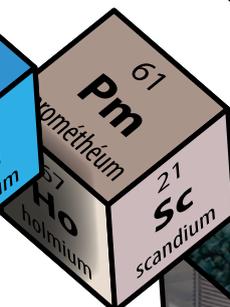
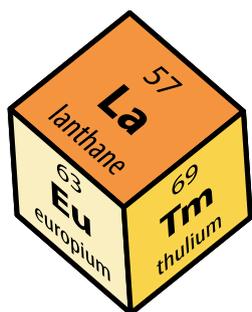


Fondation de la Maison de la Chimie

Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique 75007 Paris



Mercredi 9
novembre 2022

Chimie et Matériaux Stratégiques

RECUEIL DES RÉSUMÉS

[https://actions.maisondelachimie.com/colloque/
chimie-et-materiaux-strategiques](https://actions.maisondelachimie.com/colloque/chimie-et-materiaux-strategiques)



Chimie et Matériaux Stratégiques

Conception graphique: C&D Media | Images: Adobe Stock | © H&C | © B&I | © Blöwerk | © BluePlanet Studio | © deoxyribonucleic | R476722

RÉSUMÉS DE LA TABLE RONDE ET DES CONFÉRENCES

TABLE RONDE : Les défis industriels

Débats animés par **Danièle QUANTIN**, avec la participation de :
(par ordre alphabétique des auteurs)

Gildas BUREAU

Matériaux critiques et axes stratégiques pour l'industrie automobile.

Pages

03

Denis BORTZMEYER, Patrick MAESTRO

Polymères stratégiques sensibles pour l'industrie : bioresources, recyclage, quelles stratégies ?

04

Gilles DRETSCH

Enjeux environnementaux pour l'opérateurs Orange. Focus sur l'économie circulaire et les ressources rares.

05

Frédéric PETIT

Les enjeux matériaux pour la fabrication et le recyclage des éoliennes.

06

CONFÉRENCES :

(par ordre alphabétique des auteurs)

Luc AVÉROUS

Le défi des matériaux polymères biosourcés.

Pages

07

Jean-Claude BERNIER

Chimie métallurgique et métaux rares.

09

Étienne BOUYER

*Cycle des matériaux stratégiques, de l'éco-conception au recyclage:
illustration par les nouvelles technologies de l'énergie.*

10

Patrick D'HUGUES

La transition énergétique, un accélérateur de notre dépendance aux métaux stratégiques.

11

Jean-François GALLAUD

Les matériaux stratégiques, qu'est-ce que c'est ?

12

Alexandre NOMINÉ

Quels matériaux pour les transitions énergétiques et digitales ?

13

Christophe POINSSOT

L'énergie nucléaire, un atout majeur pour limiter l'appel aux ressources minérales stratégiques.

14

Jacques POIRIER

Les céramiques et les réfractaires indispensables à l'industrie primaire.

15

Philippe VARIN

La stratégie de la France dans la sécurité des approvisionnements en matières premières stratégiques.

17

TABLE RONDE animée par **Danièle QUANTIN**

Les défis industriels

(par ordre alphabétique des auteurs)



Matériaux critiques et axes stratégiques pour l'industrie automobile.

Gildas BUREAU

Conseil de la recherche automobile - Pilote du groupe de travail de la filière automobile et mobilité, sur les matériaux stratégiques - PFA

La filière automobile et mobilité forte de 400.000 emplois, investit plus de 6 milliards d'euros en recherche et développement, fait partie des industries stratégiques nationales et européennes.

Cette dynamique d'innovation s'attache à relever les nombreux défis en cours : une mobilité accessible à tous, une transition énergétique dirigée vers la mobilité électrique responsable, avec une compétitivité technico-économique à maintenir, au sein de tous les professionnels de la filière.

Ces défis nécessitent la mise en place de nouveaux modes de conception, de nouvelles technologies, des process de fabrication et de commercialisation différenciant et performants.

Le secteur automobile vit une transition profonde et a vu sa relation aux besoins de mobilité, aux usages et aux déplacements urbains fortement évoluer.

À l'heure de la transition énergétique, des véhicules à faible empreinte environnementale, connectés et de plus en plus autonomes, cette industrie développe de nombreux équipements technologiques de plus en plus complexes, qu'elle a su rendre fiables et abordables.

Les performances techniques, durables et de sécurité sont le fruit d'évolution et de ruptures technologiques qui ont été rendues possibles grâce à l'utilisation industrielle de matières premières présentant des propriétés exceptionnelles qu'elles soient, électronique, électrique, optique, ...

Si nous remontons la chaîne logistique de ces composants automobiles, se retrouvent des matériaux et des matières premières critiques qui pour certains présentent des critères stratégiques. Ces matières premières sont au cœur d'écosystèmes complexes, internationaux et interdépendants à forts enjeux.

Dans ce contexte, différents leviers sont possibles pour établir des stratégies pour la gestion de ces matières premières stratégiques, dans un contexte de fortes dépendances.

Mots Clés : Filière automobile, Matériaux, Criticité, Stratégie, Souveraineté.

Polymères stratégiques sensibles pour l'industrie : bioressources, recyclage, quelles stratégies ?

Denis BORTZMEYER^a, Patrick MAESTRO^b

^a Directeur Scientifique, ARKEMA

^b Directeur Scientifique, SOLVAY

Le monde des polymères est très vaste, depuis les polymères solubles utilisés dans les cosmétiques aux polymères et composites de très haute performance pour l'automobile, l'aéronautique, ou l'électronique, en passant par les polymères de commodité communément désignés sous le terme de plastiques. Le terme de plastique souffre désormais d'une connotation péjorative, en raison d'un amalgame entre le produit lui-même, son utilisation, et la gestion de sa fin de vie qui peut donner lieu à un impact environnemental négatif.

Pourtant les polymères sont indispensables à notre vie quotidienne grâce aux performances qu'ils offrent et à la diversité de leurs fonctions - mécanique, électromagnétique, conductivité ionique, thermique, inertie chimique, biocompatibilité, ... On les trouve aussi bien dans la protection des aliments que dans la santé, la cosmétique, les énergies renouvelables ou le traitement de l'eau. Il faut donc concilier cette nécessité (utiliser des polymères pour améliorer la vie humaine) avec une autre nécessité, celle de préserver l'environnement.

Lors de cette présentation, nous aborderons en premier lieu le monde des polymères et des composites, leurs fonctions et les domaines d'applications. Nous aborderons ensuite leur futur, avec la recherche continue de performances améliorées, par la synthèse et la formulation. En particulier, nous discuterons du point crucial de l'impact environnemental : nous ouvrirons la discussion sur les accès aux matières premières biosourcées fiables et durables, les procédés de transformation et leur bilan environnemental, enfin le recyclage et l'économie circulaire.

Nous montrerons ainsi que la mise en œuvre des technologies appropriées permet de concevoir un avenir qui concilie les bénéfices sociétaux des polymères, avec un impact environnemental maîtrisé.

Mots Clés : Polymères, Applications, Matières premières biosourcées, Recyclage, Environnement.

Enjeux environnementaux pour l'opérateurs Orange. Focus sur l'économie circulaire et les ressources rares.

Gilles DRETSCH

Responsable projets environnementaux, Direction de l'Innovation d'Orange

L'objet de cette présentation est de présenter les enjeux environnementaux pour Orange, notamment dans les domaines suivants :

- LA REDUCTION DES ÉMISSIONS CARBONE
- UN RECOURS ACCRU AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES
- AMPLIFICATION DU PROGRAMME D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

En ce qui concerne l'économie circulaire, les aspects suivants seront abordés :

- La démarche d'éco-conception de nos produits et services
- L'application de standards internationaux / scoring de circularité
- La prise en compte des aspects liés aux ressources rares notamment dans le cadre de la démarche ACV (Analyse de Cycle de Vie) quels sont les enjeux ? L'importance des ressources rares pour le domaine des télécommunications sera plus particulièrement évoquée.
- La capacité du secteur des télécoms à améliorer la performance environnementale de ses parties prenantes, notamment ses clients.

Les enjeux matériaux pour la fabrication et le recyclage des éoliennes.

Frédéric PETIT

Directeur Business Development, Siemens Gamesa Renewable Energy SAS

1. Rappel sur les besoins urgents de nouveaux moyens de production électrique décarbonés pour relever non seulement le défi du dérèglement climatique maintenant de plus en plus visible mais également faire face à la croissance de la consommation d'électricité dans les années à venir tout en relevant en parallèle les défis de la nécessaire efficacité et sobriété énergétique.
2. Rappel des avantages principaux de solution éolienne pour la société civile : décarbonée, moyen massif de production électrique permettant de répondre aux enjeux de sécurité énergétique, très compétitif en cette période de défense du pouvoir d'achat, simple à démanteler, recyclable, créatrice de valeur dans les territoires, retombées industrielles (750 emplois directs et indirects générés par l'usine Siemens Gamesa au Havre).
3. Stratégie : Siemens Gamesa place la décarbonisation, la recyclabilité et l'éducation technologique au cœur d'une stratégie ambitieuse en matière de développement durable.
4. Information sur les différents matériaux utilisés pour une éolienne (exemple 8 MW).
5. Recyclage des éoliennes (taux de recyclabilité, solution pale recyclable disponible depuis 2021, objectif éolienne 100% en 2040).
6. Approvisionnement en aimants permanents : l'énergie éolienne est un des consommateurs de terres rares, stratégie d'approvisionnement basée sur plusieurs partenaires, réduction de l'utilisation des terres rares lourdes, recyclage d'aimants permanents déjà réalisé.
7. Croissance attendue du marché éolien (focus Europe, France) : le pacte éolien en mer prévoit le déploiement par le gouvernement d'une planification spatiale et l'attribution de 2 GW/an à partir de 2025. En contrepartie, la filière s'engage à localiser 50% des coûts d'un projet en France et à investir 40 milliards d'euros d'ici à 2035.

Sources :

[Siemens Gamesa puts decarbonization, recyclability and technological education at heart of ambitious new sustainability strategy](#)

[Committed to environmental and climate protection | SIEMENS GAMESA](#)

[siemens-gamesa-environmental-product-declaration-epd-sg-8-0-167.pdf \(siemensgamesa.com\)](#)

[siemens-gamesa-produces-first-recyclable-blade-en.pdf \(siemensgamesa.com\)](#)

[Siemens-Energy-CMD-Presentation-SGRE \(siemensgamesa.com\)](#)

Mots Clés : Siemens Gamesa, Matériaux, Pales recyclables, Aimants permanents.

CONFÉRENCES PLENIÈRES ET SESSIONS PARALLÈLES

(par ordre alphabétique des auteurs)



Le défi des matériaux polymères biosourcés

Luc AVÉROUS

BioTeam/ICPEES-ECPM, UMR CNRS 7515, Université de Strasbourg

Depuis une à deux décades, l'utilisation de matières premières renouvelables à base de carbone est de plus en plus prise en considération car elles apportent une empreinte carbone réduite avec une analyse du cycle de vie (ACV) améliorée, en accord avec un développement durable. De plus, par rapport aux matériaux conventionnels d'origine fossile, des architectures innovantes avec des propriétés améliorées ou supplémentaires peuvent être obtenues.

Cette approche est globalement développée en science et ingénierie des polymères [1,2] avec notamment le développement régulier de nouveaux polymères biosourcés. Cette approche s'inscrit dans une bioéconomie de plus en plus circulaire (bioéconomie circulaire), qui prend de plus en plus en compte la fin de vie de ces matériaux.

Dans cette présentation, au-delà de la présentation des indispensables définitions de base, nous allons essayer de rapporter 25 ans de recherches actives sur la (bio)synthèse et la caractérisation de différents polymères innovants et biosourcés avec des architectures macromoléculaires contrôlées pour différents domaines applicatifs.

Ces matériaux polymères sont synthétisés à partir de différents composants biosourcés issus de la biomasse tels que (i) des structures aliphatiques à partir de polymères bactériens, ou de glycérides modifiés (à partir d'huile végétales ou de microalgues) [3], ou de molécules issues de (poly)sucre (polysaccharides,...) et (ii) des structures aromatiques à partir de composés issues de ressources ligno-cellulosiques du type bois et paille tels que les lignines, les tannins et les furanes.

Dans notre laboratoire au sein de l'Ecole de Chimie de Strasbourg (ECPM-Université de Strasbourg) dans une unité mixte de recherche (UMR CNRS ICPEES) et d'un laboratoire commun de recherche (LCR Mutaxio), une large gamme de matériaux renouvelables aux propriétés intéressantes et aux applications durables est développée à partir de ces différentes architectures, pour un avenir plus vert et durable. Ces développements sont le fruit de différentes collaborations académiques et industrielles internationales.

La fin de vie de ces matériaux est également prise en compte dès leur conception [4-6], par exemple au travers du bio-recyclage dans une approche Chem-Biotech [6], avec une approche de recyclage par voie enzymatique (Biotech) qui va permettre d'obtenir des molécules (synthons) lesquelles vont être utilisées pour synthétiser une nouvelle génération de polymères pour une circularité.

Références :

1. S. Kalia & L. Avérous. « Biodegradable and bio-based polymers for Biomedical and Environmental Applications ». Wiley & Scrivener Publishing. Publication Mars 2016, 350 p.
2. Avérous L., Caillol S., (2021) « Les polymères biosourcés, vecteurs d'innovations et acteurs d'un développement durable » L'Actualité Chimique, Vol. 456-458, pp. 95-100.
3. Tremblay-Parrado K-K., Garcia-Astrain C., Avérous L. (2021). « Click chemistry for the synthesis of biobased polymers and networks derived from vegetable oils. » Green Chem. Vol. 23, pp. 4296 - 4327
4. Lucherelli M.A., Duval A., Avérous L. (2022) « Biobased vitrimers: towards sustainable and adaptable performing polymer materials » Progress in Polymer Science, Vol. 127, ID N°101515
5. Ballerstedt H. et al. (2021) « MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities» Environmental Sciences Europe. Vol. 33, ID N°99.
6. Magnin A., Entzmann L., Bazin A., Pollet E., Avérous L. (2021) « Green recycling process for polyurethane foams by a chem-biotech approach » ChemSusChem. Vol. 14, Issue 19, pp. 4234-4241.

Mots Clés : Bioéconomie circulaire, Polymère biosourcé, Polymère biodégradable, Polymère renouvelable.

Chimie métallurgique et métaux rares.

Jean-Claude BERNIER

Université de Strasbourg

Après une brève revue du tableau périodique et des métaux les plus critiques, on montrera que la criticité n'est pas toujours en relation avec l'abondance dans la couche terrestre mais que des considérations de teneur des minerais, de tension économique et de géopolitique peuvent intervenir. On montrera ensuite comment la transition écologique et le tout numérique ont un rôle important sur la demande d'un certain nombre de métaux : Al, Cu, Ni, W, Li, Ag, Nd, Dy ; etc...

Plusieurs exemples seront donnés notamment sur les métaux nécessaires dans les équipements des énergies renouvelables et les prévisions de consommations pour la fabrication des éoliennes et des panneaux photovoltaïques dans l'objectif du zéro carbone. Seront ensuite examinés les contraintes sur les métaux impliqués dans les transports propres les nouveaux véhicules électriques et à hydrogène.

On verra ensuite comment la chimie métallurgique de plusieurs de ces éléments tels que Al, Cu, Li et les Terres Rares peuvent répondre au mieux aux besoins de l'industrie et du marché tout en respectant les contraintes environnementales.

Quelques données sur les méthodes de recyclage à partir des stocks possibles seront examinées à la lumière de la comparaison avec l'extraction des ressources minières prenant en compte les limites de concentrations, l'énergie nécessaire et le coût des procédés.

Enfin on verra, en suivant la chaîne de valeurs, où se situent les déficits stratégiques de la France et de l'Europe.

Mots Clés : Métallurgie, Criticité des métaux, Transition écologique, Ressources, Recyclage.

Cycle des matériaux stratégiques, de l'éco-conception au recyclage : illustration par les nouvelles technologies de l'énergie.

Étienne BOUYER

CEA - DFP/DPg Direction Déléguée aux Programmes

La plupart des technologies déployées pour avancer dans la transition énergétique sont matérialisées par des composants, des systèmes constitués d'un mélange de divers matériaux. Parmi eux, certains sont stratégiques (MS) et peuvent subir un risque d'approvisionnement pour plusieurs raisons possibles (la disponibilité géologique, le risque politique, la concentration de la production, le potentiel de recyclage,...).

Le développement des nouvelles technologies de l'énergie devrait intégrer l'accessibilité des matériaux dont elles ont besoin, pas seulement les MS. En d'autres termes, une approche de conception bien adaptée s'avère nécessaire pour surmonter ce problème d'approvisionnement durable. De manière plus générale, lors de l'étape de développement du matériau, le mot d'ordre suivant : « Un bon (et abondant) matériau, au bon endroit et en juste quantité » doit être respecté.

La présentation visera à démontrer qu'une approche systémique est nécessaire surtout lorsque l'on considère que la transition énergétique va de pair avec l'économie circulaire.

Aussi, cette présentation vise à montrer -sur la base d'exemples concrets- comment la Recherche, le Développement & l'Innovation peuvent apporter des solutions pour rendre possible et réelle cette transition énergétique de manière durable. Des aspects tels que la conception des matériaux (en minimisant le contenu en MS), la sélection des procédés pour synthétiser puis mettre en forme les matériaux de manière efficace, la réparation/re-fabrication et la possible seconde vie, avant le traitement en fin de vie pour récupérer les matériaux les plus valorisables seront abordés.

Des illustrations basées sur des exemples de production, de conversion, de stockage et de transport d'énergie seront discutées avec un accent particulier porté sur les applications liées à la mobilité.

Mots Clés : Énergie, Matériaux, Procédés, Substitution, Recyclage.

La transition énergétique, un accélérateur de notre dépendance aux métaux stratégiques.

Patrick D'HUGUES^{a*}, Christophe POINSSOT^a, Gaétan LEFEBVRE^b,

a Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM, Direction Générale

b Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM, Direction des Géoressources

Pour limiter l'ampleur du changement climatique, il faut mettre en place une révolution énergétique et réduire les gaz à effet de serre (GES) associés aux énergies fossiles. Pour y arriver il va falloir, bien évidemment, réduire les consommations mais également augmenter la part des énergies bas carbone dans le mix énergétique (photovoltaïque, énergie hydraulique, éolien, nucléaire et géothermie) et réduire l'utilisation des énergies fossiles restant majoritaires dans le monde. Or, les énergies renouvelables (ENR) et la mobilité électrique sont très consommatrices de matières premières minérales. À production électrique équivalente, les ENR requièrent plus de béton, plus d'aluminium et plus de cuivre que des centrales thermiques à énergie fossiles. Ainsi, lutter contre le changement climatique va donc requérir des quantités en ressources minérales très importantes et nous faire passer d'une dépendance actuelle aux énergies fossiles à une dépendance future aux métaux. Cette augmentation de la demande pour la transition énergétique est par ailleurs renforcée par une démographie mondiale croissante, une forte urbanisation, et une numérisation de la société.

Si le débat peut exister entre les différents scénarii envisagés par les grands acteurs du secteur, mener la transition énergétique va conduire à accroître considérablement les besoins en ressources minérales pour les prochaines décennies. Par exemple dans le secteur de la mobilité, l'Agence Internationale de l'Énergie estime que les besoins en lithium seront 42 fois plus importants en 2040 qu'aujourd'hui, ceux en cobalt et nickel, autour de 20 fois supérieurs.

L'accessibilité à la ressource minérale est donc redevenue un enjeu majeur pour les pays européens et pour la France car indispensable à son économie et à la mise en place de sa transition énergétique. Les enjeux géopolitiques, sociaux et environnementaux associés à cette accessibilité sont de plus en plus prégnants. L'Europe est dépendante aux importations à plus de 50% pour une vingtaine de substances primaires, ainsi que de l'approvisionnement en produits intermédiaires issue d'une production extérieure à son territoire, ce qui fragilise certaines chaînes de valeurs industrielles très consommatrices. Cette dépendance est non seulement responsable d'un transfert de souveraineté et d'opportunité industrielle, mais elle a également pour conséquence de transférer ailleurs les impacts environnementaux et sociaux associés à nos modes de vie. L'enchaînement de la crise sanitaire et de la crise ukrainienne nous rappelle ces constats de manière accrue et met en évidence notre grande vulnérabilité face aux enjeux d'approvisionnement en métaux nécessaires aux transitions énergétique et numérique.

Des solutions existent et se mettent en place. Au-delà d'une plus grande sobriété, elles combinent une meilleure connaissance du potentiel minier européen, une activité extractive et des approvisionnements plus responsables, une optimisation des flux de matière (en intégrant notamment l'écoconception et la traçabilité des produits) et la mise en place d'une économie circulaire.

Mots Clés : Métaux, Approvisionnements responsables, Dépendance, Économie circulaire, Souveraineté.

Les matériaux stratégiques, qu'est-ce que c'est ?

Jean-François GALLAUD

*Chef du Bureau de la politique des ressources minérales non énergétiques,
Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature,
Ministère de l'Economie, des Finances et de la Relance*

La crise de l'aluminium de 2018, les récentes menaces de la Chine sur les approvisionnements en terres rares, la crise de la Covid 19, les tensions actuelles dues à la guerre en Ukraine et la crise énergétique qui en découle, démontrent la permanence des risques en termes d'approvisionnement de matières premières. Les matières premières prennent alors un caractère stratégique pour l'industrie et à la fabrication de nombreux produits présents dans notre environnement quotidien ; enjeux d'autant plus exacerbés par les besoins liés à la double transition : numérique et écologie à laquelle nous devons faire face.

Ces matières premières sont au cœur d'enjeux économiques et géopolitiques planétaires et les risques affectant ces dernières peuvent découler de diverses défaillances de marché, notamment :

- Des asymétries d'information : un manque d'outils pour identifier les vulnérabilités et en rendre compte aux clients en aval et aux investisseurs, empêchant que ces risques soient intégrés par le marché ;
- Une absence d'intégration au niveau microéconomique de risques géopolitiques : des points de concentration dans les chaînes de valeurs mondiales peuvent répondre à un optimum économique, mais ces dernières peuvent être instrumentalisées à des fins géopolitiques ;
- Une absence de level playing field sur le plan social, démocratique et environnemental, ou des pratiques commerciales déloyales.

Les travaux menés par les comités stratégiques de filières et le Comité pour les métaux stratégiques (COMES) ont permis d'identifier certaines substances critiques nécessaires au développement des nouvelles filières fortement consommatrices de matières premières critiques. Des travaux plus globaux comme ceux du Conseil d'analyse économique proposent des méthodes d'identification des vulnérabilités.

Ces travaux, sans être exhaustifs, notamment en matière de prospective et de dépendances futures, donnent toutefois des pistes pertinentes pour prioriser les actions, accompagner des projets ambitieux, disruptifs et mûres et faciliter l'émergence de nouveaux acteurs nationaux ayant vocation à un positionnement mondial.

Quels matériaux pour les transitions énergétiques et digitales ?

Alexandre NOMINÉ

Maître de Conférence à l'Université de Lorraine

*Enseignant et Directeur de l'Action Internationale de l'École Nationale Supérieure des Mines de Nancy,
Chercheur à l'Institut Jean Lamour*

Dans cette conférence introductive nous aborderons, entre autres, les concepts physiques qui permettent, par exemple, de transformer du vent ou du rayonnement solaire en électricité et ceux qui permettent de stocker cette même électricité. Nous verrons que ces lois physiques font toutes apparaître des constantes liées aux matériaux utilisés. Nous verrons donc par exemple les raisons pour lesquelles nous utilisons souvent le silicium pour fabriquer un panneau solaire et pour quelles raisons nous ne pourrions le faire en cuivre. Ainsi nous introduirons le fait que les transitions énergétiques et digitales en cours vont induire un accroissement significatif de la demande en métaux.

Or l'extraction de ces métaux est tout sauf neutre. Nous verrons donc dans un second temps les étapes principales de l'extraction de ces métaux. Nous aborderons les défis qui se posent à cette industrie (impact environnemental, abondance, risque géopolitique, acceptabilité sociale) et les pistes pour les relever.

Enfin nous présenterons les outils disponibles pour l'aide à la prise de décision dans le domaine des matériaux critiques.

L'énergie nucléaire, un atout majeur pour limiter l'appel aux ressources minérales stratégiques.

Christophe POINSSOT^a, Patrick D'HUGUES^a, Stéphane BOURG^a, Gaétan LEFEBVRE^b,

^a Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM, Direction Générale

^b Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM, Direction des Géoressources

Face au défi de la lutte contre le changement climatique, nos sociétés se sont engagées dans une transition énergétique ambitieuse visant à se départir de notre dépendance aux énergies fossiles au profit des énergies décarbonées, nucléaire et renouvelables, et au travers d'une électrification massive des usages. Cette transition va néanmoins conduire à une augmentation exponentielle des besoins ressources naturelles non énergétiques due à la forte intensité matière et à la faible efficacité énergétique des énergies renouvelables solaires et éoliennes. La disponibilité de certains métaux pourrait même freiner le déploiement de cette transition énergétique.

À l'inverse, l'énergie nucléaire de par ses grandes densité et efficacité énergétiques présente une intensité matière bien plus faible, ce qui lui donne un atout considérable dans le contexte annoncé de guerre des métaux. Pour autant et à l'instar des autres énergies, un certain nombre de métaux rares ou stratégiques reste nécessaire, en particulier du fait des propriétés d'usages très spécifiques des matériaux de structure des centrales.

Outre ces matériaux structurels, l'énergie nucléaire nécessite également un "combustible", même si les quantités mises en jeu restent faibles, en l'occurrence de l'uranium enrichi produit à partir d'uranium naturel après des opérations complexes. La disponibilité de cette ressource est évidemment stratégique dans un contexte où cette énergie se développe rapidement en Asie et où nos approvisionnements proviennent pour partie de pays dont la stabilité géopolitique n'est pas acquise sur le long-terme. Le recyclage des combustibles nucléaires usés déployé aujourd'hui dans les usines Orano de La Hague permet d'ores et déjà de réduire de 10-20% la demande en uranium naturel. Il pourrait permettre de la réduire encore plus drastiquement en le couplant à des réacteurs à neutrons rapides capables de valoriser efficacement l'uranium-238 par capture neutronique. Dans un tel scénario, la France deviendrait quasiment autonome en uranium grâce à l'utilisation des stocks d'uranium appauvri capables d'alimenter la production électrique nationale pendant plusieurs milliers d'années.

La réaction de fission nucléaire de l'uranium conduit à la formation de multiples éléments (appelés les produits de fission) qui constituent du fait de leur radioactivité, les déchets nucléaires ultimes. Ces derniers sont séparés des matières fertiles et fissiles lors des opérations de recyclage. Or, certains de ces produits de fissions ont des périodes radioactives relativement courtes et sont des métaux stratégiques indispensables aux technologies pour l'énergie ou le numérique (platinoïdes, terres rares...). Ils pourraient donc constituer une nouvelle voie d'approvisionnement pour ces métaux pour lesquels il n'y a pas de production française ou même européenne.

Ainsi, l'énergie nucléaire dispose de solides atouts face aux enjeux de souveraineté énergétique du fait de sa dépendance réduite en métaux stratégiques et de ses besoins limités en uranium naturel. Sur le long terme, elle dispose du potentiel pour réduire voire supprimer le recours à de nouvelles ressources primaires en uranium et pourrait même être en mesure de subvenir à certains besoins en métaux stratégiques.

Mots Clés : Nucléaire, Uranium, Recyclage, Métaux stratégiques, Souveraineté.



Les céramiques et les réfractaires indispensables à l'industrie primaire.

Jacques POIRIER

Professeur Émérite - CEMHTI – CNRS UPR3079, Université d'Orléans

Étymologiquement, « Réfractaire » vient du latin « *Refractarius* » : résister, refuser de se soumettre. Pour un matériau, sa signification est : qui résiste à de hautes températures, à des niveaux supérieurs à 1500°C. L'histoire des céramiques réfractaires est intimement liée à la conquête des hautes températures, depuis que l'homme a acquis la maîtrise du feu. Elle s'enracine dans la nuit des temps. Les matériaux actuels ne seraient sans doute pas ce qu'ils sont sans les expériences de nos ancêtres. Les matières premières, les techniques d'élaboration, les compositions ont évolué au cours du temps. Ceci a pris plus de 12000 ans. Les réfractaires sont des céramiques souvent polyphasées, majoritairement à base de mélange d'oxydes, à haute température de fusion. Ce sont des matériaux stratégiques¹, indispensables à d'importants secteurs économiques clé :

- L'industrie primaire tels que la sidérurgie (qui est le plus gros consommateur de céramiques réfractaires, avec une part de marché mondiale supérieure à 60%), la métallurgie des non-ferreux, la cimenterie, l'industrie du verre, de la céramique qui visent en permanence une amélioration de leurs procédés d'élaboration et de leurs rendements énergétiques ;
- L'énergie : qu'il s'agisse de la pétrochimie ou des applications énergétiques émergentes telles que la production de biocarburants, de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse, les piles à combustibles (SOFC), les réacteurs nucléaires et le réacteur de fusion nucléaire ITER, qui nécessitent de nouveaux matériaux céramiques ;
- L'environnement en particulier les fours de traitement et de valorisation des déchets ;
- L'aéronautique, l'aérospatiale et l'armement où les barrières thermiques en céramiques sont utilisées dans les moteurs de propulsion et les revêtements extérieurs des engins spatiaux.

Sans ces matériaux de grande diffusion, notre vie quotidienne serait sans aucun doute beaucoup moins agréable. En effet, nous ne disposerions pas d'acier, de fonte, d'alliages métalliques, de verre, de ciment, etc...

En dehors de l'infusibilité de ces matériaux, les réfractaires doivent posséder un nombre important de propriétés pour résister aux sollicitations qu'elles subissent en utilisation². Dans la mesure où leur comportement est principalement gouverné par des phénomènes de corrosion³, la composition chimique, la minéralogie, la microstructure et la porosité sont des caractéristiques essentielles.

La connaissance des propriétés thermomécaniques des matériaux et des sollicitations des revêtements (choc thermique, érosion, ...) sont également à considérer.

Appréier les propriétés d'usage d'un réfractaire dans un contexte industriel nécessite alors une approche scientifique pluridisciplinaire faisant appel à des connaissances fondamentales en génie des matériaux et des procédés, en thermique, en thermomécanique et en physico-chimie des hautes températures. Le développement de céramiques réfractaires plus performantes et plus durables (telles que des matériaux auto cicatrisants, adaptatifs, non mouillant par les oxydes laitiers, résistants à H₂) afin de faire face à des environnements plus sévères (températures plus élevées, environnement « chimique » plus agressif, chocs thermiques d'amplitudes extrêmes) permettront de répondre aux défis environnementaux et économiques futurs (réduction des émissions de CO₂, production d'acier par H₂, valorisation des déchets, réduction de la consommation d'énergie).

Références :

1. G. Fantozzi, J.C Niepce, G. Bonnefont, *Céramiques Industrielle*, 512 pages, Dunod, 2013
2. J. Poirier, *Céramiques Réfractaires, Techniques de l'ingénieur*, 21 pages, 2014
3. J. Poirier, M. Rigaud, *Corrosion of Refractories, FIRE Compendium Series, Volumes 2 A-B-C*, 1174 pages, Göller Verlag, 2018

Mots Clés : Industrie primaire, Hautes températures, Céramiques, Conditions extrêmes, Défis environnementaux.

La stratégie de la France dans la sécurité des approvisionnements en matières premières stratégiques.

Philippe VARIN

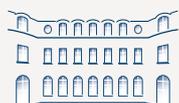
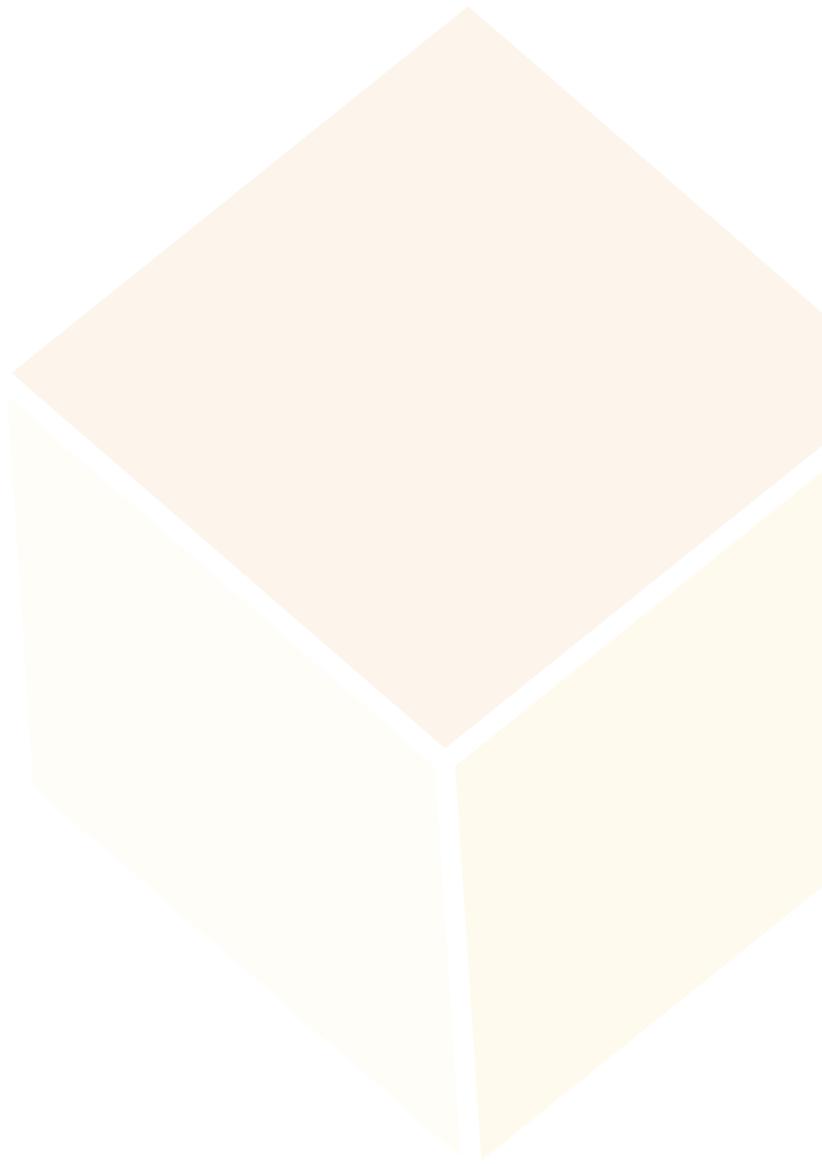
Président du World Materials Forum

Après 25 ans dans l'aluminium chez Pechiney, six ans dans l'acier comme CEO de Corus, six ans dans l'automobile chez PSA, six ans dans le nucléaire ensuite, Philippe Varin fut Président de Suez de 2020 à 2022.

Également Président de France Industrie jusqu'en 2020, et Président du World Materials Forum depuis 1995, il a été missionné par les ministères de la Transition Écologique et de l'Industrie afin de rédiger un rapport sur la sécurisation de l'approvisionnement de l'industrie française en matières premières minérales pour la transition énergétique. Remis en janvier 2022, ce rapport contient des recommandations au niveau français et au niveau européen.

Ayant l'avantage de connaître à la fois les métiers de l'extraction minière et de la transformation ainsi que les métiers de l'utilisation des métaux dans l'industrie, en particulier dans l'automobile et l'énergie, il passera en revue les défis que pose le contexte géopolitique de la transition énergétique, et ses recommandations.

Son intervention en session de clôture du colloque Chimie et Matériaux Stratégiques sera dans l'esprit des thématiques abordées dans ce rapport.



Fondation de la Maison de la Chimie

Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique 75007 Paris