les rejets, la pollution et l'impact écologique (climat, biodiversité) de la fabrication ;
 - Faciliter la réutilisation ou le recyclage du produit.

[2] Des indicateurs numériques existent pour quantifier, par exemple, l'empreinte carbone, l'énergie ou la consommation en eau associées à la production d'un kilogramme d'un métal donné [Nuss *et al.*, PLoS One, 9 (2014)]. L'impact environnemental des matériaux eux-mêmes, via l'empreinte carbone des éléments entrant dans leur composition, peut ainsi faire partie des critères pris en compte lors de l'optimisation multi-objectifs réalisée (**figure 1**).

[3] L'optimisation des performances des alliages (propriétés mécaniques ou fonctionnelles, durabilité) ou leur multi-fonctionnalisation constituent également de forts enjeux d'écoconception car ils contribuent aussi au bénéfice environnemental lors de l'usage des matériaux pour une application donnée. C'est un levier indirect mais fondamental dans les secteurs du génie civil et du transport par exemple. Alléger une structure automobile par l'utilisation d'acières plus résistants permet une réduction des consommations énergétiques (30% d'allégement conduisant à 8% de réduction) et des émissions de CO₂ des véhicules thermiques.

Le risque de rupture d'approvisionnement est un autre aspect à intégrer dans une approche industrielle stratégique. Un critère de risque peut ainsi être calculé pour un alliage donné en fonction de sa composition, en prenant en compte les risques d'approvisionnement de chacun des éléments tels que définis par la Commission européenne.

[4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Optimisation_multiobjectif

GLOSSAIRE

TRL

Acronyme de Technology Readiness Level [niveau de maturité technologique en français]

Front de Pareto

Ensemble des solutions optimales d'un problème d'optimisation multi-objectifs. Concept mathématique issu des travaux de l'économiste italien Vilfredo Pareto.

**Fabien Olivier**

(Direction de la recherche fondamentale)

Doctorant à l'Institut rayonnement-matière de Saclay [Iramis] du CEA.

**Jean-Christophe P. Gabriel**

(Direction de la recherche fondamentale)

Directeur de recherche au CEA et co-directeur du laboratoire SCARCE.



La microfluidique, un outil de développement rapide de procédés

— Avec des canaux d'un diamètre allant d'une dizaine à quelques centaines de microns, la microfluidique ouvre des perspectives nouvelles dans le développement de procédés. Dotée d'une instrumentation de précision automatisée, notre plateforme microfluidique permet de réaliser et d'étudier des procédés complexes en tirant avantage de la très petite échelle de travail.

La microfluidique permet de réaliser à l'échelle microscopique des expériences usuellement menées à l'échelle macroscopique (pour le chimiste : quelques microlitres au lieu des dizaines de millilitres de l'approche *macro*). Elle rend ainsi possible l'étude de procédés en continu au laboratoire en s'affranchissant des frontières et limitations imposées par le mode macroscopique. Cela a pour conséquence :

- de faciliter le développement de ces procédés avant leur implémentation à plus grande échelle ;
- d'accélérer les études grâce à l'automatisation de la plateforme microfluidique ;
- de mesurer des paramètres physico-chimiques liés aux procédés jusqu'alors difficiles voire impossibles à mesurer ;
- et de fortement réduire la production de déchets, de l'ordre du millilitre au lieu du litre pour une approche macro [1].

Dans ce contexte, une plateforme microfluidique instrumentée et entièrement automatisée (**figure 1A**), a été construite dans le but de faciliter le développement rapide des procédés chimiques d'extraction et de séparation des métaux. Muni d'une mesure, par fluorescence X [2], des concentrations en ions métalliques dans les phases en sortie d'extraction, ce

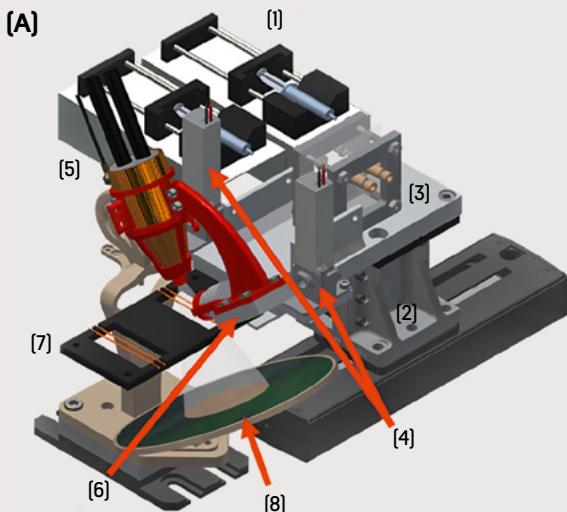
système « tout-en-un » permet de réaliser très précisément des mesures de propriétés physico-chimiques telles que les mesures :

- d'activité chimique de solvants [3], qui sont nécessaires pour la compréhension et la simulation des phénomènes impliqués ;
- des vitesses de réaction d'extraction ou de séparation grâce à sa puce d'extraction modulaires dédiée (**figure 1B**) [4, 5, 6] ;
- de la capacité d'adsorption d'une colonne de séparation d'ions pour la séparation ou la récupération de métaux fortement dilués, ou encore la dépollution [7].

Tous ces procédés chimiques sont absolument clés pour nous donner accès aux métaux stratégiques nécessaires à notre industrie car ils permettent d'extraire et de séparer ces métaux après l'étape de dissolution du matériau initial les contenant (minéraux ou déchet électronique tels que les batteries au lithium, les panneaux photovoltaïques ou encore les composants de circuits imprimés). Cette capacité de développement rapide de procédés est stratégique pour permettre d'adapter facilement ces procédés à la grande variabilité en composition des déchets entrants, un point bloquant majeur de l'industrie du recyclage. ●



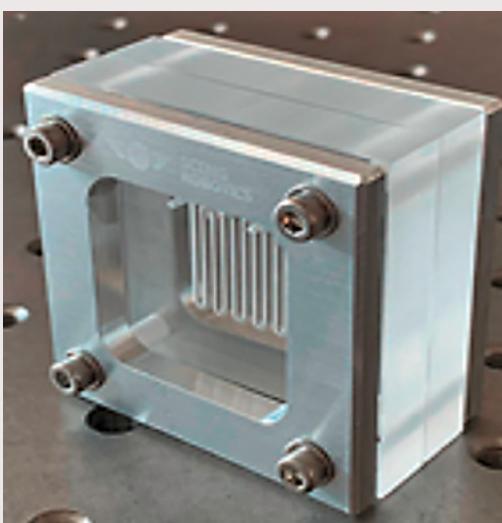
« La microfluidique permet de réaliser à l'échelle microscopique des expériences usuellement menées à l'échelle macroscopique (pour le chimiste : quelques microlitres au lieu des dizaines de millilitres de l'approche macro). »



←

Figure 1A : Rendu 3D de la plateforme microfluidique d'extraction liquide-liquide. Pousse-seringue [1], support motorisé [2] sur lequel sont placées notre puce microfluidique d'extraction liquide-liquide [3] et deux vannes [4], un tube à rayons X [5] inséré dans son support imprimé en 3D, un détecteur à fluorescence X [6] et une puce microfluidique dédiée à la mesure de concentration par fluorescence X imprimée en 3D et supportant deux paires de tubes polyimides [7]. Un plateau circulaire en étain [8] placé en dessous de la puce à fluorescence X permet d'absorber le faisceau de rayons X émis.

←



←

Figure 1B : Puce microfluidique d'extraction liquide-liquide implémentée sur la plateforme [3].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Maurice, J. Theisen, J.-C.P Gabriel, «Microfluidic lab-on-chip advances for liquid–liquid extraction process studies», *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 46 [2020] 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.03.001>.
- [2] A.A. Maurice, J. Theisen, V. Rai, F. Olivier, A. El Maangar, J. Duhamet, T. Zemb, J.-C.P Gabriel, «First online X-ray fluorescence characterization of liquid–liquid extraction in microfluidics», *Nano Sel.* [2021] 1–12. <https://doi.org/10.1002/nano.202100133>.
- [3] V. Kokoric, J. Theisen, A. Wilk, C. Penisson, G. Bernard, B. Mizaikoff, J.-C.P Gabriel, «Determining the Partial Pressure of Volatile Components via Substrate-Integrated Hollow Waveguide Infrared Spectroscopy with Integrated Microfluidics», *Anal. Chem.* 90 [2018] 4445–4451. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b04425>.
- [4] A. El Maangar, J. Theisen, C. Penisson, T. Zemb, J.-C.P Gabriel, «A microfluidic study of synergic liquid–liquid extraction of rare earth elements», *Phys. Chem. Chem. Phys.* 22 [2020] 5449–5462. <https://doi.org/10.1039/c9cp06569e>.
- [5] J. Theisen, C. Penisson, J. Rey, T. Zemb, J. Duhamet, J.-C.P Gabriel, «Effects of porous media on extraction kinetics: Is the membrane really a limiting factor?», *J. Membr. Sci.* 586 [2019] 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.05.056>.
- [6] F. Olivier, A.A. Maurice, D. Meyer, J.-C.P Gabriel, «Liquid–liquid extraction: thermodynamics–kinetics driven processes explored by microfluidics», *Comptes Rendus - Chim.* 25 [2022] 137–148. <https://doi.org/10.5802/cr chim.172>.
- [7] F.L. Olivier, S.M. Chevrier, B. Keller, J.-C.P Gabriel, «Quantifying solid-phase cation extraction efficiency using instrumented millifluidics platform with on-line X-ray fluorescence analysis», *Soumis*. [2022].

**Antoine Leybros**

[Direction des énergies]

Ingénieur-chercheur à l'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas-carbone [isec] du CEA.



La technologie des fluides supercritiques au service de l'économie circulaire

— Les fluides supercritiques, tels que le CO₂ et l'eau, sont des solvants aux propriétés modulables en fonction de leur pression et température d'utilisation, qui participent à rendre les procédés plus économies en atomes et au développement de boucles.

Bien que les fluides supercritiques (voir encadré) soient utilisés à l'échelle industrielle dans de nombreux secteurs depuis la fin des années 1970 (décaféination, extraction d'arômes naturels ou de la molécule responsable du goût de bouchon dans le liège, mise en forme de principes actifs...), la R&D relative à cette technologie reste très active car leur large spectre d'applications débouche sur des procédés à fort potentiel comme vecteurs pour l'économie circulaire.

Le CO₂ supercritique, recyclable dans une boucle partie intégrante du procédé, a un point critique facilement atteignable (74 bars, 31°C). C'est un solvant «sec» qui permet de minimiser les traitements préalables (broyage, dissolution) ainsi que la génération d'effluents secondaires et d'éviter les traces de solvants organiques, communément utilisés comme solvants d'extraction. Ce solvant est notamment étudié en tant que milieu pour la délamination de structures multicouches comme les cellules des panneaux solaires (en fin de vie ou rebut de fabrication) et pour l'extraction/fractionnement de pigments et de lipides destinés à la production de biocarburants, à partir de biomasse microalgale.

Quant à l'eau, qui est par définition un solvant vert, elle est utilisée en conditions sub ou supercritique de part et d'autre du point critique (221 bars et 374°C) comme un solvant apolaire. Dans ces conditions, l'eau solubilise les espèces organiques et sert

à produire, par exemple, du gaz combustible à partir de biomasse. En présence d'oxydants (comme l'air par exemple), des procédés compacts de minéralisation de déchets organiques peuvent être mis en œuvre, sans production de gaz toxiques et polluants (**NOx**, **SOx**). Ces propriétés peuvent également être mises à profit pour le recyclage de composites ou de polymères en fin de vie dans le but de récupérer des monomères, fibres minérales et métaux en vue de leur réutilisation en boucle courte. ●

NOx

Oxydes d'azote regroupant essentiellement deux molécules : le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂).

SOx

Oxydes de soufre composés de molécules de soufre et d'oxygène (acide sulfurique et dioxyde de soufre).

Qu'est-ce qu'un fluide supercritique ?

Il s'agit d'un composé pur porté dans un domaine de pression et de température [au-delà du point critique] où il n'y plus de distinction entre les phases liquide et gaz. Les propriétés du fluide, modulables en fonction de la pression et de la température, sont intermédiaires entre celles des liquides et des gaz en terme de pouvoir solvant et de diffusivité. Le CO₂ et l'eau sont les deux composés les plus attractifs pour les procédés oeuvrant pour l'économie circulaire.



Vers une économie circulaire des matières nucléaires

— Le CEA développe avec EDF et Framatome, et en collaboration avec des partenaires académiques, la plateforme PLEIADES afin de disposer d'une capacité de simulation du comportement des combustibles nucléaires sur l'intégralité du cycle : fabrication, comportement en réacteur (fonctionnement nominal, situations incidentielles et accidentielles), entreposage / stockage et retraitabilité.

PLEIADES est la plateforme de simulation des combustibles du CEA. Elle couvre l'ensemble du cycle du combustible, avec des degrés de complexité dans la simulation allant du 1D au 3D.

PLEIADES permet de mieux comprendre la physique des combustibles nucléaires pour répondre aux défis d'amélioration de sûreté, de manœuvrabilité et de performances, dans une approche de l'amont à l'aval du cycle, contribuant ainsi à une approche globale de l'économie circulaire des matières nucléaires.

Par exemple, les simulations PLEIADES permettent au CEA et à ses partenaires industriels d'appréhender le comportement des différents types de combustibles en réacteur, que ce soit pour le mono-recyclage du Plutonium (Pu) tel qu'actuellement mis en œuvre sur le parc français (combustible MOX), le multi-recyclage du Pu en REP tel qu'envisagé à moyen terme, ou, à plus long terme, dans un cycle fermé avec des réacteurs de 4^e génération basés sur des spectres de neutrons rapides.

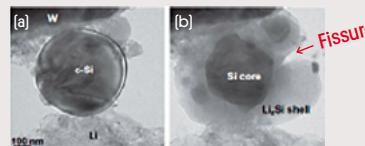
PLEIADES est également utilisée pour l'évaluation des quantités de Pu dans les résidus de dissolution des combustibles MOX, lesquels dépendent de l'hétérogénéité initiale de répartition du Pu et du taux de combustion atteint. Ces évaluations, basées sur des analyses de cartographie du combustible vierge, et confortées par des analyses sur combustible irradié, contribuent à la caractérisation du combustible avant son retraitement puis recyclage.

Au-delà du recyclage du Pu, différents actinides ou autres éléments non fissiles sont valorisables, par exemple les métaux du groupe du platine. PLEIADES permet de calculer l'ensemble de ces éléments avec leurs spéciations dans le combustible, brique de départ pour ajuster la stratégie d'extraction.

Depuis peu, PLEIADES s'ouvre également aux nouvelles technologies de l'énergie en mettant à disposition ses outils de calculs pour la simulation du comportement des matériaux des batteries Lithium-Ion (**figure 1**). ●

«Simulation multi-échelle des batteries appliquée aux matériaux d'électrode», G. Dalevedo.

- Lors des phases de charge-décharge, les inclusions de Silicium sont soumises à des variations de volume [dues à l'insertion des ions Lithium] qui induisent de fortes variations dimensionnelles des particules qui sont alors le siège de sollicitations mécaniques sévères.
- Similarité avec les gonflements différentiels observés pendant l'irradiation sur le combustible MOX hétérogène, lesquels génèrent des contraintes mécaniques pouvant conduire à l'apparition de déformations irréversibles.
- Utilisation des Outils numériques de la plateforme PLEIADES pour simuler le comportement mécanique de matériaux à phases inclusionnaires.
- Comparaison aux données de caractérisations disponibles : avancées notables dans la description du comportement mécanique d'une particule Si en lithiation.



1: observation au MET de la lithiation d'une particule de Si cristallin et de la fissuration induite. [a] une nanoparticule de Si-C en contact avec une électrode en W et une contre-electrode en Li. [b] En appliquant un potentiel entre les deux électrodes, le Li recouvre la particule de Si et y pénètre pour former une coquille amorphe. Le gonflement provoque l'initiation d'une fissure.

«Simulation du calandrage d'électrodes Li-Ion de batteries», M. Sonzogni-Dalevedo.

- Le calandrage a pour but de densifier les électrodes, augmentant ainsi leur densité d'énergie. Cependant, une trop forte densification dégrade la conductivité ionique et ainsi la vitesse de charge-décharge. Les fabricants doivent optimiser le compromis entre densité d'énergie et vitesse de charge-décharge.
- Utilisation des techniques de simulation développées dans la plateforme PLEIADES pour les milieux granulaires [DEM : Méthode des Éléments Discrets] pour mieux comprendre l'influence du calandrage sur les propriétés de l'électrode. Comparaison aux données expérimentales de la DRT.



AUTEURS



Mireille Bauer

[Direction des énergies]

Cheffe du service d'études et de simulation du comportement des combustibles de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (Irsene) du CEA.



Romain Eschbach

[Direction des énergies]

Adjoint de la cheffe du Service d'études et de simulation du comportement des combustibles de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (Irsene) du CEA.



Bruno Collard

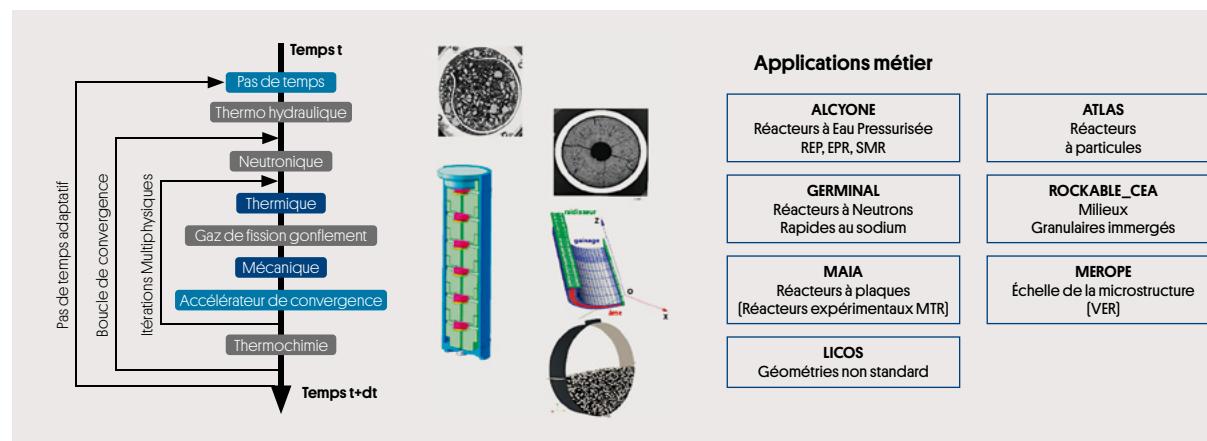
[Direction des énergies]

Chef du Laboratoire de simulation du comportement des combustibles de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (Irsene) du CEA.



Figure 1: Utilisation des compétences/outils développés pour la simulation du combustible au profit de la simulation des batteries.

→
Figure 2 : Outils numériques permettant le couplage aux différentes échelles des différents composants physiques.



PLEIADES, «couteau suisse» de la simulation du combustible

PLEIADES intègre l'ensemble des Outils de calculs scientifiques [OCS] permettant de simuler le comportement du combustible sous irradiation des différentes filières de réacteurs : ALCYONE [pour les crayons des Réacteurs à Eau Pressurisée], GERMINAL [pour les aiguilles des réacteurs rapides au sodium], MAIA [pour le combustible à plaques des coeurs des réacteurs expérimentaux] et ATLAS [pour le combustible à particules des réacteurs à haute température]. PLEIADES intègre aussi la modélisation des milieux granulaires immersés [avec l'outil ROCKABLE_CEA] pour la simulation des étapes de l'amont du cycle [fabrication du combustible], et les outils de modélisation à l'échelle de la microstructure [MEROPE]. PLEIADES est multi-phérique, avec un couplage interne (**figure 2**) entre les différents domaines de la physique nécessaires à la modélisation fine du comportement du combustible [mécanique, thermique, thermochimie, physico-chimie, neutronique, thermohydraulique]. Elle permet le couplage multidisciplinaire avec d'autres OCS de référence tels que CATHARE [thermohydraulique chaudière], FLICA [thermohydraulique cœur] ou APOLLO3® [neutronique] grâce à l'outil C3PO. PLEIADES est également multi-échelle avec des modélisations depuis l'échelle de la microstructure du combustible [micromètre], en passant par la pastille combustible [centimètre], jusqu'à l'intégralité de l'élément combustible [mètre]. Les échelles de temps modélisées vont de la milliseconde jusqu'aux temps géologiques pour représenter le combustible en situations d'entreposage ou de stockage. La **figure 3** illustre les capacités de modélisation de PLEIADES pour les milieux granulaires [procédés de fabrication du combustible, et fragmentation du combustible ensituations accidentnelles].

→
Figure 3 : Capacités de modélisation de PLEIADES pour les milieux granulaires.

Simulation des procédés de fabrication du combustible

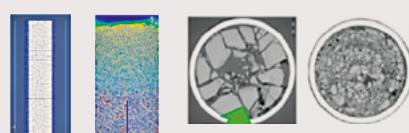
- Développement des Outils numériques de la plateforme PLEIADES pour simuler et aider à la compréhension et à l'optimisation des différentes étapes des procédés de fabrication : mélange, broyage, vidange, remplissage, pressage...
- Méthode des Éléments Discrets [DEM] pour la résolution des équations de la dynamique, la modélisation des interactions entre particules, des phénomènes de cohésion et de fragmentation...
- Validation à effets séparés sur expériences dédiées avec matériaux modèles et réels.

1: Grains d' UO_2 . - Simulation du mélange de poudres : ségrégation fonction de densités, formes, tailles...



2: Compression d'un assemblage de particules fragmentables.

Fragmentation du combustible en situations accidentielles



3: Fragmentation - Relocalisation du combustible dans sa gaine - Écoulement d'un milieu granulaire immersé dans un fluide.

- Scénarios d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire [APRP], d'Accident d'insertion de Réactivité [RIA] : la fragmentation des pastilles, combinée à la déformation de la gaine et à son potentiel éclatement, peut conduire à une relocalisation des fragments de combustible puis à leur expulsion dans le circuit primaire.
- Couplages de Méthodes numériques, en particulier Éléments Discrets [DEM] et Lattice Boltzmann [LBM], pour la cinétique de fragmentation, l'évaluation des propriétés du lit de fragments, la cinétique d'expulsion des fragments hors de la gaine.
- Validation à effets séparés sur données de la littérature, des expériences dédiées seront nécessaires.



Évaluer et maîtriser la durabilité des métaux et alliages

— L'Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas-carbone (Isas) du CEA opère la plateforme Corrosion qui regroupe environ 4000 m² de surface d'essais dédiés à l'étude de la corrosion dans des environnements multiples et complexes.

L'allongement de la durée d'usage des produits constitue l'un des sept piliers sur lesquels repose l'économie circulaire. Au cœur de cette problématique d'allongement se trouve la notion de durabilité des solutions proposées, dont la corrosion va être un des phénomènes majeurs à prendre en compte pour sa maîtrise.

Comprendre les mécanismes de la corrosion permet la mise au point de solutions de protection et d'allongement de durée d'usage des produits. Pour cela, le CEA dispose de l'un des plus grands laboratoires européens dans le domaine, la plate-forme Corrosion, (environ 80 ingénieurs chercheurs opérant sur environ 4000 m² de surfaces d'essais) dédiée à l'étude du comportement des matériaux et



AUTEUR



Fanny Balbaud-Célérier
(Direction des énergies)

Chef du Service de recherche en corrosion et comportement des matériaux à l'Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas-carbone (Isas) du CEA.

← **Figure 1** : Hall Corrosion.

RÉFÉRENCE

[1] Ce travail bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre de France 2030 et portant la référence «ANR-22-PEXD-0003»

Corrosion et durabilité

Selon la norme ISO 8044:2020, la **corrosion** des métaux et alliages se définit comme «l'interaction physico-chimique entre un matériau métallique et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie». La corrosion n'est donc pas une propriété intrinsèque du matériau et son étude nécessite la compréhension globale du système matériau/interface/environnement qui doit également intégrer la fonction du composant industriel.

La **durabilité** en termes de corrosion est, elle, définie comme la capacité du système à conserver son aptitude au fonctionnement sur une période fixée. Cette période est ainsi une donnée essentielle dans la phase de conception ou dans la prolongation de la durée de vie d'une installation. Ainsi la maîtrise de la durabilité en termes de corrosion est étroitement liée à l'impact sur l'environnement par la maîtrise des ressources minérales et de l'énergie qu'elle entraîne.

au développement de solutions anticorrosion (choix de matériaux, procédés de fabrication, protection électrochimique, revêtements, monitoring de la corrosion...) dans des environnements variés (milieux aqueux à haute température, milieux naturels, acides concentrés, gaz chauds, métaux liquides, sels fondus). Ces matériaux sont utilisés dans le domaine de l'énergie (industrie nucléaire actuelle et future, traitement et stockage des déchets, production, transport et utilisation de l'hydrogène, batteries...) ainsi que dans de nombreux autres milieux industriels.

La plateforme permet la mise en œuvre d'essais originaux, instrumentés ainsi que le couplage des sollicitations (environnement, mécanique, thermique, hydrodynamique...) pour reproduire les conditions de sollicitations réelles des matériaux. Elle regroupe également un ensemble de moyens de caractérisations multi-échelle des matériaux, surfaces et interfaces. L'ensemble des compétences et moyens de la plateforme vise l'étude, la compréhension et la modélisation des mécanismes depuis l'échelle atomique jusqu'à l'échelle macroscopique.

De nouvelles approches sont également mises en œuvre en vue d'accélérer la découverte de matériaux performants vis-à-vis de la corrosion pour répondre aux enjeux actuels de la transition énergétique et des besoins en ressources minérales, dans un contexte global de recherche de sobriété.



« Comprendre les mécanismes de la corrosion permet la mise au point de solutions de protection et d'allongement de durée d'usage des produits. »

Par exemple, au sein du PEPR DIADEM (voir p. 49), le projet ciblé A-DREAM [1], qui rassemble 6 partenaires au niveau national, vise à développer une approche générique pour accélérer la découverte de matériaux et revêtements résistants à la corrosion dans des environnements sévères. Pour cela, le projet propose une approche intégrée mettant en œuvre : (i) la conception numérique de matériaux/revêtements, (ii) la synthèse de ces matériaux à haut débit et (iii) la mise en œuvre de tests de corrosion également accélérés. ●



Manufacturing avancé et recyclage des composants des énergies renouvelables

— Précurseur de l'économie circulaire et de l'économie de matière, le CEA-Liten dispose de moyens uniques d'innovation technologique pour développer des solutions de recyclage et de manufacturing avancé.

Depuis près de 10 ans, le Département des technologies des nouveaux matériaux (DTNM) du CEA-Liten évolue dans les activités de manufacturing avancé et de recyclage en lien avec les nouvelles technologies des énergies renouvelables. Les équipes disposent de deux plateformes technologiques, CHEMINNOV et POUDRINNOV.

La plateforme POUDRINNOV traite des procédés de fabrication économies en matériaux en s'appuyant sur les technologies de fabrication additive et de plasturgie, qui concernent l'ensemble des grandes familles de matériaux : métaux, céramiques et polymères. Les enjeux portent sur la maximisation du rendement d'utilisation des matériaux en étudiant les moyens de réintroduction des chutes de production et de matières secondaires issues du recyclage.

Grâce à ces moyens de dimension industrielle, les équipes traitent, par exemple, de la refabrication d'aimants permanents utilisés dans les moteurs des véhicules électriques à partir d'aimants usagés, de leur mise en forme pour faciliter leur récupération par des approches d'écoconception et étudient les moyens d'abaisser la teneur en terres rares de ces aimants. Le projet MAGNOLIA (voir p. 35) s'inscrit dans la montée en maturité de cette filière de fabrication d'aimants à une échelle de 4 tonnes par an.

La plateforme CHEMINNOV répond aux enjeux sociétaux, environnementaux, et réglementaires de la fin de vie des composants des énergies renouvelables. D'une surface de 1500 m² de laboratoires dédiés à la chimie et au génie des procédés, cette plateforme est composée d'un ensemble de réacteurs chimiques interconnectables permettant une montée en échelle (capacité de 1l à 50l) et d'équipements de caractérisation pour comprendre les mécanismes physico-chimiques mis en jeu dans des procédés complexes multiétapes.

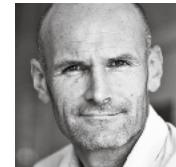


Four de traitement sous hydrogène pour le recyclage des aimants NdFeB.

Parmi les techniques développées, les procédés d'hydrométaux, d'électrochimie et d'extraction supercritique sont privilégiés avec l'objectif de minimiser les émissions et la consommation en réactif. À cette fin, des analyses d'impact environnemental et technico-économiques viennent orienter ou conforter les choix technologiques.

Les principaux travaux de l'équipe, composée d'une vingtaine de personnes, portent sur le développement de procédés de recyclage innovants, versatiles, robustes et bas coût des composants des énergies renouvelables telles que les cellules des panneaux photovoltaïques, les batteries au lithium, les déchets électroniques ou encore les piles à combustible. Le but est de récupérer les métaux critiques ou stratégiques qui les composent (argent, indium, étain, lithium, nickel, cobalt, platine, ...) ainsi que les matériaux à haute valeur ajoutée dont les polymères tels que le NAFION ou le PVDF. L'équipe a également en ligne de mire l'atteinte des futurs objectifs réglementaires de recyclage. Un des projets structurants de l'équipe concerne le recyclage des batteries Li-ion avec un transfert industriel en cours (voir p. 33). ●

AUTEURS



Richard Laucournet
(Direction de la recherche technologique)

Chef du Département des technologies des nouveaux matériaux du CEA-Liten.



Samir Derrough
(Direction de la recherche technologique)

Adjoint à la cheffe du Service des technologies durables pour le cycle des matières au CEA-Liten.



Marlène Chapuis
(Direction de la recherche technologique)

Cheffe du Laboratoire des technologies de valorisation des procédés et des matériaux pour les ENR au CEA-Liten.

Micropilote de séparation physico-chimique.





Sébastien Revol
 [Direction de la Recherche Technologique]
 Ingénieur-chercheur au Département d'ingénierie logiciels et systèmes (DILS) du CEA-List.



Jean-Pierre Gallois
 [Direction de la Recherche Technologique]
 Ingénieur-chercheur au Département d'ingénierie logiciels et systèmes (DILS) du CEA-List.



Ariane Piel
 [Direction de la Recherche Technologique]
 Ingénierie-chercheure au Département d'ingénierie logiciels et systèmes (DILS) du CEA-List.



« Dans le contexte actuel d'urgence climatique et de crise de l'énergie, réduire l'empreinte carbone et la consommation énergétique des outils de production est devenu un enjeu prioritaire pour l'industrie. »



Relever le défi de la consommation énergétique industrielle

— Le projet OptimEnergie permet d'identifier et d'optimiser les postes de consommation d'énergie dans les industries de production manufacturières.

Dans le contexte actuel d'urgence climatique et de crise de l'énergie, réduire l'empreinte carbone et la consommation énergétique des outils de production est devenu un enjeu prioritaire pour l'industrie. Cela passe d'abord par la compréhension des profils de consommation pour cibler les opportunités de gain les plus significatives, à savoir le talon (l'énergie consommée hors production) et les procédés les plus énergivores.

Entreprise dans le cadre de FactoryLab, le projet OptimEnergie a permis de concrétiser ces gains en identifiant les bonnes pratiques puis en optimisant la planification de la production elle-même, selon des critères énergétiques. L'objectif a été atteint grâce à l'outil développé par le CEA-List, sur la base de sa plateforme Papyrus, et SHERPA Engineering. Le résultat final est une méthodologie globale, fiable et duplicable, permettant d'évaluer la rentabilité des solutions envisagées¹.

Cette méthodologie comprend plusieurs étapes, en fonction des objectifs et du niveau de maturité de l'utilisateur en termes de maîtrise énergétique. Dans sa version la plus complète, une campagne de mesures débouche sur une phase d'analyse qui identifie les facteurs d'influence ; cette base permet de modéliser, puis de simuler les consommations énergétiques des procédés. Un outil d'optimisation reposant sur ces simulations permet enfin de planifier la production en minimisant la consommation énergétique. L'ensemble du travail s'appuie sur une suite logicielle outillée, avec, en interface, des tableaux de bord permettant aux opérateurs de visualiser les données et tester différents scénarios.

Le premier cas d'usage traité dans OptimEnergie a été proposé par SAFRAN Landing Systems, autour du procédé de chromage de son atelier de traitement de surface pour la production de trains d'atterrissement, à Bidos (Pyrénées-Atlantiques). Les gains obtenus grâce à la planification optimisée varient de 10 % à 50 % selon les postes ! Un succès qui ouvre un vaste potentiel d'applications à OptimEnergie.

Le projet OptimEnergie s'intègre également dans une réflexion sur l'éco-innovation en cours au CEA-List. Ses équipes spécialisées en ingénierie systèmes et logiciels développent des méthodes et outils, comme la plateforme Papyrus, qui permettent de traiter des problématiques liées au développement durable : une démarche *Technology for Green*, allant au-delà de la *Green Tech* (écoconception des développements). ●

¹Outre les partenaires cités dans le texte, Energency, Actemium, Dassault Systèmes, le Cetim et Naval Group ont contribué à la réussite du projet.

Contrôler en amont pour des structures plus durables

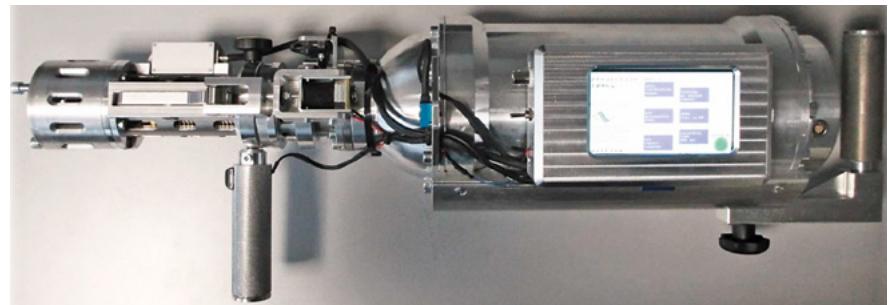
— La plateforme SACHEMS a été mise en place en 2021 afin d'accélérer l'émergence de solutions françaises de Structural Health Monitoring [SHM], en renforçant le lien entre les acteurs industriels et académiques du domaine.

Si, jusqu'à très récemment, le SHM était un domaine essentiellement dédié à la recherche académique à TRL bas ou moyen, de premiers systèmes SHM commencent à être déployés dans l'industrie, notamment à l'étranger. Il s'agit donc désormais d'accélérer le déploiement de solutions SHM françaises afin de se positionner à l'international.

Dans ce contexte, SACHEMS (SACLay High-end Equipment for the Monitoring of Structures) a pour vocation de fédérer la R&D en SHM sur le centre CEA de Saclay (91) en rassemblant, dans un lieu d'échanges, des laboratoires de recherche et des entreprises pour lesquelles le SHM est un élément essentiel de leur activité. SACHEMS participe également à la dynamique de structuration de la communauté française du SHM menée sous l'égide de la COFREND (Confédération française des essais non destructifs) et au sein de laquelle le CEA joue un rôle moteur, notamment en ayant contribué à la rédaction d'un livre blanc sur le SHM.

SHM, mode d'emploi

Le System Health Monitoring [SHM] consiste à intégrer des capteurs dans une structure pour suivre en temps réel son état de santé et anticiper ainsi les opérations de maintenance. Particulièrement adaptée aux structures à fort enjeu de disponibilité et de sûreté [par exemple aéronef, centrale nucléaire, éolienne ou pont], cette stratégie de contrôle fait l'objet de recherches intensives depuis une vingtaine d'années, mais les solutions industrielles commencent seulement à apparaître, tirées par l'essor des technologies du numérique.



Mise en service en 2021 et financée en partie par la Région Ile-de-France, SACHEMS regroupe 12 partenaires industriels et académiques : CEA, SATIE, L2S, LMT, POEMS, MEDISIM, PIMM, SAFRAN, ArianeGroup, EDF, CETIM et TechnipEnergies. Ses équipements ont été choisis afin d'aboutir à des preuves de concept de systèmes SHM complets avec des cycles de développement accélérés par la mutualisation de briques matures et génériques.

SACHEMS offre à ses utilisateurs :

- un partage de compétences pour le développement de briques technologiques clés dédiées au SHM ;
- la mise à disposition d'outils pour l'intégration de ces briques dans des systèmes SHM prototypes complets et leur démonstration sur structures industrielles réelles (**figure 1**) ;
- un vecteur d'animation scientifique de la communauté SHM au travers de journées techniques d'échanges, de lieux de formation et de challenges étudiants.

La plateforme met à disposition tous les éléments permettant de n'avoir à développer, pour chaque cas d'application, que la ou les briques nécessaires à la démonstration du système complet, sans devoir repartir de zéro, ce qui est souvent aujourd'hui un obstacle rédhibitoire. Favorisant la rencontre entre fournisseurs de solutions et utilisateurs finaux, cette plateforme originale permettra de faire émerger des systèmes SHM qui auront vocation ensuite à être industrialisés : deux exemples de maintenance prédictive sont présentés en pages 40 et 41. ●

AUTEUR



Bastien Chapuis

Responsable de la plateforme SACHEMS et ingénieur-chercheur au Département Imagerie et Simulation pour le Contrôle (DISC) du CEA-List.

Pour aller plus loin...

Livre blanc de la COFREND :
https://www.cofrend.com/jcms/prd_800385/fr/le-livre-blanc-du-shm-2022.html



**Stéphane
Pellet-Rostaing**
[CNRS]

Directeur de recherche au CNRS et Directeur de l'Institut de chimie séparative de Marcoule (ICSM).



Olivier Diat

[Direction de la recherche fondamentale]

Directeur de recherche au CEA et Directeur adjoint de l'Institut de chimie séparative de Marcoule (ICSM).

- [1] Th. Zemb, C. Bauer, P. Bauduin, L. Belloni, C. Déjugnat, O. Diat, V. Dubois, J.-F. Dufrêche, S. Dourdain, M. Duvail, C. Larpent, F. Testard, S. Pellet-Rostaing, «Recycling metals by controlled transfer of ionic species: en route to ienaics», *Colloid Polym. Sci.* 2015, 293 [1], 1–22.
- [2] M. Špadina, J.-F. Dufrêche, S. Pellet-Rostaing, S. Marčelja, T. Zemb Langmuir, «Molecular Forces in Liquid-Liquid Extraction» 2021, 37, 10637–10656.
- [3] M. Duvail, T. Dumas, A. Paquet, A. Coste, L. Berthon, P. Guilbaud, *Physical Chemistry Chemical Physics*, « UO_2^{2+} structure in solvent extraction phases resolved at molecular and supramolecular scales: a combined molecular dynamics, EXAFS and SWAXS approach», 2019, 21 [15], 7894-7906.
- [4] S. Gourdin-Bertin, J.-F. Dufrêche, M. Duvail, T. Zemb, «Microemulsion as model to predict free energy of transfer of electrolyte in solvent extraction», *Solvent Extraction and Ion Exchange* 2022, 40 [1-2], 28-63.
- [5] V. Trillaud, R. Podor, S. Gossé, A. Mesbah, N. Dacheux, N. Clavier, «Early stages of UO_{2+x} Sintering by *in situ* High-Temperature Environmental Scanning Electron Microscopy», *Journal of the European Ceramic Society* 2020, 40 [15], 5891-5899.
- [6] S. Szenknect, A. Mesbah, M. Descostes, A. Maihatchi-Ahamed, L. Bonato, M. Massonnet, Y. Ziouane, E. Vors, T. Vercouter, N. Clavier, J. Lautru, N. Dacheux, «Uranium removal from mining water using Cu substituted hydroxyapatite» *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 392, I2250-I2251.

Mieux extraire et recycler les matières avec la chimie séparative



— **Implantée dans le Gard Rhodanien à proximité du centre CEA de Marcoule, l'institut de chimie séparative de Marcoule développe une recherche fondamentale de haut niveau en chimie séparative, pour faire émerger des technologies de rupture applicables à l'ensemble du cycle nucléaire actuel et futur, et extensibles aux enjeux de l'économie circulaire.**

Premier axe : l'innovation dans l'extraction et le recyclage

Optimiser un procédé de la chimie séparative nécessite de mieux en comprendre sa phénoménologie en associant développement expérimental et théorique *via* la prise en compte de l'énergie libre de transfert selon une approche émergente désignée sous le terme de « ienaïcs » [1, 2].

Deuxième axe : les méthodologies et théories de la chimie séparative

Objectif : perfectionner et coupler des outils expérimentaux (microscopies, diffusion du rayonnement, spectroscopies) et de la modélisation prédictive multi-échelle (supramoléculaire, mésoscopique et colloïdale) [3, 4]. Tout aussi importantes sont les avancées récentes dans la structuration de la recherche autour des grands instruments scientifiques et de la microscopie électronique moderne. Ces techniques permettent l'observation directe d'agrégats supramoléculaires en solution ou la caractérisation précise de propriétés physico-chimiques telles que l'auto-guérison, le frittage, la dissolution, la réactivité chimique [5]... Aucun processus de séparation ne peut être réalisé sans la connaissance de la « durabilité des matériaux », c'est-à-dire des matériaux qui doivent résister à des contraintes extrêmes et à une longue utilisation, non seulement dans le cycle de vie du combustible nucléaire, mais aussi dans celui de tous les matériaux nécessaires aux technologies des énergies alternatives.

Troisième axe : l'optimisation du cycle de vie des matériaux pour l'énergie

Le cycle de vie de toutes les technologies mises en œuvre y est étudié et maîtrisé. Les interfaces solides/solides et solides/liquides sont ici considérées puisque les propriétés physiques et chimiques de ces matériaux (durabilité, robustesse, capacité de confinement et de rétention...) dépendent de leur synthèse, c'est-à-dire de la nature des précurseurs (colloïde, solution, émulsion...) au matériau final (fritté, poreux, poudre, film mince). [6] ●

← **Figure 1:** Les missions de l'ICSM sont d'étudier, de permettre et d'utiliser les phénomènes de la chimie séparative pour un nucléaire durable et un recyclage raisonné des matières stratégiques.

CHIMIE et PHYSICO-CHIMIE DU RECYCLAGE





L'économie circulaire des plastiques au CEA

— PLASTnet est un réseau interdisciplinaire au CEA, œuvrant autour de l'économie circulaire des plastiques allant de l'écoconception au recyclage en passant par l'étude de l'impact des plastiques sur l'environnement et la santé.

PLASTnet est un réseau interdisciplinaire au CEA, œuvrant autour de l'économie circulaire des plastiques allant de l'écoconception au recyclage en passant par l'étude de l'impact des plastiques sur l'environnement et la santé.

La production de plastiques dans le monde connaît une croissance fulgurante depuis les années 50, s'imposant comme un matériel essentiel à l'économie de consommation mondiale moderne. Elle a atteint la valeur considérable de 460 millions de tonnes sur la seule année 2019 [1], souvent - et malheureusement - sans être accompagnée d'une gestion adéquate des déchets. La pollution plastique est devenue un problème environnemental majeur, causant des dommages irréversibles sur la faune, la flore [2, 3] et la santé humaine [4, 5].

Conscient de la contribution socio-économique essentielle des plastiques conjuguée à la nécessité environnementale d'aller vers une économie circulaire de ces matériaux pour réduire leurs impacts néfastes, le CEA a créé fin 2019 le réseau PLASTnet. Cette communauté permet le croisement de connaissances pluridisciplinaires (physique, sciences des matériaux, bio-géo-thermochimie, protéomique,

sédimentologie, éco-toxicologie, génomique, ingénierie des enzymes et du métabolisme, écologie...) d'équipes du CEA joignant leurs compétences autour d'axes transversaux, de l'écoconception au recyclage.

PLASTnet travaille sur différentes thématiques

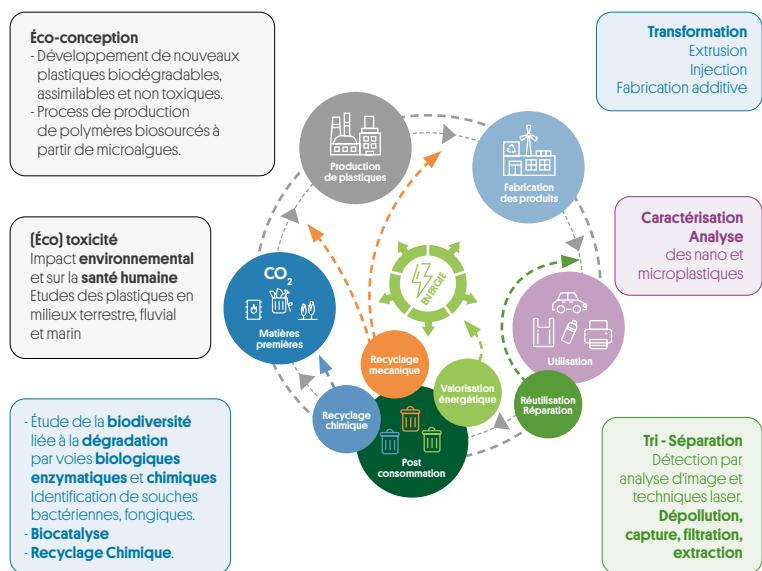
(figure 1) :

- l'état des lieux de la pollution des micro et nanoplastiques dans l'environnement, leur caractérisation et leur impact sur la santé humaine ;
- l'identification de souches bactériennes contribuant aux processus de dégradation ;
- les process de production de polymères biosourcés à partir de microalgues mais aussi le piégeage, la filtration, la fonctionnalisation, l'extraction du milieu ;
- le recyclage mécanique, biologique, thermochimique et chimique de plastiques conventionnels et biosourcés (PE, PE-EVA, PHA...) et la valorisation des produits issus des procédés de recyclage.

Pour animer cette communauté, le comité d'organisation a notamment mis en place des rendez-vous mensuels, les cafés PLASTnet, qui permettent de mieux connaître les acteurs du réseau, de présenter les projets scientifiques et d'établir des connexions. Des intervenants extérieurs (académiques, industriels, experts) apportent également leur vision sur la place des plastiques au sein de l'économie circulaire avec les enjeux actuels publics, scientifiques et réglementaires. Par ailleurs, une journée de rencontre entre chercheurs académiques et industriels a eu lieu le 30 novembre 2022 au Génoscope afin de cultiver des synergies entre les besoins des industriels et les projets de R&D du CEA. ●

tritiers, experts) apportent également leur vision sur la place des plastiques au sein de l'économie circulaire avec les enjeux actuels publics, scientifiques et réglementaires. Par ailleurs, une journée de rencontre entre chercheurs académiques et industriels a eu lieu le 30 novembre 2022 au Génoscope afin de cultiver des synergies entre les besoins des industriels et les projets de R&D du CEA. ●

←
Figure 1: Les thèmes de travail du réseau PLASTnet.
© CEA



AUTEURS

Réseau PLASTnet

Valérie Barbe,
Nathalie Picollet-D'hahan,
Virginie Chapon,
Isabelle Philippe,
Jean-Philippe Renault (Direction de la recherche fondamentale),
Muriel Marchand,
Sébastien Rolere,
Jean-François Sassi (Direction de la recherche technologique) et Sylvain Nizou (Direction des énergies).

RÉFÉRENCES

[1] Global Plastics Outlook : Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options [<https://doi.org/10.1787/de747aeef-en>]

[2] L. Chapron, E. Peru, A. Engler, J-F. Ghiglione, A-L. Meistertzheim, A-M. Pruski, A. Purser, G. Vétion, P-E. Galand, F. Lartaud, 2018. Microplastics are a serious threat for deep-water coral reefs. *Scientific reports* 8:15299.

[3] J.F. Ghiglione and V. Laudet, 2020. Fish larvae: a polluted Terra Incognita unveils. *Current Biology* 30: 112–133.

[4] E. Danopoulos, M. Twiddy, R. West, J-M. Rotchell, 2022. A rapid review and meta-regression analyses of the toxicological impacts of microplastic exposure in human cells. *J Hazard Mater.* Apr 5;427:127861.

[5] Z. Yan, Y. Liu, T. Zhang, F. Zhang, H. Ren, Y. Zhang, 2022. Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. *Environ Sci Technol.* Jan 4;56(1):414-421.

Applications

Le CEA a intégré la logique de l'économie circulaire dans l'ensemble de ses activités de recherche, qu'il s'agisse des énergies bas-carbone (nucléaire d'aujourd'hui et de demain, nouvelles technologies de l'énergie), du manufacturing avancé et SHM (System Health Monitoring) ou encore de la fabrication additive.



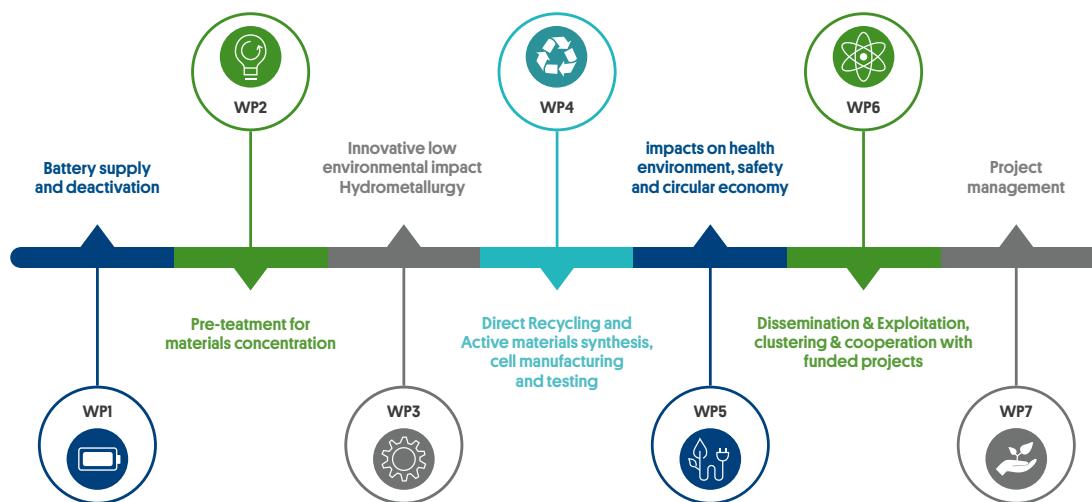


Favoriser le recyclage des batteries des voitures électriques en Europe

— Le projet RESPECT, fondé par 18 partenaires internationaux [1] et coordonné par Orano Mining du groupe Orano, a pour but de renforcer l'autonomie européenne sur les matériaux critiques utilisés dans les batteries et de soutenir la fabrication croissante de batteries Lithium-ion en Europe. Comment ? En développant des procédés innovants de recyclage et de récupération des matériaux.

Le projet RESPECT (Flexible, safe and efficient recycling of Li-ion batteries for a competitive, circular, and sustainable European battery manufacturing industry) vise à développer un procédé de recyclage innovant en boucle fermée, suffisamment flexible pour traiter tout type de batterie Li-ion. Il entend couvrir un champ très

large relatif à la chaîne de valeur tels que la logistique, le tri, la récupération des matériaux, la valorisation, mais aussi les aspects sécurité pour l'ouverture et la désactivation des modules, et l'hydrométallurgie. Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon Europe de l'Union européenne, de l'ordre de 9 millions d'€.



↑

Schéma de principe du projet RESPECT..



AUTEURS



Justo Garcia
(Orano)

Responsable financement des projets batteries.



Antoine Driancourt
(Direction de la recherche technologique)
Coordinateur des projets européens sur le recyclage des batteries au CEA-Liten.

RÉFÉRENCES

[1] Les 18 membres du consortium conduisant le projet RESPECT : Orano, le CEA, Chalmers Tekniska Heogskola AB [Suède], Cidetec Energy Storage [Espagne], MEET Battery Research Center - Université de Muenster [Allemagne], Morrow Batteries AS [Norvège], Vianode AS [Norvège], Metso Outotec [Finlande], LOMARTOV SL [Espagne], Fraunhofer Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung E. V. [Allemagne], CLEPA [Belgique], I.C. BELGIUM SCRL [Belgique], COUP'INDUS [France], CEVA LOGISTICS [France], Kyburz Switzerland AG [Suisse], Addible Ltd. [Royaume-Uni], et Johnson Matthey PLC [Royaume-Uni].

Le CEA est fortement impliqué dans RESPECT sur toutes les étapes de développement du procédé de recyclage, par l'intervention de plusieurs laboratoires du Département des technologies des nouveaux matériaux (DTNM) et du Département électricité et hydrogène pour les transports (DEHT) du CEA-Liten.

Parmi les laboratoires impliqués sur le projet, citons le Laboratoire de valorisation des matières (LVME) du DTNM qui développe des procédés de recyclage par voie hydro-métallurgique ou électrochimique pour la fin de vie des technologies développées au sein du Liten. Le LVME a en charge la coordination technique du projet RESPECT ainsi que la maturation de plusieurs briques technologiques.

L'une de ces briques est notamment développée en lien direct avec le Laboratoire matériaux (LM) du DEHT afin de promouvoir le recyclage direct de matériaux actifs de batteries, en évitant certaines étapes hydro-métallurgiques, réduisant ainsi les impacts économiques et environnementaux.



Afin de valoriser la matière issue du recyclage, il faut re-fabriquer des matériaux actifs performants pouvant être réinjectés dans les procédés de fabrication des cellules. Dans le cadre de RESPECT, le LM mène une partie des recherches sur les voies de régénération des matériaux et de synthèse par co-précipitation. ●





Vers la création d'une filière souveraine pour les aimants permanents

— Les aimants permanents sont des matériaux stratégiques de la transition énergétique. La création de nouvelles filières d'approvisionnement selon les principes de l'économie circulaire devient un enjeu majeur pour répondre à la forte croissance de la demande.

Les aimants permanents à base de terres rares, notamment l'alliage Nd₂Fe₁₄B, se sont depuis plus de 20 ans largement imposés dans la conception des machines électriques, notamment pour les véhicules hybrides. La conception de moteurs avec ces aimants permet en effet de rendre ces machines très compactes et d'améliorer leur rendement.

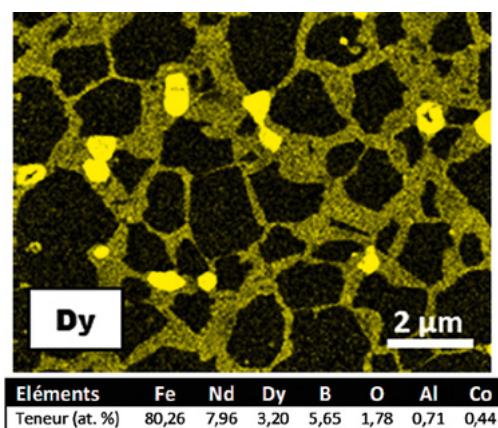
Toutefois, les aimants et plus généralement les terres rares métalliques, sont aujourd'hui produits à plus de 90 % en Chine. Et les projections sur la croissance de la demande font apparaître d'ici à 2030 des risques de tension d'approvisionnement. La prise de conscience de cette dépendance de l'industrie a engendré depuis 2020 des initiatives à l'échelle européenne et en France afin d'accompagner la création de filières souveraines de production de matières premières et d'aimants permanents. Le projet national MAGNOLIA, piloté par Orano et auquel est associé le CEA, s'inscrit dans cette démarche. Objectif à horizon 2024 : produire 4 tonnes par an d'aimants sur une ligne pilote.

Plusieurs technologies déjà maîtrisées par le CEA seront ainsi développées à l'échelle industrielle :

- la substitution du néodyme (Nd) par des terres rares abondantes (Cérium (Ce), Lanthane (La)), ainsi que la localisation des terres rares lourdes aux joints de grains des aimants frittés par diffusion (**figure 1**) afin de réduire les teneurs en matériaux critiques ;
- le procédé de moulage par injection de poudre de pièces unitaires dans l'objectif de supprimer les pertes de matière qui surviennent aujourd'hui lors de la découpe des blocs d'aimants ;
- le recyclage des aimants pour disposer progressivement d'une source secondaire de terres rares.

La faisabilité du recyclage a été démontrée au CEA dans le cadre de plusieurs projets européens (Recval, Permafrost, Valomag, REE4U). Si ces procédés peuvent encore être optimisés, le principal enjeu réside aujourd'hui dans la collecte et le démantèlement des équipements en fin de vie, afin d'augmenter le taux de recyclage de leurs aimants, qui n'est aujourd'hui que de 1 %.

L'écoconception des moteurs de traction est susceptible de contribuer à lever ce verrou en améliorant la « recyclabilité » des machines à aimants permanents, c'est-à-dire en simplifiant et en standardisant les opérations de récupération des aimants. La production d'aimants par des procédés permettant une plus grande liberté de forme pour de nouvelles architectures de machines démontables, combinée à des techniques de traçabilité et d'identification des matières, constitue un axe d'innovation prometteur dans ce domaine. ●



AUTEUR

**Gérard Delette**

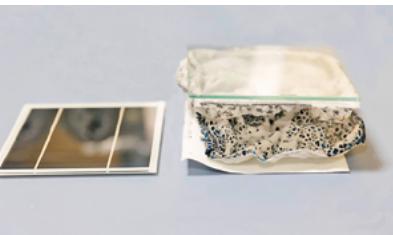
(Direction de la recherche technologique)

Expert senior au CEA-Liten.

Figure 1: Microstructure de type cœur/coquille au sein des grains de l'aimant fritté obtenu par le procédé de localisation du Dysprosium [Dy] par diffusion. Cartographie élémentaire du Dy obtenue par EDS [X-ray energy dispersive spectroscopy] montrant les zones en périphérie des grains riches en Dy [coquilles en jaune] par rapport au centre des grains qui en est dépourvu [cœurs en noir]. La composition chimique de la coquille est mesurée par WDS [wavelength-dispersive X-ray spectroscopy]. La périphérie des grains est enrichie en Dy, ce qui permet d'améliorer la tenue en température de l'aimant avec une utilisation optimale de cette terre rare lourde dont la teneur peut être fortement réduite par rapport au procédé conventionnel où le Dy est réparti de façon homogène.

© CEA-PFNC

←



↑

Figure 1: Panneaux photovoltaïque avant [gauche] et après [droite] délamination par CO₂ supercritique.

© Y. Audic/CEA

AUTEURS

**Claire Agrafel**

[Direction de la recherche technologique]

Ingénierie-Chercheure au Département des technologies solaires (DTS) du CEA-Liten.

**Lucas Liotaud**

[Direction des énergies]

Ingénieur-chercheur à l'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone (Isec) du CEA.

**Alexandre Carella**

[Direction des énergies]

Chef du Laboratoire des procédés supercritique et décontamination (LPSD) du CEA-Isec.

RÉFÉRENCES

Power and Solutions Energie, issue 40, 2022, p.50-52 [<https://online.pubhtml5.com/laed/fjic/#p=53>]

Pour une énergie solaire durable



— PHOTORAMA est un projet européen réunissant tous les acteurs de la chaîne de valeur du photovoltaïque. Son objectif : renforcer la durabilité de cette source d'énergie.

L'énergie solaire photovoltaïque est une des alternatives pour remplacer les sources fossiles et accompagner les transformations nécessaires à la transition énergétique. Son déploiement massif a déjà permis aujourd'hui l'installation de plus d'un TeraWatt à travers le globe et ce ne sont que les prémisses de son développement considérant les objectifs de neutralité carbone. En tant que leader de ce nouveau paradigme, l'énergie photovoltaïque se doit d'être exemplaire en termes de durabilité prenant en compte toutes les étapes du cycle de vie.

Dans ce contexte, l'un des objectifs majeurs du projet européen PHOTORAMA est de développer des solutions robustes pour appréhender et gérer la fin de vie des panneaux photovoltaïques (PV) qui représente aujourd'hui le point de faible du cycle de vie. Selon l'IRENA (2016), la quantité de PV à recycler dans le monde en 2050 est estimée à 60 millions de tonnes (Mt), dont 1,5 Mt en France. Or, en accord avec la réglementation européenne actuelle, seuls le cadre en aluminium et le verre sont aujourd'hui recyclés alors que plus de 60 % de la valeur (cuivre, silicium métal et argent) se situe dans la cellule PV encapsulée. Le défi du recyclage repose principalement sur la capacité à préserver la qualité et la pureté des matériaux secondaires récupérés à l'issue des procédés de recyclage.

Trois équipes du CEA sont investies dans le projet pour répondre à cet enjeu et transférer des technologies innovantes et bas carbone vers l'industrie. Le Département des technologies solaires du CEA-Liten développe une technologie de découpe au fil diamanté qui permet une séparation mécanique des couches. Une technologie complémentaire basée sur la séparation par fluide supercritique est développée par une équipe du Département de recherche sur les procédés pour la mine et le recyclage du combustible du CEA-Isec (**voir encadré**). Ces technologies seront implantées et intégrées à la démonstration d'une ligne pilote d'une capacité de 1 000 tonnes/an sur site industriel en Allemagne à LuxChemtech (partenaire du projet) en 2024. Le CEA apporte son savoir-faire et ses compétences techniques mais participe également à l'expérimentation et au développement d'un modèle ambitieux. En effet, si l'économie circulaire en tant que concept a fait l'objet d'un réel

intérêt depuis plus d'une décennie, les mises en application sur le terrain restent souvent difficiles car elles nécessitent l'implication d'acteurs dont les perspectives économiques diffèrent. PHOTORAMA permet de réunir tous les acteurs mais également toutes les compétences pour répondre à un objectif commun. L'évaluation continue du modèle économique, environnemental et social permettra d'établir un bilan pour développer concrètement un modèle collaboratif à travers une approche systémique. ●

Comment recycler les matériaux d'intérêt

Le recyclage des panneaux photovoltaïques comprend trois étapes : le décadrage, la délamination [séparation des différentes couches du module pour accéder aux éléments d'intérêt à recycler] et la récupération des métaux.

Dans le cadre de PHOTORAMA, les instituts Liten et Isec du CEA proposent trois technologies brevetées : deux pour la délamination et une pour la récupération de l'argent qui fait partie, avec le silicium métal et le cuivre, des métaux critiques utilisés pour concevoir les modules photovoltaïques.

Une fois le panneau décadré, l'objectif est de séparer les différentes couches, soit :

- à l'aide d'un procédé mécanique utilisant un fil diamanté, qui vient couper le module en deux au niveau de l'encapsulant [procédé développé au Liten] ;
- ou à l'aide d'un procédé utilisant les propriétés de diffusivité et de solubilité du CO₂ supercritique dans le polymère encapsulant pour générer un moussage de celui-ci menant à la séparation des couches du module [procédé développé à l'Isec].

Après délamination, un procédé de lixiviation dans un solvant eutectique profond permet la récupération sélective de l'argent.

Pensé en économie circulaire, l'ensemble des matériaux valorisables ont vocation à être réintégrés dans la filière PV. **LL** et **AC**

Kiwee, un nouveau concept de transport partagé



— Le concept de Kiwee ? Proposer aux usagers de petits véhicules électriques individuels disponibles en libre-service, en station ou en stationnement libre. Ces véhicules sont emboitables et attelables mécaniquement à l'arrêt en station, pour former des trains routiers compacts et redistribuables en groupe.

La mobilité urbaine, et davantage encore périurbaine, est fondée sur l'usage dominant de la voiture particulière, engendrant des problèmes de congestion, de pollution et d'occupation de l'espace public (stationnement). Le transport public se heurte en effet encore à des limites en zone périurbaine comme en ville intramuros.

Pour répondre à ces problématiques, le CEA a piloté et coordonné entre 2015 et 2018 le projet Européen H2020 ESPRIT. Objectif : développer un système complémentaire au transport public, capable de constituer une alternative vertueuse à la voiture particulière, en réaliser des démonstrateurs et qualifier le potentiel du système par enquêtes et par modélisation. Les aspects socio-économiques ont été ensuite approfondis dans le cadre d'un autre projet (DRIVE2) financé par la Climate KIC [1].

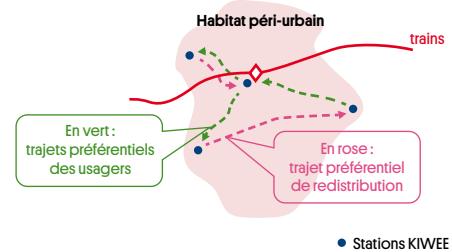
À ce jour, le système baptisé Kiwee a donné lieu à 15 dépôts de brevets technologiques et à la réalisation de six prototypes, dont trois carrossés.

Kiwee est un quadricycle léger à deux places dont la vitesse est limitée à 45 Km/h. Il est accessible aux personnes dépourvues de permis B, utilisable par des personnes titulaires seulement d'un permis AM (anciennement BSR) facilement accessible.

L'aptitude des véhicules à se combiner en train routier et à être conduits «en groupe» par un seul opérateur est le principe technologique disruptif. Le système est structuré autour de stations où les véhicules peuvent y être empruntés ou déposés. Quand une station se vide, elle est réalimentée par un convoi depuis une station saturée, réalisée par un

Figure 1: Un service basé sur la redistribution pour maximiser l'usage.

↓



AUTEUR



Valéry Cervantès

[Direction de la recherche technologique]

Responsable du Programme «Transports» au Département électricité et hydrogène pour les transports du CEA-Liten.

[1] <https://www.climate-kic.org/>

opérateur professionnel. L'opération de redistribution des véhicules vides s'appuie sur des algorithmes «classiques» d'optimisation de tournées de livraison combinés à des algorithmes de gestion de stocks de véhicules en station.

Cette logique de redistribution «tirée par la demande» est vertueuse : les véhicules sont déplacés uniquement pour répondre au besoin, suivant des trajets optimisés. Elle est également efficace : un train routier peut, en effet, être constitué de 10 véhicules Kiwee !

Par ailleurs les véhicules sont connectés électriquement entre eux, permettant à un train routier stationné d'être chargé par un seul point de charge (baisse des investissements).

Les simulations effectuées indiquent que dans les zones périurbaines d'intérêt desservies par des transports publics efficaces, Kiwee pourrait à terme induire, dans certains cas, un transfert de 15 % des usagers de la voiture particulière. ●



→
Démonstration à Glasgow en présence du ministre écossais des transports
© Chris James

L'équipe projet et le comité →
de pilotage [CEA].

AUTEURS



Sophie Charton

[Direction des énergies]

Directrice de recherche en génie des procédés et coordinatrice du projet EASI-Fuel à l'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone (Isec) du CEA.



Vincent Artero

[Direction de la recherche fondamentale]

Directeur de recherche en photosynthèse artificielle à l'Institut interdisciplinaire de Grenoble (Irig) du CEA.



Muriel Matheron

[Direction de la recherche technologique]

Directrice de recherche en cellules solaires au Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Litén) du CEA.

Pour aller plus loin...

European Innovation Council :
https://eic.ec.europa.eu/eic-funding-opportunities/eic-prizes/eic-horizon-prizes/fuel-sun-artificial-photosynthesis_en



Convertir l'énergie solaire en méthane



— Le démonstrateur EASI-Fuel du CEA est un dispositif original et autonome de conversion continue d'énergie solaire, d'eau et de CO₂ en méthane (CH₄). Il a été finaliste du concours de l'European Innovation Council (EIC) «Horizon Prize : fuel from the sun».

La capture et l'utilisation du carbone sous forme de molécules d'intérêt à partir d'énergie solaire est un des axes de R&D de la feuille de route Économie Circulaire du Carbone du CEA.

Au-delà des enjeux scientifiques, les problématiques d'intégration et de changement d'échelle demeurent des freins au déploiement industriel de ces procédés dits de « photosynthèse artificielle ». Le concours d'incitation Européen « Horizon Prize : fuel from the sun » a été l'opportunité pour le CEA de s'appuyer sur ses compétences pluridisciplinaires (énergies, fabrication additive...) pour concrétiser la réalisation d'un démonstrateur de taille préfiguratrice.

Le dispositif EASI-Fuel est basé sur la méthanogenèse pour convertir, en continu et en conditions douces, du CO₂ en méthane (CH₄). Le bioréacteur est couplé à des cellules photo-électrochimiques intégrées (IPEC) qui l'alimentent en hydrogène produit de façon autonome par photo-électrolyse de l'eau. L'IPEC intègre une cellule solaire tandem Silicium-Perovskite à haut rendement à un électrolyseur de type PEMFC de structure hybride métal/plastique. Grâce à la fabrication additive, sa structure monolithique compacte permet d'intensifier les échanges thermiques et de minimiser l'empreinte au sol. Associé à une unité industrielle de méthanisation de taille moyenne, cette technologie permettrait

de convertir intégralement les émissions de CO₂ de l'unité tout en augmentant de 50 % sa production de CH₄.

EASI-Fuel a fait partie des 3 projets sélectionnés pour la finale du concours, organisée cet été à Ispra (Italie). Au cours des 72h de démonstration, le prototype a fonctionné en continu et avec une production de CH₄ conforme aux attentes. Ce démonstrateur est un outil précieux pour tester de nouvelles technologies intégrées de photosynthèse artificielle et les comparer aux approches plus matures de type power-to-X (non intégrées). Ce projet interdisciplinaire et transversal témoigne de la capacité du CEA à innover sur les briques élémentaires, l'intégration et la démonstration en environnement réel. ●



↑
Le démonstrateur EASI Fuel sur le site du JRC Ispra [CEA].

Des capteurs intégrés à la matière

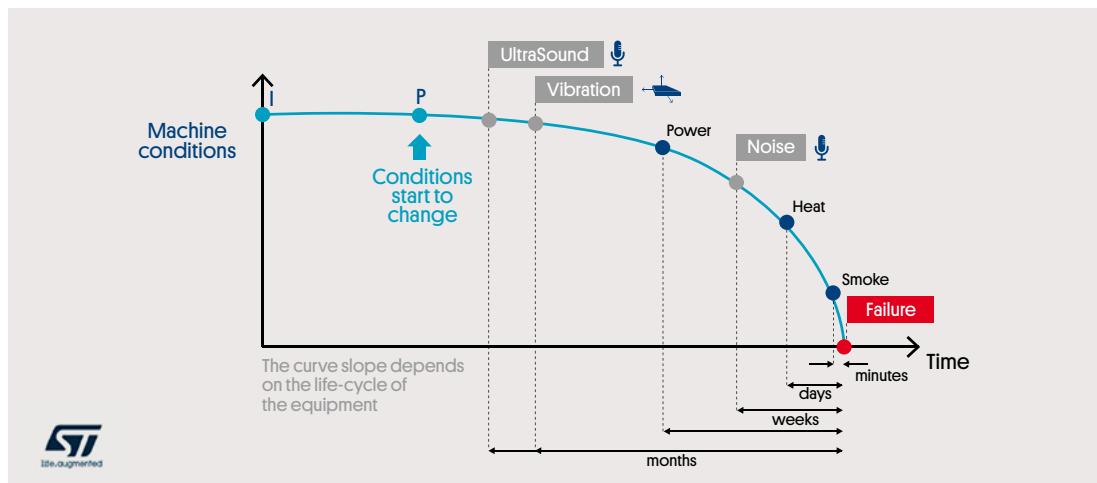
— Pour éviter des maintenances planifiées trop fréquentes et réduire le nombre d'interventions sur machines, la maintenance prédictive via le contrôle de santé intégré dit SHM [Structure Health Monitoring] est de plus en plus déployée dans les environnements industriels.

AUTEUR

**Rémy Kalmar**

[Direction de la recherche technologique]

Ingénieur-chercheur en mécatronique au sein de la plateforme MAPP [Mécatronique pour l'amélioration des produits et procédés] du CEA TECH Grand Est.



↑
Figure 1: Précocité de détection d'une défaillance par grandeur physique d'intérêt.
© STMicroelectronics

Pour détecter une dérive ou une défaillance le plus tôt possible au sein d'une structure, le choix de la grandeur physique est primordiale. Dans la majorité des cas, les mesures acoustiques et vibratoires sont les grandeurs physiques qui requièrent le moins d'énergie et transmettent les informations les plus en amont d'une défaillance.

Dans le milieu industriel, de nombreux capteurs dédiés au SHM pour la maintenance prédictive voient le jour, notamment pour la surveillance des machines tournantes et des roulements à billes, particulièrement exposés aux pannes. Parmi les technologies déjà disponibles sur le marché, on peut citer Bob Assistant de EOLANE et les capteurs ultrasons de UE Systems, qui effectuent à la fois la mesure du signal annonciateur de défaillance ainsi que la détection de la dérive à l'aide d'algorithme d'apprentissage.

Au sein de la plateforme MAPP (Mécatronique pour l'amélioration des produits et procédés), nous mettons en œuvre des technologies de fabrication additive telles que la projection thermique à froid (ColdSpray) ou l'extrusion de pâtes (Paste extrusion modeling) pour réaliser les fonctions suivantes :

- amener les interconnexions électriques sur des substrats de différentes natures (métaux, polymères) et s'affranchir ainsi des structures d'une carte électronique classique ;
- apposer et intégrer les capteurs sur des pièces pré-fabriquées ;
- co-construire la pièce et les capteurs par étapes de fabrication additive, successives ou combinées ;

La fabrication et co-fabrication par technologies additives rendent possible une intégration plus intelligente au sein des structures à surveiller car elles permettent à la fois l'optimisation topologique de la pièce et de localisation de la mesure. On peut ainsi simplifier les matrices de transformation du signal d'intérêt, créées usuellement par les interfaces mécaniques présentes entre le système et l'élément de mesure. Ceci est d'autant plus pertinent pour des mesures vibratoires. ●



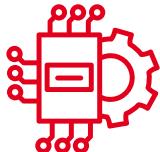
Une approche générique et disruptive

AUTEUR

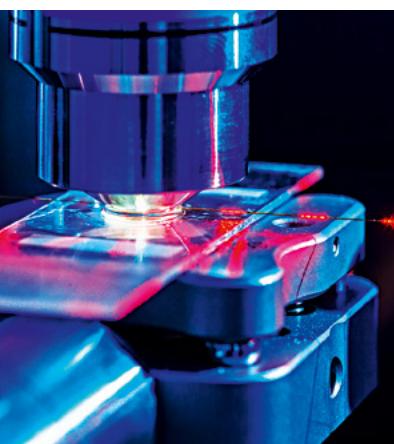


Guillaume Laffont
(Direction de la recherche technologique)

Chef du Laboratoire capteurs fibres optiques (Département métrologie, instrumentation et information) du CEA-List.



« Parmi les différentes pistes considérées, le CEA développe une approche SHM générique et disruptive. »



— **Approche système et multidisciplinaire, la Surveillance Santé des Structures ou SHM vise à optimiser la disponibilité opérationnelle et la maintenance d'installations et d'infrastructures, à prévenir leurs éventuelles défaillances et *in fine* à prolonger leur durée de vie. Combinant des technologies d'instrumentation *in-situ*, d'analyse des données et d'interprétation mais aussi de prise de décision, le SHM a un rôle primordial à jouer dans de multiples secteurs industriels mais également dans la surveillance de grands équipements de recherche.**

Il en va ainsi des domaines du **génie civil** (surveillance de ponts, barrages, grands bâtiments, infrastructures nucléaires), du **transport terrestre** (voies ferrées et leur réseau d'alimentation électrique, matériels roulants) ou **maritime** (coque des navires, cuves de méthaniers), de l'**aéronautique** (fuselage et nacelle d'avions en matériaux composites, turboréacteurs) et même du **spatial** (lanceurs réutilisables, stations orbitales), de l'**énergie** (installations et équipements de production/stocage d'hydrogène, pipeline et éoliennes on-shore et off-shore), du **manufacturing avancé** (machines et outils de fabrication additive pour matériaux métalliques ou céramiques, pièces fabriquées 3D en opération) et bien entendu du **nucléaire** (centrales nucléaires, usine de retraitement, sites de stockage). Cette démarche est transposable au domaine scientifique pour la surveillance de grands équipements : dispositifs dédiés aux études sur la **fission** (dispositifs d'irradiation et réacteurs de recherche) et la **fusion nucléaire** (tokamak West, ITER) mais également installations dédiées à la **physique des particules** de haute énergie (accélérateur de particules).

Pour que ces secteurs adoptent une démarche SHM, il est indispensable de proposer une technologie générique d'instrumentation pour alimenter le système en données fiables et ce, quelles que soient les conditions de déploiement, le plus souvent spécifiques à chaque domaine.

Une approche générique du SHM...

Parmi les différentes pistes considérées, le CEA développe une approche SHM générique et disruptive, en associant deux technologies *via* des interrogateurs spécifiquement développés et exploitant des lasers fibrés ou même des puces photoniques. Il s'agit de coupler des instrumentations de mesure sur fibres optiques (réseaux de Bragg) avec des approches issues du monde du contrôle non destructif (CND) exploitant des ondes ultrasonores guidées et/ou

de volume au sein des matériaux et des structures. Capteurs intrinsèquement **multiparamétriques**, les réseaux de Bragg sur fibre optique permettent de créer des **réseaux de capteurs peu intrusifs et maillant des structures complexes**, tout en donnant accès à des mesures classiques de température, de déformation, de vibration, de pression, de dose de rayonnements ionisants mais également à celle de signaux acoustiques ultrasonores (en remplacement des traditionnels transducteurs piézoélectriques PZT). Les ondes acoustiques ultrasonores et les différentes techniques pour les générer (PZT, laser impulsif mais aussi bruit ambiant d'une structure en fonctionnement) sont utilisées, quant à elles, pour sonder les matériaux en surface ou « à cœur », qu'ils soient métalliques ou composites et, *via* des algorithmes d'analyse et d'imagerie spécifiques, de détecter des prémisses de défauts (amorces de fissures, corrosion, délamnages) ou de vieillissement puis de prédire les opérations de maintenance à planifier voire la durée de vie résiduelle.

... y compris en conditions extrêmes !

En outre, le SHM pourra être appliqué au sein d'infrastructures opérant en environnement sévère avec des réseaux de Bragg capables d'opérer dans des conditions extrêmes (gravés au cœur des fibres optiques par laser femtoseconde pour rendre ces transducteurs ultra-stables au-delà de 1000°C, mais aussi en régime cryogénique et sous radiations ionisantes) et des algorithmes d'imagerie ultrasonore robustes et tenant compte des spécificités de cette technologie de mesure. Ce sera, par exemple, applicable au SHM des moteurs d'avion de nouvelle génération, fonctionnant à des températures toujours plus élevées (et parfois sans carénage !), des lanceurs réutilisables, de la surveillance d'installations de production et de stockage d'hydrogène, des petits réacteurs nucléaires, des prototypes de réacteurs exploitant la fusion... ●



Surveiller les rails

— Afin de détecter et prévenir les casses de rails, le CEA et Alstom ont développé une solution de monitoring de rail à l'aide de capteurs piézoélectriques installés en bord de voie. Une étude d'impact environnemental a montré que cette solution présente un bilan carbone favorable pour l'exploitation ferroviaire.

Chaque ligne de métro en Europe connaît entre 2 et 4 casses de rail par an. Pour le réseau « grandes lignes » européen, le nombre de casses pour 100 km de voie est estimé à 1,5. Ces chiffres impressionnantes ne sont heureusement pas sources de fréquentes catastrophes ferroviaires mais ces casses sont à l'origine d'interruptions de service aux conséquences économiques et sociales importantes.

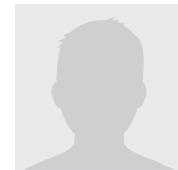
Sollicité par Alstom, le CEA a développé une solution innovante de détection de casses de rail par propagation d'ondes élastiques ultrasonores guidées par le rail (**figure 1**). Cette solution comporte des transducteurs piézo-électriques installés de façon permanente sur le rail et connectés à des cartes électroniques placées dans un coffret en bord de voie. Ces dernières assurent le pilotage des transducteurs, le traitement local des signaux et la communication de l'information vers un serveur de supervision distant.

Les premiers prototypes mis au point dans les laboratoires du CEA ont été déployés fin 2019 sur le Centre d'Essais Ferroviaires de Bar-Le-Duc (55) pour des tests en conditions réalistes qui se sont avérés concluants. La solution a donc été transférée à Alstom, qui produit désormais ses propres systèmes et les a installés sur une partie de la ligne 13 du métro parisien dans le cadre d'une expérimentation avec la RATP qui se déroule *via* le Rail Open Lab, dispositif partenarial de co-développement de solutions innovantes de la filière ferroviaire française. Dans les prochains mois, des systèmes seront également installés sur une ligne du métro de Taïpei à Taïwan.

Tout en accompagnant Alstom dans ses premiers déploiements sur réseaux commerciaux, le CEA continue la R&D afin d'améliorer les performances des systèmes dans l'objectif d'identifier précocelement des amorces de fissures au lieu de détecter des casses. Cela nécessite la mise au point d'algorithmes d'analyse des signaux poussés, embarqués au plus proche des capteurs en bord de voies.

En parallèle de ces travaux, le CEA a mené une étude d'impact du système, sous forme de bilan carbone. Elle a montré que, sous réserve d'une implémentation judicieuse, le système SHM rail présente un bilan carbone favorable : le coût de production, transport et utilisation du système (en kg de CO₂) est inférieur au gain apporté (toujours en kg de CO₂) grâce à la réduction des opérations de maintenance actuellement mises en œuvre. Ce résultat est conservatif car il ne prend pas en compte une potentielle extension de la durée de vie des rails, le coût engendré par d'éventuels accidents et le bénéfice offert par une meilleure disponibilité du système ferroviaire. Toutefois, cette étude présuppose que la réglementation et les pratiques de maintenance acceptent et reconnaissent le SHM, ce qui n'est pas le cas actuellement. Il y a donc un fort enjeu autour de la certification du système Rail SHM (**figure 2**), avec une démarche qui pourrait bénéficier à tous les secteurs industriels qui cherchent à mettre en œuvre des technologies similaires de monitoring de leur (infra-)structures. ●

AUTEURS



Bastien Chapuis

[Direction de la recherche technologique]

Ingénieur-chercheur au Département imagerie et simulation pour le contrôle (DISC) du CEA-List.



Maxime Darbois

[Alstom]
Innovation Manager Infrastructure.

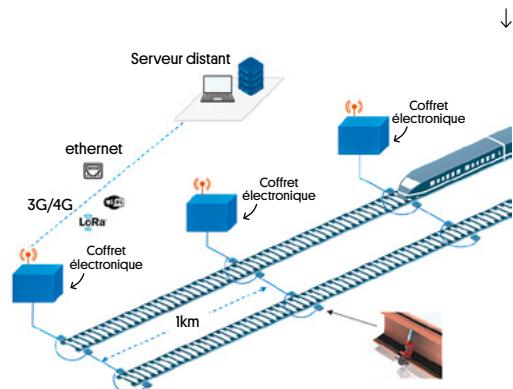


Figure 2: Schéma d'ensemble du système Rail SHM.

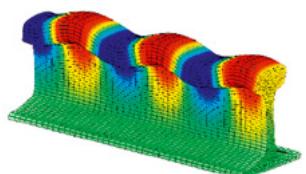


Figure 1: Simulation de la propagation d'onde élastique guidée dans la tête du rail.



↑

Figure 1: Stand SCARCE lors du sommet CleanEnviro 2022 à Singapour. De gauche à droite : l'équipe de montage du stand ; le passage des Ministres Grace Fu et Dr. Amy Khor ; la visite du Chief Minister de Bohor [Malaisie] Onn Hafiz Ghazi ; Snapshot du focus sur SCARCE télévisé sur CNA et Channel 5.

AUTEUR



Jean-Christophe P. Gabriel

[Direction de la recherche fondamentale]

Directeur de recherche au CEA et co-directeur de SCARCE.

Pour aller plus loin...

- > SCARCE : focus & interview de Channel News Asia TV
- > Interview sur la radio CNA938

[i] Les membres du comité d'encadrement. Co-Directeurs : JCP Gabriel [CEA/DRF] avec Prof. M. Srinivasan [NTU]. Co-PI pour RT1 : Daniel Meyer [CEA/DES] & Prof. MS. Co-PI RT2 & RT3 : JCP Gabriel & Profs. N. Matthews et Y. Qingyu [NTU]. Co-PI RT4 : Antoine Leybros [CEA/DES] & Prof JM. Lee [NTU].

Recycler les déchets électroniques



— **Crée en août 2018, l'Alliance NTU Singapour - CEA pour la recherche en économie circulaire, ou SCARCE, est le premier laboratoire commun à l'étranger du CEA. Il vise à développer et à protéger des étapes de procédés, au-delà de l'état de l'art, dans le domaine du recyclage des déchets électroniques jusqu'à l'échelle du démonstrateur (10 kg/h).**

L'alliance SCARCE est une action visant à récupérer des métaux stratégiques issus des déchets électroniques. Intégrée dans le plan de développement durable de Singapour, elle contribue à l'essor de son industrie locale tout en réduisant sa dépendance en matériaux et, par son impact sociétal, permet de justifier les efforts financiers en R&D. Elle permet au CEA, d'accéder plus rapidement au marché et d'obtenir un retour sur investissement pour de nouveaux concepts matériaux, produits ou procédés de recyclage qui étaient, en 2018, à un stade précoce de développement au sein de ses laboratoires, voire orphelins de tout financement.

Au cours des quatre premières années du projet, l'accent a été mis sur plusieurs axes de recherche [i] : (RT1) Recyclage des batteries lithium-ion ; (RT2) Développement de procédés de recyclage durable pour les panneaux solaires (Si) ; (RT3) Recyclage des cartes de circuits imprimés ; (RT4) Détoxicification et recyclage des déchets plastiques toxiques.

Sur la base d'une dotation financière initiale de 12,5 M SG\$ (~ 7,8 M€) allouée par l'Agence singapourienne de l'environnement (NEA), à laquelle se sont ajoutées des contributions en nature (salaires et équipement) du CEA (2,6 M SG\$) et de NTU (2,6 M SG\$), le budget total initial de SCARCE était de 17,9 MSG\$ (11,1 M€) entre août 2018 et février 2023. Les évaluations successives du projet ont été excellentes : au-delà des indicateurs (nombre de publications, brevets, présentations), l'un des faits majeurs est l'intérêt manifesté par l'industrie, déjà visible à travers l'engagement financier reçu (1,5 M€ soit 2 fois l'objectif initial) mais aussi les collaborations en cours de discussion avec des partenaires potentiels en France, en Europe et à Singapour qui portent sur :

- le co-traitement des batteries au Li avec des déchets alimentaires permettant la lixiviation de + 80 % des métaux ;
- (ii) l'utilisation des fluides supercritiques pour l'extraction des métaux stratégiques et la dépollution des plastiques ;
- les procédés de tri avancés sur technologies issues du CEA permettant un tri de composants électroniques sur la base de leur composition élémentaire, une première mondiale ;
- les premières démonstrations de la viabilité économique de procédés de récupération de métaux « orphelin de recyclage » (néodyme, terres rares et tantale, notamment).

Et pour la suite ? Le financement de la phase 2 du laboratoire SCARCE est en discussion. Cette phase 2 sera centrée sur le transfert des technologies développées vers les industriels et sera doté d'un budget de l'ordre de plus de 10 M€. Côté français, une forte participation des acteurs de SCARCE au PEPR Recyclage permettra d'équilibrer les efforts de développement, démonstration et valorisation. ●

Figure 2: Démonstrateur [10 kg/h ou 72 000 composants/h] de tri de composants électroniques permettant de les séparer sur la base de leur composition chimique élémentaire. Cet outil permet de réduire la complexité d'un mélange de déchets électroniques de 60 éléments chimiques à seulement quelques-uns [entre 4 à 6 en moyenne]. Cette simplification permet de rendre économiquement viable les procédés de recyclage de « métaux orphelins » [non recyclés].



Au cœur de la réparation et de l'économie de matière



— Le développement de la fabrication additive offre de nouvelles opportunités pour l'élaboration de pièces métalliques avec de la matière recyclée, ainsi que pour le prolongement de la durée d'usage de composants industriels par réparation.

La fabrication additive (FA) métallique offre aujourd'hui une réelle alternative aux procédés de fabrications conventionnels tels que la fonderie ou le forgeage. Parmi l'ensemble des technologies d'impression 3D permettant de produire des pièces par ajout de matière couche par couche à partir d'un fichier numérique de conception assistée par ordinateur (CAO) [1], deux procédés se distinguent par leur maturité et complémentarité. La projection laser de poudre (LMD) permet de fabriquer ou réparer des pièces de grandes tailles avec un fort rendement, en projetant et déposant des particules de poudre métallique sur un substrat ou une pièce à travers une buse coaxiale, où un laser les fait fondre simultanément (**figure 1**). La fusion laser sur lit de poudre (LPBF) est utilisée pour usiner des pièces aux géométries complexes avec une grande précision, par ajout successif de fines couches de poudre les unes au-dessus des autres et avec une consolidation localisée du matériau par un laser après chaque étalement de couche. Les pièces métalliques élaborées par ces deux procédés (**figure 2**) de fabrication présentent d'excellentes propriétés (mécaniques, résistance à la corrosion).

En outre, les procédés de FA se caractérisent par leur adéquation avec les principes de l'économie circulaire, notamment «l'épargne» de la matière nécessaire à la fabrication et le prolongement de

Figure 1: Procédé de réparation par projection laser de poudre et coupes transverses avant et après révélation de la microstructure

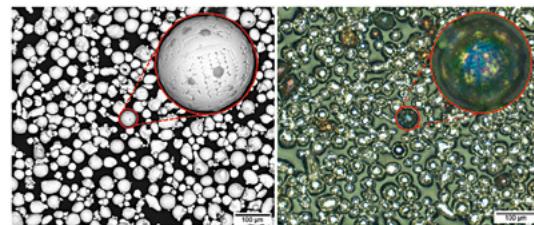
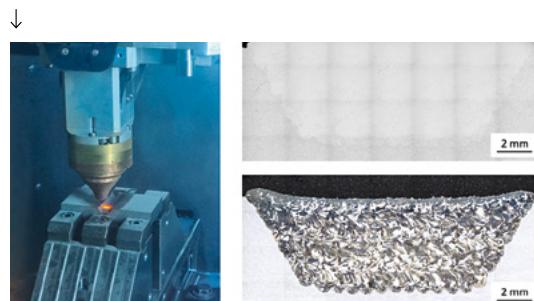


Figure 2: Poudres métalliques recyclées – contrôle de l'oxydation par la couleur des particules

la durée d'usage des composants grâce à la réparation. Le procédé LMD a démontré sa capacité à réparer des pièces métalliques en conservant une haute densité de dépôsition et de bonnes propriétés mécaniques [2]. L'énergie apportée par le laser fait fondre le matériau d'apport sans sensiblement affecter thermiquement le substrat, donnant lieu à une qualité de réparation optimisée. Enfin, l'implantation des têtes de dépôsition sur des machines à contrôle numérique automatise le procédé de réparation, en ayant une haute précision en comparaison d'une réparation manuelle, qui est encore la forme la plus courante à ce jour. Ainsi, cette méthode de réparation de composants endommagés permet d'allonger la durée d'usage des produits, qui est un des piliers de l'économie circulaire développée actuellement. Quant au procédé LPBF, il offre des opportunités en termes d'économie de matière en allégeant les structures grâce à l'optimisation de leur topologie et la création de formes complexes. Il a été également démontré que la poudre non fusionnée peut être récupérée et réutilisée après un simple tamisage pour d'autres fabrications sans diminution des propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion des pièces élaborées [3]. Une méthode de contrôle du vieillissement de la matière première au fur et à mesure des réutilisations a également été développée, permettant de déterminer les teneurs en oxygène des particules à partir de leur couleur. Ces atouts placent donc la fabrication additive comme une réelle solution de production durable ! ●

AUTEURS



Thomas Cailloux

[Direction des énergies]

Doctorant à l'Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone (Isas) du CEA.



Timothée Delacroix

[Direction des énergies]

Doctorant à l'Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone (Isas) du CEA.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ISO/ASTM, 52900:2021, Additive Manufacturing – General Principles – Fundamentals and Vocabulary, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

[2] T. Cailloux, W. Pacquentin, S. Narasimalu, F. Belnou, F. Schuster, H. Maskrot, C. Wang, K. Zhou, F. Balbaud-Celerier, Influence of trapezoidal groove geometry on the microstructure and mechanical properties of stainless steel 316L parts repaired by laser metal deposition, Materials Science and Engineering : A. (2022) 144218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144218>.

[3] T. Delacroix, F. Lomello, F. Schuster, H. Maskrot, J.-P. Garandet, Influence of powder recycling on 316L stainless steel feedstocks and printed parts in laser powder bed fusion, Additive Manufacturing. 50 (2022) 102553. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102553>.

Jeunes pousses mais prometteuses

— Différentes start-ups issues du CEA travaillent dans le domaine de l'économie circulaire et couvrent un spectre d'activités assez large. Petit tour d'horizon...

NAWA TECHNOLOGIES



Vers des batteries plus respectueuses de l'environnement

Spin off du CEA créée en 2013, NAWAtechnologies développe de nouvelles briques technologiques pour la transition énergétique afin d'améliorer le stockage, le transport et l'efficacité énergétique. NAWA utilise le carbone - matière première abondante, peu chère, accessible et naturelle - comme matériau de choix, tout en cherchant à minimiser l'impact environnemental de ses procédés de fabrication et la fin de vie de ses produits.

À partir de sa technologie de tapis de nanotubes de carbone alignés verticalement, NAWA développe trois produits : un super-condensateur de très haute puissance (NAWACAP), une solution efficace de renfort mécanique pour les matériaux composites (NAWASTITCH) et une batterie de nouvelle génération NAWABATT. Dans tous les cas, grâce à leurs caractéristiques physiques incomparables (conduction électrique, thermique, chimique et/ou mécanique), ces tapis de nanotubes permettent de développer des produits performants pour la transition énergétique, capables de réduire drastiquement l'impact environnemental de la mobilité. Et, grâce à par leurs caractéristiques morphologiques, ils sont classés parmi les plus inoffensifs pour la santé et l'environnement. NAWA est lauréate du Label de la fondation Solar Impulse pour ses super-condensateurs.

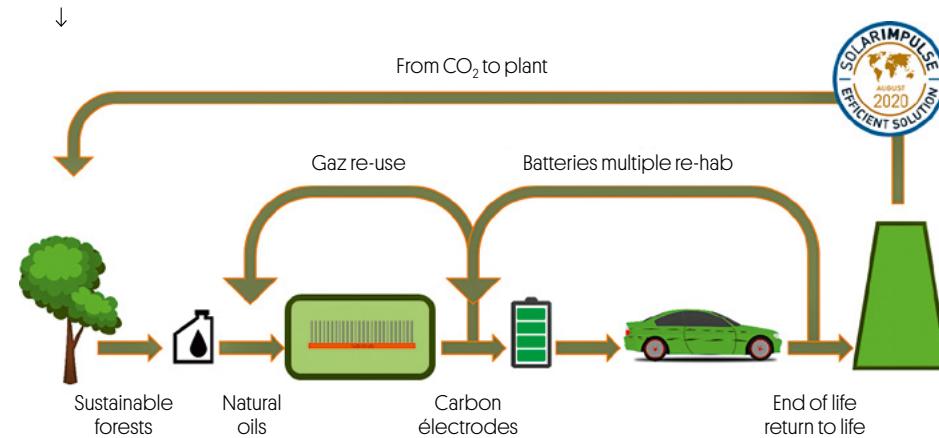
AUTEUR



Pascal Boulanger

CTO de NAWAtechnologies.

Figure 1: NAWA ou la fermeture de la boucle du carbone.



NAWA travaille également sur la réduction de l'impact environnemental de ses procédés de fabrication et du cycle de vie de ses produits, de différentes façons :

- Pour faire croître des tapis de nanotubes, il faut un catalyseur (du fer) et des sources de carbone. Tous les procédés actuels utilisent principalement des gaz ou des liquides qui viennent de l'exploitation de sous-produits pétroliers. NAWA travaille sur le remplacement de ces gaz ou liquides par des équivalents plus verts, issus de la transformation de la biomasse ou bio-sourcés via des huiles naturelles comme des huiles d'eucalyptus ou de camphre voire, à terme, des huiles recyclées. L'utilisation de liquide comme source de carbone permettra de réduire grandement la quantité de matières premières nécessaires. A plus long terme, il serait possible d'utiliser directement le CO₂ de l'atmosphère comme matière première à condition de pouvoir le séquestrer.
- Un autre composant important pour la fabrication des produits de NAWA est l'hydrogène, pour lequel nous identifions et qualifieront des sources vertes d'hydrogène avec des production locales sans stockage si possible.
- Enfin, dernier composant crucial pour les collecteurs de courant des batteries, l'aluminium et le cuivre pour lesquels l'emploi de sources recyclées est désormais quasi obligatoire.

Enfin, NAWA commence à intégrer dans sa démarche de conception des batteries d'autres voies faisant appel à l'éco-circularité comme :

- Le ré-emploi de produits extrants du procédé de synthèse comme le catalyseur, que ce soit pour un usage interne ou externe, le recyclage de gaz et des scraps (déchets de la coupe des électrodes avec des chutes de tapis de nanotubes).
- La réutilisation de matière active d'anciennes générations de batteries, recyclée par des procédés en cours de développement.
- La réhabilitation multiple des super-condensateurs ou batteries, leur recyclage facilité et, en fin de vie, celui des tapis de nanotubes en source de carbone pour réaliser d'autres tapis, fermant ainsi la boucle du carbone (**figure 1**).

Au stade de développement de NAWA, une démarche globale d'éco-circularité a été lancée même si elle n'est pas complètement mise en œuvre aujourd'hui.



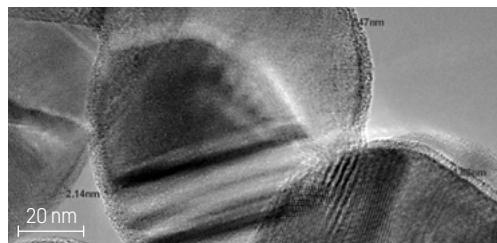
S'affranchir des matériaux critiques

Nanomakers conçoit, produit et commercialise en **quantités industrielles** des **poudres** nanométriques à base silicium pour le renforcement disruptif des matériaux (élastomères, polymères, céramiques, métaux) et l'amélioration de la densité énergétique de l'anode dans les batteries Lithium-ion.

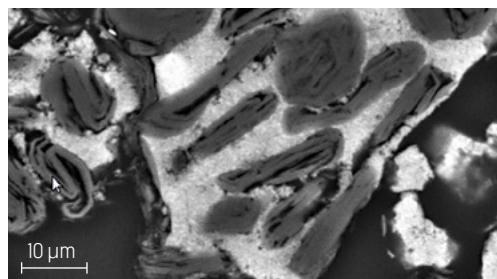
Découverte au MIT en 1980 puis reprise par le CEA dès 1985, la pyrolyse laser permet la production de nanopoudres de grande pureté. Après 25 ans de développement au CEA, la technologie (unique au monde), licenciée et utilisée par Nanomakers, permet de produire des nanoparticules à une échelle industrielle depuis 2012.

Les nanopoudres de carbure de silicium (SiC) et de silicium (Si) produites par Nanomakers accroissent de façon significative les performances des matériaux industriels. Le nano SiC permet d'augmenter les résistances mécanique, thermique et chimique des matériaux tels que les élastomères, les polymères, les céramiques, les métaux, les composites... Quant au nano Si ou Si enrobé de carbone, il améliore la densité énergétique des batteries Lithium-ion. Ce dernier matériau a une capacité de stockage d'énergie 10 fois plus grande que le matériau de référence actuel des anodes, le graphite,

qui est un matériau critique européen. Le silicium permet de diminuer fortement son utilisation, tout en augmentant l'autonomie et la densité des batteries Li-ion.



↑
Figure 2 : Particules de silicium enrobé d'une couche carbonée [images MET-haute résolution].



↑
Figure 3 : Composite silicium-graphite naturel-coke pour application batterie [Si en blanc, graphite et coke en gris].

AUTEURS



Nicolas Béret
Directeur général
de Nanomakers.



Yohan Oudart
Responsable R&D
de Nanomakers.



Améliorer le traitement et le recyclage des effluents liquides industriels

La capture et la séparation sélective d'espèces chimiques dissoutes dans des effluents liquides industriels offrent l'opportunité à la fois de recycler l'eau et de valoriser les composés.



↑
Figure 4 : Nanofibres NFA - Acide polyacrylique.
Brevets CEA. Sélectivité métaux lourds bivalents.

Créée en 2014 à l'occasion du concours mondial de l'innovation (CMI), AJELIS s'est engagée sur cette voie en développant des matériaux innovants et performants qui permettent de dépasser les limites techniques des matériaux actuels tels que les résines échangeuses d'ions ou les charbons actifs.

La rupture technologique apportée est celle d'une nouvelle mise en forme de matériaux échangeurs d'ions maintenant proposés en fibres polymères de faibles diamètres (2-20 μm) en comparaison avec billes de résines échangeuses d'ions à minima 10 à 100 fois plus grosses. De la même façon que la diminution de la taille de gravure des microprocesseurs fait accélérer les vitesses de calcul, le très faible diamètre des fibres AJELIS permet d'obtenir des vitesses d'échange extrêmement rapides.

Son catalogue couvre tout le spectre des matériaux échangeurs d'ions : des fibres cationiques acides faibles ou fortes, anioniques faibles ou fortes, des fibres chélatantes mais aussi des fibres plus spécifiques comme celles pour la capture de l'arsenic ou du césum. Ces fibres d'origine textile possèdent des

AUTEURS



Ekaterina Shilova
Fondatrice et Présidente
d'AJELIS. Chimiste organicienne,
experte en chimie de
matériaux extractants.



Pascal Viel
Directeur de recherche CEA et
cofondateur d'AJELIS. Expert en
matériaux polymères et chimie
de surface.

diamètres de 20 µm en moyenne et sont disponibles en vrac, en non-tissé ou en cartouches bobinées. Elles permettent de satisfaire des débits élevés d'eau pouvant, pour des colonnes d'un kilogramme, dépasser le m³/h.

En se positionnant à la source des productions de déchets, la réduction de volume par la concentration de la pollution réduit nettement l'impact carbone lié au transport dans le traitement des déchets. Outre cet aspect, certaines fibres permettent une séparation sélective de métaux critiques : Ni, Pd, Au, terres rares... en vue de leur recyclage. Ce qui s'inscrit parfaitement dans une démarche d'économie circulaire en réduisant les difficultés d'approvisionnement actuelles et à venir.



↑
Figure 5 : Installation industrielle de traitement d'effluents liquides industriels et une colonne M7 garnie de fibres AJELIS sur le site de Paimboeuf de la société ARETZIA du groupe CHIMIREC.

AUTEURS



Frédéric Goettmann
Directeur général d'Extracthive.



Mehdi Mahmoudi
Responsable du procédé PHYRe®.

Pour aller plus loin...

Extracthive : <https://www.extracthive-industry.com>

Le site web PHYRe® : <https://www.phyre-recycling.com>

Le projet Relicario : <https://eitrawmaterials.eu/project/relicario/>



Vers une fibre de carbone de haute qualité et à faible impact

Un matériau composite se définit comme l'association d'au moins deux matériaux non miscibles, association conférant au matériau final des propriétés (tenue mécanique, résistance au vieillissement, etc.) qu'aucun des deux constituants ne possède, toutes, à lui seul. Dès lors que des applications de pointe sont visées, ce sont les composites à base de fibre de carbone qui se taillent la part du lion. Ce succès tient aux propriétés physiques inégalées de la fibre de carbone qui est à la fois 50 % plus résistante que l'acier et deux fois moins dense que l'aluminium. Elle est ainsi devenue incontournable dans l'aéronautique, l'aérospatial, l'éolien ou le stockage hydrogène. (**figure 6**). Et ainsi la demande en fibre de carbone croît de plus de 12 %/an.

Mais chaque médaille a son revers et ces composites pèsent par trois aspects principaux :

- des capacités de production de fibre trop faibles pour répondre à l'explosion de demande ;
- un mode de production énergivore induisant un fort impact environnemental ;
- et un manque de solutions pour recycler les composites en fin de vie.

Figure 6 : Trois exemples de composants intégrant des fibres de carbone [de gauche à droite] : une pale d'éolienne, des aubes de réacteurs d'avion et un réservoir à hydrogène pour l'automobile.

↓



↑
Figure 7 : Réalisation d'une pièce composite intégrant les fibres PHYRe® par compression moulage.

C'est pour répondre à ces trois défis qu'Extracthive développe depuis 2016 un procédé de recyclage innovant appelé PHYRe®. Il repose sur la dégradation de la résine des composites par solvolysé, soit la mise en œuvre d'un mélange d'acides à température modérée (<200°C), pour venir casser les liaisons chimiques de la résine et libérer les fibres.

Dans le cadre du projet Relicario financé par l'EIT Raw Materials et mené conjointement avec le CEA, il a été démontré que les fibres de carbone ainsi produites présentent des propriétés mécaniques équivalentes à celles des fibres neuves et un impact environnemental 5 à 10 fois plus faible. Ces fibres ont par ailleurs pu être remises en œuvre dans différentes pièces, notamment automobile (**figure 7**), sans altération de leurs propriétés mécaniques.

Depuis fin 2020, Extracthive opère une unité pilote basée sur la technologie PHYRe® qui a une capacité de production de 50 kg de fibre par semaine. Extracthive et Arkema ont, depuis lors, signé un accord prévoyant d'installer le démonstrateur de cette technologie, d'une capacité de 250 kg par semaine, sur la plate-forme chimique de Saint-Auban (04) d'ici l'été 2023. À l'horizon 2027, l'ambition d'Extracthive est d'atteindre une capacité de production de 550 tonnes de fibres par an.

AUTEURS



Alexandre Paleologue
CEO de Morphosense.



Cyril Condemeine
CTO de Morphosense.

RÉFÉRENCES

«Structural Integrity Management & Digital Twin Platform», **L. Grau, M. Carmona et A. Paléologue**, Conférence sur la simulation - www.simulation-conference.fr, Forum Digital CADFEM & ANSYS, 7 au 9 Juillet 2020.

«Digital Twin for Lock Gate», **Loïc Gau (Morphosense) et Teresa Alberts (ITficient)**, «Best practice: digital twins for the optimization of maintenance costs», dans «Best Practice: How Industry Leaders benefit from Digital Twins», 6 Octobre 2020.

«Application des R.O.M. dans les Digital Twins pour l'estimation de la fatigue», **C. Condemeine, L. Grau**, Journée de la simulation automobile, Forum CADFEM & ANSYS, 21 Octobre 2021.

«Enabling Digital Twin and Real-time monitoring for O&M cost reductions with Digital Twin solution», **C. Condemeine, L. Grau**, FOWT 2021 Conférence, 16-18 Novembre 2021, Saint Malo.

«Innovative Live Digital Twin for Hydraulic structures», **C. Condemeine, L. Grau (MPS)**, Yves Masson [CNR], Conférence HYDRO2I, Strasbourg. Conférence reportée en Avril 2022.

«Innovative Live Digital Twin for Hydraulic structures», **C. Condemeine, L. Grau (MPS)**, Yves Masson [CNR], International Journal on Hydropower & Dams, Vol.29, issue 2, 2022, pp.80-86.

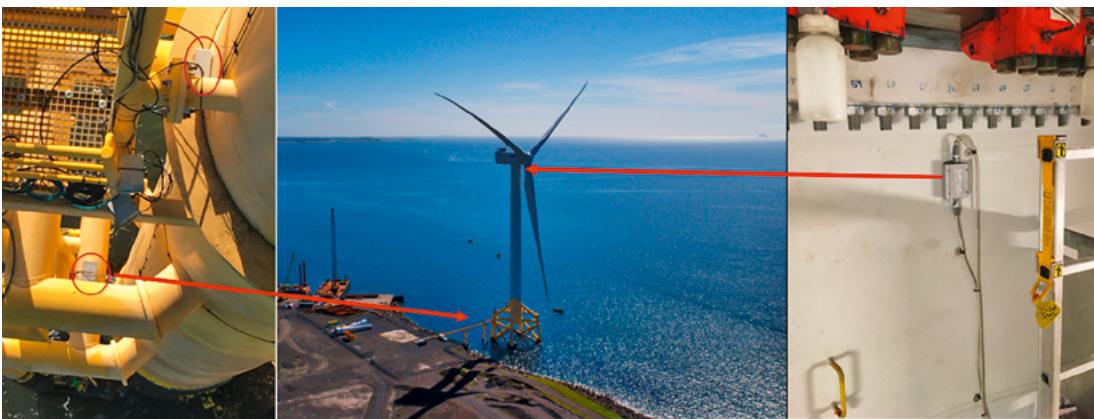


Figure 8: Éolienne offshore instrumentée.
© Morphosense, 2022



Prolonger la durée de vie des infrastructures de production d'Énergie

Pour répondre aux enjeux de la transition énergétique et de la réduction de l'empreinte carbone (CO_2), l'extension de la durée de vie et le maintien en conditions opérationnelles des actifs de production d'énergie (offshore éolien et oil&gaz, hydraulique, génie civil et nucléaire) sont des leviers critiques. C'est dans ce cadre que Morphosense propose une solution unique de suivi de leur durée de vie, basée sur la technologie du jumeau numérique et intégrant les dernières évolutions des capteurs, des architectures IT, des outils d'IA ou encore des systèmes embarqués.

Pour les parcs éoliens offshore récents (**figure 8**) aussi bien que pour des barrages, écluses ou centrales nucléaires déjà en exploitation, le monitoring avancé (SHM) associé au jumeau numérique (**figure 9**) rend possible leur maintenance prédictive par l'estimation de la fatigue structurelle et de la durée de

vie résiduelle. Une nécessité pour l'optimisation ou la prolongation de vie des actifs de production de l'énergie, qu'elle soit d'origine fossile, nucléaire ou renouvelable, à condition que les coûts d'exploitation et de maintenance soient prévisibles et contrôlés et les risques inhérents maîtrisés.

Pour des structures de production d'énergie en exploitation depuis longtemps (centrales nucléaires, barrages ou écluses), disposer d'un outil de suivi de l'état structurel et d'estimation de la durée de vie résiduelle des parties les plus critiques permet la définition d'une stratégie de prolongation d'exploitation opérationnelle maîtrisée.

Pour les nouveaux outils de production d'énergie (champs éoliens), la maîtrise des coûts de maintenance et d'exploitation sont l'enjeu principal pour atteindre le seuil de rentabilité et en garantir le bas niveau de carbone exigé.

Au-delà de la maîtrise des coûts, la maintenance prédictive contribue également à la réduction de l'empreinte carbone sur plusieurs axes :

- la réduction des actions d'inspection (coûteuses en temps, en personnel et en déplacements consommateurs de CO_2) ;
- l'objectivation des actions correctives de remplacement de parties structurelles imposantes dont la production et le transport sont défavorables en termes de bilan carbone ;
- la maîtrise des risques par la mesure pour poursuivre l'exploitation d'une centrale hydraulique où d'un barrage, dont le bilan CO_2 est favorable au regard d'autres moyens de production d'énergie, largement plus défavorables.

Morphosense dispose de toutes les technologies nécessaires au déploiement à grande échelle du jumeau numérique. Morphosense propose ainsi à ses clients une maintenance prédictive au service de la gestion bas carbone et sécurisée de leurs actifs de production d'énergie.

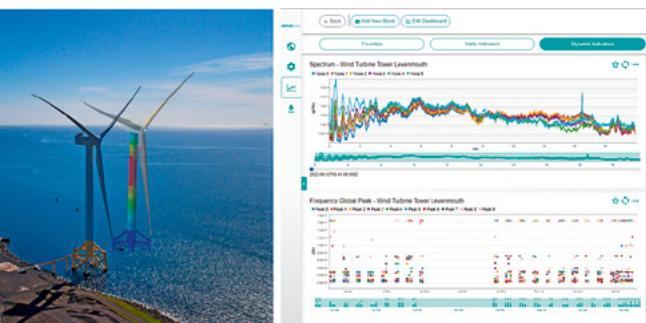


Figure 9: Jumeau numérique et tableaux de bords opérationnels.
© Morphosense, 2022

**Lionel Geynet**

Directeur Business Unit RFID
Sensors d'Asygn.

**Frédéric Maricourt**

Directeur commercial
d'Asygn.

- [1] <https://asygn.com/as32lx/>
- [2] https://www.hidglobal.com/sites/default/files/resource_files/idt-industrial-grade-rfid-tag-for-ge-cs-en.pdf



Mesurer sans fils ni batterie

En proposant des capteurs faible consommation compatible avec une technologie de communication sans fil et sans batteries (RFID) conçue pour l'identification et l'inventaire massif, Asygn cherche à répondre aux enjeux de la maintenance prédictive.

La technologie mise au point par Asygn s'appuie sur les fondamentaux de la RFID passive : un lecteur émet un champ radiofréquences dont une étiquette récupère l'énergie pour alimenter sa puce électronique. Là où une étiquette RFID passive classique se contente de retourner un numéro d'identification unique au lecteur, permettant ainsi l'identification et l'inventaire d'objets, Asygn donne à ce même objet la capacité de sentir son environnement. Les quelques micro-Watts véhiculés par le champ radio vers la puce située jusqu'à une dizaine de mètres sont alors utilisés pour mesurer température, humidité, luminosité, champ magnétique ambients, la position d'un objet, son poids ou la contrainte qui lui est appliquée, la présence d'éléments chimiques ou un contact électrique pour ne citer que quelques exemples [1].

Par son absence de source d'énergie embarquée et de connexions électriques, les produits d'Asygn trouvent naturellement des applications dans les

Figure 10 : Suivi de la température pendant la prise du béton



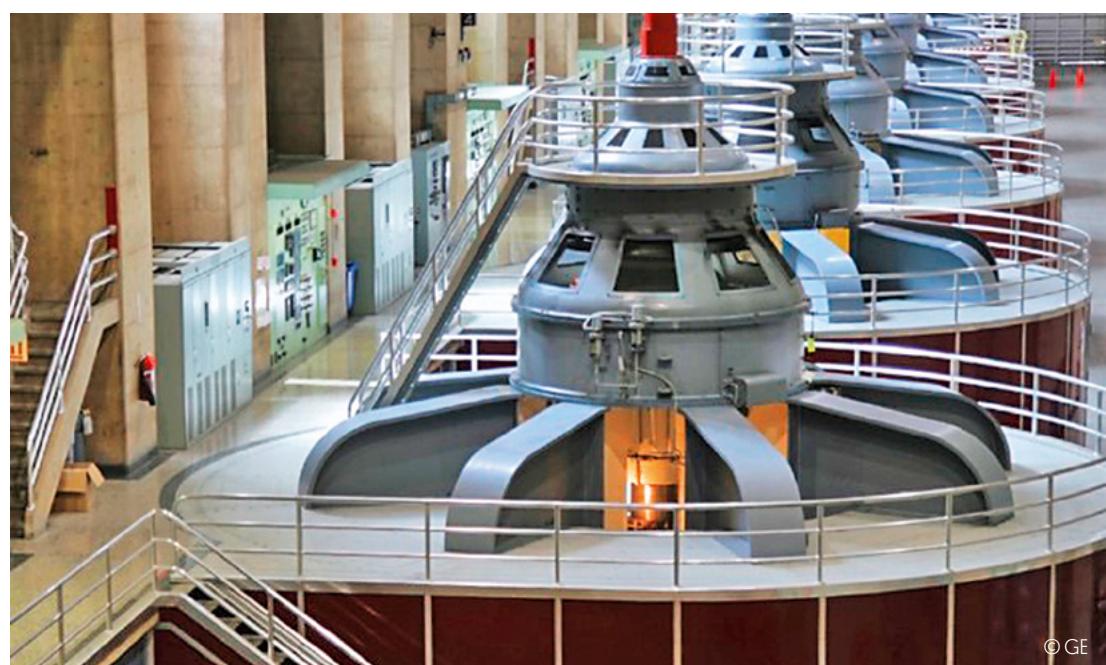
© Asygn

secteurs où l'accès au capteur est difficile après son installation : en génie civil, pour le suivi de la température pendant la prise du béton (**figure 10**) et la déformation d'un ouvrage, pour la production d'énergie hydro-électrique, la détection précoce d'échauffements ou de contraintes trop élevées dans les turbines (**figure 11**) permettant d'éviter de coûteuses périodes d'interruption pour maintenance [2], pour l'agriculture, le suivi des conditions de température, humidité et luminosité dans l'objectif d'économiser l'eau, l'énergie, les engrains et d'optimiser les rendements.

Nul besoin d'infrastructure spécifique : ces produits répondent à la norme RAIN RFID, garantissant une compatibilité avec tous les lecteurs du marché et les installations existantes ! ●

Figure 11: Asygn et son partenaire HID proposent une solution de maintenance prédictive par mesures de température et de déformation dans les turbines hydroélectriques.

↓



© GE

Vers un changement culturel de la recherche ?

— La thématique de l'économie circulaire s'est imposée aujourd'hui dans le débat public et la question climatique y concourt fortement. L'indispensable transition énergétique qui en découle a non seulement mis en lumière le besoin en matières premières mais également la nécessité de minimiser leur consommation, de recourir aux circuits courts d'approvisionnement, à la réparation, au recyclage...

La thématique de l'économie circulaire ne peut être considérée comme une nouveauté au CEA. L'exemple le plus emblématique est naturellement celui du cycle du combustible nucléaire qui mobilise les équipes du CEA depuis des décennies et qui a pour but de valoriser toute la matière fissile à travers une conception adaptée des crayons pour permettre le recyclage, tout en minimisant les impacts environnementaux. Ce succès révèle aussi qu'un cycle, conçu de la fabrication jusqu'à la fin de vie, permet d'éviter le, si classique, *down-cycling* et la perte de valeur des matériaux critiques inclus ; il requiert une vision systémique et en avance de phase. Les exemples de projets collaboratifs sur les matériaux, les NTE, les déchets électroniques ou les start-up illustrent qu'aujourd'hui des programmes bien loin du nucléaire se sont saisis de la problématique de l'économie circulaire. La première appréhension de cette thématique se concentre sur le cycle des matières. Les exemples

présentés dans ce numéro montrent que le CEA développe une approche holistique de la science des matériaux sur l'ensemble du cycle de vie, depuis la conception accélérée et sobre jusqu'à la fin de vie et le recyclage. En outre, un des axes stratégiques du CEA, pour la période 2021-2025, porte sur le cycle des matières étendu aux aspects économie circulaire du carbone et analyses de cycle de vie.

Mais, comme l'illustrent le transport partagé (p. 37), la corrosion (p. 25) ou les SHM (p. 39 et suivantes), l'économie circulaire ne se limite pas au cycle de vie des matières : elle est propice à l'innovation du fait de la modification des usages et met surtout au cœur des problématiques la question de la durabilité des procédés et des produits formés. Ce dernier aspect doit s'ancrer et percoler dans tous les travaux de recherche du CEA car l'attente sociétale sera de plus en plus forte. Le numérique commence à s'en saisir et les futures programmations du CEA

AUTEURS



Hervé Desvaux

[Direction financière et des programmes]

Directeur délégué aux programmes du CEA.



Etienne Bouyer

[Direction financière et des programmes]

Directeur du Programme exploratoire «Bottom - Up» à la Direction déléguée aux programmes du CEA.



Frédéric Schuster

[Direction financière et des programmes]

Directeur du Programme transversal de compétences matériaux et procédés à la Direction déléguée aux programmes du CEA et co-directeur du PEPR DIADEM.

Innover dans les matériaux

Co-piloté par le CEA et le CNRS, le **PEPR exploratoire DIADEM** vise à accélérer le déploiement de matériaux innovants, en combinant de façon intégrée modélisation, simulation numérique, méthodologies associées à l'intelligence artificielle (IA), technologies de synthèse/cribleage et caractérisation à haut débit. Lancé en juin 2022, il est doté d'un budget de près de 85 M€ sur 8 ans, notamment pour mettre en place quatre plateformes pérennes sur lesquelles reposent d'abord des projets «démonstrateurs», qui permettront la découverte de matériaux clés pour les grandes transitions avec des approches novatrices. L'objectif est d'identifier de nouveaux matériaux en réponse à des spécifications

données, avec une rapidité inaccessible à la démarche purement expérimentale, où la percée est souvent aléatoire. **FS**



devront faire une place de plus en plus importante à cette question qui s'entend, bien entendu, en matière de consommation énergétique des composants mais aussi d'énergie et d'eau pour les fabriquer, de matériaux critiques...

De manière plus générale, la recherche ne pourra pas rester en marge de cette émergence du « durable » dans des champs thématiques de plus en plus nombreux et vastes, en considérant que cette exigence ne s'applique qu'à la société et aux industriels en charge de fabriquer des produits et qu'elle n'est que source de nouveaux sujets de R&D (recyclage, études de durée de vie, nouvelles solutions technologiques...) ou d'innovation. Les questionnements récents sur la consommation énergétique des grandes infrastructures ont illustré que le domaine de la recherche ne peut se considérer comme exempté des questions sociétales d'approvisionnement énergétique. Si cette attente sociétale forte autour du durable était négligée, son attractivité et sa légitimité en seraient affectées. Il s'agira donc dans les années à venir, à tous les niveaux, du chercheur au responsable programme, de considérer l'impact de son travail et de son projet, non pas seulement en matière de progrès des connaissances ou des technologies mais aussi des conséquences sur la planète. Des piliers de l'économie circulaire comme l'écoconception, la consommation responsable ou l'économie de la fonctionnalité dans toutes leurs dimensions transdisciplinaires devront donc être intégrés dans les réflexions les plus amonts et les constructions plu-



riannuelles des trajectoires programmatiques. Cela conduira à une révolution culturelle profonde : la seule recherche des meilleures performances instantanées, qui est un des moteurs majeurs de la science et la R&D effectuée au CEA, devra intégrer encore davantage la dimension temporelle, du juste besoin et de l'analyse globale de l'impact environnemental, en tenant compte des externalités. Se saisir de cette question rapidement permettra également au CEA d'adapter sa stratégie et son fonctionnement aux normes et réglementations qui ne manqueront pas d'émerger. Le premier chantier sera probablement autour des critères environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG) qui permettent d'évaluer le caractère durable d'un investissement. ●

GLOSSAIRE

PEPR

Acronyme de Programme et équipement prioritaire de recherche.

D3E

Déchets d'équipements électriques et électroniques.

Objectif recyclage

Le recyclage des matériaux manufacturés et la réincorporation des matières premières sont au cœur des démarches éco-responsables pour économiser les ressources stratégiques et réduire leur contamination par les déchets tout en assurant l'accès aux ressources critiques. Dans ce cadre, le **PEPR «Recyclabilité, Recyclage et Réincorporation des Matériaux»**, doté de 40 M€, se concentre sur cinq familles de matériaux : les plastiques et élastomères, les métaux stratégiques, les matériaux composites, les papiers/cartons et les textiles, pour lesquels les enjeux spécifiques et communs aux différents secteurs seront définis. En plus de cette approche verticale par classe de matériaux, le PEPR déploie une approche systémique et transversale sur le recyclage d'objets technologiques complexes [**D3E**, composants énergies nouvelles]

Son objectif : améliorer la conception du recyclage, la collecte, le tri et le démantèlement des objets et le traitement des matériaux, et diversifier les débouchés des matériaux recyclés. Ses travaux visent aussi à objectiver les impacts sociaux, économiques et environnementaux du recyclage pour la prise de décision politique et industrielle. **EB, FS**

**Vous venez de feuilleter
ou de lire le tout dernier
numéro de Clefs CEA.**

*L'aventure s'arrête, une autre
commence... Rendez-vous
au printemps 2023 pour
découvrir la nouvelle revue
du CEA !*



#75
FÉVRIER 2023

clefs

LES VOIX
DE LA RECHERCHE



Suivez #CEA_Officiel



À l'exclusion des illustrations, la reproduction totale ou partielle des informations contenues dans ce numéro est libre de tous droits, sous réserve de l'accord de la rédaction et de la mention d'origine.

Cet exemplaire ne peut être vendu.



© 2023 CEA

RCS Paris B 775 685 019

Siège social: Bâtiment Le Ponant D,
25 rue Leblanc, 75015 Paris

Clefs CEA n° 75 - Février 2023

Revue éditée par le CEA

Direction de la communication
Bâtiment Siège
91191 Gif-sur-Yvette Cedex - FR

Directeur de la publication

Marie-Ange Folacci

Rédacteur en chef

Laetitia Baudin

Comité éditorial

Renaud Blaise, Etienne Klein,
Boris Le Ngoc, Eric Proust, Yves Samson,
Gérard Sanchez, Olivier Vacus

Iconographie

Adobe Stock, Getty Images

Illustration de couverture

CEA / Marion Hartmann

ISSN 0298-6248

Dépôt légal à parution

Réalisation

Agence Efil
www.efil.fr

Impression

Fabrègue



Pour en savoir plus ou
retrouver tous
les dossiers thématiques

www.cea.fr

cea