



Chimie et matériaux stratégiques

Luc Averous
Jean-Claude Bernier
Denis Bortzmeyer
Etienne Bouyer
Gildas Bureau
Patrick d'Hugues
Gilles Dretsch
Jean-François Gaillaud
Patrick Maestro
Alexandre Nominé
Frédéric Petit
Christophe Poinssot
Jacques Poirier
Philippe Varin



*Coordonné par
Danièle Olivier
et Paul Rigny*



Chimie et matériaux stratégiques

La civilisation est née avec les matériaux ; elle risque maintenant de mourir si l'humanité ne sait plus les gérer. En effet, leurs usages ont complètement changé depuis les dernières décennies. Citons les deux raisons majeures :

1 - **Matériaux et rareté des matières premières**, cela va ensemble, l'usage des métaux le montre depuis la préhistoire, la gestion des forêts aussi, origine de l'effondrement de grandes aventures humaines ! Et cette rareté nous guette car de mille côtés, les besoins de nouvelles technologies se développent pour la transition énergétique, pour le numérique... Rareté, cela signifie disparition possible et donc « catastrophes », d'où l'emploi du qualificatif « stratégique » pour ce colloque.

2 - Le **réchauffement climatique**, dont plus personne ne doute, impose des contraintes exceptionnelles sur les besoins en matériaux. Les énergies solaire ou éolienne, par exemple, réclament des métaux « rares » dont la pérennité n'est pas assurée. L'impératif de lutter contre l'émission du CO₂ accroît considérablement les besoins de nouveaux matériaux (biosourcés par exemple), car les procédés de fabrication doivent être revus en profondeur et faire exploser les besoins en matériaux. Le **recyclage** doit être mis au point pour rendre tout cela compatible.

Des spécialistes des diverses disciplines appelés à la manœuvre (minéralistes, polyméristes, biologistes, ingénieurs) se mobilisent dans cet ouvrage pour analyser cette complexité, qui est l'enjeu vital de notre époque. Ils mettent à la portée des étudiants et des chercheurs les points prioritaires de la recherche en **chimie pour « matériaux stratégiques »** devenue aujourd'hui vitale.

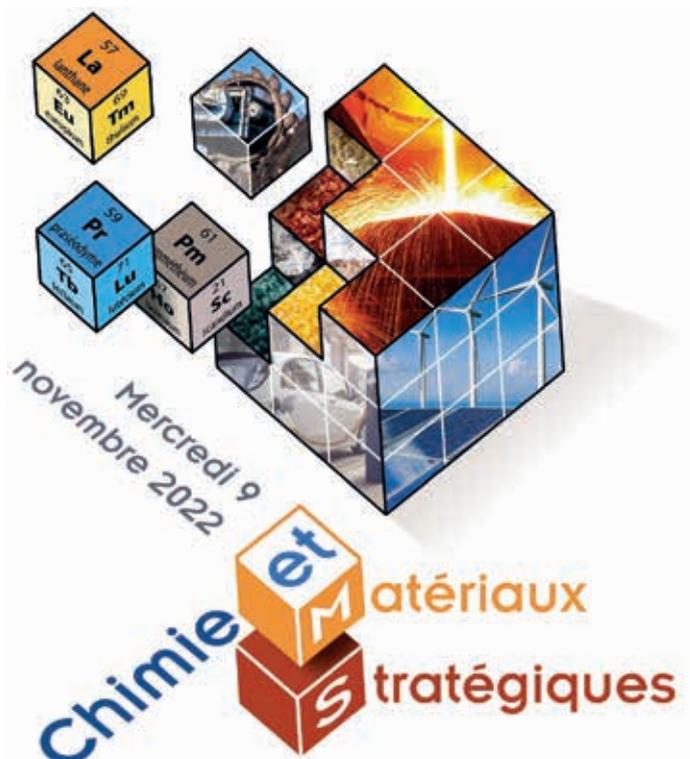


ISBN : 978-2-7598-3487-7

edp sciences

www.edpsciences.org

Chimie et matériaux stratégiques



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et matériaux stratégiques », qui s'est déroulé le 9 novembre 2022 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Philippe Gœbel

Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Chimie et matériaux stratégiques

Luc Averous, Jean-Claude Bernier, Denis Bortzmeyer, Étienne Bouyer,
Gildas Bureau, Patrick d'Hugues, Gilles Dretsch, Jean-François Gaillaud,
Patrick Maestro, Alexandre Nominé, Frédéric Petit, Christophe Poinssot,
Jacques Poirier, Philippe Varin

Coordonné par Danièle Olivier et Paul Rigny

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari

Crédits couverture :
Images : Adobe Stock – © H&C – © RHJ – © Bildwerk –
© Blue Planet Studio – © zhengzaishanchu

Mise en pages et couverture : Patrick Leleux PAO (Caen)
Conception graphique, visuel du colloque : CB Defretin

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3487-7
ISBN (ebook) : 978-2-7598-3486-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© Fondation de la Maison de la Chimie

Fondation de la Maison de la Chimie
28, rue Saint-Dominique
75007 Paris, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Luc Averous

*Professeur des universités,
ICPEES-ECPM, Université de
Strasbourg*

Jean-Claude Bernier

*Professeur émérite de
l'Université de Strasbourg*

Denis Bortzmeyer

Directeur scientifique, Arkema

Étienne Bouyer

*Directeur du programme
exploratoire, Direction des
Programmes, CEA*

Gildas Bureau

*Coordinateur Filière
Automobile et Mobilité sur les
matériaux critiques, Stellantis*

Patrick d'Hugues

*Directeur du programme
scientifique « Ressources
minérales et économie
circulaire », BRGM*

Gilles Dretsch

*Responsable de Projets
innovants, Direction de
l'Innovation d'Orange*

Jean-François Gaillaud

*Chef du Bureau de la politique
des ressources minérales
non énergétiques, Direction
générale de l'Aménagement,
du Logement et de la Nature,
ministère de la Transition
énergétique*

Patrick Maestro

*Directeur scientifique, groupe
Solvay*

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*

Frédéric Petit

*Directeur Business
Development, Siemens
Gamesa Renewable Energy
SAS*

Christophe Poinssot,

*Directeur général délégué et
directeur scientifique, BRGM*

Jacques Poirier

*Professeur émérite, Conditions
Extrêmes et Matériaux : Haute
Température et Irradiation
(CEMHTI – CNRS UPR3079),
Université d'Orléans*

Philippe Varin

*Président du World Materials
Forum*

Équipe éditoriale :

*Danièle Olivier
et Paul Rigny*

Sommaire

Avant-propos, par Paul RIGNY	9
Préface, par Danièle OLIVIER	11

Partie 1 : Matières premières et matériaux stratégiques

Chapitre 1 : La stratégie de la France dans la sécurité des approvisionnements en matières premières stratégiques par Philippe VARIN	19
---	----

Chapitre 2 : Comment dépnir le périmètre des matériaux stratégiques ? par Jean-François GAILLAUD	29
---	----

Chapitre 3 : Quels matériaux pour les transitions énergétiques et digitales ? par Alexandre NOMINÉ	43
---	----

Partie 2 : Les défis industriels

Chapitre 4 : Importance des métaux et matériaux pour le secteur des TIC par Gilles DRETSCH	59
---	----

Chapitre 5 : Matériaux critiques et axes stratégiques pour l'industrie automobile par Gildas BUREAU	75
--	----

Chapitre 6 : Les enjeux matériaux pour la fabrication et le recyclage des éoliennes par Frédéric PETIT	95
---	----

Chapitre 7 : Polymères stratégiques sensibles pour l'industrie : bioressources, recyclage, quelles stratégies ? par Patrick MAESTRO, Denis BORTZMEYER	107
--	-----

Partie 3 : Ressources et matériaux pour la transition énergétique

Chapitre 8 : Transition énergétique, un accélérateur de notre dépendance aux métaux stratégiques
par **Patrick D'HUGUES, Christophe POINSSOT** ... 123

Chapitre 9 : Risques et opportunités pour le nucléaire actuel et futur en termes de ressources minérales stratégiques
par **Christophe POINSSOT** 137

Chapitre 10 : Cycle des matériaux stratégiques, de l'éco-conception au recyclage appliqué aux nouvelles technologies de l'énergie
par **Étienne BOUYER** 157

Partie 4 : Pénurie des matériaux Solutions apportées par la chimie

Chapitre 11 : Chimie métallurgique et métaux rares
par **Jean-Claude BERNIER** 185

Chapitre 12 : Les céramiques et les réfractaires indispensables à l'industrie primaire
par **Jacques POIRIER** 207

Chapitre 13 : Le dép des matériaux polymères biosourcés
par **Luc AVEROUS** 239

Avant- propos

Les livres « Chimie et... » de la Maison de la Chimie : une nouvelle présentation

La Maison de la Chimie a créé en 2007 une collection de livres intitulée « Chimie et... ». Chaque livre représente le thème spécifique d'un colloque d'une série éponyme, qui correspond à chaque fois à une préoccupation techniquement importante de la société pour laquelle la chimie est appelée à trouver ou à perfectionner les solutions. À titre d'exemple, il peut s'agir de l'énergie, des transports, de l'alimentation, etc. La liste complète est rappelée ci-dessous. Ces colloques sont d'importantes manifestations. Ils se tiennent deux fois par an pendant une journée.

Conformément à la mission de la Fondation de la Maison de la Chimie, ces colloques et les livres de la collection sont largement tournés vers l'information de jeunes à la recherche d'une orientation professionnelle et l'actualisation des connaissances des enseignants et d'un large public non expert du domaine concerné. Ils font le pont entre les travaux des laboratoires de recherche publics

ou industriels et les activités industrielles ou économiques. Les conférenciers sont souvent issus du milieu de la recherche industrielle, recherche, programmation ou mise en œuvre, spécialisés dans le domaine abordé et s'adressent prioritairement au monde éducatif, les professeurs, les étudiants en licence ou master, ainsi qu'à toute personne intéressée à connaître les bases scientifiques des questions techniques d'actualité.

Chaque colloque réunit une assistance importante, de sept cents à mille personnes, qui traduit bien l'importance de la demande d'information scientifique objective de nos concitoyens. Ceci n'est pas surprenant, car les nouvelles applications de la recherche entourent notre vie quotidienne et sollicitent en permanence notre curiosité ou notre besoin de compréhension. La considérable somme de connaissances présentées dans les colloques doit absolument servir ces demandes des ingénieurs, des enseignants ou du public curieux. C'est pourquoi après chaque colloque, les conférences présentées sont publiées dans un ouvrage spécialisé.

Pour accroître la diffusion de ces connaissances, nous avons décidé, plutôt que par voie de livre-papier comme nous le faisons depuis le début, de les diffuser systématiquement sur Internet et d'utiliser pour cela le site :

<https://www.mediachimie.org/content/colloques-chimie-et>.

Le colloque « **Chimie et matériaux stratégiques** » de février 2023 inaugure cette nouvelle pratique : les contenus font bien l'objet d'une rédaction de « livre » mais paraissent exclusivement sur le site Internet <https://www.mediachimie.org/>. Comme d'autres, et peut-être encore davantage, le thème se place au cœur des préoccupations actuelles : l'attention portée à la « durabilité » incite à changer les usages, à mettre en relief les objectifs de préservation des ressources de la nature, la faisabilité des transitions énergétiques et numériques, par exemple. On y verra abordé entre autres la question de l'utilisation économe des ressources minérales, celle des risques d'épuisement des mines de certains matériaux, notamment métalliques, qui guident la recherche vers de nouveaux objectifs et appellent de nouvelles solutions et de nouveaux comportements.

La présence des livres « Chimie et... » sur le site www.mediachimie.org lui donnera une valeur ajoutée qui sera certainement appréciée. Leurs chapitres nourriront aussi des développements spécifiques des autres contributions du site. Et les progrès scientifiques et techniques étant ce qu'ils sont, c'est-à-dire affectés d'un développement étourdissant, les lecteurs, jeunes et

moins jeunes, seront invités à l'utiliser et éventuellement à enrichir leur contenu par des propositions variées.

Liste des ouvrages de la collection « Chimie et... »

Publiés sous forme de livres papier (éd. EDP Sciences)

La Chimie et la mer ; Chimie et santé ; Chimie et art ; Chimie et alimentation ; Chimie et sport ; Chimie et habitat ; Chimie et nature ; Chimie et enjeux énergétiques ; Chimie et transports : vers des transports décarbonés ; Chimie et technologies de l'Information ; Chimie et expertise : sécurité des biens et des personnes ; Chimie et cerveau ; Chimie et expertise – Santé et Environnement ; Chimie et changement climatique ; Chimie dermo-cosmétique et beauté ; La chimie et les grandes villes ; La chimie et les sens ; Chimie, aéronautique et espace ; Chimie et biologie de synthèse ; Chimie, nanomatériaux, nanotechnologies ; Chimie et Alexandrie dans l'Antiquité ; Chimie et nouvelles thérapies ; Chimie et lumière ; Chimie et énergies nouvelles ; Chimie et agriculture durable ; Chimie et Notre-Dame.

Publiés sous forme de livre numérique

(<https://www.mediachimie.org/content/colloques-chimie-et>)

Chimie et matériaux stratégiques (le présent ouvrage).

En cours d'élaboration : Chimie et intelligence artificielle.

Paul Rigny

Conseiller du président
de la Fondation de la Maison
de la Chimie

Préface

Danièle OLIVIER

Les métaux et matériaux stratégiques sont souvent relativement rares ou difficilement accessibles, inégalement répartis sur la planète, mais mondialement indispensables dans des conditions industrielles stratégiques et notamment la décarbonation de l'énergie dans toutes ses applications industrielles et environnementales. Les conflits géopolitiques contemporains ne font qu'amplifier l'importance de ce thème, car ces matériaux, comme nous allons le voir, sont indispensables à la vie d'un État et leur manque entraîne des impacts industriels et économiques négatifs importants.

La première partie de cet ouvrage montre que certaines matières premières sont stratégiques pour l'industrie et la fabrication de nombreux produits présents dans notre environnement quotidien ; ces enjeux sont exacerbés par les besoins liés à la double transition numérique et écologique à laquelle nous devons faire face, et par les risques en termes d'approvisionnement de ces matières premières liés aux tensions actuelles dues à la guerre en Ukraine et à

la crise énergétique qui en découle.

Philippe VARIN, président du World International Forum, a été missionné par les ministères de la Transition écologique et de l'Industrie pour rédiger un rapport remis en janvier 2022 sur la sécurisation de l'approvisionnement de l'industrie française en matières premières minérales pour la transition énergétique. Ce chapitre est une synthèse des recommandations émises dans ce rapport pour la France et l'Europe. Il y passe en revue les défis que pose le contexte géopolitique de la transition énergétique, et en déduit des recommandations pour l'industrie, en particulier celles de l'automobile et de l'énergie.

Jean-François GAILLAUD, chef du Bureau de la politique des ressources minérales non énergétiques à la Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature du ministère de la Transition énergétique, présente ensuite les travaux menés par les comités stratégiques de filières et le Comité pour les métaux stratégiques (le COMES), qui ont permis d'identifier certaines substances critiques nécessaires au développement des

nouvelles filières fortement consommatrices de matières premières critiques. 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 matures, et faciliter l'émergence de nouveaux acteurs nationaux ayant vocation à un positionnement mondial.

Les transitions énergétiques et digitales en cours vont induire un accroissement significatif de la demande en certains métaux.

Alexandre NOMINÉ, chercheur à l'Institut Jean Lamour à l'École des Mines de Nancy, Université de Lorraine, explique les concepts physiques liés à la spécificité des choix des matériaux utilisés. Il présente les défis posés par les principales étapes de l'extraction de ces métaux (impact environnemental, abondance, risque géopolitique, acceptabilité sociale) et les pistes pour les relever. Il rappelle les outils disponibles pour l'aide à la prise de décision dans le domaine de ces matériaux critiques.

Les défis industriels à relever dans quatre grands domaines de notre vie quotidienne sont traités dans la deuxième partie.

Dans le domaine des TIC, **Gilles DRETSCH**, responsable de projets concernant l'efficacité énergétique et l'économie circulaire à la Direction de l'Innovation d'Orange, expose les trois enjeux environnementaux et les moyens mis en œuvre par ce grand opérateur national : la réduction des émissions carbonées, le

recours accru aux énergies renouvelables, l'amplification d'un programme d'économie circulaire.

La filière automobile fait évidemment partie des industries stratégiques nationales et européennes et **Gildas BUREAU**, pilote du groupe de travail sur les matériaux stratégiques pour l'industrie automobile au sein de la plateforme automobile et mobilité de Stellantis, présente la vision du groupe Stellantis sur les matériaux critiques et les axes stratégiques qui résultent du besoin de véhicules connectés et de plus en plus autonomes. Cette industrie développe de nombreux équipements technologiques complexes, qu'elle a su rendre fiables et abordables grâce à l'utilisation industrielle de matières premières présentant des propriétés exceptionnelles, qu'elles soient électroniques, électriques, optiques, etc. Mais ces matières premières sont au cœur d'écosystèmes complexes, internationaux et interdépendants. Différents leviers sont possibles pour gérer ces matières premières stratégiques, dans ce contexte de fortes dépendances.

Le programme éolien en mer prévoit le déploiement par le gouvernement d'une planification spatiale et l'attribution de 2 GW/an à partir de 2025. Le chapitre de **Frédéric PETIT**, Directeur Business Development de Siemens Gamesa France, montre **les enjeux matériaux pour la fabrication et le recyclage des éoliennes** du groupe Siemens Gamesa Renewable Energy SAS. Dans le cadre de l'utilisation d'aimants permanents, l'énergie éolienne est un des

consommateurs de terres rares. Nous verrons que la stratégie d'approvisionnement doit être basée sur plusieurs partenaires, mais aussi sur la réduction de l'utilisation des terres rares lourdes, et que le recyclage d'aimants permanents est déjà réalisé.

Malgré tout ce que l'on entend, les polymères sont pourtant indispensables à notre vie quotidienne grâce aux performances qu'ils offrent et à la diversité de leurs fonctions. Il faut donc concilier cette nécessité et une autre nécessité, celle de préserver l'environnement.

Denis BORTZMEYER et Patrick MAESTRO, respectivement directeurs scientifiques dans deux grands groupes de chimie, Arkema et Solvay, présentent des exemples de **polymères stratégiques sensibles pour l'industrie**. Lors de cette présentation du monde des polymères et des composites, ils abordent leur futur, avec la recherche continue de performances améliorées par la synthèse et la formulation. En particulier, ils discutent du point crucial de l'impact environnemental et ouvrent la discussion sur les accès aux matières premières biosourcées fiables et durables, au recyclage et à l'économie circulaire.

La partie 3 est dédiée aux ressources et matériaux pour la transition énergétique.

Le chapitre de **Patrick D'HUGUES**, Directeur du programme scientifique « Ressources minérales et Economie Circulaire » au BRGM, montre que la transition énergétique accélère considérablement notre dépendance

aux métaux stratégiques : elle va 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 est par ailleurs renforcée par une démographie mondiale croissante, une forte urbanisation et une numérisation de la société. L'accessibilité à la ressource minérale est donc redevenue un enjeu majeur pour les pays européens et pour la France, notamment dans le contexte géopolitique actuel. Mais nous verrons qu'heureusement des solutions existent et se mettent en place.

Avec **Christophe POINSSOT**, directeur général délégué et directeur scientifique au BRGM, nous verrons que **l'énergie nucléaire est un atout majeur pour limiter l'appel aux ressources minérales stratégiques**. Grâce à ses grandes densités et efficacités énergétiques, elle présente une intensité matière bien plus faible. Pour autant, un certain nombre de métaux rares ou stratégiques restent nécessaires, en particulier du fait des propriétés d'usages très spécifiques des matériaux de structure des centrales.

De plus la disponibilité de l'uranium naturel reste 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 couplé à des réacteurs à neutrons rapides pourrait cependant permettre

à la France d'être autonome sur le très long terme.

De même, une meilleure exploitation des produits de fission pourrait constituer une nouvelle voie d'approvisionnement pour des métaux stratégiques pour lesquels il n'y a pas de production française ou même européenne.

Étienne BOUYER, directeur du « programme exploratoire » au CEA, illustre ensuite **le cycle des matériaux stratégiques, de l'écoconception au recyclage**. Il montre sur des exemples comment recherche, développement et innovation peuvent apporter des solutions pour rendre possible la transition énergétique. Des exemples de production, de conversion, de stockage et de transport d'énergie sont discutés avec un accent particulier porté sur les applications liées à la mobilité.

La partie 4 est dédiée à des exemples de solutions apportées par la chimie à la pénurie des matériaux.

Le chapitre de **Jean-Claude BERNIER**, professeur émérite de l'Université de Strasbourg, est une synthèse pédagogique sur **la chimie métallurgique et les métaux rares**. Plusieurs exemples sont traités, notamment les métaux nécessaires dans les équipements des énergies renouvelables et les prévisions de consommation pour la fabrication des éoliennes et des panneaux photovoltaïques dans l'objectif du zéro carbone. Sont ensuite examinées les contraintes sur les métaux impliqués dans les transports propres, les nouveaux véhicules électriques et à hydrogène.

Quelques données sur les méthodes de recyclage à partir des stocks possibles sont présentées 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.

On voit où se situent les déficits stratégiques de la France et de l'Europe.

Jacques POIRIER, professeur émérite du laboratoire Conditions extrêmes et matériaux : haute température et irradiation à l'Université d'Orléans, rappelle que certaines céramiques et réfractaires sont indispensables à l'industrie primaire, à l'énergie, à l'environnement, à l'aéronautique et à l'armement.

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, les réfractaires doivent posséder un nombre important de propriétés spécifiques pour résister aux sollicitations qu'ils subissent en utilisation. Dans la mesure où leur comportement est principalement gouverné par des phénomènes de corrosion, la composition chimique, la minéralogie, la microstructure et la porosité sont des caractéristiques essentielles qui sont expliquées.

Luc AVEROUS, professeur des universités à l'ECPM au sein de l'Université de Strasbourg, montre, sur l'exemple des polymères biosourcés, comment la chimie permet non seulement de réduire l'empreinte

carbone, mais aussi d'obtenir des structures innovantes conduisant à des propriétés améliorées et mêmes supplémentaires pour différents domaines applicatifs.

C'est donc un contenu très riche d'une actualité particulièrement importante qui est présenté dans cet ouvrage par des experts de ces domaines sur lesquels les informations diffusées ne sont pas toujours, et peut-être même pas souvent, d'une rigueur extrême.

Nous espérons donc que sa lecture vous apportera

beaucoup d'informations utiles sur ces problèmes d'actualité pour tous, mais utiles aussi pour la préparation de l'avenir de tous les jeunes. **L'aide à la formation et l'orientation des jeunes adaptée à l'évolution de notre société et de ses problèmes est une mission fondamentale de la Fondation de la Maison de la Chimie.**

Nous vous souhaitons une bonne lecture.

Danièle OLIVIER

*Vice-présidente de la Fondation
internationale de la Maison
de la Chimie*

Partie 1

Matières premières et
matériaux stratégiques

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

Philippe VARIN a consacré la quasi-totalité de sa vie industrielle au thème des matériaux, qu'on les appelle stratégiques ou non : vingt-cinq ans chez Aluminium Pechiney, six ans comme PDG de Corus dans l'acier, six ans comme PDG de PSA, puis six ans comme président du Conseil d'administration de Areva (aujourd'hui Orano), et, pour finir, deux ans comme président de Suez.

Philippe Varin a été missionné par le ministère de la Transition écologique et le ministère de l'Industrie pour remettre en début d'année 2022 un rapport sur « la sécurisation de l'approvisionnement de l'industrie française en matériaux stratégiques ».

La première partie de cette présentation est consacrée aux matériaux critiques pour la transition écologique qui ont fait l'objet de mon rapport « sur la sécurisation de l'approvisionnement de l'industrie française en matériaux stratégiques », présenté au début de l'année 2022. Puis, dans un deuxième temps, seront données quelques clés du succès pour le futur, puis un résumé de quelques recommandations pour la France qui ont été faites dans ce rapport.

1 Les matériaux critiques pour la transition écologique

Pour commencer, je rappellerai quelques vérités sur la transition écologique. Je ferai ensuite le point sur la balance offre/demande probable au moins pour les dix années à venir.

1.1. Quelques vérités sur la transition écologique

Quelques vérités sur la transition écologique, qui dérangent

un peu, méritent d'être rappelées. Elles concernent : l'intensité en matériaux de cette transition, les signaux économiques qui n'existent pas franchement pour le moment, les problèmes liés à la souveraineté et enfin l'aspect systématique de la transition.

La période qui est devant nous sera très gourmande en matériaux. On dit que l'on passe de l'âge du pétrole à l'âge des matériaux, et c'est complètement vrai. Le tonnage annuel de matériaux consommés par un Européen moyen directement ou indirectement est considérable. En prenant le total de la consommation française et en divisant par le nombre d'habitants dans le pays, nous consommons vingt tonnes par an. La moyenne mondiale est plutôt de douze/treize tonnes, mais nous sommes en Europe, et, dans la moyenne mondiale, il y a l'Afrique, l'Amérique et la Chine. Dans les trente ans à venir, nous allons consommer autant que depuis le début de l'humanité en termes d'extraction des matériaux du sol. En effet, dans le cadre de la transition écologique, il faut rappeler les chiffres suivants : un véhicule électrique, c'est six fois en empreinte matériaux le montant d'un véhicule thermique, et l'empreinte matériaux d'un kilowattheure¹ éolien

1. Unité de puissance électrique, 1 kWh correspondant à l'utilisation de 1 000 watts en une heure, et ainsi à une énergie totale de 3 600 kJ (unité du système international pour l'énergie). À titre indicatif, 1 kWh correspond à 1 cycle de lave-linge, 1 journée de réfrigérateur, ou encore environ 5 km en voiture électrique. (Source : EDF, HelloWatt)

est aussi à peu près six fois celle d'un kilowattheure gaz.

La transition écologique ne consommera donc pas moins de matériaux qu'avant mais, au contraire, cela va plutôt renforcer les problèmes. C'est un sujet très sérieux et il ne faudrait pas que pour résoudre un problème de CO₂, qui est manifeste et indiscutable, on se crée un autre vrai problème général sur la ressource en matériaux.

La deuxième vérité est que **la transition écologique est politique.** Elle est politique au bon sens du terme, c'est-à-dire que les responsables politiques, compte tenu des perspectives du GIEC, ont simplement décidé qu'il fallait être « net zéro² » en 2050, au moins en Europe. Ceci dit, elle est politique parce que cette décision régaliennne a été faite sans véritable étude d'impact, et elle n'est pas accompagnée, comme dans le cas des transitions antérieures, du signal économique qui fait que les acteurs peuvent faire cette transition naturellement. Quand on est passé du bois au charbon, puis du charbon au pétrole, et ensuite du pétrole au gaz, il y avait à chaque transition un avantage de la nouvelle source d'énergie par rapport à la précédente, sans compter les externalités comme disent les économistes. De plus, on avait le temps, et l'économie de marché faisait en sorte que les

2. Principe selon lequel toute émission de CO₂ est compensée par l'élimination des gaz à effet de serre ; cela peut se faire aujourd'hui en stockant du CO₂ ou en le réutilisant (comme avec des arbres).

bonnes pratiques pouvaient se répandre. Pour la transition écologique, c'est totalement différent. Il s'agit de faire zéro carbone en 2050, ce qui est un laps de temps très bref, et comme on n'aime pas trop parler du prix du CO₂, on n'en parle pas, ou très peu. Le coût n'est pas aujourd'hui le driver³ des acteurs économiques en France comme ailleurs. Cette transition est donc politique. Ainsi elle suppose que **les acteurs politiques utilisent d'autres moyens que ceux qu'ils utilisent habituellement** dans l'économie de marché, c'est-à-dire qu'il faut dépasser les outils réglementaires, il faut dépasser les aides à l'innovation et **il faudra payer, parce que sinon, cela ne se passera pas.**

La troisième vérité dont il faut tenir compte, c'est la politique de la Chine, parce que, depuis vingt ans, les responsables chinois se sont engagés, avec une volonté très claire, à ne plus dépendre du pétrole et du gaz pour des questions de sécurité. Il y a dix ans, quand j'étais patron de PSA, j'avais présenté au ministre de l'Économie et de l'Industrie de l'époque nos idées et nos réalisations à venir en matière de véhicules électriques, et annoncé que nous ne souhaitons pas acheter les batteries en Chine, mais en Corée. Mais cela n'a pas été possible et au bout de deux ans nous avons dû prendre des batteries chinoises, ce qui montre que l'engagement politique de la Chine dans le domaine du véhicule électrique existe depuis déjà un

certain temps. De plus, il n'y a pas en Chine de problèmes de financement par l'État de la transition écologique, car les sociétés minières, comme les entreprises automobiles, sont des entreprises de l'État, et le programme *Belt and Road Initiative*⁴ permet de financer les investissements extérieurs dans un certain nombre de pays, notamment en Afrique. Le résultat est que la Chine a pris 50 % du contrôle des chaînes de valeur sur les batteries (c'est-à-dire Nickel, Cobalt, Lithium) et jusqu'à 90 % actuellement du contrôle des chaînes de valeur sur les aimants. **Il s'agit donc d'un sujet de souveraineté extrêmement sérieux** sur lequel les États-Unis ont déjà réagi depuis cinq ans, et plus récemment avec l'*Inflation Reduction Act*⁵ qui consiste à mettre 367 milliards de dollars d'investissement gouvernemental. On ne parle pas dans cette loi de réduction du prix du CO₂. L'État américain investit pour favoriser tout ce qui permet dans le triptyque : transition énergétique, transition écologique, matériaux, de dire que l'on fait du « *made in USA* » ou dans les pays qui ont des accords commerciaux avec les États-Unis. C'est un point extrêmement important notamment pour nos exportations et pour les risques que

4. Projet économique lancé sous l'impulsion du gouvernement chinois en 2013 afin de relancer l'historique route de la soie.

5. L'*Inflation Reduction Act*, ou loi de réduction de l'inflation, est une loi adoptée en 2022 aux États-Unis visant à réduire les effets de l'inflation causée par la crise sanitaire de la Covid-19 et de l'invasion russe en Ukraine.

3. Moteur.

cela pose aussi sur l'importation de nouvelles unités industrielles dont certaines, prévues en Europe, vont avoir tendance à rester aux États-Unis.

L'Europe a donc réagi depuis environ un an, et très récemment avec la loi promue par le commissaire Breton sur les matériaux critiques (*Critical Raw Materials Act*⁶), qui reste encore à implémenter et à réaliser, mais qui donne déjà un certain nombre d'indications sur ce que l'Union européenne envisage de faire. **Néanmoins, dans la course mondiale, nous ne partons pas avec de l'avance. C'est peut-être la troisième vérité.**

La quatrième vérité, c'est que la transition écologique est une révolution systémique.

Aujourd'hui, il est facile de promouvoir les véhicules électriques : tous les responsables politiques les promeuvent d'une seule voix, ou presque. Mais derrière chaque véhicule électrique on oublie la mine, et on oublie que la transition écologique n'a de sens que si le système électrique est décarboné. Or si on consulte « *Electricity Map* », cette application qui donne en temps réel les émissions de CO₂ des différents systèmes électriques européens, la France n'apparaît pas très brillante actuellement. Nous produisons 90 g de CO₂ par kilowattheure, alors

6. Le *Critical Raw Materials Act*, ou loi pour les matériaux critiques, est une loi européenne visant à augmenter les capacités de minage, de traitement et de recyclage des matériaux critiques, ainsi qu'à réguler leur utilisation dans le but de limiter sa dépendance. Elle devrait prendre place en 2023.

qu'avant nous étions plutôt autour de 60 g en moyenne. L'Allemagne produit dans les 450 g, la Pologne 600 g, et la moyenne européenne est à 350 g de CO₂ produit par kilowattheure. Un véhicule électrique émet actuellement en moyenne 60 g au km. Quand on roule sur 200 000 km avec une voiture (durée de vie moyenne), cela correspond à l'émission de 12 tonnes de CO₂. À ces douze tonnes, il faut aussi ajouter les émissions résultant de la fabrication de la batterie, donc si cette batterie est faite comme pour la Tesla 3, avec du nickel indonésien et du graphite chinois, cela correspond à une émission de 8 tonnes supplémentaires. Donc, au total, cela correspond à une émission de 20 tonnes de CO₂ pour 200 000 km, soit 100 g de CO₂ au kilomètre.

De plus, il ne faut pas oublier que, pour produire les métaux utilisés, il faut des mines qui n'émettent pas de CO₂, qu'elles soient à proximité du centre d'utilisation, et qu'elles utilisent une électricité décarbonée.

Ces quatre vérités ne sont pas forcément très agréables, mais il faut les rappeler parce qu'elles ne sont pas évidentes pour un certain nombre de responsables.

1.2. L'évolution de la balance des offres et de la demande

La demande du marché va devenir explosive dans les dix prochaines années. Il faudra deux à trois fois plus de nickel, six, sept ou huit fois plus de lithium et quatre fois plus de terres rares qu'actuellement.

Une telle croissance de la demande n'a encore jamais été observée dans le passé. Pour pouvoir produire, ces croissances nécessiteront l'ouverture de 70 à 100 mines ou usines nouvelles au niveau mondial.

Face à cette demande, **l'offre est très contrainte**, pour au moins cinq raisons :

La première est liée aux nombreuses **instabilités politiques**. En effet, l'Amérique latine est passée maintenant à gauche. En Afrique, il y a *de facto* une alliance des pays africains, d'une part avec la Chine dont les entreprises y sont très présentes, d'autre part de plus en plus avec Wagner pour la sécurité, et cela conduit les Européens et les Américains à être dans une situation parfois inconfortable. Avec les tensions résultant de la guerre en Ukraine, nous avons un autre exemple de difficultés évident.

La deuxième raison est que, en termes d'investissements, **les entreprises minières sont dans un bas de cycle** : il y a une dizaine d'années, les vingt premières entreprises minières investissaient une centaine de milliards de dollars ; elles sont passées il y a trois ans par un creux à cinquante milliards. Cela commence à remonter, mais il n'y a pas de réserves de capacité vraiment disponibles.

La troisième raison est la **décroissance des rendements**, notamment pour certains minerais : les mines de cuivre tournent aujourd'hui à moins de 1 %, alors qu'il y a dix ans on était plutôt à 2 ou 3 %. De plus, parce que les mines sont des grandes consommatrices d'eau, la sécheresse liée

aux perturbations climatiques va de plus en plus devenir un problème.

La quatrième raison, c'est la **réticence des populations à l'installation d'une exploitation minière**, ce qu'on appelle la réaction Nimby (*Not In My Backyard*⁷). On comprend pourquoi l'opinion publique peut réagir négativement sur ces sujets puisque les mines ont une histoire qui n'est pas extrêmement positive et que, **d'autre part, on recycle peu ou mal**. En effet, nous utilisons tous des smartphones qui ne sont recyclés qu'à environ 0,1 %. Ils sont effectivement collectés mais, même si on retire la coque, l'intérieur n'est pas recyclé. Il en est de même pour les aimants aujourd'hui, ils sont collectés, d'ailleurs souvent pas toujours, et 0 % sont recyclés en Europe. Les aimants à recycler ont pour l'instant tendance à quitter l'Europe. Ainsi, si l'on ne recycle pas complètement les métaux stratégiques utilisés, il sera difficile de convaincre qu'il faut creuser pour extraire de nouveaux minerais.

Cela dit, le nouveau règlement sur les batteries est une bonne nouvelle puisqu'il obligera les batteries à avoir dès le début un écodesign⁸ et donc

7. *Not in my Backyard*, ou « pas dans mon jardin » est un syndrome désignant l'attitude du grand public à approuver certaines décisions tant qu'elles ne se font pas à proximité de chez eux [Wikipédia].

8. L'écodesign vise à repenser la conception d'un produit afin que celui-ci soit plus respectueux de l'environnement et plus durable tout au long de son cycle de vie, tout en restant économiquement viable.

on ne sera pas confronté aux mêmes problèmes qu'avec les smartphones. Et puis enfin, **les réglementations sont toujours de plus en plus contraignantes**. Entre le moment où l'on décide d'ouvrir une mine et le moment où on va le réaliser, il faut quand même aujourd'hui, selon les pays, 7 à 10 ans pour obtenir un *permitting*⁹, ce qui est un vrai problème quand on connaît la demande qui est devant nous.

On sait donc à peu près comment les choses vont se passer en termes d'offre/demande dans les prochaines années.

2 Quelques clés de succès pour le futur

2.1. Au niveau mondial

La première clé de succès au niveau mondial est la **vitesse de l'innovation** : la concurrence au niveau mondial est très efficace comme on peut par exemple le voir au salon de l'auto où les producteurs chinois sont tous là et prêts à fournir assez vite. L'Agence internationale de l'énergie a dit que nous ne disposons pas de 50 % des innovations qui vont être nécessaires dans le futur. De gros efforts d'innovation sont donc à faire le plus rapidement possible et pour cela en termes d'organisation, **il faut que nous puissions fonctionner en mode projet pour aller plus vite**. Or, nos organisations, nos administrations, nos responsables industriels fonctionnent, en particulier

9. Correspond au « feu vert » des administrations, une fois que l'ensemble des normes et réglementations sont respectées.

en France, souvent de façon indépendante les uns des autres. Le mode projet n'est pas forcément en Europe aussi répandu qu'aux États-Unis où la DARPA¹⁰ est une agence qui associe les efforts des universités, des laboratoires de recherche et des entreprises sur un certain nombre de gros projets avec de gros enjeux. **Il faut travailler sur des écosystèmes complets**, comme celui des batteries ou celui des aimants, et traiter l'ensemble des problèmes concernant la matière première, la production et la recherche, y compris les compétences qui seront nécessaires. Pour cela, la mise en place du mode projet est nécessaire.

Deuxièmement, **l'exploitation minière au niveau mondial doit être responsable** : c'est la condition de l'investissement et pour que l'opinion publique suive sur ce sujet. Sur les batteries, ce n'est pas encore le cas. Pourtant, dans le « règlement batteries » qui se prépare au niveau européen et qui est maintenant presque prêt, il y a des éléments très concrets comme le taux de recyclage dans les batteries qui doit monter dans le temps, avec des points de repère et des jalons. Mais il y a aussi le fait que la batterie doit avoir un passeport CO₂ : c'est assez simple dans le principe mais moins dans la pratique où il faut y associer les matériaux

10. La DARPA, ou « Defense Advanced Research Projects Agency », est une agence liée à la Défense américaine en charge de la recherche et du développement de technologies, en faisant appel aux universités, aux entreprises et aux laboratoires de recherche.

de la batterie et les systèmes électriques. Et on dit aussi dans le règlement que les matériaux doivent provenir de mines responsables et ce concept de la mine responsable n'est pas aujourd'hui complètement délimité. Il existe des standards, il y a la norme européenne, il y a la norme canadienne, il y a les principes de l'OCDE, il y a des principes de l'ICMM, qui est l'organisation des miniers. Il y a une norme dite IRMA, qui certifie la performance sociale et environnementale des sites miniers dans le monde entier qui, en raison de sa rigueur, est consultée par un large éventail de parties prenantes. Donc on a un certain nombre de standards, mais la question en accord avec la demande du « règlement batteries », c'est de **pouvoir dire à quelle norme on se réfère**, et il faut que ces normes soient certifiables par des tiers ; c'est une condition pour l'opinion publique. En effet, on ne pourra ouvrir de nouvelles mines que si l'on peut garantir à l'opinion publique, de manière robuste, que sur le plan de l'éthique, cela sera bien traité, qu'il n'y aura pas d'enfants dans les mines, que le CO₂ sera très limité, que l'eau sera minimisée, etc. **Il est donc très important que ces standards soient mis en place.**

La troisième clé, c'est l'éco-design dont nous avons déjà parlé à propos des batteries : il faut faire la même chose sur les aimants, de telle manière que l'opinion publique voit bien que l'on s'occupe de ce sujet dès le début.

Et enfin, la quatrième clé du succès mondial, c'est la

question financière. Il y a des fonds disponibles qui sont prêts à s'investir. Dans les infrastructures de l'écologie, on va passer de 2 trillions de dollars par an mondialement, à typiquement 5 trillions de dollars pour faire face aux besoins de la transition écologique. Mais il est nécessaire de « dérisquer » un certain nombre d'investissements, parce que beaucoup d'entre eux comportent des risques forts. La tendance générale sera probablement positive sur les prix, mais pas toujours en revanche pour la localisation, à la fois pour les questions d'environnement, pour les questions politiques et autres. Il est donc indispensable que **les fonds publics puissent s'engager aussi dans ce domaine.** Les États-Unis viennent de le démontrer en y investissant 367 milliards de dollars. La Chine n'a pas de problèmes sur ce point ; au niveau européen, c'est un sujet qui est peut-être plus difficile mais qui paraît indispensable.

2.2. Des clés de succès pour l'Europe

L'Europe va investir 150 milliards d'euros dans 36 gigafactories¹¹ dans les dix années qui viennent.

Premièrement, il est absolument aberrant que les mines de lithium ou autres ne soient pas dans la taxonomie¹². Ce sont, comme on peut les

11. Usine de grande taille permettant la fabrication en grand volume et à haute cadence de produits.

12. Réglementation, classification prenant en compte les activités économiques avec un impact favorable sur l'environnement.

appeler, des activités habilitantes au sens de la réglementation européenne, au même titre que le nucléaire et le gaz. **Si les mines ne sont pas dans la taxonomie, cela pose un problème parce que les banques et les investisseurs font appel à des fonds verts, et donc c'est la taxonomie qui est le point de repère.** Ainsi, il y a un lien direct avec les standards évoqués à propos de la mine responsable pour que cette réglementation puisse intégrer les mines.

Deuxièmement, il n'existe pas aujourd'hui de dispositif européen de levée de fonds, à part un fonds d'investissement privé appelé InnoEnergy de 300 à 400 millions d'euros. Mais il est en grande partie pour les start-ups et les jeunes entreprises dans le domaine des mines ou de la transformation en Europe, à part la BEI¹³, en dette, mais **il n'y a pas un véritable outil pour pouvoir agir en matière d'investissements en fonds propres dans des mines.** Le commissaire Breton a annoncé récemment, dans le cadre du *Critical Materials Act*, qu'il réfléchissait

13. Banque européenne d'investissement.

sérieusement à créer un fonds souverain en Europe.

Au niveau européen, en matière d'innovation, beaucoup de fonds ont été développés pour l'optimisation de la batterie lithium-ion, mais réfléchir, y compris en France, sur **les chimies alternatives pour les batteries, est un sujet vraiment très important.** En effet, si le lithium-ion est justifié, en général et pour de grandes distances en particulier, sur de plus petites distances, les Chinois ont la technologie LFP (Lithium Fer Phosphate) qui n'utilise que le lithium comme « matériau critique », et qui est très efficace, certes, avec une moindre autonomie. Mais pour des usages urbains ou périurbains, cela peut être une solution. Il y a donc une nécessité d'innovation qui s'appelle *Breakthrough Affair*¹⁴ en matière de développement sur les batteries.

Le *Critical Materials Act* va aussi mettre en place un réseau d'observatoires en Europe pour identifier la criticité des matériaux, et en tout cas la réévaluer régulièrement en anticipant.

14. Point de rupture, notant une rupture avec ce qui existait avant.

Conclusion : recommandations pour la France

Au niveau français, il a été recommandé de **mettre en place un observatoire des minéraux industriels**, l'OFREMI (voir le chapitre de Christophe Poinssot¹⁵) qui est sous la tutelle du

15. Christophe POINSSOT : Conférence sur « Risques et opportunités pour le nucléaire actuel et futur en termes de ressources minérales stratégiques ».

BRGM, avec le soutien étroit du CSF (Comité Stratégique des Filières mines et métaux).

Il a été recommandé également qu'il y ait un **délégué interministériel**. En ce qui concerne les plateformes pour les batteries et pour les aimants, il faut des responsables pour promouvoir ces plateformes aussi vis-à-vis des interlocuteurs extérieurs : Business France fait une partie du travail, mais il faut aller certainement plus loin.

J'ai recommandé également que le fonds d'investissement puisse être un fonds d'investissement français. Des réflexions sont en cours sur ce sujet.

Il faudrait mettre en place une « diplomatie efficace des métaux », parce qu'il est clair que nos OEM, nos constructeurs, nos utilisateurs, vont avoir à passer des contrats de long terme, de type *Take-or-Pay*¹⁶ sur de très grandes périodes (dix ans par exemple), ce qui est tout nouveau. J'ai été constructeur automobile, je n'aurais jamais pensé passer un contrat de dix ans avec un opérateur minier, et encore moins de prendre une participation. Or aujourd'hui, ce n'est pas encore la norme, mais c'est devenu une obligation. Il faut donc pouvoir aider les constructeurs, automobiles entre autres, dans leur négociation.

Une feuille de route pour développer les recherches des années à venir est mise en œuvre entre les acteurs de l'innovation de la pile batterie : CEA, CNRS, avec les gigafactories¹⁷.

Une revalorisation des compétences est à faire, dans le domaine minier. Nous avons plusieurs Écoles des mines en France, mais aujourd'hui on n'y fait plus beaucoup d'ensei-

16. Type de contrat laissant le choix à une entreprise, soit de prendre le produit d'un fournisseur, soit de payer des pénalités à ce fournisseur.

17. Usine permettant de produire de très grands volumes.

gnement dans le domaine des mines, on fait de l'intelligence artificielle. Pourtant, si on veut de la mine responsable, il faut des technologies propres et parfois nouvelles. Il va donc falloir travailler sur ce sujet.

Il faut aussi, dans le domaine des batteries, des compétences que l'on n'a pas forcément. La région Hauts-de-France a les gigafactories, la région de Grenoble est le deuxième pôle, et un troisième pôle de développement en Aquitaine est aussi prévu.

Il faut avoir beaucoup de bon sens pour naviguer sans instruments, parce qu'il n'y a pas de boussole économique dans cette transition écologique ; ce n'est pas le PIB qui va vous donner des réponses, et il n'y a pas de valorisation du capital nature aujourd'hui dans les outils économiques. Ainsi, il est important que les organisations industrielles puissent faire entendre leurs voix de bon sens parce que l'on n'a pas forcément les points de repère habituels.

Enfin, nous avons été dans les 40 dernières années sous l'effet de guerres liées au pétrole ; il faut éviter que cette guerre des matériaux se termine mal. Dans cet aspect, la transition écologique doit être inclusive globalement, et pas uniquement en France. Les pays émergents n'ont pas du tout la même vision des choses que la nôtre : ils ont pour cela de bonnes raisons parce que leur problème c'est de rattraper notre niveau de vie. Aussi, considérer, et c'est à mon avis le sujet du Green Deal européen, qu'on va avoir une île verte européenne au milieu d'un monde qui ne serait pas forcément si vert, est peut-être un peu une illusion.

Il faut donc une transition écologique qui soit à la fois inclusive et équitable, ce qui n'est pas forcément le comportement spontané sur la planète en ce moment.

Comment définir le périmètre des matériaux stratégiques ?

Jean-François GAILLAUD est chef du Bureau de la politique des ressources minérales non énergétiques à la Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature du ministère de la Transition énergétique.

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer comment autour de l'usage des matériaux stratégiques, on peut essayer de les hiérarchiser et d'exprimer le risque vis-à-vis d'un certain nombre de facteurs : facteur géopolitique, d'approvisionnement ou ne serait-ce que vis-à-vis des mutations industrielles.

1 Introduction

Les ressources naturelles sont variées et multiples (**Figure 1**).

Elles sont extraites des milieux physiques¹, que sont

1. Un milieu physique peut être soit solide (la terre), liquide (les océans, les mers...) ou gazeux (l'atmosphère).

les rivières, les océans, les sols, l'atmosphère. Dans ces écosystèmes des milieux physiques, on peut retrouver une biodiversité, par exemple les ressources issues des grands fonds marins. On parle de ressources minérales², de ressources énergétiques, comme le pétrole, le gaz ou la géothermie³, mais aussi des ressources alimentaires. L'eau est aussi une ressource dont nous pouvons apprécier toutes les incidences de sa rareté ou de son abondance, notamment

2. Une ressource minérale correspond à une substance extraite de la terre, et qui possède des propriétés intéressantes, ou qui peut être exploitée.

3. Chaleur de la Terre et exploitation par l'Homme.

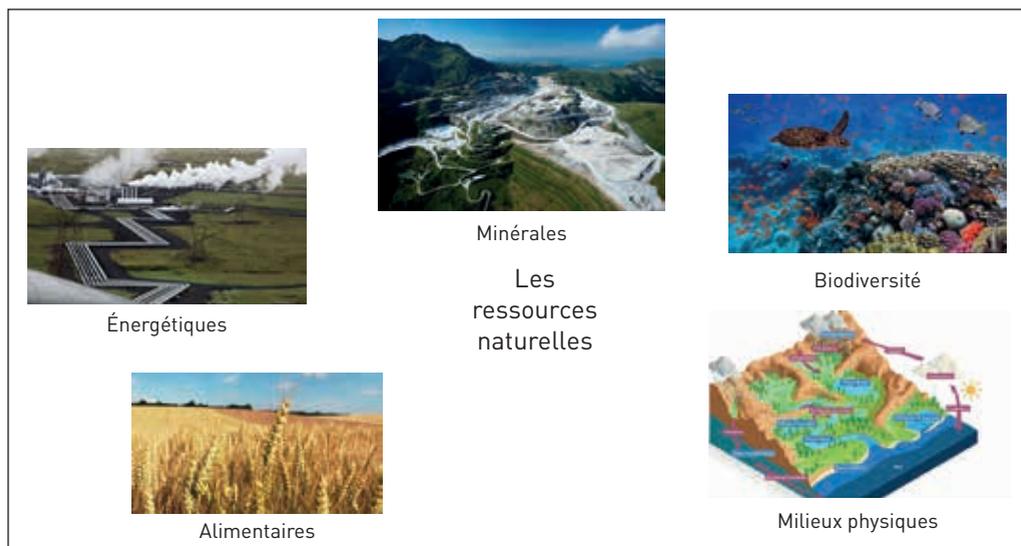


Figure 1

Les différentes ressources naturelles.

dans le contexte du changement climatique.

Aujourd'hui ces ressources naturelles sont une préoccupation constante pour notre société, mise en exergue par les crises telles que récemment les masques et les médicaments avec la crise liée au Covid, ou l'alimentation avec la crise ukrainienne et les interrogations sur les approvisionnements en blé de l'Afrique. Ces préoccupations irriguent tous les domaines de nos sociétés (**Figure 2**).

L'approche de l'État et des entreprises est différente vis-à-vis de la définition des ressources stratégiques.

Pour l'État, ce qui est stratégique dans une ressource, ce sont les fonctions qu'elle va pouvoir garantir à ses citoyens, telles que l'alimentation, la santé, l'approvisionnement

en carburant, l'énergie. Si on prend l'exemple actuel du gouvernement ukrainien : sa préoccupation première, au-delà de défendre ses frontières, c'est d'avoir un approvisionnement énergétique pour pouvoir passer l'hiver. C'est aussi les produits et services qui vont permettre de garantir la souveraineté économique, c'est-à-dire comment l'industrie et les filières industrielles peuvent poursuivre leurs activités dans un environnement qui est constamment en évolution.

Pour l'entreprise, la vision est plus réduite. Une ressource stratégique est une ressource qui va avoir une valeur, qui est rare, inimitable et non substituable et qui est un entrant indispensable à la production et procure un avantage concurrentiel durable.



Figure 2

Exemples d'articles présentant les retombées des pénuries liées aux crises sur les ressources alimentaires, en semi-conducteurs, en masques, en médicaments et en eau.

2 Les minéraux stratégiques

Les ressources minérales potentiellement stratégiques sont extrêmement variées et leurs applications sont diverses. Quelques exemples sont donnés dans la **Figure 3**.

- Le kaolin, une roche granitique dégradée, est une argile qui permet de faire de la porcelaine.
- La diatomite est une roche fossile indispensable aujourd'hui pour la filtration de la bière et du vin, donc dans

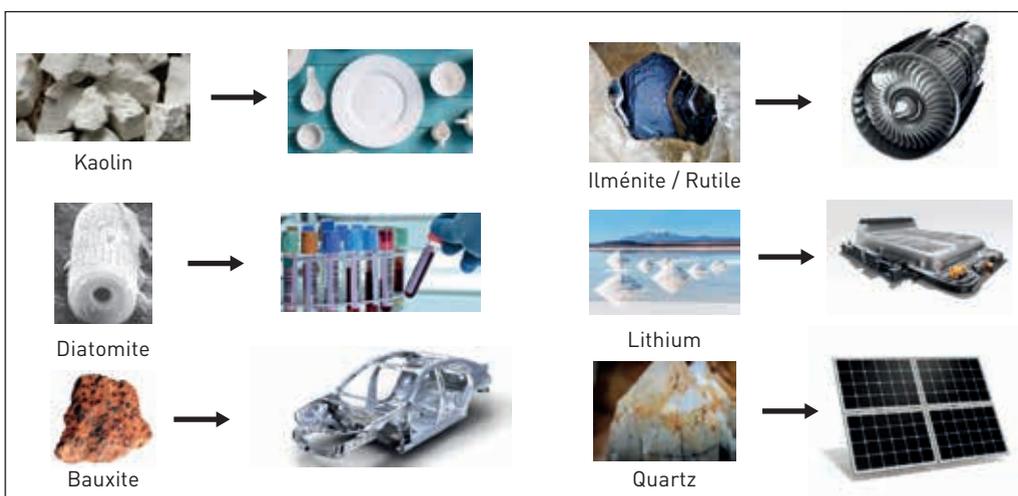


Figure 3

Exemples de ressources minérales stratégiques.

Source : Minéraux industriels de France.

l'agroalimentaire, mais également la filtration du sérum sanguin. Sa disponibilité concerne donc tout le marché de la santé et de la sécurité pour les populations.

- La bauxite permet de produire de l'alumine donc, *in fine*, de produire de l'aluminium qui irrigue largement notre société et notre environnement, ne serait-ce que dans l'industrie de l'automobile.

- L'ilménite et le rutile sont des minerais qui, une fois transformés, permettent la production du titane. Le titane est aujourd'hui un matériau indispensable dans l'aéronautique puisqu'il entre notamment dans la fabrication des disques et d'autres pièces structurelles des moteurs.

- Le lithium, utilisé comme agent fondant dans l'industrie verrière, a beaucoup d'autres applications et surtout trouve un nouvel usage dans la fabrication des batteries au lithium notamment dans l'industrie automobile.

- Le quartz conduit à la production de panneaux solaires.

Les « hautes technologies », et notamment les deux applications largement répandues que sont les smartphones et les véhicules, n'utilisent pas que les métaux mais plus généralement des minéraux industriels stratégiques.

Le talc est un bon exemple de ressource minérale stratégique insoupçonnée dans les applications quotidiennes. Ce minéral qui favorise le glissement et réduit la friction, a aussi un usage essentiel dans la chimie, notamment dans la chimie du plastique, pour donner de la structure aux plastiques et alléger les plastiques de l'industrie automobile, mais aussi dans la chimie des peintures, puisqu'il permet d'optimiser l'effet de brillance de la peinture blanche.

Au fur et à mesure que la société s'est développée, elle a utilisé de plus en plus de ressources minérales : dans les années quatre-vingt, 12 éléments du tableau de Mendeleïev étaient utilisés pour leurs applications dans notre vie quotidienne, alors qu'aujourd'hui c'est presque la totalité du tableau de Mendeleïev (**Figure 4**).

La complexité des objets et des moyens que l'on emploie est de plus en plus grande. Les **Figures 5** et **6** montrent la grande diversité des matériaux stratégiques utilisés sur un avion de chasse tel que le *Rafale* et sur un char *Leclerc*. Il est difficile aujourd'hui d'avoir un seul intrant sur un système ou pour un usage. Même la charrue n'est plus aujourd'hui

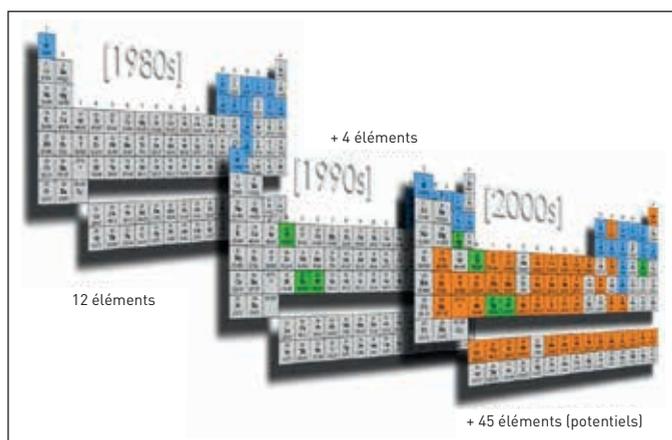


Figure 4

Au cours du temps, de plus en plus d'éléments sont utilisés pour leurs applications dans notre vie quotidienne.

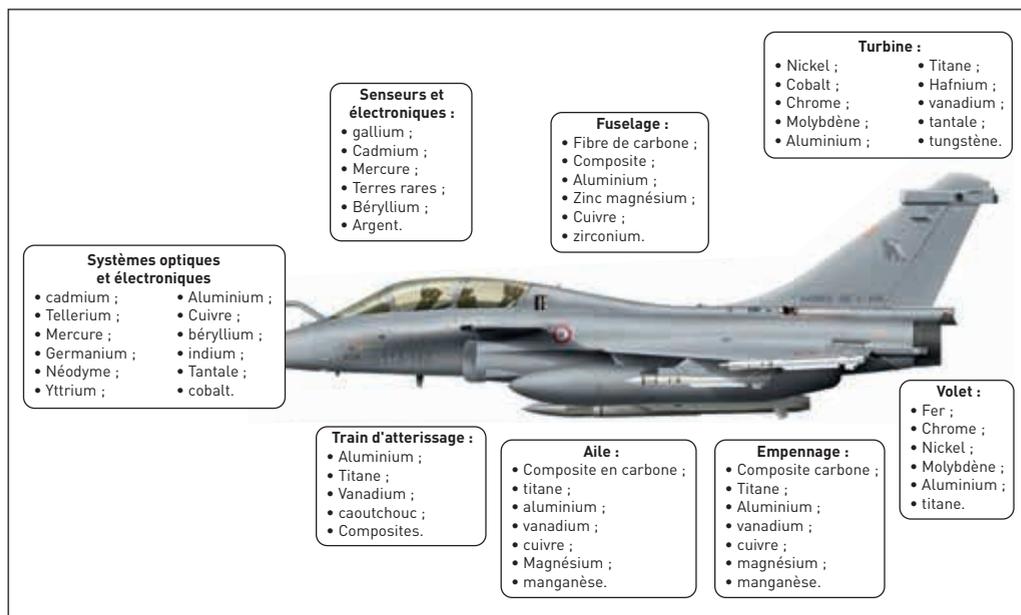


Figure 5

Ensemble des matériaux présents dans le Rafale.

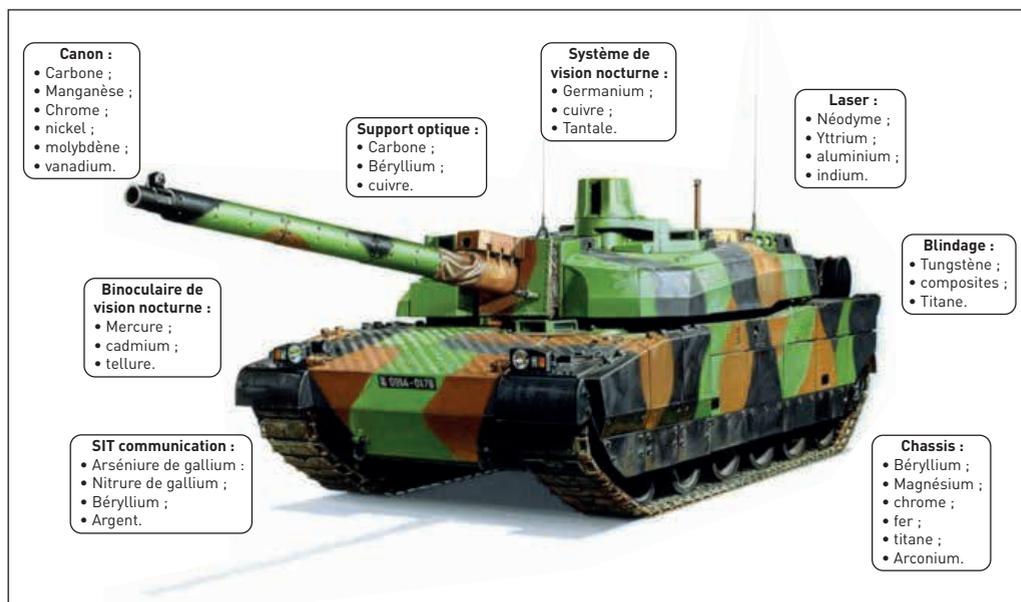


Figure 6

Ensemble des matériaux présents dans le char Leclerc.

uniquement en fer, le tracteur qui la conduit va embarquer de l'électronique et des systèmes qui font appel à des matériaux tous plus ou moins stratégiques.

D'autres facteurs influencent ce côté stratégique, notamment **l'augmentation de la démographie mondiale** et l'exemple suivant est assez emblématique : 50 milliards de tonnes de sable et de graviers sont utilisés annuellement sur la planète pour la construction, ce qui correspondrait à la construction d'un mur de 27 mètres de large et 27 mètres de haut qui ferait le tour de la Terre. On imagine le nombre de murailles de Chine que l'on pourrait ainsi construire tous les ans autour de la Terre. De même, les objets que nous utilisons ne sont pas forcément recyclables à l'infini, et les taux de renouvellement de certains équipements peuvent être assez rapides : nous sommes tentés, par exemple, de changer de smartphone assez

régulièrement. Tout cela a un impact sur l'usage et le besoin que l'on va avoir dans les matériaux qui les constituent.

La définition du mot stratégique doit être également couplée à une analyse des vulnérabilités au sein des **différents maillons de la chaîne de valeur**. Une chaîne de valeur est ce qui va nous permettre de produire et de mettre sur le marché le bien de consommation final. Prenons l'exemple de la production d'un câble électrique (**Figure 7**). Elle commence par une extraction de minerai de cuivre, dans une mine quelque part dans le monde, en l'occurrence il s'agit d'une mine de cuivre au Chili.

Le process⁴ extractif nécessite lui-même une succession de transformations : la concentration du minerai puis le raffinage⁵ par pyrométallurgie⁶

4. Anglicisme pour dire procédé.

5. Technique de purification.

6. Technique de métallurgie extractive faisant appel à un traitement thermique.

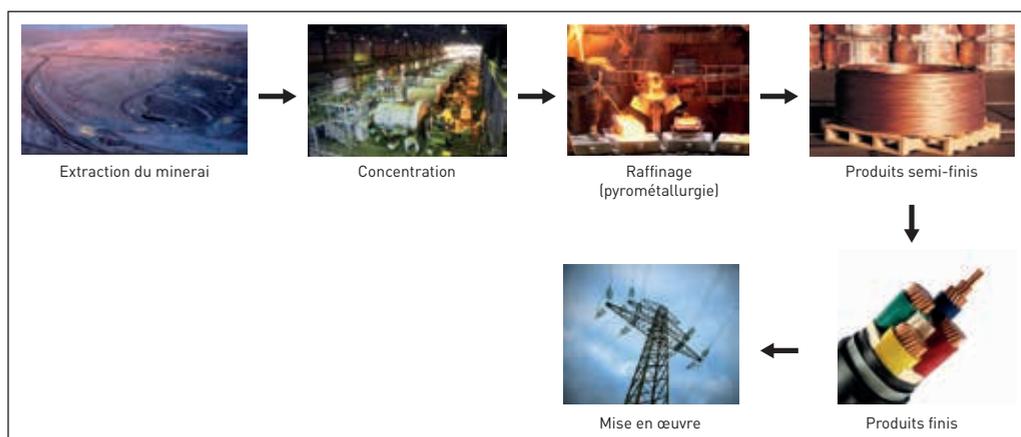


Figure 7

Exemple de la chaîne de valeur appliquée à la fabrication d'un câble électrique.

permettent de fabriquer un produit semi-fini qui nécessite également d'autres transformations et potentiellement l'usage d'autres matériaux pour en faire des câbles qui seront mis en œuvre à la fin par l'opérateur du réseau électrique ; si on prend la haute tension, ce sera RTE⁷.

De plus, derrière chaque fournisseur il y a une série de processus de transformation de la matière première mise en jeu pour arriver à une puce, un écran tactile, une batterie... Dans le cas d'un smartphone, on parle d'une valeur en termes de coût des matériaux, mais il faut ajouter la nécessité d'avoir plus d'une trentaine de mines à l'origine des matériaux utilisés pour pouvoir réaliser le smartphone.

On voit donc les enjeux dans la chaîne de valeur qui peuvent naître de la multiplicité des matériaux auxquels on va faire appel, mais aussi de la multiplicité des acteurs qui vont intervenir au sein de cette chaîne de valeur.

3 Les ressources stratégiques en France métropolitaine

La France dispose de ressources géologiques qui permettraient potentiellement d'accéder à une souveraineté minière (Figure 8).

Nous avons du tantale, du tungstène, du cuivre, du plomb, du lithium, du sel, du zinc... mais l'industrie minière en France a complètement disparu (Figure 9). Il ne reste plus que quelques activités

minières concentrées sur la bauxite dans le Sud de la France, pour faire des aluminés de spécialités qui vont servir à faire des bétons.



Figure 8

Ressources géologiques présentes en France.

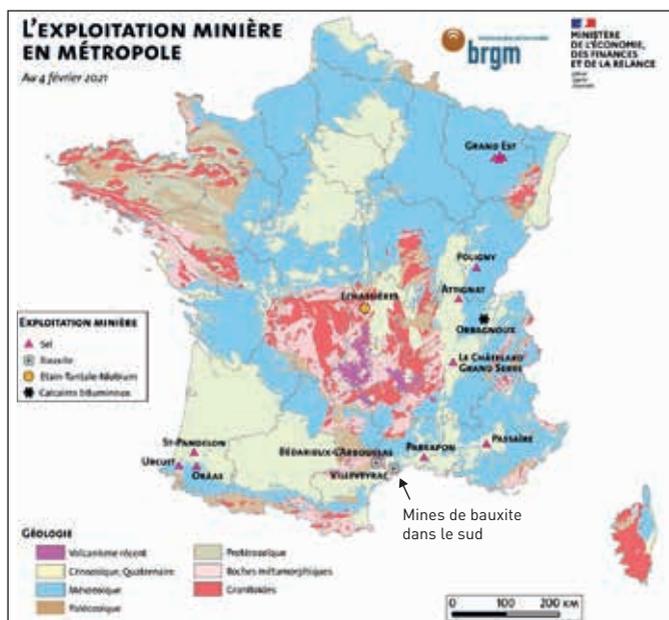


Figure 9

Carte de la France montrant les exploitations minières en sel, en bauxite, en étain/tantale/niobium et en calcaire bitumineux.

7. RTE : Réseau de Transport d'Électricité.

Nous avons aussi une industrie minière saline qui heureusement est encore prospère, qui est la base de toute la chimie du chlore, notamment dans le Grand Est et dans le Sud de la France.

Il existe un projet d'ouverture d'une mine de lithium à Échassières.

Le potentiel minier dont dispose la France est néanmoins trop réduit alors que nous sommes confrontés à des besoins importants pour notre industrie de transformation. La **Figure 10** montre la localisation des acteurs industriels qui transforment ces métaux dont nous avons besoin pour leurs applications. Prenons l'exemple de Solvay à La Rochelle (**Figure 10**), dont les installations industrielles

permettent de séparer et de purifier les terres rares légères dont l'importance pour la production des aimants est évoquée dans un autre chapitre de cet ouvrage ou encore la production de titane par EcoTitanium, qui fait du recyclage, alors que nous n'avons pas de mines d'ilménite ou de rutile en France qui nous permettent d'avoir une source de titane. Ce titane provenait entre autres d'Ukraine, ce qui permet d'imaginer la difficulté actuelle de l'approvisionnement.

4 Les ressources stratégiques mondiales

4.1. Les terres rares

La France a certes une petite installation de production de

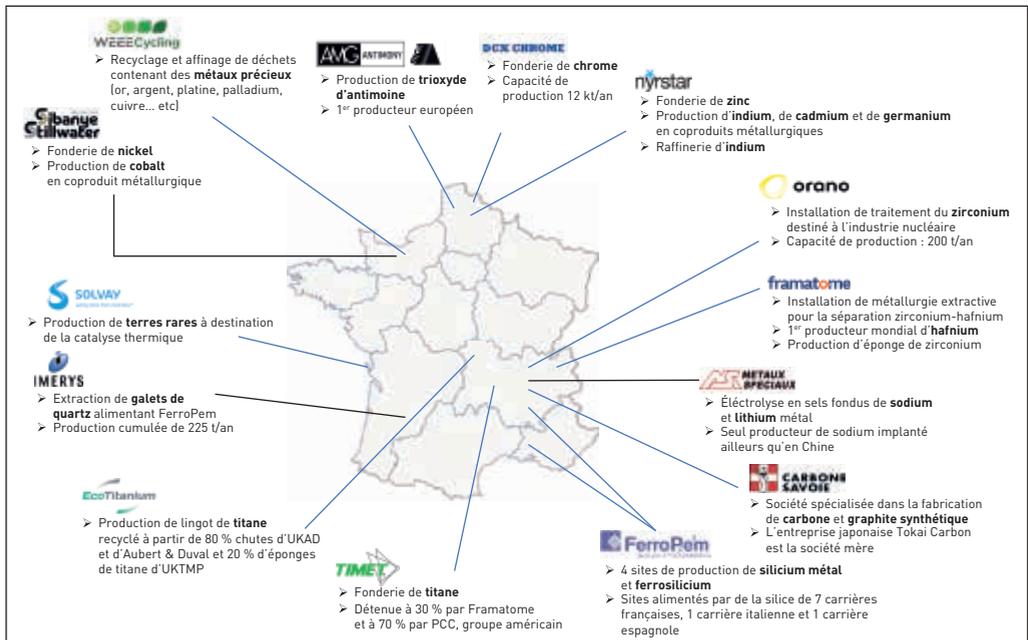


Figure 10

Les sites industriels français de transformation des métaux : leur localisation et leurs activités.

trouve un petit peu de tantale radioactif, donc il faudra prévoir la gestion.

4.2. Les fournisseurs de matières premières critiques

Il y a donc une forte dépendance vis-à-vis d'une part des pays qui possèdent les ressources en matières premières, mais aussi vis-à-vis des pays qui les transforment (*Figure 12*). C'est le cas de la Chine qui, par sa géographie mais aussi par sa géologie, dispose non seulement des terres rares mais aussi de très nombreuses autres ressources stratégiques, et est aujourd'hui le principal producteur au monde de la quasi-majorité des métaux dont nous avons besoin, ce qui pose certains risques géopolitiques. Prenons aussi l'exemple actuel de la Russie qui est un acteur

majeur en matière de production de platinoïdes¹⁰, qui sont entre autres des catalyseurs essentiels pour notre industrie chimique, et servent aussi pour abaisser les émissions des véhicules thermiques.

Cette dépendance pose donc des enjeux dès lors que les relations avec les pays avec qui on était relativement amis peuvent changer.

4.3. Matrice de criticité

Ces difficultés nous ont amenés à construire une matrice de criticité (*Figure 13*), qui prend en compte les risques d'approvisionnement et l'impact économique.

Un certain nombre de critères ont été retenus pour construire

10. Correspond aux métaux présents dans un gisement de platine.

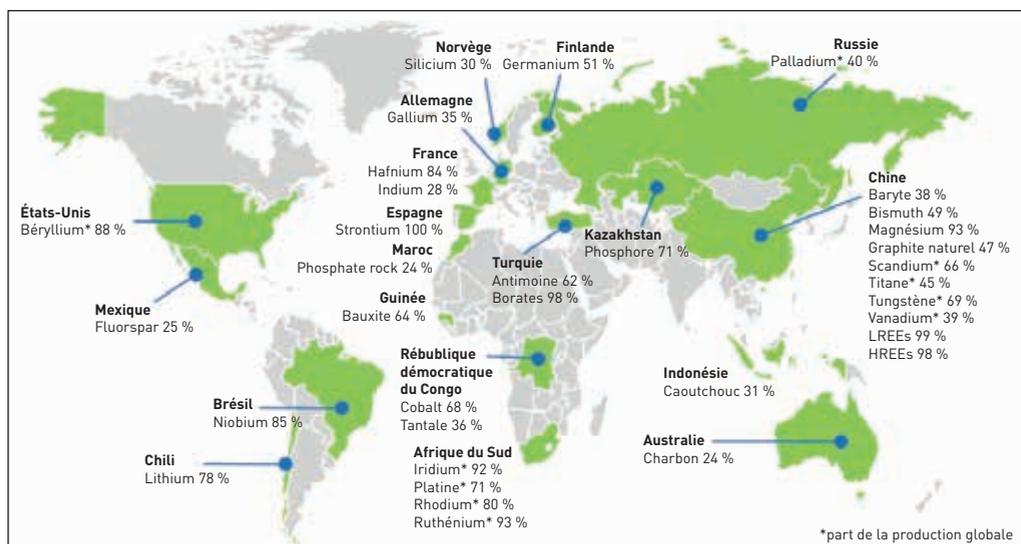


Figure 12

Principaux fournisseurs de matières premières critiques à l'Union européenne.

Source : Rapport de la Commission européenne sur l'évaluation de la criticité en 2020.

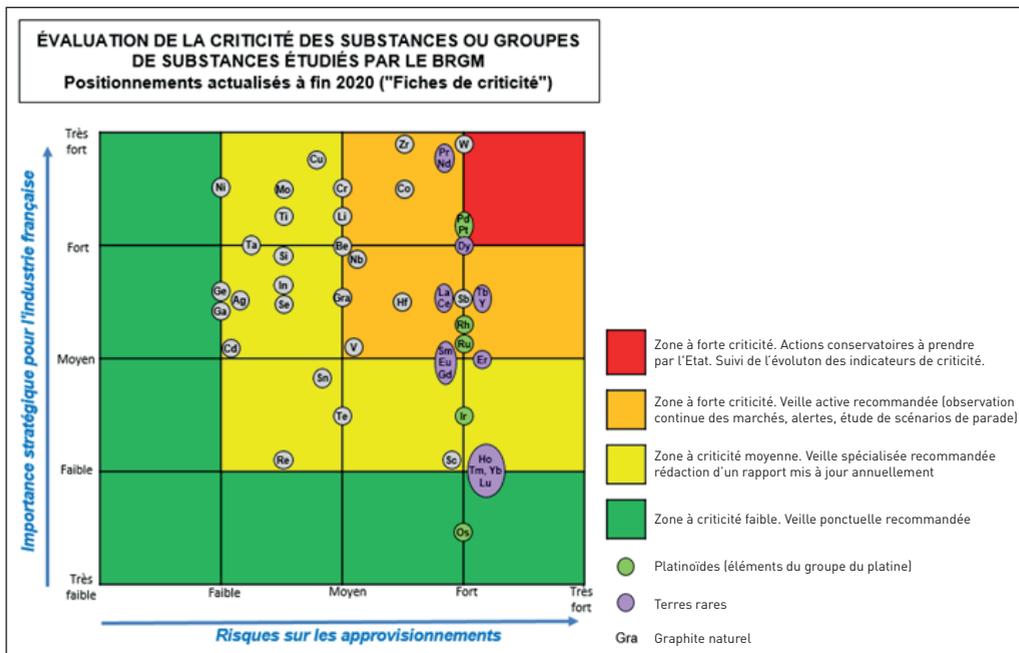


Figure 13

Matrice de criticité, prenant en compte l'importance stratégique pour l'industrie française et les risques sur les approvisionnements.

Source : BRGM.

cette matrice qui est régulièrement mise à jour :

- les usages et la consommation ;
- la production ;
- le potentiel et le recyclage ;
- les potentiels de substitution ;
- les prix et évolutions réglementaires et sanitaires ;
- les ressources géologiques ;
- les filières industrielles nationales : il est important de travailler avec les comités stratégiques de filière, afin de définir quels sont leurs besoins et quels sont les usages qui sont faits de ces matériaux dans les différentes filières industrielles, afin d'établir une hiérarchie qui permet de voir où se trouve l'exposition au risque pour l'État ;
- la situation du commerce international.

Cette matrice de criticité (Figure 13) met en évidence aujourd'hui un risque majeur pour quelques métaux, notamment les platinoïdes, les terres rares, le dysprosium qui figurent dans l'angle en bas du carré rouge. Le tungstène est aussi fortement exposé : l'industrie du tungstène est encore présente en France, son usage est assez important dans notre industrie mais aussi dans ses applications dans notre vie quotidienne : c'est le cas par exemple des forêts en carbure de tungstène utilisés notamment pour les perceuses.

Les matrices de criticité sont variables et ce n'est pas une spécificité française. La matrice de criticité de l'Union européenne (Figure 14) diffère de la matrice française puisque les usages et les enjeux au niveau européen

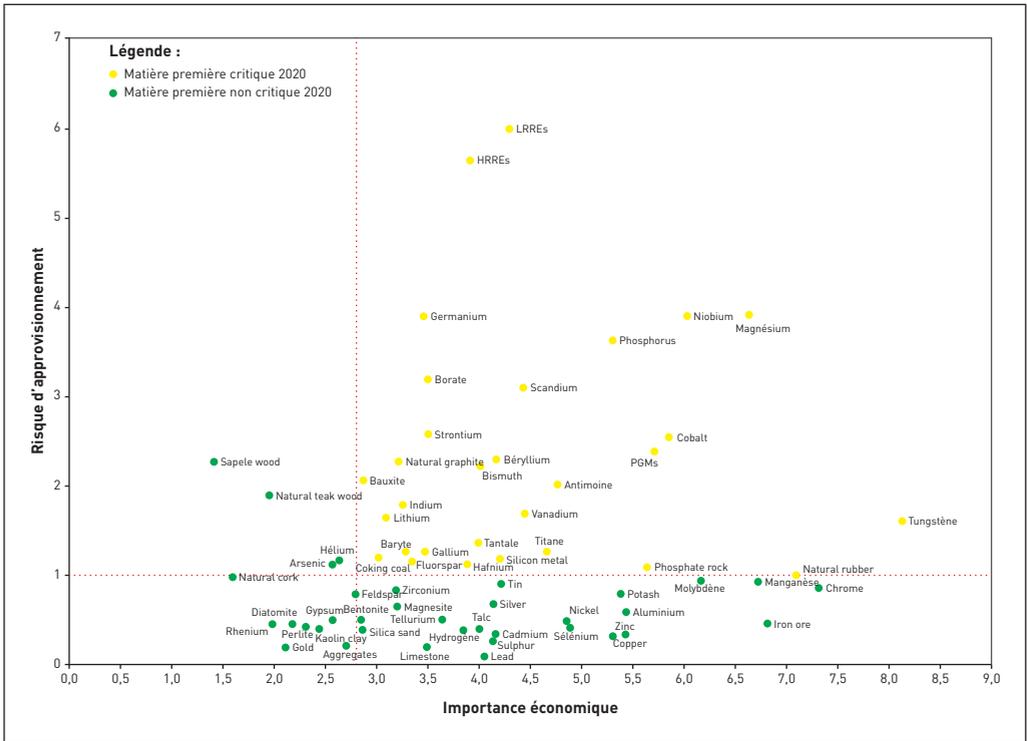


Figure 14
 Matrice de criticité de l'Union européenne.

Source : Commission européenne.

sont différents. Par exemple dans le cas du tungstène, pour l'Europe, il y a une forte importance économique mais le risque est relativement faible, alors que pour la France le tungstène était tout en haut

des risques et de l'importance pour nos approvisionnements. On voit qu'en fonction du pays ou de la zone où l'on se situe, l'enjeu peut varier selon la matière prise en considération.

Conclusion : matières premières critiques au niveau mondial

Pour conclure, examinons la production mondiale de matières premières critiques (**Figure 15**) qui montre l'importance que certains pays peuvent avoir en matière d'approvisionnement pour l'industrie. Sur l'ensemble de ces matières premières critiques identifiées par l'Union européenne, cette figure montre le poids considérable que peut avoir la Chine ou

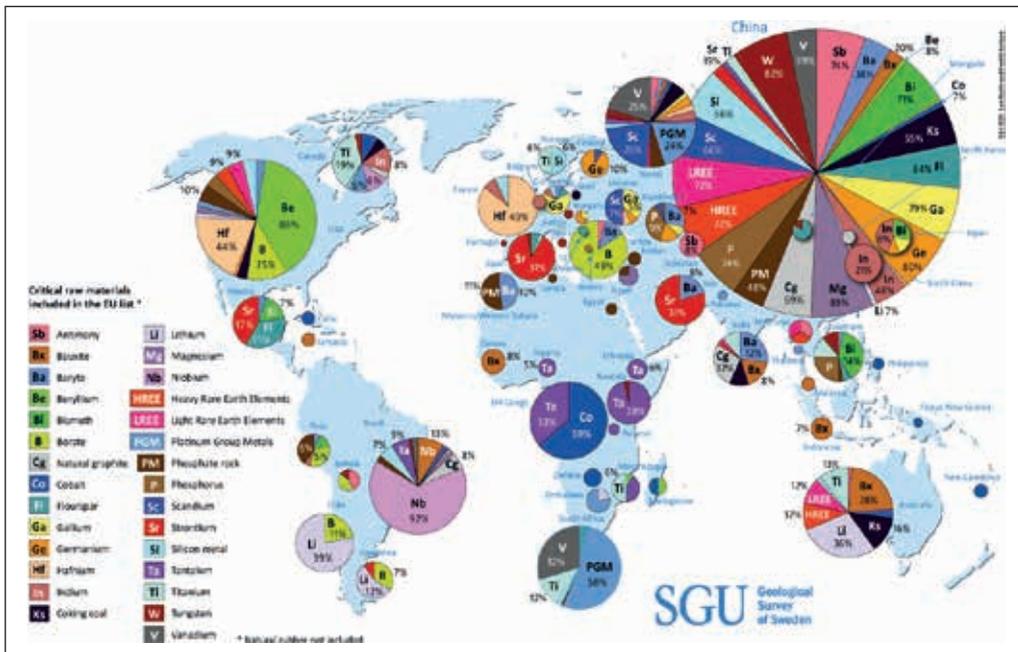


Figure 15

Production mondiale de matières premières critiques, selon l'UE.

Source : Service géologique de Suède.

d'autres pays. Ces éléments sont forcément à prendre en compte pour nos stratégies de sécurisation mais aussi pour la mise en place de la diversification de nos approvisionnements afin de ne pas dépendre d'un seul pays, qui, lorsque l'on est en moins bons termes avec celui-ci, peut mettre à mal nos approvisionnements et perturber profondément notre économie et notre vie quotidienne.

Quels matériaux pour les transitions énergétiques et digitales ?

Alexandre NOMINÉ

Alexandre NOMINÉ

Institut Jean Lamour – École des Mines de Nancy, Université de Lorraine

Institut Jozef Stefan, Ljubljana, Slovénie

Laboratoire lorrain d'Informatique et Applications (LORIA), Université de Lorraine/INRIA

1 Introduction

Les historiens ont pour habitude de décrire différentes périodes de la Préhistoire en leur associant les matières prédominantes découvertes puis utilisées. On parle d'âge de pierre, puis d'âge du bronze, puis du fer. Cette classification n'est plus utilisée pour définir les périodes de l'Histoire en raison du fait que l'on associe à différentes périodes des avancées qui peuvent être intellectuelles (l'écriture est associée à l'Antiquité) ou politiques (la fin du Moyen Âge est définie par, soit la chute de Constantinople en 1453, soit la découverte de l'Amérique en 1492). De plus, il aurait été caduc d'associer

des matériaux à des périodes de l'Histoire en raison des décalages conséquents qui pouvaient exister entre les civilisations dans leur appropriation de certains matériaux ou certaines techniques. On notera en effet que la sidérurgie chinoise a longtemps possédé plusieurs siècles d'avance sur la sidérurgie européenne. Il est en revanche communément admis qu'une ère industrielle a démarré entre la fin du XVIII^e siècle et le courant du XX^e siècle pour toute l'Humanité. Cette nouvelle ère est liée à une invention technologique majeure : la machine à vapeur.

Développée par James Watt entre 1763 et 1788, cette

machine permet de transformer la chaleur générée par la combustion du charbon en mouvement, c'est-à-dire, dans le langage de la thermodynamique, en travail. La machine à vapeur est à l'origine de nombreuses innovations dans le domaine du transport (les navires à vapeur, le chemin de fer, l'automobile) qui ont contribué à réduire les distances temporelles entre les différents points du Globe.

On ne mesure que trop peu à quel point la révolution industrielle a marqué un tournant majeur dans l'histoire de l'humanité, et ses effets se font encore sentir aujourd'hui. Sur le plan sociétal, la révolution industrielle a entraîné d'importants changements dans l'organisation de la société. Les populations rurales ont afflué vers les villes pour travailler dans les usines, ce qui a donné naissance à une classe ouvrière urbaine. Les conditions de travail dans les usines étaient souvent difficiles, avec de longues heures de travail et des salaires bas, ce qui a conduit à l'émergence d'un mouvement ouvrier et à la lutte pour de meilleures conditions de travail. On ne parlerait pas de communisme ou de capitalisme sans cette révolution industrielle.

Aujourd'hui, nous sommes à l'aube d'une ère nouvelle qui devra voir nos sociétés diminuer, voire cesser leur dépendance aux énergies fossiles. La difficulté principale vient de l'exceptionnelle concentration d'énergie contenue dans les énergies fossiles. En effet, un simple litre d'essence contient suffisamment d'énergie pour déplacer une

masse d'une tonne (voiture) sur une distance de 10 km. Le plein de kérosène d'un avion correspond à une injection de puissance comparable à celle d'une centrale nucléaire. Ces deux exemples donnent une idée de la difficulté de la tâche à accomplir en termes de puissance énergétique « verte » à déployer pour réaliser la transition énergétique.

La question de l'énergie *stricto sensu* ne doit cependant pas oblitérer la question des matières premières. Déjà à l'ère du pétrole, les entreprises et les nations ont développé des politiques de sécurisation des approvisionnements en pétrole et en gaz afin d'assurer leur prospérité. La transition énergétique ne changera pas fondamentalement cette approche. En effet, nous allons voir dans cet article que la transition énergétique va engendrer une demande croissante en matériaux, principalement des métaux, qui nécessitera donc une sécurisation des approvisionnements. Cela pose bien entendu la question de la rareté de certains métaux, mais également celle du lieu, des conditions et du volume de production de ces métaux par l'industrie minière. Nous verrons également que l'extraction minière, indispensable à la transition énergétique, n'est pas une industrie neutre tant d'un point de vue environnemental que sociétal. Cet article ne doit en aucun cas alimenter l'éco-anxiété, car les constats qui y sont faits doivent au contraire stimuler les initiatives lucides et réalistes pour faire de la transition énergétique un succès.

2 Une question de transformation d'énergie

Richard Feynman, célèbre physicien, théoricien et lauréat du prix Nobel, a abordé la difficulté d'expliquer la nature de l'énergie dans ses cours de physique. Il a souligné que bien que l'énergie soit un concept fondamental en physique, il est extrêmement difficile de donner une définition claire et précise de ce qu'elle est réellement (« Il est important de réaliser que, en physique, aujourd'hui, nous n'avons aucune connaissance de ce que l'énergie est.¹ »). Il a souligné que l'énergie est une grandeur abstraite qui ne peut être directement mesurée, mais seulement observée à travers ses effets sur d'autres objets ou systèmes. Richard Feynman a expliqué que l'énergie peut prendre différentes formes, comme l'énergie cinétique, l'énergie potentielle, l'énergie thermique, l'énergie électrique, etc.

À la lumière de la phrase de Richard Feynman, prenons un peu de recul pour comprendre les phénomènes et constantes de temps sous-jacents à l'utilisation des énergies fossiles. En présence de carbone et d'oxygène, et dans les conditions de pression et de température de la Terre, la molécule la plus stable est normalement le CO_2 . Cependant, en présence de lumière, le processus peut être inversé. C'est ce que l'on appelle la photosynthèse qui réduit le CO_2 . La photosynthèse

est un processus vital réalisé par les plantes, les algues et certains organismes photosynthétiques. Grâce à la lumière du soleil et à la présence de chlorophylle, ces organismes captent l'énergie lumineuse et utilisent le CO_2 atmosphérique pour synthétiser des glucides, comme le glucose, en libérant de l'oxygène. Cette conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique stockée dans les molécules organiques est essentielle pour la vie sur Terre.

Lors de la décomposition des végétaux, ou lors de feux, tout ou partie du carbone contenu dans les végétaux est retransformé en CO_2 . Cependant, ce processus peut être interrompu lorsque des végétaux meurent et se déposent dans des environnements favorables à leur conservation, tels que des marécages, des lacs ou des océans. Au fil du temps, ces matières organiques sont soumises à des pressions et des températures élevées, provoquant leur transformation en combustibles fossiles tels que le gaz naturel, le charbon et le pétrole. Ce piégeage des végétaux et la formation de ces combustibles fossiles sont des processus qui prennent plusieurs millions d'années.

De nos jours, nous extrayons ces matières premières fossiles, principalement pour les brûler et ainsi restituer leur énergie chimique par combustion. Ce processus libère de la chaleur, ce qui transforme l'énergie chimique en énergie thermique. Cette énergie thermique peut être utilisée de différentes manières. Par

1. Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands [2013]. "The Feynman Lectures on Physics, vol. 1 for tablets", Basic Books.

exemple, dans un moteur à combustion interne, tel qu'un moteur à explosion, l'énergie thermique est convertie en énergie cinétique pour propulser des véhicules et permettre le transport.

L'énergie thermique issue de la combustion des combustibles fossiles peut également être utilisée dans des centrales électriques. Dans ces centrales, la chaleur est utilisée pour générer de la vapeur, qui fait tourner des turbines connectées à des générateurs électriques. Ainsi, l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique dans les turbines, puis en énergie électrique dans les générateurs.

Stricto sensu les énergies fossiles sont renouvelables dans la mesure où elles sont le fruit d'un processus cyclique. Le problème est que ce processus prend des millions d'années et que nous avons utilisé une bonne partie des réserves en quelques centaines d'années. Elles ne sont donc pas renouvelables à l'échelle de la vie humaine. De plus nous avons rapidement déstocké une grande partie du carbone que la croûte terrestre avait piégé, ce qui a mécaniquement fait augmenter le taux de CO_2 dans l'atmosphère. Aujourd'hui nous devons complètement repenser notre cycle d'utilisation de l'énergie en utilisant des sources qui sont renouvelables à l'échelle humaine. Voitures électriques, éoliennes, panneaux solaires, moteur à hydrogène font tous appel à des transformations de l'énergie, mais avec des technologies et des matériaux différents de ceux dont nous avons l'habitude à l'ère du

pétrole. Nous allons en voir les principes et surtout comprendre les besoins en métaux qu'impliquent ces transformations d'énergie.

2.1. Énergie mécanique et énergie électrique

Les équations de Maxwell fournissent un cadre mathématique pour comprendre les phénomènes électromagnétiques, y compris le transfert d'énergie entre les formes mécanique et électrique. Dans le cas d'une turbine, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique grâce à l'induction électromagnétique, découverte par Faraday et décrite par les équations de Maxwell. Lorsque les pales de la turbine tournent dans un champ magnétique variable, cela génère un flux magnétique changeant à travers les bobines de cuivre entourant les pales.

Selon la loi de Faraday, cette variation du flux magnétique induit une force électromotrice dans les bobines, ce qui génère un courant électrique. Ainsi, l'énergie mécanique initiale des pales est transformée en énergie électrique utilisable. Ce processus est utilisé dans les centrales électriques, où une turbine est entraînée par différentes sources d'énergie, telles que la vapeur, l'eau ou le vent, pour produire de l'électricité.

Inversement, dans un moteur électrique, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique. Lorsqu'un courant électrique est fourni aux bobines situées dans un champ magnétique créé par

des aimants permanents, la loi de Lorentz indique qu'une force est exercée sur les bobines, les faisant tourner (Figure 1). Cela entraîne un mouvement rotatif de l'arbre mécanique du moteur, qui peut être utilisé pour accomplir un travail utile, comme faire tourner les roues d'une voiture ou faire fonctionner des machines industrielles.

La contribution de Nikola Tesla est essentielle dans cette compréhension et cette application. Tesla a développé le système de courant alternatif (AC), qui a révolutionné la production et la distribution d'électricité. Grâce au courant alternatif, il a été possible de générer et de transporter efficacement l'électricité sur de longues distances. Cela a permis d'alimenter les turbines des centrales électriques à distance, en transformant l'énergie mécanique en énergie électrique pour la distribution.

En termes de matériaux, cela signifie donc que nous avons besoin de faire passer du courant dans des bobines avec le moins de pertes possible d'une part, et d'un champ magnétique d'autre part. Nous allons donc avoir besoin d'un volume conséquent de matériaux conducteurs au premier rang desquels on trouve le cuivre. Le cuivre est parfois substitué par l'aluminium, bien que cette option soit peu utilisée dans le cas des moteurs électriques en raison de problèmes d'encombrement (l'aluminium étant moins conducteur, il faut une section de fil plus grande pour assurer la même conduction). Concernant la génération d'un champ magnétique,

elle peut se faire soit à l'aide d'autres bobines, soit à l'aide d'aimants. Historiquement, le matériau de prédilection pour les aimants était le fer. Cependant, dans les années 1980, les chercheurs ont découvert des matériaux permettant de générer une énergie magnétique bien supérieure. Ces matériaux, tels que le SmCo (Samarium Cobalt), NdFeB (Néodyme-Fer-Bore, auxquels on peut ajouter du Praséodyme ou du Dysprosium), nécessitent l'utilisation de terres rares. On voit donc le choix qui se présente entre, d'une part l'utilisation d'aimants qui offrent un champ magnétique à coût énergétique nul mais nécessitant des matériaux critiques et, d'autre part, l'utilisation de

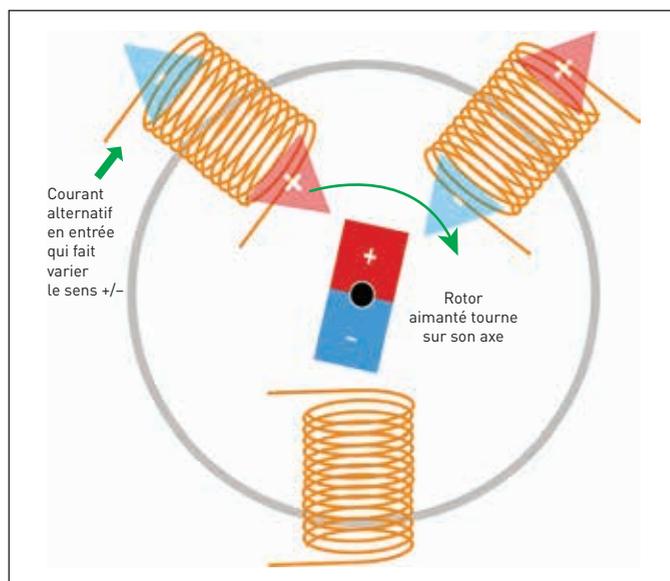


Figure 1

Schéma simplifié d'un moteur électrique.

Source : www.fiches-auto.fr : <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-730-fonctionnement-d-un-alternateur.php>

bobines faites avec des matériaux moins critiques mais qui nécessitent une alimentation en énergie.

2.2. Énergie chimique et énergie électrique

Le stockage d'énergie dans les batteries repose sur des réactions électrochimiques réversibles (réactions d'oxydo-réduction). Les batteries utilisent des matériaux d'intercalation pour stocker et libérer des ions chargés, ce qui permet de stocker l'énergie chimique sous forme électrique.

Les batteries rechargeables, telles que les batteries lithium-ion (**Figure 2**), sont basées sur des matériaux d'intercalation. Lors de la charge, des ions, généralement des ions lithium, sont insérés dans une structure cristalline du matériau

d'intercalation, ce qui génère un courant électrique et stocke l'énergie. Lors de la décharge, les ions sont libérés de la structure cristalline, fournissant ainsi un courant électrique et libérant l'énergie stockée.

Les matériaux d'intercalation jouent un rôle clé dans le stockage d'énergie efficace des batteries. Ils doivent avoir une structure cristalline stable capable d'absorber et de libérer les ions de manière répétée sans subir de dommages. De plus, ils doivent avoir une conductivité électrique suffisante pour permettre un transfert rapide des ions et des charges électriques.

Certains exemples courants de matériaux d'intercalation comprennent les oxydes métalliques, les sulfures, les phosphates et les polymères conducteurs. Les matériaux d'intercalation à base de

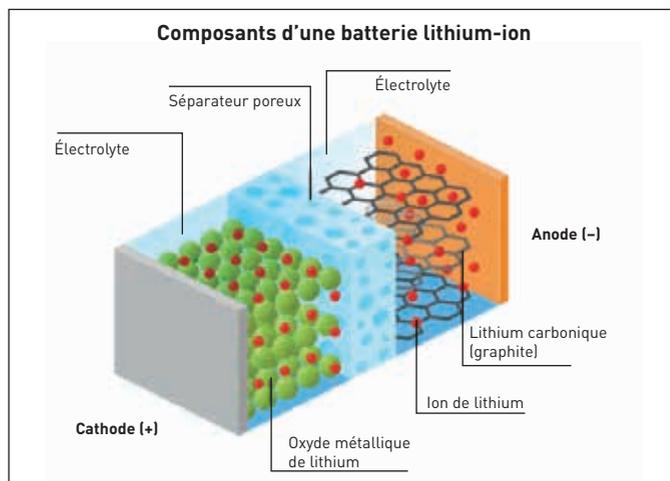


Figure 2

Schéma simplifié d'une batterie.

Source : Parlons Science. Les composants d'une batterie lithium-ion. © 2019 Parlons sciences, à partir d'une image de ser_igor sur iStockphoto.

lithium, tels que les oxydes de cobalt, de nickel et de manganèse, sont largement utilisés dans les batteries lithium-ion en raison de leurs propriétés électrochimiques favorables.

L'utilisation de l'hydrogène est également une question de transformation de l'énergie chimique en énergie électrique. En effet, le dihydrogène H_2 n'est pas une molécule stable en présence d'oxygène car celle-ci se transforme en eau H_2O . Pour produire du dihydrogène, il faut donc « casser » (réaction de réduction) une molécule contenant des atomes d'hydrogène. Parmi ces molécules, on a donc l'eau, le méthane CH_4 , l'ammoniac NH_3 ou des molécules plus complexes issues de la biomasse. C'est cette molécule d'origine qui a donné la classification par couleur de l'hydrogène qui, en tant que molécule, n'a pas réellement de couleur. L'hydrogène gris et l'hydrogène bleu sont produits par reformage à la vapeur à partir respectivement du charbon ou du gaz. Cette réaction émet donc du CO_2 , qui, dans le cas de l'hydrogène bleu, peut être stocké géologiquement dans d'anciennes « poches » de gaz naturel ou de pétrole vides (séquestration géologique). Lorsque l'hydrogène est produit à partir d'eau, il est qualifié d'hydrogène vert. Dans ce cas, la réaction de réduction se fait sous l'effet d'un courant électrique (électrolyse) (Figure 3). Le réactif est l'eau et les produits de la réaction sont le dioxygène d'une part O_2 et le dihydrogène d'autre part H_2 . Ce procédé n'émet donc pas de CO_2 et au contraire émet du dioxygène.

Il faut cependant bien comprendre que l'hydrogène n'est pas une énergie en soit. C'est un vecteur énergétique, en d'autres termes, une manière de transporter de l'énergie. En effet, réduire des molécules stables demande de l'énergie, car on éloigne le système de l'état d'équilibre. Le dihydrogène porte donc de l'énergie chimique car il est réactif. L'hydrogène peut ensuite être transporté et utilisé et ainsi restituer de l'énergie, souvent sous forme électrique. On effectuera alors la réaction inverse à celle de la réduction par électrolyse, c'est-à-dire une oxydation. Puisqu'il aura fallu un courant (un flux d'électron) pour réduire la molécule d'eau en H_2 et O_2 , un courant pourra être récupéré lors de la réaction entre le H_2 et le O_2 qui reformera de l'eau. C'est le principe de la pile à combustible.

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est donc basée sur un cycle électrochimique et nécessite de l'électricité. Il est également important de noter que le réel impact positif de l'hydrogène vert pour l'environnement dépend de la nature de l'électricité utilisée. Si celle-ci provient de sources fossiles, alors le gain environnemental est nul, voire négatif en raison d'un rendement des réactions qui n'est pas parfait. En revanche, l'hydrogène est vu comme une manière de stocker l'énergie produite à partir d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne qui ont le défaut d'être intermittentes et dont les lieux de production peuvent être éloignés

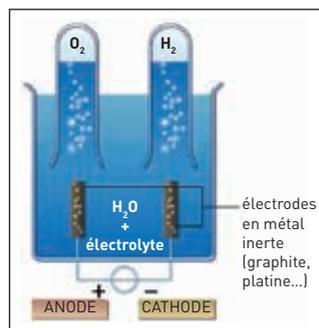


Figure 3

Réaction d'électrolyse de l'eau permettant la production de dihydrogène.

Source : Larousse. © Larousse/ J. Pajoues (https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/%C3%89lectrolyse_de_l%20%80%99eau/1313208#:~:text=L.%C3%A9lectrolyse%20de%20l'eau,interm%C3%A9diaire%20d'un%20g%C3%A9n%C3%A9rateur.)

des lieux de consommation (ex. : déserts). Le Chili, pays de plus de 4 000 km de long, possède un fort potentiel de production d'énergie solaire au nord (désert d'Atacama) et éolienne au sud (Patagonie) qui sont cependant éloignés de plusieurs centaines, voire de milliers de kilomètres, des zones de consommation. Un transport par câbles serait coûteux en infrastructures et générerait également des pertes importantes. Le pays développe un plan ambitieux de génération d'hydrogène à partir d'électricité verte qui pourra ensuite être transporté par pipeline ou par bateau dans la région centrale du pays, voire exporté.

Le second défi de l'hydrogène réside dans l'efficacité du procédé. Comme tout cycle chimique, une barrière énergétique doit être dépassée. Celle-ci est élevée dans le cadre de l'eau (ce qui explique sa stabilité). Pour améliorer

le rendement de la réaction, on doit utiliser des catalyseurs pour accélérer la réaction et abaisser la barrière énergétique. Ces catalyseurs sont principalement des platinoïdes (platine, ruthénium, iridium, etc.) qui sont des matériaux rares et chers. Il y a aujourd'hui une réelle interrogation quant à la disponibilité de ces ressources et c'est pourquoi des matériaux alternatifs sont actuellement recherchés (ex. : alliages de haute entropie).

2.3. Énergie lumineuse et énergie électrique

La conversion entre lumière et électricité a été expliquée théoriquement par Einstein en 1905 et lui a valu le prix Nobel de Physique en 1921 pour la découverte de l'effet photoélectrique. Selon sa théorie, lorsque les photons frappent la surface d'un matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de ce matériau. Ce concept est au cœur du principe physique d'une cellule photovoltaïque (**Figure 4**), mais n'est possible qu'en présence d'un type particulier de matériaux : les semi-conducteurs. Pour comprendre l'importance des semi-conducteurs, il convient d'expliquer la spécificité de ces matériaux.

Dans un matériau cristallin, les atomes sont arrangés de manière périodique, formant une structure régulière. Les électrons des atomes peuvent se déplacer à travers le matériau, et leur comportement est décrit par les niveaux d'énergie permis. La théorie des bandes considère ces niveaux d'énergie permis sous forme

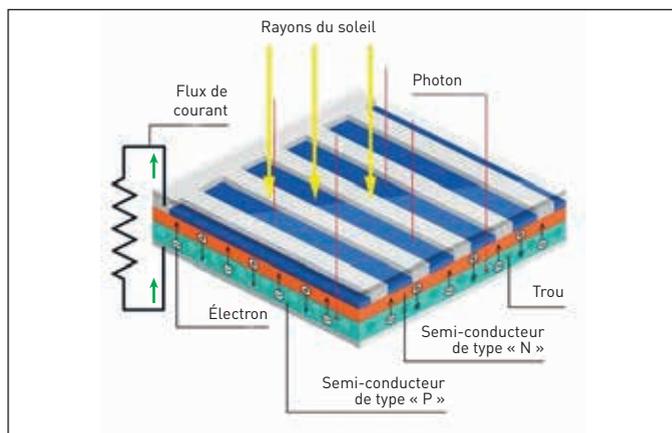


Figure 4

Schéma simplifié d'une cellule solaire photovoltaïque.

Source : monkitsolaire <https://www.monkitsolaire.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-n307>

de « bandes d'énergie ». Les bandes d'énergie sont des plages d'énergies possibles pour les électrons à l'intérieur du matériau. Elles sont formées par la superposition des niveaux d'énergie des atomes voisins.

Les deux bandes d'énergie les plus importantes sont la bande de valence et la bande de conduction. La bande de valence contient les niveaux d'énergie occupés par les électrons liés aux atomes et ne contribuant pas à la conductivité électrique du matériau. La bande de conduction, quant à elle, contient les niveaux d'énergie non occupés par les électrons et qui sont disponibles pour la conductivité électrique.

La bande interdite, également appelée « gap » d'énergie, est la plage d'énergie interdite aux électrons entre la bande de valence et la bande de conduction. Dans un matériau isolant, cette bande interdite est relativement large, ce qui signifie qu'il faut fournir une quantité importante d'énergie pour qu'un électron puisse passer de la bande de valence à la bande de conduction. En conséquence, les matériaux isolants ont une faible conductivité électrique.

En revanche, dans les matériaux conducteurs, la bande interdite est partiellement ou complètement remplie, ce qui signifie que les électrons peuvent facilement passer de la bande de valence à la bande de conduction et contribuer à la conductivité électrique. Les semi-conducteurs se situent entre les matériaux isolants et conducteurs. Leur bande

interdite est plus étroite que celle des isolants, ce qui permet aux électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction avec une certaine quantité d'énergie.

Or pour beaucoup de matériaux semi-conducteurs, cette énergie du gap est comparable à celle des photons émis par le soleil. Le soleil émet des photons dont la longueur d'onde va de 300 à environ 2 500 nm, soit en unité d'énergie de 0,5 à 4,1 eV (électronvolt). Dans le cas d'un matériau isolant tel que l'alumine (Al_2O_3), cette énergie de gap s'élève à 7 eV et la lumière du soleil ne peut donc contribuer à faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. En revanche, le gap du silicium est de 1,14 eV, ce qui signifie qu'une partie conséquente des photons du spectre solaire ont une énergie suffisante pour faire passer certains électrons de la bande de valence à la bande de conduction.

Une fois que le photon a transféré son énergie à un électron de la bande de valence, celui-ci est transféré à la bande de conduction et laisse un trou – c'est-à-dire une énergie positive – dans la bande de conduction. On appelle cela la génération de paire électron-trou. Pour générer un courant, il faut désormais séparer ces charges. Pour cela, il faut créer une interface entre deux régions de semi-conducteurs distinctes, le matériau de type p (p pour « positif ») et le matériau de type n (n pour « négatif ») qui sont tous deux des semi-conducteurs. La région de type p (dopée positivement) et la région de

type n (dopée négativement) du semi-conducteur sont en contact, créant une interface. Cette jonction permet de séparer les charges positives et négatives. C'est la jonction p-n qui crée un champ électrique interne dans le semi-conducteur. Le champ électrique dirige les électrons libérés vers la région n et les trous vers la région p, créant ainsi un déséquilibre de charges. Des contacts métalliques sont placés aux extrémités de la cellule photovoltaïque pour collecter les électrons et les trous séparés. Les électrons sont collectés par la couche de contact métallique à la région n, tandis que les trous sont collectés par la couche de contact métallique à la région p. Ce flux de charges crée un courant électrique.

Pour créer des cellules photovoltaïques, il faut donc un empilement de plusieurs matériaux semi-conducteurs qui permettent la génération de porteurs de charge électriques libres et des matériaux métalliques pour les transporter. Parmi les semi-conducteurs, le plus répandu est le silicium. On notera cependant qu'il existe d'autres matériaux tels que le CdTe (Cadmium Tellure), le CIGS (Cuivre Indium Galium Sélénium), le GaAs (Arséniure de Galium)... Le choix de ces matériaux correspond au fait que le maximum théorique d'efficacité d'une cellule photovoltaïque s'établit à un rendement de 33,7 % pour un matériau dont le gap d'énergie est de 1,34 eV.

Le fait qu'il existe un rendement maximal s'explique facilement par le fait que tout

photon d'énergie inférieure au gap ne va pas permettre de faire passer un électron dans la bande de conduction. Ces photons seront donc « perdus ». Prenant comme exemple le silicium, tous les photons solaires d'une énergie comprise entre 0,5 et 1,14 eV seront perdus. D'un autre côté, l'énergie récupérable par une transition de la bande de valence à la bande de conduction sera égale à celle du gap, même si le photon incident possède une énergie supérieure. En d'autres termes, lorsqu'un photon de 2 eV arrive à la surface du silicium, il permettra de générer une énergie électrique de 1,14 eV, le reste de l'énergie étant perdue lors des transferts intra-bande (souvent en échauffement thermique). Un optimum s'établit donc et il a été établi par l'équation de Shockley-Quessier. Cette limite peut être dépassée en créant plusieurs jonctions dont les gaps sont différents et permettent de transformer une plus large portion du spectre solaire. Dans ce cas, la limite de Shockley-Quessier s'établira à 42 % pour une double jonction et 86 % pour une infinité de jonctions. Aujourd'hui le record absolu de conversion solaire s'établit à 47,6 % pour une cellule à quadruple jonction. Les cellules à multi-jonction restent cependant très onéreuses et réservées à des marchés de niche tels que le domaine spatial.

Concernant les électrodes métalliques, on utilisera des métaux tels que le molybdène ou l'argent. Dans certaines technologies, on pourra utiliser des couches minces de

matériaux métalliques tels que l'oxyde d'étain dopé à l'indium (ITO) ou au fluor (FTO) ou plus rarement l'oxyde d'aluminium dopé au zinc (AZO).

2.4. Des métaux pour l'énergie

À ce stade, nous avons donc vu que même si les sources d'énergies renouvelables existent, les transformer en électricité ne peut se faire sans l'utilisation de matériaux. La transition énergétique va donc générer une augmentation spectaculaire en métaux. Une étude récente de l'Université KU Leuven en Belgique estime que la demande en lithium va être multipliée par 21, celle du cobalt et du dysprosium par 4 d'ici 2030. On estime que l'électrification de nos sociétés va nécessiter d'extraire d'ici 30 ans autant de cuivre que depuis le début de l'Humanité. Le défi de la transition énergétique est donc lié à celui de la production et de l'utilisation des métaux.

3 Extraire les métaux

Dans la précédente section, nous expliquions que la constante de temps de la formation des ressources fossiles était sans commune mesure avec celle de la vie humaine. Malheureusement, la situation est encore pire dans le cas des métaux. Les métaux se sont formés sur Terre au cours de processus géologiques complexes sur de très longues périodes. Les éléments métalliques ont été créés lors de la nébuleuse solaire et certaines supernovæ. Lors de la formation de la Terre, les métaux se

sont regroupés principalement dans le noyau terrestre et se sont ensuite déplacés vers la croûte terrestre grâce à des processus géologiques tels que la tectonique des plaques et les activités hydrothermales. Les réactions chimiques entre les métaux et les fluides géologiques ont donné lieu à des réactions chimiques et à la formation de gisements minéraux riches en métaux. Ainsi, les métaux formés lors de la formation de la planète sont une ressource non renouvelable. Forts de nos erreurs lors de l'ère du pétrole, nous devons d'ores et déjà anticiper la forte demande en matériaux.

Il faut souligner que l'extraction de métaux n'est pas un procédé neutre à plusieurs points de vue. Tout d'abord il convient de rappeler que peu de métaux sont présents à l'état métallique (natif). C'est le cas de l'or et du platine, mais pas du fer ou de l'aluminium qui sont présents sous forme oxydée et souvent mélangés avec d'autres composés. Il faudra donc procéder à des opérations chimiques permettant de réduire les minerais pour obtenir du métal. Ces opérations émettent de grandes quantités de CO₂ et font parfois appel à de grandes quantités de produits toxiques. La production d'un kilo de fer ou d'aluminium, matériaux abondants dans la couche terrestre, émet respectivement 2 et 12 kg de CO₂. En conséquence, la production d'acier est responsable de 7 % des émissions de gaz à effet de serre. Un effort important de recherche est actuellement mené pour remplacer le charbon par l'hydrogène pour la production

de l'acier et en réduire ainsi les émissions. Les matériaux tels que l'or sont certes présents à l'état natif, mais en très faibles quantités dans les roches. Ainsi, la production d'un volume correspondant à une bouteille d'or nécessite d'extraire un volume équivalent à une piscine olympique de roches. Cela nécessite une quantité d'énergie extrêmement importante et on estime que l'empreinte CO₂ de la production d'un kilo d'or est de 50 tonnes de CO₂. L'industrie minière travaille actuellement à la réduction de l'impact carbone de l'extraction par l'électrification des procédés.

Au-delà des émissions, les conditions de sécurité dans lesquelles sont faites ces opérations d'extraction et de raffinage des métaux varient énormément d'un pays à l'autre. L'exploitation à bas coût économique des terres rares en Chine et au Myanmar s'est faite à un coût environnemental et social exorbitant. On pourrait également citer l'extraction du cobalt nécessaire aux batteries, qui se fait principalement en République démocratique du Congo qui est un État ravagé par les conflits armés. Ce dernier exemple illustre une crainte actuelle des entreprises et des États quant à la politisation des approvisionnements. En effet, avec le regain de tensions internationales, les États souhaitent diversifier leurs approvisionnements auprès de différents pays, voire acquérir une souveraineté sur ces approvisionnements. Cela nécessite une diplomatie des métaux critiques et des ouvertures de mines. Il

est cependant intéressant d'observer que malgré des prévisions de demande extrêmement élevée, et ce sur des temps longs, l'investissement dans l'extraction minière est au plus bas. Ceci est dû à un décalage entre la constante de temps de la demande (année) et celle d'une mine qui nécessite 10 à 15 ans avant d'ouvrir. Enfin, beaucoup d'investisseurs sont réticents à l'investissement dans le secteur minier en raison d'un risque réputationnel.

Il existe également un risque peu connu lié au fait que plus de la moitié des éléments du tableau périodique ne sont pas extraits pour eux-mêmes mais comme des sous-produits d'autres métaux. C'est par exemple le cas de l'indium (nécessaire aux panneaux solaires, aux écrans tactiles et à l'électronique) qui est un sous-produit du zinc. Cela signifie que l'offre en indium n'est pas corrélée à la demande en indium, mais à celle du zinc. Il y a donc des risques de flambée des cours en cas de décalage entre la demande en sous-produit et celle en métal hôte. Cela limite également la quantité de métal disponible et augmente le risque de pénurie.

Pour pallier tous les risques susmentionnés, le recyclage est souvent présenté comme une solution miracle. Le recyclage permet en effet de réduire l'empreinte carbone de manière substantielle (pour l'aluminium, on passe de 12 à 2,5 kg de CO₂ par kg de métal) et limite l'exposition aux risques sociaux, environnementaux et géopolitiques. Cependant, le taux

de recyclage n'atteint jamais 100 %. Il est de 40 % pour l'aluminium et quasiment nul pour les terres rares. Ces taux de recyclage sont dus au fait que le recyclage n'est pas toujours viable économiquement, qu'il dépend de la collecte et de la difficulté à séparer les métaux, par exemple dans l'électronique. Des progrès importants peuvent cependant être espérés dans les années à venir.

Il n'en demeure pas moins que l'on ne recycle les matériaux qu'à la fin de leur vie. En d'autres termes, les 11 millions de voitures électriques que l'Union européenne souhaite construire seront équipées de batteries neuves qui ne pourront provenir de matériaux recyclés faute de batteries usagées. Le recyclage est donc une solution absolument nécessaire mais pas suffisante.

Conclusion

La transition énergétique est liée à une augmentation de la demande en métaux. L'extraction de ces derniers n'est malheureusement pas neutre à différents points de vue. Pour réduire les risques liés à cette transition, quatre piliers apparaissent cruciaux : la limitation de l'impact de la mine, l'augmentation du recyclage, une consommation raisonnée et une recherche active dans la substitution des métaux critiques. Ces quatre chantiers sont parfois présentés comme différentes options possibles parmi lesquelles nous pourrions choisir. La réalité des chiffres montre qu'il ne s'agit pas d'un choix « à la carte », mais de chantiers qui devront être menés de front et de manière concomitante.

Dès la primaire, on apprend aux enfants qu'on « ne mélange pas les choux et les carottes » et qu'on n'additionne pas les joules avec les kilogrammes. Nous risquons pourtant d'être confrontés à ce type d'équations dans les années à venir. En effet nous allons devoir prendre en compte des paramètres d'une grande diversité lors de nos décisions. Comment considérer à la fois la réalité économique, géopolitique, environnementale, sociale dans la conception et

le choix de technologies vertes dont on attend qu'elles soient également performantes ? Il n'y a aujourd'hui aucun modèle permettant d'effectuer de tels choix et le scientifique, s'il peut aider à quantifier les différents risques, ne peut utiliser la science pour choisir entre les différentes options car il s'agit d'un choix de société. Cependant un tel débat nécessite une connaissance par le plus grand nombre des questions liées à la transition énergétique. Ce débat doit être éclairé d'arguments chiffrés et rationnels, loin des idéologies simplistes, afin que les sociétés puissent faire des choix en âme et conscience.

REMERCIEMENTS

Cette contribution fait partie du projet européen HERawS (*Highlights on Europe Raw Materials Sustainability*) qui rassemble l'Université de Lorraine, l'Université du Luxembourg, l'Université de Belgrade (Serbie), l'Institut Jozef Stefan (Ljubljana, Slovénie), l'Université Galatasaray (Istanbul, Turquie) et l'Université d'Alberta (Edmonton, Canada). Je remercie tous les membres de ce projet pour leurs contributions à cet article. Je remercie également la Fondation Mines Nancy pour son indéfectible soutien. Je remercie également la Société française des Matériaux et de la Métallurgie pour le soutien moral qu'elle m'a apporté par l'intermédiaire de la médaille Jean et André Rist. Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à la Fondation de la Chimie pour m'avoir donné l'opportunité de présenter ces travaux.

Partie 2

Les défis industriels

Importance des métaux et matériaux TIC pour le secteur des

Gilles DRETSCH est responsable de projets concernant l'efficacité énergétique et l'économie circulaire, à la Direction de l'Innovation d'Orange, essentiellement au service des réseaux fixes et mobiles de l'opérateur.

Ce chapitre est essentiellement centré sur les aspects économie circulaire, recyclage, et leur signification pour Orange. Quelques figures sont présentées en préliminaire pour montrer que ces aspects s'inscrivent dans notre démarche de responsabilité sociale d'entreprise (RSE).

Comme toutes les entreprises, nous avons des engagements vis-à-vis de la RSE. Le principal, celui qui nous occupe le plus aujourd'hui, c'est la réduction des émissions de gaz à effet de serre et notamment du CO₂ (**Figure 1**) qui se fait aussi au travers d'un recours accru aux énergies renouvelables

et de l'amplification du programme d'économie circulaire, et, je rajouterais, même d'éco-conception. Nous avons aussi pris des engagements de réduction d'émissions de CO₂ sur les émissions indirectes.

Dans le cadre de notre nouvelle stratégie, qui a été annoncée en février 2023 après le colloque, ces objectifs ont été légèrement modifiés :

Le Groupe Orange poursuit son programme de réduction des émissions de CO₂ pour diminuer de plus de 30 % les émissions sur les scopes 1 et 2 en 2025 (base 2015) et prend l'engagement supplémentaire de réduire de 45 % ses émissions sur les scopes 1, 2 et 3 d'ici 2030 (base 2020).

1. TIC : Technologie de l'information et des communications.

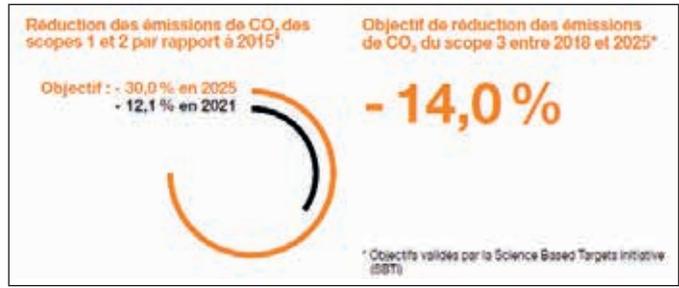


Figure 1

Objectifs de réduction des émissions de CO₂ pour Orange.

1 La démarche de responsabilité sociale d'entreprise d'Orange

1.1. La notion de scope

La notion de scope² est importante et surtout liée au carbone mais nous verrons plus loin son lien avec l'économie

2. Périmètre/Cadre.

circulaire. Cette notion de scope (Figure 2) est de plus en plus utilisée pour décrire les émissions des gaz à effet de serre des entreprises. Elle se décompose essentiellement en trois parties.

Le scope 1 concerne les émissions directes. Pour Orange, ce sont essentiellement les émissions de gaz à effet de serre dans nos bâtiments et

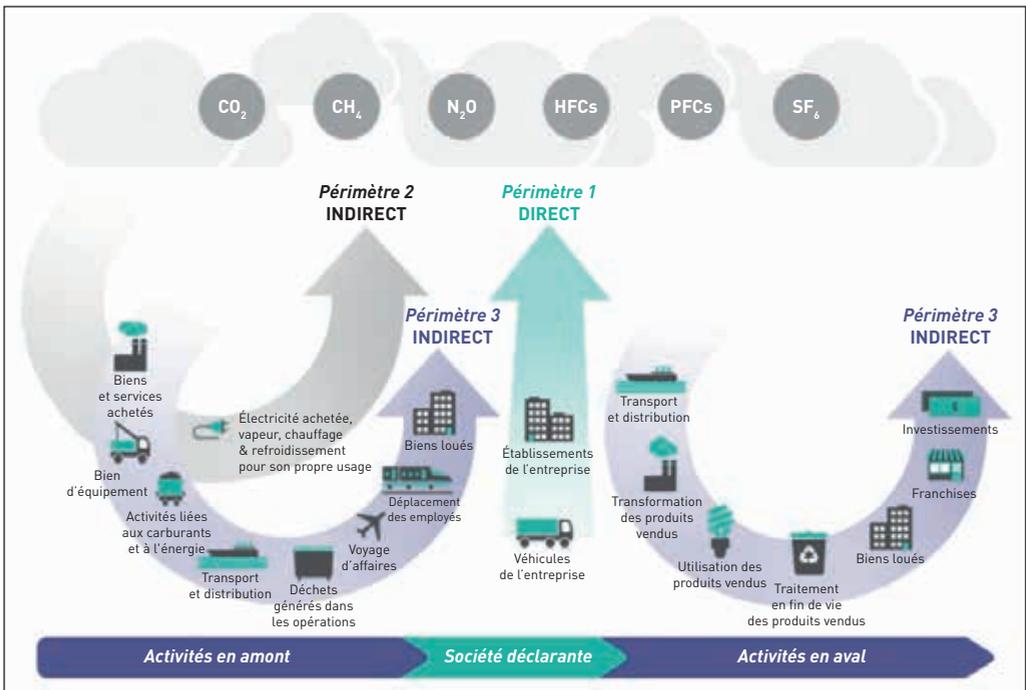


Figure 2

Les trois types de scopes et leurs origines.

dans notre flotte de véhicules thermiques.

Le scope 2, ce sont les émissions indirectes que nous maîtrisons partiellement : elles concernent les émissions de CO₂ de l'électricité que nous consommons, avec des mix carbonés qui sont assez différents car nous sommes opérateurs dans différents pays en Europe, en Afrique et au Moyen-Orient. Nous utilisons des mix carbonés qui sont exprimés en grammes de CO₂ par kWh, mais la France est par exemple très différente de la Pologne qui utilise un mix beaucoup plus carboné et c'est encore plus différent en Afrique.

Le scope 3, ce sont toutes les autres émissions indirectes qui concernent à la fois les émissions de CO₂ liées aux équipements achetés par Orange, mais aussi celles liées aux installations sur notre réseau ou à la vente à nos clients. Cela concerne aussi l'extraction des matériaux qui entrent dans la composition des équipements de réseau ou dans les smartphones,

la partie aval qui touche l'usage de ces équipements chez nos clients, et aussi les phases de fin de vie, de recyclage, et de traitement de ce que nous appelons nous les D3E c'est-à-dire les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques. Nous verrons que l'économie circulaire est très concernée par ce scope 3.

1.2. Le programme d'Orange de réduction des émissions CO₂

Notre programme pour réduire nos émissions de CO₂ est représenté **Figure 3**. Nous avons pour objectif d'être net zéro carbone en 2040, c'est-à-dire de réduire nos émissions de CO₂ d'environ 80 % par rapport à une base de 2015, et de compenser le reste au travers de puits de carbone. Avec cet objectif, nous optimisons l'architecture de nos réseaux en y développant aujourd'hui des fonctionnalités d'efficacité énergétique.

Il y a tout un débat autour de la consommation électrique de la 5G, cependant, globalement,

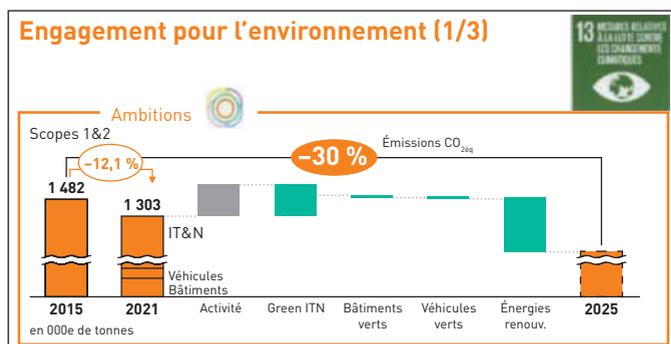


Figure 3

Programme d'Orange pour réduire ses émissions de CO₂

la 5G est plus efficace que les technologies antérieures pour la consommation du réseau d'accès mobiles. On adapte mieux la consommation des réseaux, notamment aux courbes de charge que l'on a sur ces réseaux. Nous faisons également du partage d'infrastructures avec d'autres opérateurs, nous appelons cette démarche du RAN-sharing³. De plus nous sortons du réseau les anciennes technologies qui étaient généralement davantage consommatrices d'électricité. Finalement, à fonctionnalité équivalente, la 2G consommait plus que la 3G qui consommait plus que la 4G qui consommait plus que la 5G. Nous essayons au travers de différents moyens d'augmenter la part d'énergies renouvelables dans notre mix énergétique (*Figure 4*), par exemple en solarisant les sites notamment dans les zones qui

3. Le RAN-sharing (Radio Access Network-sharing) ou le partage de réseaux mobiles correspond à la mise en commun entre plusieurs opérateurs de tout ou partie des équipements constituant leurs réseaux mobiles.

sont dans nos filiales en zone Afrique ou au Moyen-Orient. Nous avons aussi recours à ce qu'on appelle les PPA (les *Power Purchase Agreement*⁴) qui nous permettent d'acheter à un certain prix, sur une certaine période, de l'énergie avec des garanties d'origine renouvelable, à un producteur d'électricité sans passer par un fournisseur d'électricité. Ce sont des contrats qui sont très convoités par toutes les entreprises surtout dans le contexte actuel.

Avec l'économie circulaire, nous avons une démarche de recyclage et d'éco-conception (*Figure 5*). Qui dit éco-conception dit un travail important en amont avec nos fournisseurs pour que par exemple, les produits, que ce soient les téléphones portables ou les LiveBox, soient mieux éco-conçus. Par exemple, afin de

4. La vente directe d'électricité (*Power Purchase Agreement* en anglais) est un contrat passé par un producteur d'électricité, souvent d'origine renouvelable avec une structure qui la consomme directement, sans passer par un fournisseur d'électricité.

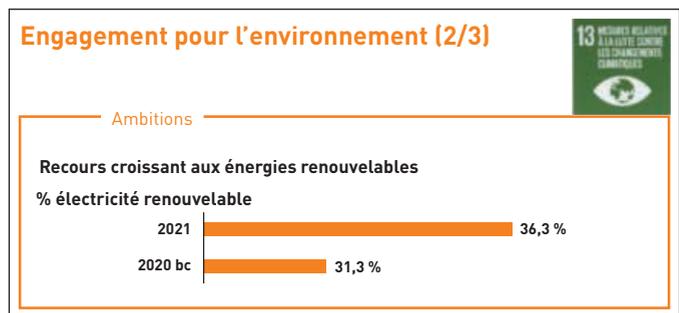


Figure 4

Programme d'Orange pour augmenter la part d'énergies renouvelables dans son mix énergétique.

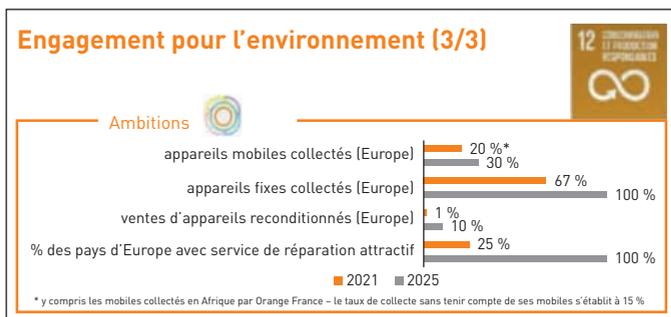


Figure 5

Programme d'Orange en faveur du recyclage et de l'éco-conception.

pouvoir reconditionner ces produits, il faut que les cartes électroniques se dévissent rapidement et facilement. Orange est un membre fondateur de l'initiative Eco Rating (Figure 6) qui est une sorte de notation que l'on donne à nos téléphones portables. Nous travaillons aujourd'hui avec 12 fournisseurs et aussi avec d'autres opérateurs.

Nous avons mis en place un programme de reconditionnement dans différents pays en termes de recyclabilité, de durabilité, d'exposition aussi aux métaux rares⁵ (Figure 7). Des ateliers de réparation se développent dans un certain nombre de pays où nous sommes présents, notamment en France, en Belgique ou en Pologne.

5. Les métaux rares, aussi appelés terres rares, sont une famille d'éléments chimiques composée de 17 métaux. Ceux-ci sont omniprésents dans l'industrie de pointe et les nouvelles technologies. On les retrouve dans la fabrication des composants électroniques, dans les ordinateurs et les smartphones mais aussi dans les batteries de véhicules électriques.

Notre scope 3, c'est-à-dire nos émissions indirectes, sont souvent les émissions directes de nos fournisseurs qui eux-mêmes ont déjà, comme Orange, pris des engagements sur leur scope 2 (Figure 8). La JAC, la Joint Alliance for CSR⁶, est un consortium d'opérateurs qui rassemble tous les grands opérateurs dont nos concurrents : par exemple Deutsche Telekom, Vodafone ou AT&T. Nous essayons notamment d'avoir des exigences communes et pas contradictoires vis-à-vis de nos fournisseurs dans ces domaines et nous favorisons également l'achat d'équipements reconditionnés dans nos appels d'offres.

Pour un opérateur comme Orange, aujourd'hui l'empreinte carbone (Figure 9) provient pour plus de 80 % environ de ce scope 3, et c'est

6. La Joint Alliance for CSR (Corporate Social Responsibility) est un regroupement d'opérateurs de télécommunications qui vise à vérifier, à évaluer et à développer la mise en œuvre de la durabilité dans les centres de fabrication des fournisseurs multinationaux impliqués dans l'industrie des TIC.

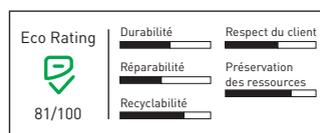


Figure 6

L'Eco Rating pour noter l'éco-conception des téléphones portables.



Figure 7

Programme de reconditionnement mis en place par Orange.



Figure 8

Objectifs d'Orange de réduction des émissions indirectes de CO₂ (scope 3).

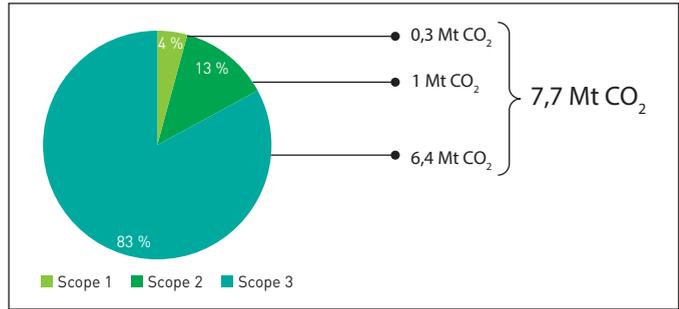


Figure 9

L'empreinte carbone d'Orange par scope.

ce que nous maîtrisons finalement le moins mais ce pour lequel nous essayons d'avoir une influence sur nos fournisseurs, ce qui est très important car les autres scopes ont un effet plus limité.

Si on regarde l'origine de l'empreinte carbone dans les différents scopes (Figure 10), dans le cas des émissions

directes des scopes 1 et 2, c'est l'électricité. Le scope 3 représente tout ce qu'on fait en termes d'interventions sur nos réseaux après la phase de fabrication, tous les équipements qu'on achète, tout ce qui concerne le recyclage par exemple qui est très important d'un point de vue environnemental mais qui aujourd'hui

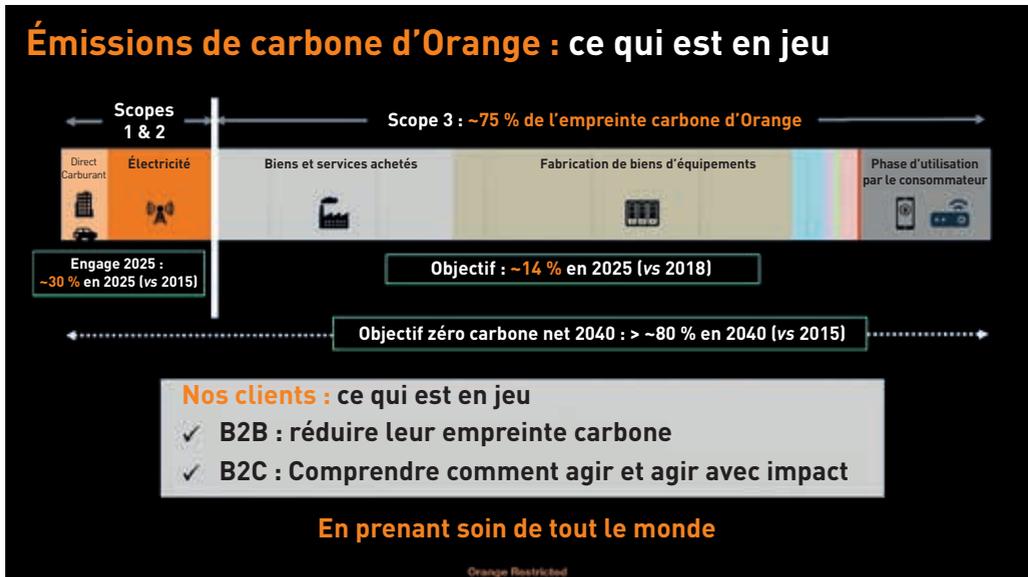


Figure 10

Décomposition détaillée de l'empreinte carbone d'Orange par scope et par cause.

Domaine du TIC	Types d'équipement	Exemples d'équipement
Sites TIC (incluant les centres de données, les OS et les NDN)	Équipement de télécommunications de réseau : équipement situé entre les limites des réseaux centraux et/ou d'accès et destiné à assurer la connexion à ces réseaux	<ul style="list-style-type: none"> • Équipement de transmission du cœur de réseau • Équipement de transmission du réseau d'accès • Stations de base
	Équipement de technologie de l'information : équipement fournissant des services de stockage, de traitement et de transport de données pour la distribution par l'équipement de télécommunications en réseau	<ul style="list-style-type: none"> • Commutateur de serveur • Routeurs matrices de disques • Robots de sauvegarde • Disques durs • Lecteurs à semi-conducteurs
	Fonction de surcharge	<ul style="list-style-type: none"> • PC fixes et ordinateurs portables • Moniteurs, écrans, imprimantes, scanners • Accessoires, autres périphériques
Infrastructure externe	Unité d'interface réseau : dispositif principal dans les locaux permettant à l'utilisateur d'accéder aux services fournis par le réseau d'accès par câble	<ul style="list-style-type: none"> • Points d'accès Wip • Unités radio • Antennes
Locaux du client	Équipement terminal	<ul style="list-style-type: none"> • Téléphones fixes • Boîtiers Internet • Boîtiers TV • Appareils connectés, y compris ceux destinés à l'IoT
Utilisateur	Équipement de l'utilisateur	<ul style="list-style-type: none"> • Téléphones mobiles • Ordinateurs portables • Tablettes et autres appareils connectés, y compris l'IoT

Figure 11

Exemples d'équipements du domaine des TIC.

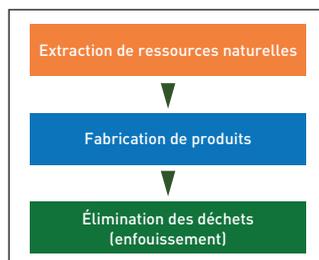
n'est pas très important en termes d'émissions de CO₂. Pour information, la **Figure 11** résume quelques types d'équipements qu'on peut rencontrer dans le domaine des TIC.

2 Comment lutter contre l'épuisement des ressources dans le domaine des TIC ?

2.1. Passage de l'économie linéaire à l'économie circulaire

Autrefois le modèle économique était très linéaire : on extrayait des ressources, on élaborait des équipements, on fabriquait des appareils qui étaient sortis du réseau ou abandonnés par les clients et après on en recyclait ce que l'on pouvait, souvent pas toujours très bien (**Figure 12**). Dans l'Union européenne, beaucoup d'efforts ont été

faits depuis un certain nombre d'années, notamment au travers de la directive DEEE, et on essaie aujourd'hui de passer vers un modèle circulaire via différentes phases (**Figure 13**). On va reconditionner les équipements, quand c'est possible extraire des pièces détachées notamment dans les équipements réseau, et puis, au bout du processus, comme il y a quand même des équipements qui vont être recyclés,


Figure 12

Modèle d'économie linéaire.

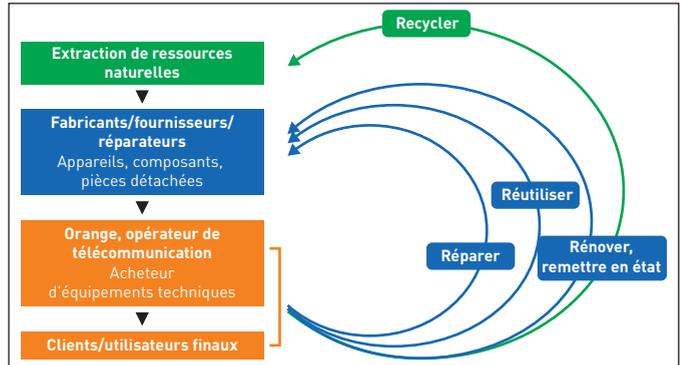


Figure 13

Modèle d'économie circulaire.

on essaie de faire de la valorisation matière notamment avec les partenaires.
 Une matrice de Responsabilité sociale et environnementale d'Orange est représentée sur

la **Figure 14**. On y retrouve les aspects sociétaux, les aspects économie circulaire et les aspects environnementaux. On voit aussi que l'épuisement des ressources est positionné

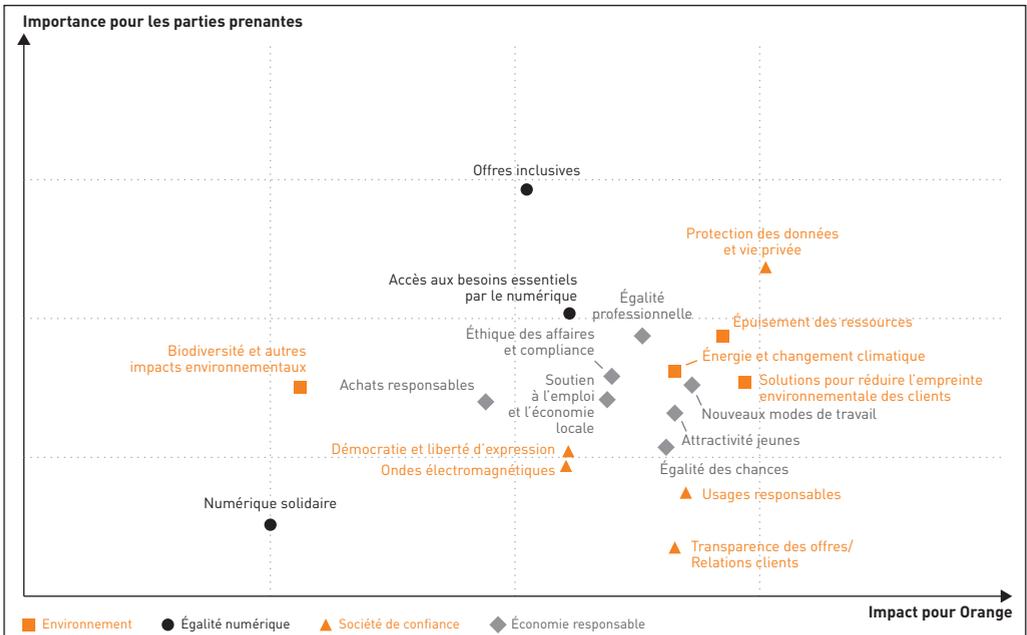


Figure 14

Matrice de matérialité RSE du groupe Orange en 2021.

comme un sujet important en termes d'impact pour Orange et pour nos parties prenantes.

2.2. Orange et les matériaux

Orange réalise depuis 2016 des analyses du cycle de vie (ACV) pour identifier les matériaux ayant le plus d'impact environnemental dans le secteur des TIC.

L'évaluation de l'utilisation des matières premières selon la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) permet d'identifier les matériaux les plus critiques en termes d'épuisement des ressources naturelles, selon l'indicateur *Abiotic Resources Depletion*⁷ (ARD). Cela nécessite une collaboration assez étroite avec nos fournisseurs qui doivent aussi jouer le jeu. Nous sommes très impliqués dans ces travaux parce qu'il est important de normaliser ces méthodologies d'ACV. Il y a un organisme (auquel nous participons) qui est une émanation des Nations unies, qui s'appelle l'UIT (l'Union Internationale des Télécoms) qui a défini un certain nombre de normes dont un indicateur de circularité qui sera présenté plus loin.

Nous avons par ailleurs de nouveaux enjeux qui apparaissent sur l'utilisation des batteries Lithium-Ion. Nous utilisons beaucoup de batteries en sources d'énergie de secours sur nos sites radio, et avec la crise énergétique actuelle, nous travaillons de plus en plus sur des stratégies d'effacement sur notre réseau pendant quelques heures ou

quelques minutes par jour, et le recours à ces batteries pourrait donc devenir important.

Les ACV ont montré que cinq matériaux représentent apparemment 95 % de l'impact par rapport à cet indicateur ARD (**Figure 15**). On retrouve l'or, l'étain, le cuivre, le molybdène qui sont présents effectivement dans un certain nombre d'applications.

L'or, par exemple, se retrouve dans les cartes électroniques à tel point qu'on peut presque parler de mines urbaines ; lorsque l'on concasse des cartes électroniques, on arrive à des concentrations en métaux précieux qui peuvent être, sous le contrôle de spécialistes, de véritables mines qui sont ici à des concentrations de 40 à 50 fois supérieures à celle des mines primaires qui, en plus, deviennent de plus en plus difficiles d'accès aujourd'hui.

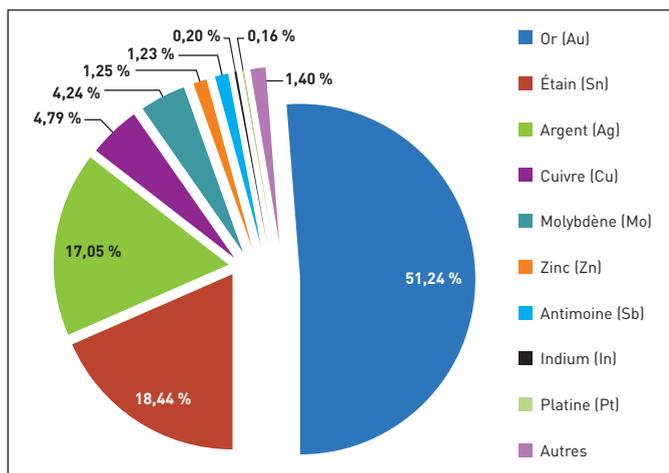


Figure 15

Part des matériaux dans l'impact pour l'indicateur ARD d'épuisement des ressources.

7. Épuisement des ressources abiotiques.

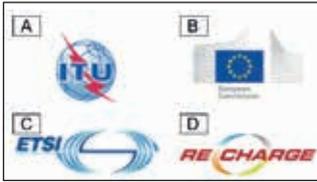


Figure 16

Organismes qui ont participé à la mise en place de méthodologie d'ACV.

La **Figure 16** montre les organismes qui ont participé à la mise en place de la méthodologie ACV : l'Union Internationale des Télécommunications est sans doute le plus important. L'ETSI (European Telecommunication Standards Institute) est un institut européen basé à Sophia Antipolis qui publie des normes dans le domaine des télécommunications. Il est impliqué dans tout ce qui est efficacité énergétique, développement durable, indicateurs pour les équipements réseau du domaine des télécoms. On utilise aujourd'hui des indices de performance avec les classes de couleurs qui sont assez proches de ceux que l'on trouve dans les équipements grand public. On essaie de faire la même chose sur les datacenters et sur les équipements électroniques. La Commission européenne est

également très impliquée dans ce domaine.

Orange a initié une première série de travaux sur l'exposition de l'entreprise à la problématique des matériaux critiques sur la base d'inventaires d'ACV menés par la Direction de l'Innovation d'Orange. Les paramètres suivants ont été pris en compte pour classer, ou non, les matériaux comme critiques pour Orange :

- importance économique de ces matériaux pour le Groupe ;
- leur substituabilité ;
- la volatilité de leur prix ;
- l'évolution historique de leur prix ;
- leur taux de recyclage ;
- la concentration géographique de leurs dépôts.

Quand on examine l'architecture d'un smartphone

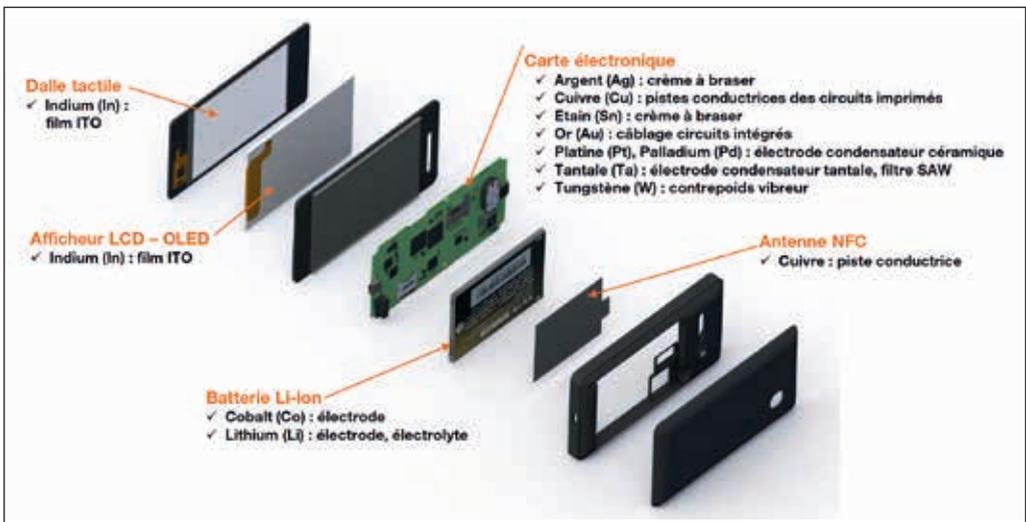


Figure 17

Architecture d'un smartphone.

(Figure 17), on voit qu'il y a de l'indium dans l'écran tactile et du néodyme dans l'aimant du vibreur. Mais c'est la carte électronique qui est effectivement la plus riche. On y trouve un certain nombre de métaux précieux : l'or, les platinoïdes, l'argent. Les cartes électroniques qu'il y avait dans l'ancien réseau RTC⁸ étaient beaucoup plus riches en métaux critiques que les cartes électroniques utilisées aujourd'hui. On a aussi réussi à baisser progressivement les besoins en métaux précieux dans les autres équipements électroniques, dans les puces électroniques notamment.

Dans la batterie lithium-ion, il y a du lithium et aussi du cobalt notamment.

La Figure 18 est un exemple d'ACV faite sur un smartphone. Trois domaines sont regardés : l'épuisement des

ressources naturelles, la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre. C'est la phase de fabrication qui compte majoritairement dans ces différents domaines. On voit que l'impact du transport en avion coûte en CO₂ parce que beaucoup d'équipements sont actuellement fabriqués en Asie.

Réaliser ces ACV demande un gros travail d'expert, et les experts dans ce domaine, qui nécessite un niveau d'études supérieures, sont très recherchés.

La Figure 19 est un autre exemple d'ACV réalisé sur les batteries Li-ion et VLRA qui sont des batteries plomb-acide. Les impacts ne sont pas tout à fait les mêmes en fonction des types de batterie. Différents domaines sont regardés dans ces ACV comparatives dont : l'abiotique⁹,

8. Réseau Téléphonique Commuté.

9. Se dit d'un milieu impropre à la vie.

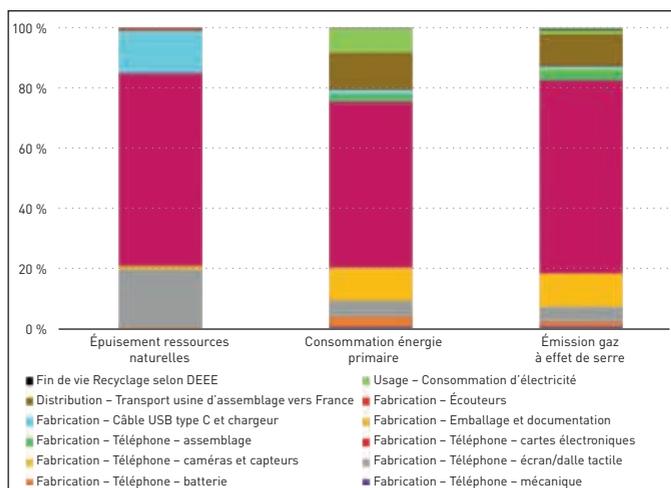


Figure 18

ACV d'un smartphone.

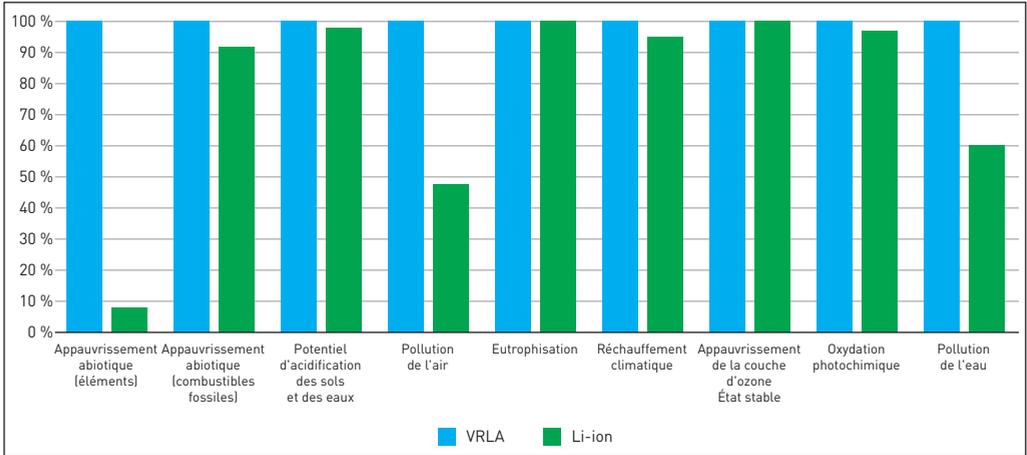


Figure 19

ACV comparative des batteries Li-ion et des batteries au plomb.

l'eutrophisation¹⁰ donc ce qui est lié à l'eau, la pollution de l'air, l'acidification.

Application de la méthodologie ACV à l'équipement réseau.

Cette méthodologie qui a été définie à l'IUT, examine un certain nombre de critères pour lesquels on regarde à chaque fois la pertinence par rapport à l'équipement qui est considéré et la marge d'amélioration (Figure 20).

Sur la Figure 21 sont rassemblés les 21 critères de la

méthode d'évaluation appliquée à l'équipement réseau : cela peut être la disponibilité des pièces de rechange, ou la facilité à désassembler l'équipement pour le recyclage ou pour le reconditionnement.

Il y a quatre niveaux d'évaluation pour chacun des critères (Figure 22). Par exemple pour la disponibilité des pièces détachées, on distingue le cas de la disponibilité des pièces détachées partout chez les revendeurs des cas où l'on n'a pas de pièces détachées, des cas où l'on ne sait pas où elles se trouvent, et de ceux dont on ne sait pas si on en aura.

10. Enrichissement d'une eau en sels minéraux entraînant des déséquilibres écologiques tels que la prolifération des algues ou l'appauvrissement du milieu en oxygène.



Figure 20

Article à l'origine de la méthode d'évaluation du score de circularité.

Critères L. 1023	Pertinence
PD1 : Support logiciel et données	
PD2 : Résistance aux rayures	
PD3 : Support de maintenance	
PD4 : Robustesse	
PD5 : Longévité de la batterie	
PD6 : Sécurité des données – Gestion des données	
3RUe1 : Fixations et connecteurs	
3RUe2 : Aide au diagnostic	
3RUe3 : Compatibilité avec le recyclage des matériaux	
3RUe4 : Profondeur ou complexité de montage	
3RUe5 : Plastiques recyclés/renouvelables	
3RUe6 : Identification des matériaux	
3RUe7 : Substances dangereuses	
3RUe8 : Matières premières critiques	
3RUe9 : Recyclage des emballages	
3RUe10 : Environnement de travail des activités de réparation	
3RUM1 : Service offert par le fabricant	
3RUM2 : Distribution de pièces de rechange	
3RUM3 : Disponibilité des pièces détachées	
3RUM4 : Informations sur le désassemblage	
3RUM5 : Programmes de collecte et de recyclage	
3RUM6 : Connaissances sur l'évaluation de l'empreinte environnementale accessibles au public	

Figure 21

Les 21 critères de la méthode L. 1023 appliquée à un équipement réseau.

Critères L. 1023	Notations de la marge d'amélioration
3RUM2 : Distribution des pièces de rechange	MI = 1 - Les pièces de rechange sont disponibles publiquement ou disponibles pour les prestataires de services de réparation indépendants
	MI = 2 - Les pièces de rechange sont disponibles pour les prestataires de services de réparation agréés par le fabricant ou disponibles uniquement pour le fabricant sur tous les marchés où le produit est vendu par le fabricant
	MI = 3 - Les pièces de rechange sont disponibles auprès des prestataires de services de réparation agréés par le fabricant ou ne sont disponibles que sur des marchés limités où les produits sont vendus par le fabricant
	MI = 4 - Les pièces de rechange ne sont pas disponibles
Critères L. 1023	Notations de la marge d'amélioration
3RUM3 : Disponibilité des pièces détachées	MI = 1 - Les pièces détachées peuvent être classées comme disponibles à long terme si elles sont disponibles pendant une durée qui réjète la durabilité attendue de la catégorie de produit
	MI = 2 - Les pièces détachées peuvent être classées comme disponibles à moyen terme si elles sont disponibles pendant une durée qui réjète la durabilité moyenne attendue du produit
	MI = 3 - Les pièces détachées peuvent être classées comme disponibles à court terme si elles sont disponibles pendant une période de deux ans après la vente du produit
	MI = 4 - Aucune information sur la durée de disponibilité n'est fournie pour les pièces

Figure 22

Les 4 niveaux d'évaluation des critères « Distribution des pièces de rechange » et « Disponibilité des pièces de rechange » de la méthode L. 1023 appliquée à un équipement réseau.

Conclusion : réparabilité et recyclage

On regroupe sous le terme D3E les déchets d'équipements électriques et électroniques (**Figure 23**). Ce sont des pilières dites à responsabilité élargie du producteur (REP) et elles sont encadrées par la directive européenne avec, dans la plupart des pays, des intermédiaires qui s'appellent des éco-organismes. L'enjeu pour un groupe comme Orange est de bien collecter pour ensuite pouvoir bien recycler avec l'aide des éco-organismes.

Il y a des éco-organismes dans tous les domaines : dans les pneus, dans les batteries, dans le textile... Leur rôle est de transférer cette REP qui est la responsabilité du metteur sur le marché, et d'organiser les pilières de recyclage pour récupérer *in fine* notamment les matériaux réutilisables. Dans le cas des D3E, des affneurs par hydrométallurgie ou pyrométallurgie arrivent à récupérer l'or, l'argent, le platine.

Il faut aussi tenir compte d'une autre directive appelée *Restriction Of Hazardous Substances*¹¹ (ROHS) qui est très liée au domaine TIC. Elle impose de limiter la concentration ou la présence d'un certain nombre de métaux ou de composés dans nos équipements électroniques.

Le recyclage doit aussi s'articuler avec le règlement REACH¹² qui est beaucoup plus large.

Enfin la nouvelle loi AGEC (la loi Anti-Gaspillage et pour l'Économie Circulaire) va renforcer ces aspects ACV et ces aspects exigences de la part des metteurs sur le marché avec des indices de réparabilité sur les équipements, etc.

11. Restriction des substances dangereuses.

12. Le règlement REACH est un règlement européen pour sécuriser la fabrication et l'utilisation des substances chimiques dans l'industrie européenne. Il s'agit de recenser, d'évaluer et de contrôler les substances chimiques fabriquées, importées et mises sur le marché européen.

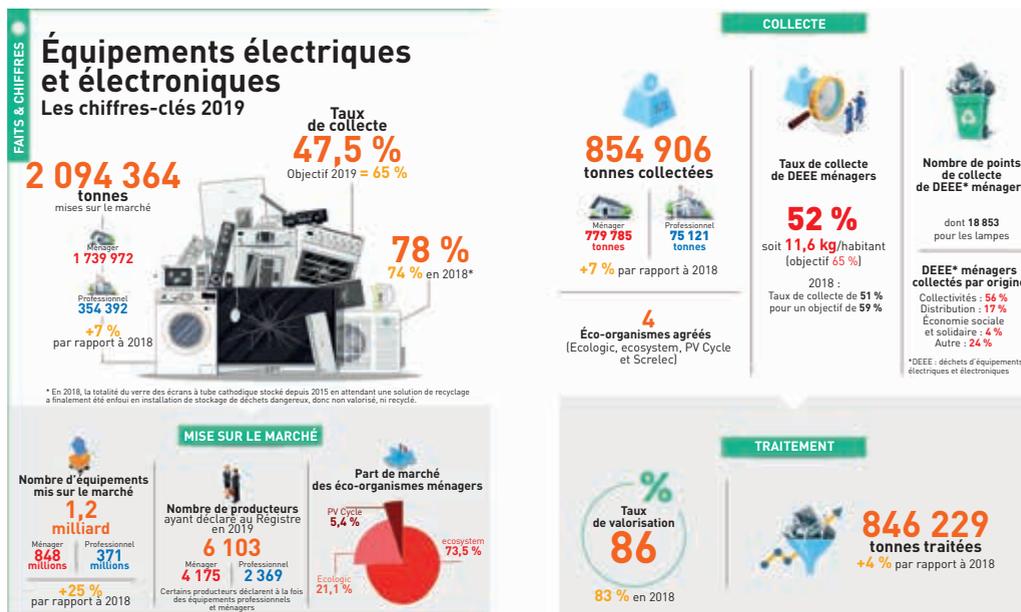


Figure 23

Quelques données sur les D3E en France en 2019.

Source : ADEME.

La réparabilité et le recyclage permettront d'économiser ou de récupérer des matériaux stratégiques même si on sait qu'aujourd'hui, toutes les terres rares sont peu recyclées parce qu'il y a des problématiques de processus industriel. Cette orientation vers le recyclage et le reconditionnement devient un des enjeux importants qui permettra aussi de diminuer nos émissions indirectes de CO₂ en scope 3.

Matériaux critiques et axes stratégiques pour l'industrie automobile

Gildas BUREAU est pilote du groupe de travail sur les matériaux stratégiques pour l'industrie automobile au sein de la plateforme automobile et mobilité (Stellantis).

Nous présentons ici les activités de la filière automobile, les enjeux du véhicule et des futures mobilités. Il sera également présenté les activités liées du groupe de travail de la filière sur les matériaux critiques (qui ne sont pas que des minerais¹) et les « leviers » mis en place pour relever les nombreux enjeux qui se présentent. Nous adresserons également les compétences rares qu'il faut obligatoirement créer pour le succès final.

1 La filière automobile et les enjeux associés

1.1. Filière automobile

La **plateforme automobile et mobilité (PFA)** rassemble tous

1. Un minéral est une roche présentant une concentration élevée en matériaux utiles. Source : Dictionnaire Larousse.

les acteurs liés à la filière automobile en France. Elle représente 4 000 entreprises, plus de 400 000 emplois et 6 milliards d'euros en recherche et développement.

Sa gouvernance s'appuie sur un conseil des présidents constitué :

- d'un collège des constructeurs (Stellantis, Renault, CCFA : comité des constructeurs français d'automobiles) ;
- d'un collège équipementiers et sous-traitants : Forvia, Michelin, Plastic Omnium, Valeo, Fiev, fédération de la carrosserie (FFC), de la mécanique (FIM), de la plasturgie (GPA), du syndicat national du caoutchouc et des polymères (SNCP).

La contribution à la thématique « Innovation R&D, enseignement-recherche » est très forte dans tout ce secteur,

la filière automobile étant la 1^{re} déposante de brevets en France.

1.2. Les enjeux

Les futurs véhicules seront **électriques, connectés et autonomes**. Ils seront également **sûrs et sécurisés**, au niveau de la recharge électrique, mais aussi au niveau de la **cyber-sécurité**. Quand nous parlons de connectivité, cela implique de nombreuses interfaces et différents moyens de communication. Toutes ces fonctions impliquent le besoin de pouvoir mettre régulièrement et rapidement le véhicule à jour. Des systèmes sophistiqués sont installés pour tout ce qui est « mise à jour embarquée » ou « mise à jour débarquée » qui passent par ces systèmes. Il y a également les réseaux – comme précédemment présenté par le Directeur de l'innovation chez Orange – pour tout ce qui est téléphonie, mais également tout ce qui est connectivité avec le réseau extérieur. Dans ces futurs véhicules connectés, selon le niveau d'autonomie, la responsabilité de la conduite du véhicule pourra être complètement déléguée. Des intrusions étant possibles, elles doivent être totalement détectées, bloquées pour sécuriser les systèmes du véhicule et de ses occupants.

Il faut aussi que le véhicule du futur reste abordable financièrement : pour une mobilité décarbonée avec le véhicule électrique, c'est un vrai enjeu pour le rendre accessible à tous. Nous observons également de nouveaux usages qui se répandent comme la grande tendance de l'usage au lieu de

la possession (avec la location longue durée). Le « **leasing** » **social** pour le véhicule électrique pour certains foyers étant le parfait exemple de ces enjeux sociétaux. Cet enjeu du véhicule électrique accessible à tous est essentiel pour éviter toute fracture sociale autour de la mobilité décarbonée.

Le véhicule du futur sera également « à faible empreinte carbone » et respectueux de l'environnement. Cela se traduit par des objectifs dans tous les secteurs d'activités – les différents scopes² – c'est-à-dire aussi bien dans l'empreinte carbone de la production des usines, la logistique, que pendant l'usage. Ainsi, au moment de la recharge d'un véhicule électrique, la décarbonation du secteur ne pourra se faire massivement que si l'électricité utilisée est à faible empreinte carbone et dans ce secteur la France dispose d'un réel avantage. Pour finir, il ne faut pas oublier la volonté européenne d'un « zéro émission », émissions de CO₂ mais aussi de toutes les émissions de polluants ou de particules.

Le « paquet climat-énergie » européen, baptisé « Fit for 55³ » encadrant notamment les émissions de CO₂, est illustré en **Figure 1**. En 2030, les émissions de CO₂ devront diminuer de 55 % (par rapport à 1990), sachant qu'actuellement elles sont est à 95 g avec une trajectoire à 0 g en 2035.

2. Scope : étendue, champ.

3. Le « Fit for 55 » est un ensemble de mesures législatives adopté par le Conseil européen en 2022 avec pour objectif de réduire d'au moins 55 % les émissions de gaz à effet de serre (le CO₂ notamment). Source : ecologie.gouv.fr.

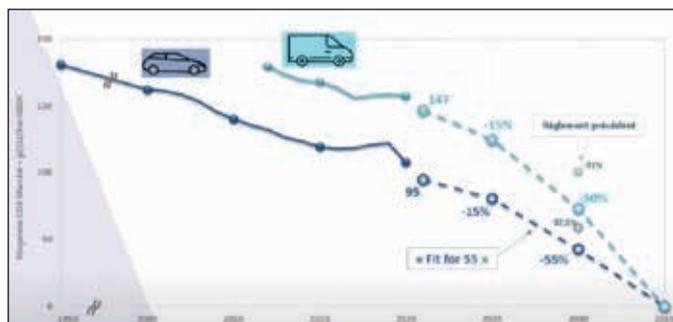


Figure 1

Courbes d'évolution de l'émission de CO_2 en fonction des années écoulées.
Source : PFA.

Cette obligation d'atteindre le zéro émission de CO_2 en 2035, imposée à l'heure où nous parlons, que tous les véhicules hybrides ou fonctionnant avec des carburants alternatifs (hydrogène, e-fuels), **ne pourront plus être vendus en Europe** à cette date. Sans dérogations (en cours de discussions), les constructeurs auront donc obligation de mettre sur le marché soit des véhicules purement électriques, soit des véhicules à hydrogène (*fullpower*⁴, ou hybride à batterie) comme illustré sur la **Figure 2**.

Cette réglementation européenne constitue une vraie révolution pour toutes les industries du transport et notamment celles du transport terrestre. La plateforme automobile et mobilité – avec le cabinet AlixPartners – a ainsi publié fin 2021 une étude multisectorielle⁵ sur les consé-

quences de ce paquet climat « Fit for 55 » sur les emplois au sein des filières, illustrant les évolutions et les transferts d'activités entre les industries mécaniques, électriques et électroniques.



Figure 2

Architecture d'un véhicule utilitaire avec pile à combustible et batterie de traction.

Source : Symbio-Stellantis.

4. *Fullpower* : pleine puissance ; fait référence aux véhicules purement à hydrogène.

5. « Fit for 55 » – Quelles conséquences pour la filière automobile française. – PFA (pfa-auto.fr).

1.3. Évolution des véhicules

Comment cette évolution au niveau des énergies et des réglementations se traduit-elle sur le **véhicule connecté autonome électrique** ? Nous allons avoir par exemple de nouveaux composants au niveau de la chaîne de traction pour piloter et gérer les batteries ou les piles à combustibles. Ceux-ci nécessiteront de nouveaux matériaux stratégiques ou des usages plus intensifs de certains métaux critiques. Par exemple, cela imposera le recours massif au lithium, au cobalt, au nickel, au graphite, au niveau des batteries ou, avec la pile à combustible, nous pouvons également évoquer les platinoïdes⁶ ou intensifier l'usage de métaux conducteurs électriques comme le cuivre (**Figure 3**).

Si les nombreuses technologies des batteries des

6. Nom donné aux groupes des métaux de la famille du platine. On y distingue les platinoïdes légers, comme le ruthénium, le rhodium et le palladium, ainsi que les platinoïdes lourds, comme l'osmium, l'iridium et le platine.

véhicules électriques sont souvent prises en exemple, l'architecture complète d'un véhicule électrique est également complexe et nécessite de nombreux nouveaux matériaux. En voici quelques exemples :

- Une chaîne de traction électrique peut disposer d'une, de deux, voire trois machines électriques sur un même véhicule et pour certaines mobilités légères ou autonomes, une machine électrique est intégrée au niveau de chacune des roues. Ces machines nécessiteront de l'aluminium (carter), du cuivre, des composants électroniques et des terres rares pour les machines électriques à aimants permanents.
- Au niveau architecture électrique et électronique, le véhicule doit pouvoir piloter ces machines électriques (via de « l'électronique de puissance »), être connecté aux nombreux calculateurs internes, au réseau externe, au téléphone des utilisateurs, aux infrastructures voire aux autres véhicules. Ces fonctions nécessiteront des composants

Figure 3

Évolution de l'utilisation des matières premières des véhicules électriques par rapport au moteur à combustion. ICE : Internal Combustion Engine = moteur à combustion interne. BEV : Battery Electric Vehicle = Véhicule à batterie électrique.

Source : PFA-AlixPartners.

Matière première	Différence de poids nette BEV vs ICE (kg)	
Cuivre	64	+250 %
Graphite	56	
Autres	54	
Aluminium	42	+24 %
Électrolyte (hors lithium)	36	
Nickel	29	
Cobalt	10	
Manganèse	9	
Lithium	7	
Caoutchouc	-1	-1 %
Plastiques	-6	-4 %
Fluides & lubrifiants	-16	-32 %
Acier	-106	-20 %
TOTAL	+179 kg	+19 %*

utilisant du silicium, cuivre, plomb, étain, et pour les futures technologies de calculateurs le nitrure de gallium (GaN) ou carbure de silicium (SiC).

- Le véhicule électrique nécessite également le recours à des polymères techniques⁷, comme les matériaux pour les « barrières thermiques⁸ » pour renforcer la résistance au feu du véhicule, ou des membranes séparatrices au sein de la batterie ou de la pile à combustible.

- Au niveau de la connectivité et des systèmes d'aide à la conduite (ADAS⁹), les besoins seront également considérables pour ces systèmes d'aide dont beaucoup sont déjà disponibles et contribuent à la sécurité passive. Au-delà des TICs¹⁰ évoquées précédemment, des nouveaux équipements seront nécessaires pour les

7. Polymères techniques : famille de polymères possédant de hautes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques, supérieures à celles des polymères courants.

8. Permet de renforcer la résistance du véhicule à l'emballlement thermique de la batterie.

9. ADAS : *Advanced Driver Assistance System* : système d'assistance à la conduite.

10. TIC : Technologies de l'Information et de la Communication.

véhicules autonomes comme les caméras, les radars, les sonars, des lidars¹¹ (Figure 4).

Une autre dimension à prendre en compte est les différents usages liés au véhicule électrique : urbains, routiers, péri-urbains.

Par exemple, dans le cas des usages routiers, les attentes sur l'autonomie orientent les choix vers l'allègement et l'aérodynamique : c'est ici qu'interviennent les capotages¹², l'utilisation des matériaux plus légers-plus résistants, ou la diminution de la résistance aux frottements. Avec, par exemple chez Michelin (Figure 5), des pneumatiques adaptés aux véhicules électriques. Tous ces leviers permettent d'améliorer l'autonomie des véhicules à iso-chimie de batterie.

Des réflexions existent également pour adresser le concept de « *vehicule as a service* », c'est-à-dire utiliser un véhicule typé urbain pour les utilisations urbaines, et

11. Le lidar (*Light Detection and Ranging*) correspond à la télédétection par laser, et permet de mesurer une distance précise. Source : Wikipédia.

12. Correspond au recouvrement d'un moteur, d'une machine par un capot en tôle ou en alliage léger. Source : Dictionnaire Larousse.



Figure 4

Exemple de fonctions ADAS.

Source : Valeo.

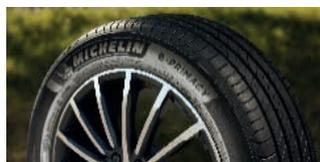


Figure 5

Modèle de pneu Michelin pour véhicule électrique.

Source : Michelin.

une extension d'autonomie pour un usage routier. Dans ce sens-là, le véhicule et sa batterie deviennent un « service », comme pour d'autres applications courantes mais sans changer de véhicule.

2 Matériaux critiques, stratégiques et leviers mis en place

2.1. Approche de la criticité des matériaux stratégiques

Ainsi, dans ce contexte, un groupe de travail de la PFA est entièrement dédié aux matériaux critiques et stratégiques pour la filière automobile.

Le travail se base notamment sur les différentes matrices de criticité établies au niveau mondial : Union européenne, États-Unis, Asie (Figure 6). Ces États dressent également,

en fonction des besoins, des approvisionnements et de l'importance économique, leurs matrices de criticité à certains matériaux.

Au sein de ce groupe, nous étudions ensuite les différentes évolutions du véhicule du futur, les mix énergétiques et technologiques pour étudier l'importance des différents matériaux. À partir de là, nous avons publié en 2021 une position de filière, qui présente l'état des matériaux stratégiques pour l'automobile (Figure 7).

Également, autour de ce groupe de travail, une approche systémique a été mise en place. Cette approche permet d'échanger rapidement, directement, de façon très active et très réactive avec l'écosystème automobile français. Cette organisation

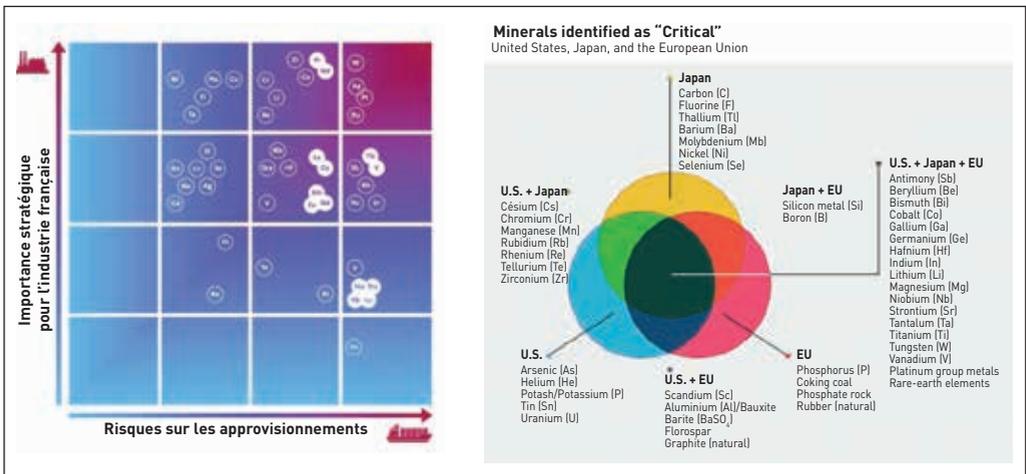


Figure 6

À gauche, matrice de criticité pour différents matériaux : en ordonnée, l'importance stratégique pour l'industrie française, et en abscisse, les risques sur les approvisionnements. À droite, les minéraux identifiés comme étant critiques suivant certains pays.



Figure 7

Position technique de filière sur les matériaux stratégiques.

Source : PFA.

a démontré tous ses intérêts face aux récents conflits, tensions géopolitiques, réglementations qui rendent nécessaire le traitement de ces nombreuses évolutions. Cela permet également le partage d'informations croisées, de renforcer l'évaluation des risques et favorise l'adoption rapide de décisions pour la filière et son écosystème.

Prenons le cas de l'Ukraine : le grand public a (re)découvert l'importance des échanges industriels entre l'Ukraine, la Russie et l'Europe, et le rôle de ce pays dans l'approvisionnement de certains composants automobiles ou de matériaux critiques.

Ainsi, dans l'automobile, nous ne parlons pas de matériaux « rares » mais de matériaux « critiques » qui sont utilisés dans de nombreuses applications (**Figures 8 et 9**) et qui, pour certains usages au sein de la filière automobile, vont devenir stratégiques.

2.2. Quels sont les matériaux stratégiques ?

Ils sont décrits dans la position de filière (**Figure 7**). Citons les platinoïdes, les matériaux pour batterie, les terres rares – beaucoup de terres rares sont utilisées dans l'automobile –, dans différents composants : actuateur¹³, composants électroniques, aimants permanents...

Certains métaux stratégiques sont associés à des exigences réglementaires comme « les minerais issus des zones de conflits » portant sur l'approvisionnement des 4 métaux Sn, Ta, Au, W (**Figure 10**), très utilisés dans les composants électriques et électroniques.

Mais il y a aussi des polymères dont certains monomères deviennent difficiles à approvisionner ou à diversifier.

13. Actuateur : dispositif permettant de réguler le débit et la pression d'un fluide (air, gasoil, huile). Source : lalanguefrancaise.com.

IUPAC periodic table of the elements

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 Actinides	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Ts	118 Og
Lanthanides :		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Actinides :		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Figure 8

Cartographie des matériaux critiques dans l'automobile (en rouge).

Source : PFA.

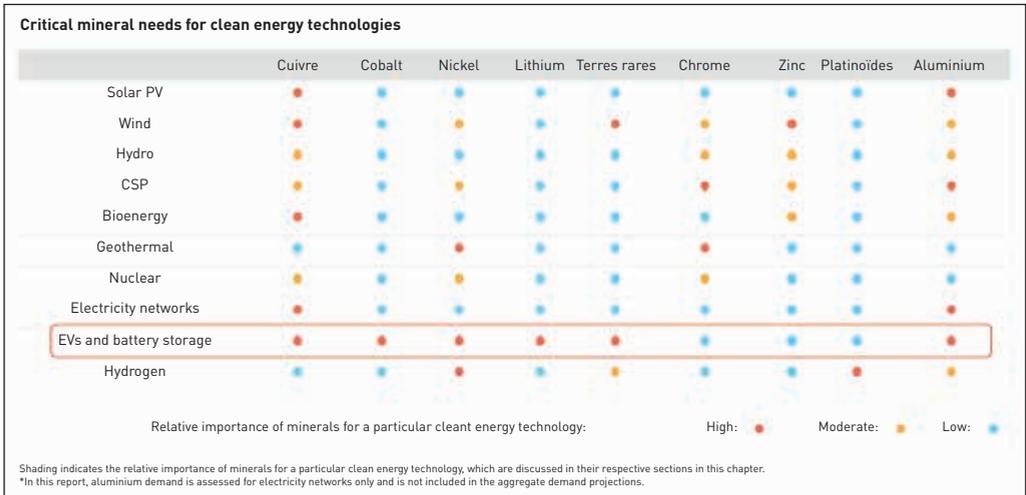


Figure 9

Matériaux critiques nécessaires pour les technologies des énergies vertes, encadrés en rouge pour les véhicules électriques et les batteries. Point rouge : haute importance relative, point orange : importance modérée, point bleu : faible importance.

Terre rare : famille de 17 métaux

Source: IEA.

Ainsi, les matériaux stratégiques pour le secteur automobile sont :

1. Les platinoïdes : principalement Pt, Pd, Rh
2. Les matériaux pour batteries / électrification : Li, Co, Ni, Cu, Graphite
3. Les terres rares (lourdes et légères) : Nd, Pr, La, Ce, Sm, Tb, Dy
4. Les métaux du numérique, de la connectique et de l'électronique (commun aux autres industries) : Ge, Ga, In
5. Les métaux issus de zones de conïit: Sn, Ta, Au, W
6. Certains plastiques : PA, PPE, PVDF
7. Autres matériaux d'origine minérale ou naturelle qui présentent des risques RSE forts comme :
 - le caoutchouc naturel : non substituable à court terme (applications pneumatique / système antivibratoire,...)
 - le mica (charges, pigments, additifs, feuillets...)
 - le cuir, au niveau des questions liées au bien-être animal

Figure 10

Liste des matériaux stratégiques dans le secteur automobile.

Source : PFA.

Les producteurs chimiques deviennent de plus en plus multinationaux, et, souvent, regroupent leurs capacités de production de monomères essentiels à la transition énergétique (dont certaines interviennent dans les batteries par exemple). Ainsi, en cas d'accidents industriels, d'incidents (comme les récents incidents climatiques), nous pouvons avoir une forte dépendance et des ruptures d'approvisionnement très importantes.

D'autres matériaux sont moins souvent cités : ce sont ceux d'origine naturelle, par exemple le caoutchouc naturel, le mica, mais aussi le cuir. Leurs approvisionnements peuvent se heurter à des questions sociales, environnementales ou sociétales (le bien-être animal, l'exploitation de surfaces agricoles).

Des facteurs politiques peuvent également profondément modifier certains approvisionnements : cela peut prendre la forme d'aides ou de subventions, de choix normatifs, de quota, d'obligations d'usage (« contenu recyclé » par exemple) ou d'interdictions d'exportations.

2.3. Les leviers mis en place

Au sein de ce groupe de travail, nous manipulons six leviers afin d'essayer d'alléger les contraintes d'exposition aux matériaux stratégiques (**Figure 11**).

Le 1^{er} levier, la substitution, est déjà largement pratiqué : voici des exemples.

Le parc automobile européen devient de moins en moins diesel, de plus en plus essence, donc la dépollution demande une technologie différente. Ces travaux liés à l'évolution du mix énergétique permettent de substituer certains platinoïdes (surtout platine/palladium) en fonction des carburants, des technologies nécessaires (véhicule thermique vs véhicule hybride) ou des tensions sur les marchés des platinoïdes.

L'utilisation des terres rares fournit un autre bon exemple de substitution en cours. Pour les aimants permanents par exemple, Toyota a publié une feuille de route très précise et pédagogique (**Figure 12**). Actuellement, les aimants contiennent du dysprosium et



Figure 11

Ensemble des 6 leviers.

Source : PFA.

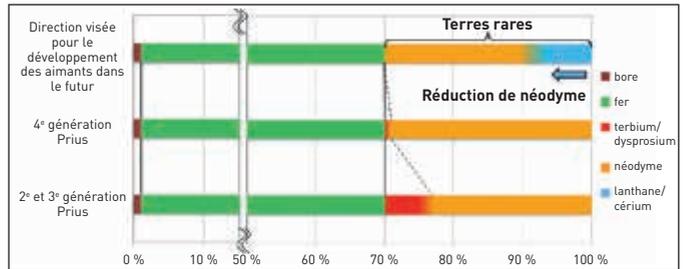


Figure 12

Feuille de route de substitution des terres rares lourdes.

Source : Toyota.

du terbium, des terres rares lourdes. À terme, Toyota diminuera cette quantité de terres rares lourdes, puis fera leur substitution par des terres rares légères. Ensuite, à moyen terme, le néodyme serait partiellement substitué par d'autres terres rares moins stratégiques comme le lanthane ou le cérium.

De même, les technologies des batteries sont en évolution

constante et illustrent un autre cas de substitution : celui du cobalt. La **Figure 13** montre l'évolution des batteries avec un contenu en cobalt de plus en plus faible. À côté des caractéristiques techniques, l'autre enjeu de cette substitution partielle ou totale réside dans les risques liés à l'extraction et l'approvisionnement du cobalt.

Substituer une technologie à une autre technologie

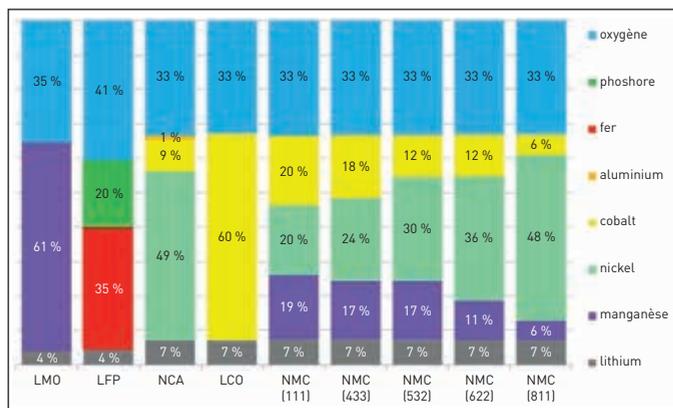


Figure 13

Composition des batteries suivant leur chimie.

Description des différents sigles : LMO : Lithium-Manganèse-Oxide ; LFP : Lithium-Fer-Phosphate ; NCA : Nickel-Cobalt-Aluminium ; LCO : Lithium-Cobalt-Oxide ; NMC : Nickel-Manganèse-Cobalt.

Source : BloombergNEF.

est également un moyen de réduire certaines tensions d'approvisionnement. Dans le cas des moteurs électriques, nous pouvons utiliser des machines synchrones qui utilisent soit des aimants permanents, soit des bobinages de cuivre (électro-aimants).

Les batteries fournissent encore d'autres exemples :

parmi les différentes chimies disponibles, certaines sont complémentaires selon les usages : ainsi la chimie LFP¹⁴ est sans nickel ni cobalt (Figure 14). Les choix dépendent d'arbitrages délicats entre les performances techniques, les usages, les

14. LFP : Lithium-Fer-Phosphate.

	NiCo FREE	Ni BASED
Matériau actif de la cathode* sur feuille d'aluminium	Fe-Mn-x	Ni-Mn-y
Matériau actif de l'anode* sur feuille de cuivre	Graphite Carbon	
Densité d'énergie** à la cellule (Wh/L)	400-500 Wh/L	600-700 Wh/L
Pack configuration 2024	Cellules (ensemble anode/cathode) en pack (sans modules)	One unique module-based
Pack configuration 2026	One unique Cell-To-Pack design	
Coût (€/kWh)	-20%	Référence

Figure 14

Différence de propriétés des batteries selon les technologies apportées.

Source : Stellantis.

* Une anode est une électrode sur laquelle se déroule une réaction d'oxydation, donc une perte d'électrons pour le métal. Pour une cathode, ce sera une réaction de réduction donc un gain d'électrons pour le métal.

** Ici, la densité d'énergie correspond à une énergie par unité de volume.

propriétés des clients, les technologies de recharge et les coûts.

Le levier de la diversification. La diversification, c'est pouvoir disposer de plusieurs sources d'approvisionnement et de les valider pour favoriser les interchangeabilités. Ainsi, pour les batteries, il faut considérer les différentes chaînes d'approvisionnement en Chine mais également au Japon, en Corée, en attendant de pouvoir disposer de capacités suffisantes en Europe. Au niveau minerais pour batteries, il y a de plus en plus de miniers qui ouvrent de plus en plus de mines, en s'engageant dans des démarches de protocoles communs, d'accords d'échanges entre États ou de standardisation. Et puis nous regardons aussi tout ce qui peut être produit en Europe, afin de construire une diversification à cette échelle : ce sont tous les travaux qui sont réalisés avec les ambassades pour faciliter les échanges commerciaux avec les grands pays miniers, ou avec les collaborations avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), avec les instances européennes et nationales ou interministérielles au sein de l'Observatoire français des ressources

minérales pour les filières industrielles (OFREMI). Ces collaborations conduisent à des actes concrets pour faciliter les diversifications, par exemple, sur le plan d'investissement européen de 42 milliards pour créer et produire des semi-conducteurs en Europe ou, pour créer des « gigafactories¹⁵ » sur le sol français. Toutes ces activités foisonnantes sont suivies à travers différents comités réunissant les acteurs du monde de l'automobile.

La diversification demande ainsi de sécuriser les approvisionnements au moyen d'accords avalisés par le monde politique. La France, l'Europe signent ainsi des accords de partenariats, ou favorisent l'implantation de collaborations commerciales, ou douaniers pour faciliter ces échanges. Ainsi, au sein de la filière, différents contrats commerciaux, de fusion, de rachat ou d'accords que l'on appelle des JV¹⁶, permettent de se positionner sur différents projets de diversification

15. Anglicisme désignant des grandes usines construisant des équipements, batteries ou autres.

16. JV : signifie *Joint-Venture*, et correspond à un accord de collaboration entre plusieurs entreprises.



Figure 15

Exemples de contrats entre constructeurs et équipementiers ou fournisseurs de matériaux.

des approvisionnements de matériaux stratégiques. La **Figure 15** montre différents contrats signés entre constructeurs ou équipementiers sur des approvisionnements durables, incidemment de plus en plus en Europe.

Une mesure remarquable a été la création de l'**Agence européenne de l'alliance pour les matériaux**, où a été mis en place le premier annuaire des projets industriels européens sur la chaîne de valeurs des terres rares pour la fabrication d'aimants permanents, aussi bien pour le véhicule électrique que pour l'éolien. Le prochain document qui sera publié par l'**ERMA (European Raw Materials Alliance)** portera sur les matériaux pour batteries, avec une vision forte de la diversification et de la sécurisation des approvisionnements. L'ambition est de produire en Europe jusqu'à 25 % de certains matériaux critiques nécessaires à la transition énergétique.

Le levier de l'économie circulaire est basé sur l'importance de pouvoir réutiliser ce qui est disponible en Europe pour des fabrications européennes.

Voici deux exemples : celui de la batterie et celui des aimants permanents.

Considérons une « batterie de traction » caractérisée par ses performances et sa durée de vie (**Figure 16**). Le but des constructeurs est d'augmenter la durée de vie et les cas d'usages pour diminuer l'empreinte carbone liée à sa fabrication, avant une fin de vie permettant le recyclage des métaux critiques. À partir d'un certain état de charge, la batterie n'est plus utilisable pour un usage sur véhicule, nous pouvons envisager alors son usage pour du stockage stationnaire. Cette dernière commence alors une seconde vie. En dernière phase du cycle intervient la « vraie » fin de vie de la batterie. Nous pouvons à ce moment-là recycler les matériaux critiques et les réinjecter dans des futures fabrications industrielles et, dans le cas d'une boucle fermée, les réutiliser pour fabriquer des futures batteries pour l'automobile.

Pour les aimants permanents, comme pour tout matériau critique, toutes les chutes de production, résidus ou déchets liés



Figure 16

L'économie circulaire de la batterie : de son utilisation à son recyclage.

Source : Groupe Renault.

à la production des aimants, sont recyclés. Pour l'instant, tout cela est souvent exporté en Asie pour être recyclé. Mais dans le cadre d'une intégration de l'Europe dans la chaîne de fabrication, nous pouvons envisager une approche plus locale (*Figure 17*) au travers de deux voies possibles de recyclage. Nous parlerons alors de « **boucle courte** » ou de « **boucle longue** ».

Dans la première, les aimants sont prélevés en fin de vie, et sont déstructurés pour reformer des poudres magnétiques qui serviront à la fabrication de nouveaux matériaux magnétiques. Dans l'autre, « **boucle longue** », les aimants sont broyés puis soumis à des traitements de transformations pour reformer les oxydes de terres rares qui permettent de rentrer dans la chaîne de valeurs des terres rares et dans le cas d'une boucle fermée pour refaire des aimants permanents ou des composants pour l'automobile.

Cependant, la *Figure 18* donne la cartographie européenne des taux de recyclage des matériaux critiques en Europe. Les matériaux en rouge sont recyclés, à moins de 1 % ; ce sont souvent des matériaux critiques et stratégiques pour l'automobile.

Le levier de la R&D. Il est très important parce qu'il alimente tous les autres. La gestion des matériaux critiques, ce chapitre l'a déjà montré, est multiforme, complexe et concerne toutes les activités de l'industrie automobile. De nouvelles innovations, de nouvelles solutions, sont constamment en train d'apparaître dans les laboratoires et sont approfondies par des programmes de R&D. C'est une évidence : les verrous scientifiques, technologiques et industriels sont nombreux mais les initiatives et les innovations doivent être accompagnées, car de nombreuses solutions apparaissent.

Par exemple, tous les industriels regardent attentivement les futures technologies qui émergent pour les stockeurs énergétiques : nous pouvons évoquer les batteries au sodium, les batteries solides ou pour l'hydrogène les futurs stockages. Cela implique d'anticiper, de suivre et de piloter ces évolutions pour évaluer leur impact sur le mix-énergétique. Nous évaluons les inventions, les start-ups, les brevets pour les futurs matériaux, les procédés, les technologies d'assemblages, afin de pouvoir alimenter les différents leviers présentés.

L'évolution à long terme du véhicule promet des



Figure 17

Principe de l'économie circulaire pour les aimants.

Source : BRGM.

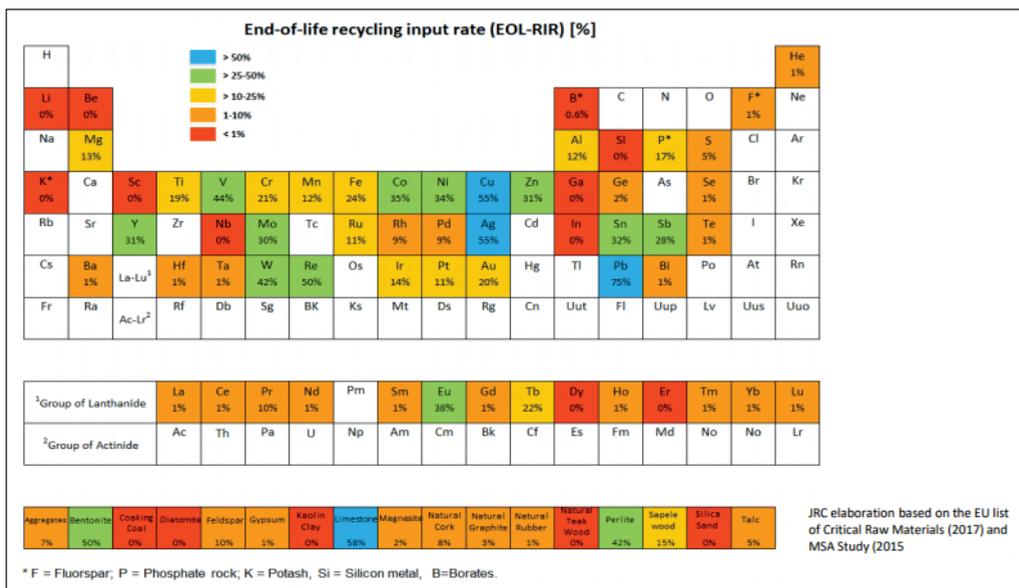


Figure 18

Cartographie européenne du recyclage des matériaux. Plus les matériaux sont bleu-vert, plus ils sont recyclés, et plus les matériaux sont orange-rouge, moins ils sont recyclés.

Source : Union européenne.

changements absolument considérables. Par exemple, la **Figure 19** montre l'évolution technologique des intérieurs de véhicule avec l'utilisation d'équipement d'info-divertissement de grandes dimensions et dans la perspective des véhicules autonomes, la disparition des commandes de conduite et du volant.

Ces transformations se préparent maintenant et il y a tout un travail d'identification, de collecte, de sélection des technologies afin d'assurer une mobilité accessible, à faible empreinte environnementale, tout en limitant l'exposition de la filière automobile à de nouveaux matériaux stratégiques.

Si nous nous projetons dans l'évolution des mobilités et non plus seulement

la voiture héritière de nos usages actuels, nous pouvons évoquer **un monde impressionnant d'opportunités, de diversité, d'inventions, de technologies à développer ou souvent même à inventer.** Ainsi, on ne s'interdit pas de prévoir les futurs concepts de continuité des mobilités terrestres et non terrestres.



Figure 19

Intérieur d'une voiture : à gauche : voiture traditionnelle ; à droite : présence de grands panneaux et d'interfaces, et absence de volant.

Source : Forvia.

Citons par exemple la collaboration entre Stellantis et la start-up Archer. Ces aéronefs adressent le chaînon manquant entre « vous êtes à pied ou en trottinette » puis « vous allez prendre le train », et via un terminal dédié, vous prenez une « navette rapide volante, électrique, autonome » vers un aéroport pour prendre un avion (Figure 20). Il s'agit de la continuité de mobilité au sens large, qui ne sera pas forcément uniquement terrestre et pose des enjeux nouveaux d'interopérabilité, de certification, d'acceptation sociétale...

En dernier lieu, **le levier d'Intelligence économique**, dont l'importance est déjà perceptible et pourrait s'imposer comme un levier majeur. Comme nous l'avons vu, l'écosystème de la filière automobile est complexe, les enjeux majeurs et les opportunités nombreuses. Ainsi, il est essentiel de pouvoir se

doter de moyens pour acquérir l'information, développer des réseaux d'échanges, de mettre en place des veilles, de savoir ce qui se passe dans l'économie, le normatif, le monde des start-ups, de voir comment tout cela est financé, disruptif et pourrait impacter le monde de l'automobile ou exposer à de nouvelles dépendances. Par exemple, les membres de la filière ont contribué à la mission Philippe Varin qui avait pour but de formuler à l'État français des recommandations pour la sécurisation et l'approvisionnement en matières premières critiques.

C'est tout l'écosystème de la filière automobile (Figure 21) qui est à l'œuvre : experts et acteurs dans chacun des domaines, avec des réseaux qui s'appuient sur chacune des sociétés, des membres de la filière et nos réseaux externes qui sont sollicités. Cela anime toutes les compétences dans une dynamique forte.



Figure 20

Aéronef à décollage et atterrissage vertical.

Source : Archer.



Figure 21

Écosystème de la filière automobile.

Source : PFA.

3 Les compétences rares

Il est indispensable, dans toutes les réflexions prospectives qui sont abordées dans ce chapitre, de ne pas oublier la place majeure des futures compétences rares et stratégiques. Leur nombre est actuellement trop restreint, vu l'importance des enjeux de la neutralité carbone, de l'électrification, de l'économie circulaire... il faut les multiplier. C'est un travail de formation qu'il faut accentuer, poursuivre, voire transformer. La PFA a travaillé avec les communautés d'experts de la Société des ingénieurs de l'automobile (SIA), pour rédiger **le livre blanc des compétences rares et d'avenir pour l'automobile** (Figure 22), montrant que l'évolution du véhicule et des mobilités ne se fera pas sans l'évolution des compétences.

Dès lors, nous pouvons classer les compétences selon 4 grands axes principaux :

Les compétences liées aux mega trends¹⁷, c'est-à-dire tout ce qui est évolutions profondes de nos sociétés et modes de vie. La société sera de plus en plus urbanisée, concentrée et pourtant fractionnée : on le voit avec les différentes tensions qui nous entourent. Mais également, l'évolution de l'usage plutôt que la possession. L'importance du développement durable, de la neutralité carbone ou de la digitalisation, bouscule nos modes de vivre,

17. Anglicisme qui correspond à une transformation puissante qui a des répercussions sur l'économie et la société.

de travailler, de dépenser et nos inspirations les plus profondes. Des nouvelles attentes de mobilité résulteront de ces évolutions... donc de nouvelles compétences seront nécessaires.

Il y aura aussi **les compétences liées aux nouvelles technologies**, nous en avons parlé : véhicules électriques, connectés, l'hydrogène, nouveaux services, infrastructures connectées et d'interopérabilité des systèmes y compris non terrestres... Les compétences associées à ces évolutions technologiques seront donc renforcées.

Mais un véhicule même électrique, hydrogène, ou autonome, cela reste un objet de plaisir et d'attraction. Donc il restera **des compétences « cœur de métier »** dans l'industrie de la vente, du commerce, de la sûreté de fonctionnement, de la simulation et de l'électronique, qui doivent être renforcées et adaptées.

Et puis il y a **les compétences traditionnelles à maintenir**. Un véhicule demandera toujours à être entretenu et réparé, à passer en concession, avec des circuits de logistique et de réseaux qui se transforment profondément.

Le monde enseignant dans son entièreté, professeurs et étudiants, doit être informé de ces compétences rares pour l'automobile, celles qui réclament l'effort de formation le plus urgent. C'est obligatoire pour la filière automobile, ce sont aussi des « opportunités » exceptionnelles pour les carrières.

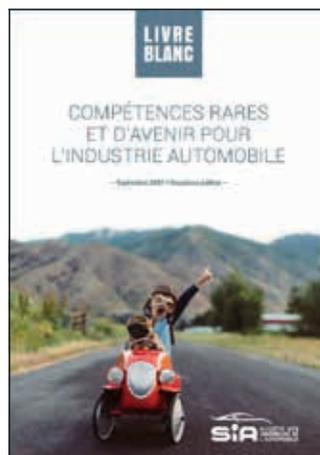


Figure 22

Livre blanc : *Compétences rares et d'avenir pour l'industrie automobile*.

Source : SIA.

Conclusion

Sur plusieurs points, ce chapitre évoque une vision futuriste et inspirante : elle s'aventure dans des technologies ou dans des pratiques souvent étonnantes dont on se demande parfois si elles sont réalistes ou simplement des fiction. Mais non, c'est bien la réalité de la planète !

L'automobile va bien plus évoluer dans les 10 prochaines années qu'elle ne l'a fait dans les 100 dernières. Toutes les technologies étaient « sur du thermique », maintenant tout sera hybride ou électrique : nous hybridons les technologies, les énergies, les matériaux et les compétences.

Un des enjeux planétaires de toutes ces évolutions est d'arriver au niveau européen à la neutralité carbone en 2050. Mais pour les constructeurs, les échéances sont plus courtes : basculer toutes les productions de véhicules sans émission au plus tard en 2035, arriver volontairement à une neutralité carbone entre 2038 et 2040. Il ne s'agit pas d'une génération, mais d'une demi-génération... un rythme de sprinter !

Les technologies vont évoluer, le contenu véhicule va évoluer, les expositions à des nouveaux matériaux vont évoluer, les dépendances aussi vont évoluer. **Tous les leviers présentés dans ce chapitre vont être utilisés** d'une manière qui dépendra des situations géopolitiques, conjoncturelles, ou structurelles. Dans l'industrie automobile, nous ne parlons pas de métaux rares pour éviter la confusion avec les terres rares. Nous parlons bien de matériaux critiques et de matériaux stratégiques pour les chaînes industrielles. Ceux-ci ne sont pas que des minerais, ce sont aussi des métaux, des polymères, des plastiques, même des ressources naturelles, qui peuvent être utilisés.



Figure 23

Citation sur la prise de conscience autour du climat en Europe.

Du côté de l'organisation collective face à ces enjeux, des outils nationaux, transnationaux et européens commencent à se mettre en place. Ce sont eux qui alimentent les différents leviers, objets du présent chapitre. **L'objectif reste dominant : il faut réduire nos dépendances en utilisant les six différents leviers présentés ici.**

Une conclusion sur la prise de conscience politique sur cette exposition aux matières stratégiques est résumée sur la **Figure 23**. Dans son récent discours de l'Union européenne, en septembre 2022, la présidente de la Commission a clairement affirmé que : « notre ambition en tant qu'Européen est de devenir le premier continent climatiquement neutre » en 2050 « et cette transition ne pourra se matérialiser sans un accès sûr et durable aux ressources ».

C'est bien là la clef de toute l'industrie automobile !¹⁸

18. Donc pour avoir une vision complète de tout ce qui est lié à la transition énergétique, consultez le rapport de l'Union européenne, qui renvoie sur tout ce qui est matériaux critiques pour les technologies bas carbone et la transition énergétique dont notamment le véhicule électrique.

Les enjeux matériaux pour la fabrication et le recyclage des éoliennes

Frédéric PETIT est directeur Business Development de Siemens Gamesa France.

La **Figure 1** est une usine d'éoliennes en mer mise en production par la société Siemens Gamesa Renewable Energy au Havre en mars 2022. C'est le plus gros projet industriel jamais réalisé en France dans les EnR¹. Elle est couplée avec des infrastructures portuaires fournies par HAROPA² pour le port du Havre. Ce sera notre introduction de ce chapitre

1. EnR : Energies Renouvelables.
2. HAROPA : complexe portuaire regroupant les ports de Rouen, de Paris et du Havre.

du thème « Chimie et matériaux stratégiques » pour la fabrication et le recyclage des éoliennes.

1 Sobriété et besoins en nouveaux moyens de production électrique

La France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone en 2050 afin de lutter efficacement contre le dérèglement climatique. Cela va l'amener à réduire sa consommation globale d'énergie d'environ



Figure 1

Usine Siemens Gamesa du Havre.

(Crédit photographie Vinci Construction – Photographe Jacques Basile)

PRÉSENTATION DE LA SOCIÉTÉ SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY SAS

L'effectif de la société en France est d'un peu plus de 1 200 personnes dont plus de 900 sur l'usine du Havre. La société dispose d'un plan de recrutement actif de plus de 100 personnes. Les offres d'emploi se trouvent sur notre site corporate L'Usine d'éolienne en mer au Havre (siemensgamesa.com).

Dans l'éolien en mer, Siemens Gamesa Renewable Energy va mettre en production d'ici à 2026 cinq projets de 500 MW soit 2,5 gigawatts, ce qui correspond à l'alimentation d'électricité pour 4 millions de personnes environ. La société exploite une trentaine de centres de maintenance pour l'éolien terrestre au plus près des parcs d'éoliennes (**Figure 2**). Un centre de R&D installé à Rouen travaille notamment sur les effets de sillage sur les éoliennes en mer ou à terre.

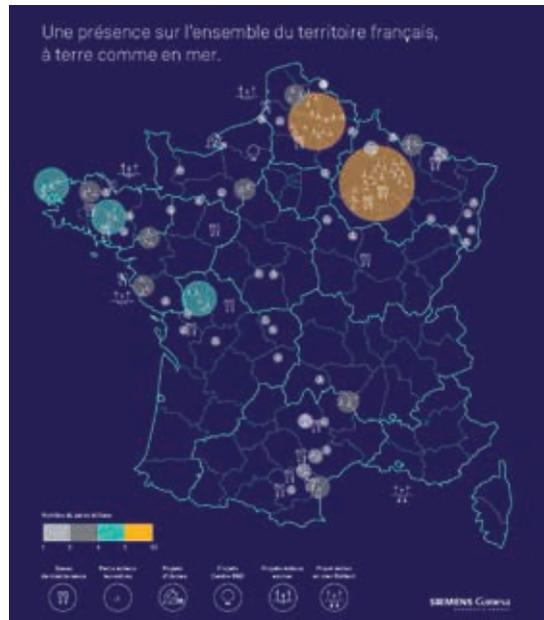


Figure 2

Présence de Siemens Gamesa Renewable Energy en France.

1 600 TWh aujourd'hui à une valeur comprise entre 900 et 1 200 TWh selon les scénarios RTE, soit une baisse pouvant aller jusqu'à 40 % (Figure 3). Ceci imposera une baisse de consommation des énergies fossiles alors que, dans le même temps, une croissance des besoins en électricité de 40 % d'ici à 2050 est à prévoir du fait notamment des nouveaux usages, véhicule électrique, hydrogène, pompes à chaleur, etc. Ces indications sont celles de la SNBC³ ainsi que de RTE⁴, le gestionnaire de réseau.

Les maîtres-mots pour répondre à cette situation sont : sobriété et efficacité.

3. SNBC : Stratégie Nationale Bas-Carbone.

4. RTE : Gestionnaire de Réseau Transport Electricité.

2 Bénéfices sociétaux de l'éolien – Stratégie Développement durable Siemens Gamesa Renewable Energy

En termes d'émissions carbone, que fait Siemens Gamesa Renewable Energy ? L'entreprise est aujourd'hui déjà neutre en carbone depuis fin 2019. Elle sera « net-zéro » sur les scopes 1 et 2⁵, la partie directe et la partie indirecte d'ici à 2030. En 2040, elle sera également « net-zéro » sur le scope 3 (Figure 5).

5. Scopes 1, 2 ou 3 : dans le bilan de gaz à effets de serre, le scope désigne le périmètre 1 pour le plus près et 3 pour le plus éloigné. Ainsi, le scope 1 fait référence aux émissions directes, le scope 2 aux émissions indirectes liées à la consommation d'énergie et le scope 3 aux émissions de la chaîne de sous-traitance.

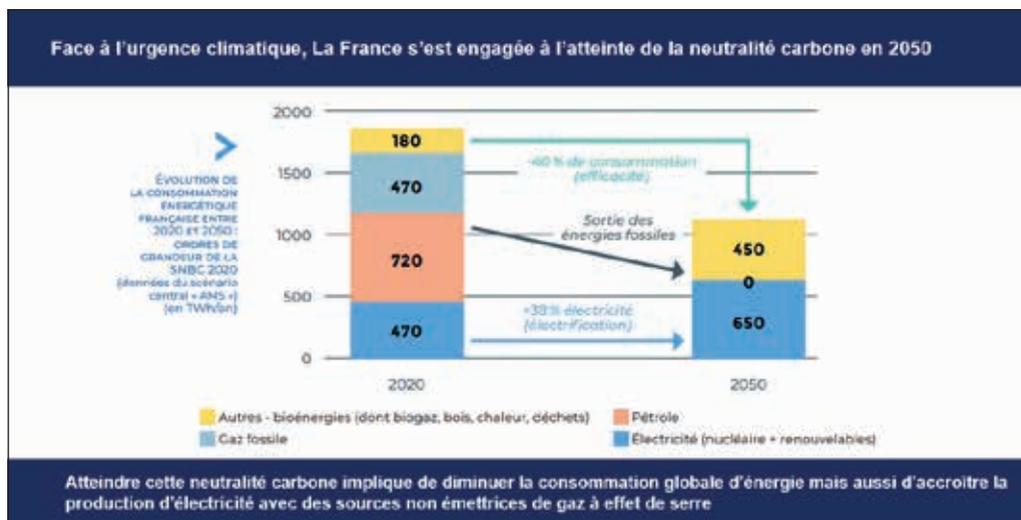


Figure 3

Évolution de la consommation d'énergies en France entre 2020 et 2050.

POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE À MOYEN TERME EN FRANCE

RTE a étudié une série de scénarios (**Figure 4**) en considérant divers équilibres entre les sources d'énergie accessibles, de l'éolien, du solaire, de l'hydraulique, du nucléaire, et évidemment en arrêtant tout ce qui est centrale à charbon et en réduisant le gaz et le pétrole.

Le travail de RTE montre qu'en 2050, il faut qu'on ait installé un minimum de 50 % d'énergies renouvelables en France, quel que soit le scénario. Les ambitions affichées officiellement par le président Macron en février 2022 reposent sur la construction de centrales nucléaires au niveau de 6 EPR2 et une trajectoire qui prévoit 40 GW d'éolien en mer et 40 GW d'éolien terrestre d'ici à 2050.

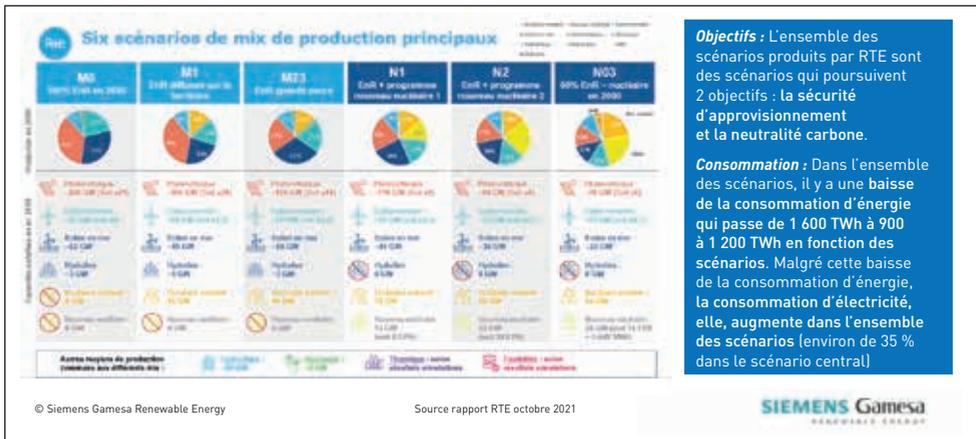


Figure 4

Scénarios RTE de la production d'énergie en 2050.

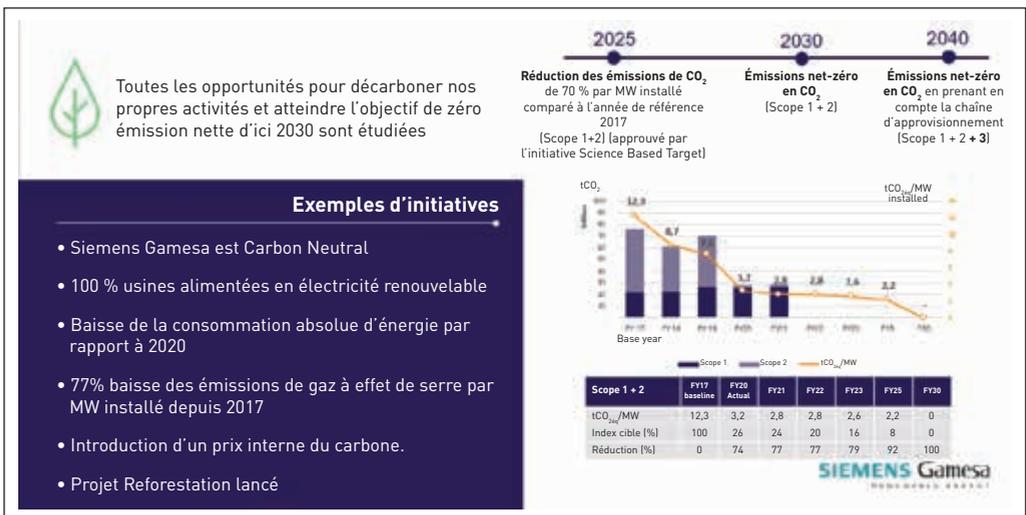


Figure 5

Objectifs de Siemens Gamesa en termes de neutralité carbone.

BÉNÉFICES SOCIÉTAUX DE L'ÉOLIEN EN MER

Sur l'éolien en mer, cette source d'énergie est non seulement décarbonée mais également très compétitive. Pour le dernier appel d'offres de Dunkerque attribué en France en juin 2019, le prix de l'énergie était de 44 euros du mégawattheure, à comparer à l'état des prix sur le marché spot autour de 150-200 €/MWh.

On a eu cet hiver (**Figure 6**) des anticipations de prix jusqu'à 1 600 euros du mégawattheure alors que la filière éolienne terrestre ou en mer permet de défendre activement le pouvoir d'achat des Français. Aujourd'hui, l'éolien va rapporter en France à peu près 23 milliards d'euros (chiffres de la Commission de régulation de l'énergie).

L'énergie éolienne n'était certes pas encore aussi compétitive il y a quelques années, mais il y a eu depuis beaucoup d'investissements dont on a aujourd'hui les bénéfices en termes de compétitivité. Par ailleurs, l'éolien en mer est créateur d'emplois : il a déjà créé plus de 6 500 emplois en France et nous ne sommes qu'au début de l'aventure. 20 000 emplois sont prévus d'ici à 2035 sur la base de 18 GW raccordés à cet horizon.

L'éolien en mer est d'autre part une activité très européenne. L'Europe est techniquement à la pointe et le marché va s'accélérer, malgré une concurrence asiatique de plus en plus insistante. Au moment où l'activité s'accélère, il faut que l'Europe puisse continuer à récolter, également sur le plan de l'emploi, les fruits de son investissement initial pour préserver la compétitivité.

L'industrie éolienne européenne est cependant au milieu d'une grave crise, menaçant l'avenir de l'Europe en tant que leader des énergies renouvelables et la liberté de l'Europe à pouvoir prendre des décisions énergétiques souveraines. Toute l'industrie éolienne devrait investir, mais les fabricants d'éoliennes subissent actuellement des pertes massives. Siemens Gamesa suggère cinq étapes pour protéger l'industrie éolienne européenne :

1. Transformer les objectifs en projets réels et fournir une visibilité marché
2. Stabiliser les chaînes d'approvisionnement et gérer les risques de prix
3. Soutenir l'innovation et favoriser les compétences technologiques
4. Établir des règles du jeu équitables
5. Investir aujourd'hui dans l'avenir d'une industrie d'importance stratégique

La France, par ailleurs, est bien placée puisqu'un tiers des usines européennes de pales et de nacelles sont localisées sur son territoire. Siemens Gamesa et General Electric disposent en effet de 4 usines en France sur les 12 usines de pales et nacelles de la filière en Europe. La France dispose également de champions comme les Chantiers de l'Atlantique.

Autre point positif : le démantèlement aisé et le taux de recyclabilité de nos installations sont parmi les plus élevés.



Figure 6

Bénéfices sociétaux de l'éolien en mer.

Les consommations électriques des sites de l'entreprise sont aujourd'hui toutes d'origine EnR (Énergie Renouvelable). Siemens Gamesa Renewable Energy saisit également toute initiative permettant de réduire en permanence ses consommations : par exemple, à Courbevoie, on vient d'adopter l'éclairage LED pour l'ensemble des bureaux, une petite contribution mais un message important, ou au Havre où l'usine a été conçue pour réduire au maximum ses consommations en énergie.

3 Recyclage des éoliennes et des pales

Le cycle de vie (Figure 7) des éoliennes est pris en compte depuis la conception, les matériaux, la production, leur installation en mer, la maintenance (les éoliennes sont conçues pour durer un minimum de

25 ans) et jusqu'au démantèlement.

Aujourd'hui, en termes de CO₂, le retour sur investissement (le payback⁶) est en un peu moins de 8 mois par rapport à l'énergie nécessaire pour produire l'éolienne, l'installer et la démanteler. La différence est spectaculaire : il s'agit de 6 g/kWh, comparé à plus de 800 grammes par kilowattheure pour une centrale charbon (Figure 8).

Sur la droite de la Figure 8 sont portés les équivalents d'émissions par composants. Une éolienne est constituée principalement d'acier, d'aluminium et de cuivre, matériaux que l'on sait recycler simplement puisqu'une éolienne se recycle déjà à plus de 90 %. Il y a néanmoins un défi sur les pales. Aujourd'hui on leur applique une « valorisation thermique » c'est-à-dire qu'on

6. Payback : retour sur investissement.

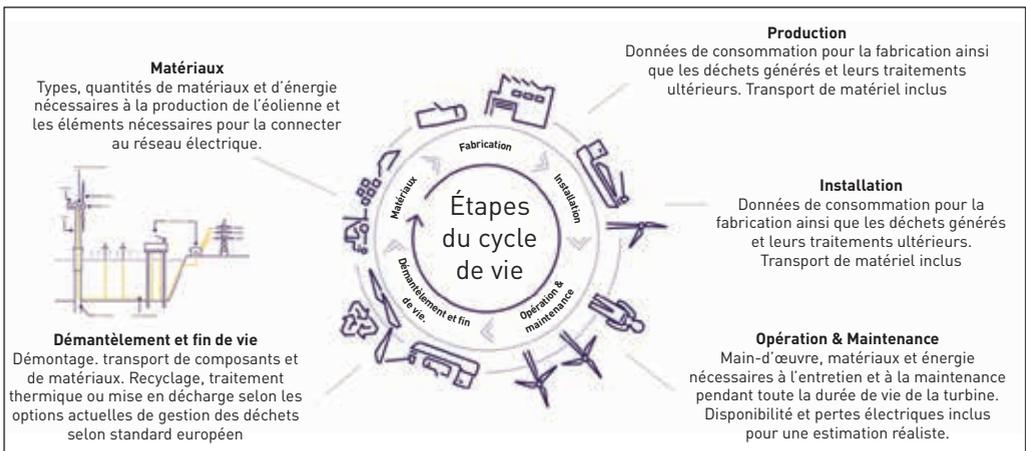


Figure 7

Cycle de vie d'une éolienne.

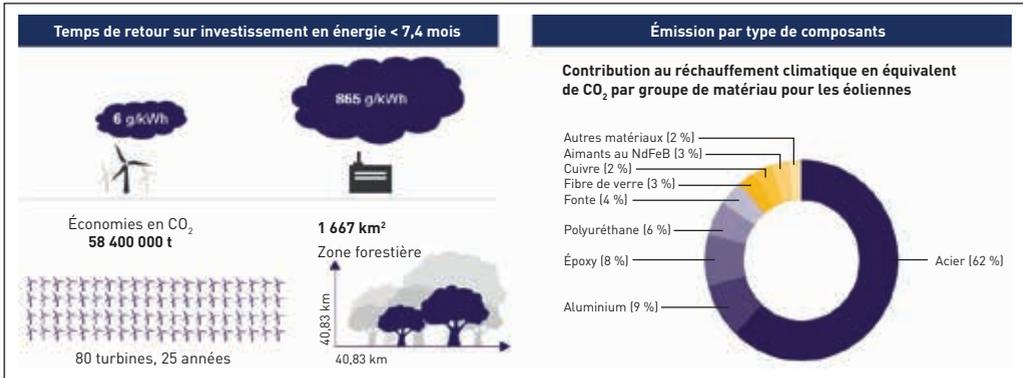


Figure 8

Émissions d'une éolienne.

les brûle dans des cimenteries par exemple, une technique admissible mais qu'il faut chercher à améliorer.

Pour l'éolien en mer, Siemens Gamesa propose à ses clients la solution RecyclableBlade depuis 2021 (Figure 9). Cette solution met en œuvre une nouvelle sorte de résine qui permet, en trempant la pale en fin de vie dans un bain

légèrement acide chauffé à environ 80 °C, de séparer la fibre de verre de la résine et de réutiliser celle-ci, par exemple pour l'industrie automobile (fabrication de tableaux de bord) ou chez les aviateurs (coffres à bagages) ou des coques de protection pour les écrans plats.

Depuis deux mois, Siemens Gamesa propose également



Figure 9

Technique de recyclage des pales d'éoliennes.

cette solution pour l'éolien terrestre.

En termes de caractéristiques techniques et de garantie de durabilité, ces nouvelles résines ne présentent pas d'inconvénients. Leur utilisation crée de la valeur pour nos clients et pour la société. Le critère de recyclabilité des pales a été introduit dans le quatrième appel d'offres pour l'éolien en mer (*Figure 10*).

Notre RecyclableBlade est une solution simple et robuste, développée grâce à l'ingéniosité technologique. Le seul changement apporté au processus de production des lames est notre nouvelle résine.

La première installation commerciale d'une technologie d'éolienne recyclable a récemment eu lieu sur le projet éolien offshore Kaskasi de RWE en Allemagne. Ce projet a été mis en production fin 2022. Cette solution sera également mise en œuvre sur le projet éolien en mer du Calvados d'EDF Renouvelables. Ces pales recyclables seront produites depuis l'usine du Havre et ce projet sera mis en production en 2025.

4 Matériaux d'une éolienne et sources d'approvisionnement

En ce qui concerne les matériaux stratégiques ou les matières rares, notre principal souci, initié par la crise Covid, a été que tous les prix ont fortement augmenté (*Figure 11*) : l'acier, le cuivre, les aimants permanents et les coûts logistiques notamment. Et on ne parle pas de 20 ou 30 %, mais de facteurs 2, 3, ou plus.

Le contexte dans lequel Siemens Gamesa et les autres turbinières ont évolué, a complexifié leur rentabilité d'une manière radicale. Si l'on regarde les chiffres européens, tous les turbinières européens ont rencontré le même problème et sont en situation financière délicate. Cette situation était totalement imprévue ; les indexations des contrats étaient loin de prévoir des variations aussi anormales et sur un scope aussi étendu.

En même temps, le sujet de souveraineté industrielle doit revenir au cœur des préoccupations. Par exemple, sur les aimants permanents ou sur les terres rares, on maîtrisait



Figure 10

Les avantages des pales recyclables.

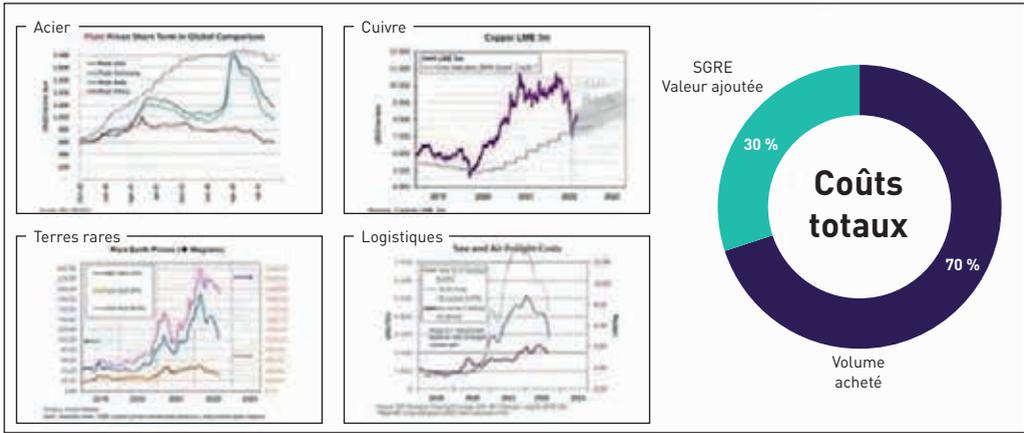


Figure 11
Volatilité des prix des matériaux depuis le Covid.

la fabrication en France ou en Europe il y a 25-30 ans, mais on a laissé partir cette industrie. Il faut la faire revenir, ne serait-ce que pour éviter des incertitudes aussi dangereuses sur les prix des matériels.

5 Croissance attendue du marché de l'éolien en mer

Les terres rares et les aimants permanents sont mis en œuvre sur les éoliennes en mer depuis 2015. Les terres rares n'ont de rare que le nom, il y en a en effet un peu partout sur la planète. Mais les seuls fournisseurs d'aimants permanents sont en Chine. Aujourd'hui l'industrie l'automobile est confrontée à cette même réalité. Avoir un système où l'on pourrait relocaliser des productions d'aimants permanents en Europe et en France pour regagner en souveraineté serait un choix politique extrêmement positif.

Une précision sur le recyclage : Siemens Gamesa a déjà su recycler les aimants permanents pour en produire de nouveaux pour des éoliennes plus puissantes. En même temps, c'est une question que l'on regarde avec une certaine sérénité car les échéances ne sont pas si proches. On va installer en France notre premier projet en mer en 2023 et il sera démantelé en 2050 au plus tôt. On a du temps devant nous pour mettre au point la meilleure solution, y compris sur un plan économique. Un autre avantage de l'éolien, c'est le caractère localisé et non diffus. Cette caractéristique va simplifier le démantèlement et le recyclage de leurs aimants permanents (Figure 12).

Sur le long terme, la France s'est engagée à attribuer 2 gigawatts par an à partir de 2025. La mise en œuvre de cet objectif va demander une planification spatiale et un choix des sites. L'État a décidé d'engager cette démarche lors

<p>Fournisseurs (aimants)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Principalement en Chine (contrat long terme) • Recherche de nouveaux fournisseurs selon la stratégie de Global Sourcing 	<p>Responsabilité corporate</p> <ul style="list-style-type: none"> • Clauses de protection de l'environnement • Code de conduite • Audits 	
<p>Développement</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction et élimination des terres rares lourdes (Dysprosium & Terbium) 	<p>Recyclage</p> <ul style="list-style-type: none"> • À partir de 2040 pour les éoliennes installées en 2015 • Solution déjà mise en œuvre sur les prototypes • Taux de recyclage proche de 100 % 	

Figure 12

Présence des terres rares dans de nombreux produits.

Long terme (2050) : Le Président a précisé le 10 Février 2022 un objectif de 40 GW – 50 parcs
Moyen terme (2035) : Signature le 14 mars 2022 du pacte éolien en mer avec l'État (2 GW/an à partir de 2025)




**PACTE ÉOLIEN EN MER
ENTRE L'ÉTAT ET LA FILIÈRE**

Engagements du Pacte :

L'État confirme son engagement pour un déploiement ambitieux de l'éolien en mer au large des côtes françaises.

Pour cela, l'État s'engage notamment à :

1. Viser un volume minimal d'attribution d'appels d'offres de 2 GW/an pour l'éolien en mer dès 2025 ;
2. Dans cette dynamique, fixer l'objectif de 20 GW attribués en 2030 pour atteindre une capacité de 18 GW en service en 2035 et de 40 GW en 2050 ;
3. Dans le cadre de l'élaboration de la PPE, réaliser des travaux de planification pour permettre l'atteinte de ces objectifs.

De son côté, la filière s'engage à concevoir et réaliser des projets exemplaires du point de vue technologique, social et environnemental et maximisant les retombées sociales et économiques.

Pour cela, la filière s'engage notamment à :

1. Viser un quadruplement du nombre d'emplois de la filière pour occuper, d'ici 2035, au moins 20 000 emplois (directs et indirects) sur le territoire ;
2. Engager plus de 40 milliards d'euros d'investissements pour la réalisation des projets, au cours des 15 prochaines années ;
3. D'ici à 2035, atteindre un contenu local à hauteur de 50 %, calculé sur l'ensemble des coûts du projet, au moment de sa mise en service, pour chacun des projets éoliens en mer ;
4. Mettre en œuvre des projets exemplaires en matière d'intégration à l'environnement, humain comme naturel, dans lesquels ils s'insèrent.

Figure 13

L'éolien en mer sur le long terme.

du CIMER de janvier 2021. Il y a urgence à échanger avec l'ensemble des parties prenantes, évidemment les pêcheurs, mais aussi les usagers maritimes, les militaires... pour trouver les sites les plus propices (Figure 13). En fait,

50 gigawatts d'éolien en mer en 2050, ce serait moins de 2,7 % de l'espace métropolitain français, à comparer aux 15 % que les Belges vont mobiliser. Cette concertation doit permettre d'identifier les zones les plus propices.

L'éolien : un parcours vers la compétitivité - gagné (et une souveraineté à défendre !)

Plus encore que d'autres branches industrielles, l'éolien a placé une très forte priorité sur le respect de l'environnement. Ce n'est pas une surprise puisque la technique de base elle-même, l'utilisation du vent, est consubstantielle au climat, à la météorologie et à l'utilisation de l'espace, terrestre traditionnellement, mais aujourd'hui également maritime, où il doit se faire accepter.

La compétitivité était une des contraintes que cette industrie a su surmonter. Même en restant rigoureux sur le respect de l'environnement, il convient de continuer à produire à coûts contrôlés. Ceci nous conduit à adopter la politique de ramener en France et en Europe, des compétences récemment et partiellement émigrées en Asie.

L'éolien est une des sources énergétiques indispensables pour une transition énergétique et décarbonée réussie !

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

Patrick MAESTRO, Denis BORTZMEYER

*Patrick MAESTRO est directeur scientifique du groupe Solvay.
Denis BORTZMEYER est directeur scientifique dans le groupe
Arkema.*

1 Bref état de l'art sur les polymères

1.1. Définition

La **Figure 1** montre le « plat de nouilles » que Pierre-Gilles de Gennes donnait comme illustration du comportement d'un polymère. La **Figure 2** schématise les molécules composantes de ces « nouilles », les monomères. C'est de la chimie, de la chimie organique, de la chimie de polymérisation qui va faire en sorte d'associer ces monomères¹.

1. Les monomères sont de petites molécules qui forment les polymères en se regroupant.

1.2. Applications des polymères

Les polymères ? Ils sont partout ; c'est ce que la **Figure 3** illustre. Sans polymères, pas de téléphone, pas de prothèses, pas de voitures, pas d'avions, pas de trains, en tous cas pas au niveau de performance énergétique permis par la légèreté et les performances mécaniques et électromagnétiques qu'amène le polymère. On trouve aussi des polymères dans les formulations liquides, des polymères hydro-dispersables ou oléo-dispersables, qui sont à la base des compositions des shampoings, des cosmétiques, des

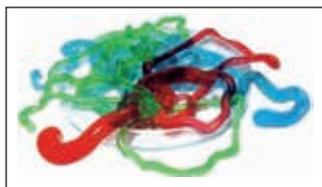


Figure 1

Représentation imagée d'un polymère proposée par Pierre-Gilles de Gennes.

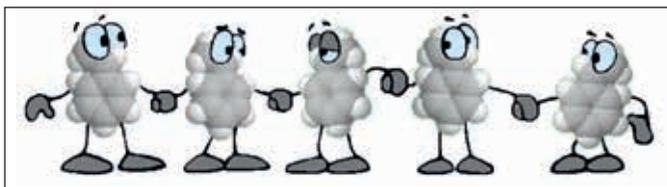


Figure 2

Représentation imagée d'un polymère comme une association de monomères.



Figure 3

Multiplés exemples de domaines où sont utilisés des polymères.

peintures, des lubrifiants, et encore des formulations pour l'agrochimie.

1.3. Quelques exemples de polymères

Les polymères des objets du quotidien sont essentiellement issus de synthèses, à partir d'enchaînements de molécules simples, appelées monomères, comme celles qui sont représentées sur la **Figure 4**.

Le choix et l'assemblage des unités de base permettent de définir les propriétés du polymère final. On peut donc voir que l'intervention de la chimie est cruciale pour la synthèse des polymères. Au passage, notons l'ambiguïté de l'expression « chimie décarbonée » utilisée quand on parle du changement climatique, car le carbone, c'est déjà toute la chimie organique et la chimie du vivant. Il vaudrait

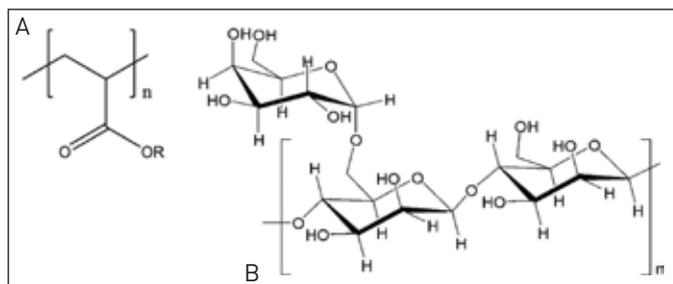


Figure 4

Exemples de polymères synthétiques (A) les polyacryliques et de polymères naturels (B) les polysaccharides.

donc beaucoup mieux parler d'une chimie durable, respectueuse de l'environnement, ce que, par exemple, l'utilisation raisonnée de la biomasse, le recyclage, la biodégradabilité contrôlée, permettront d'obtenir dans le futur. Il existe aussi quelques polymères naturels et la **Figure 4A** donne un exemple de **polymères synthétiques** (les acryliques) et la **Figure 4B** de **polymères naturels** (des polysaccharides comme les guar²), ou les gommes xanthane³ que l'on utilise très largement pour modifier la rhéologie⁴ des dispersions dans un grand nombre de domaines, depuis l'alimentaire jusqu'à l'extraction du pétrole.

Une très grande gamme de polymères a été développée

2. La gomme de guar est un polysaccharide extrait de la graine du haricot de guar.

3. La gomme xanthane est un polysaccharide obtenu naturellement par l'action d'une bactérie sur des sucres.

4. La rhéologie est l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée.

dans les 50 dernières années. Parmi les plus répandus, citons les polyoléfines comme le polypropylène (**Figure 5A**), le polyéthylène (**Figure 5B**), célèbres « polymères de commodité », comme le PVC (**Figure 5H**) très utilisé dans l'industrie du bâtiment, ou encore les silicones (**Figure 5I**) qui sont des élastomères⁵.

Plus récemment se sont développés les **polymères de spécialité** proprement dits, couvrant un grand nombre de propriétés (mécaniques, thermiques, électromagnétiques...) et de ce fait un champ d'applications quasiment infini. On peut ainsi mentionner le PVDF⁶ (**Figure 5C**) essentiel dans la composition des batteries lithium en développement massif, les polymères fluorés qui ont des propriétés de protection contre l'humidité par exemple, mais aussi les

5. Un élastomère est un polymère élastique *i.e.* qui supporte de très grandes déformations avant rupture.

6. Le PVDF (Fluorure de PolyVinylidène) est un polymère fluoré doté d'une très bonne résistance aux UV, au feu et aux agents chimiques.

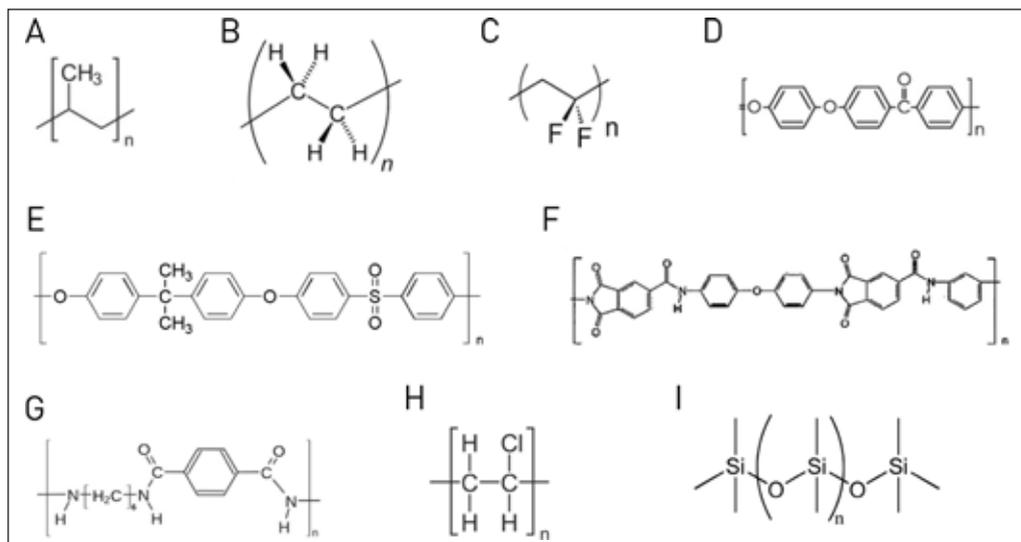


Figure 5

Exemples de polymères. A) Le polypropylène, B) le polyéthylène, C) le PVDF, D) les polycétones, E) les polysulfones, F) les polyamides imines, G) polyamides aromatiques, H) le PVC et I) les silicones.

polycétones (Figure 5D), polysulfones (Figure 5E), polyéthylène sulfure, polyamide imine (Figure 5F), des polyamides aromatiques (Figure 5G), que l'on retrouve abondamment dans notre vie quotidienne.

Les exemples de la Figure 5 font ressortir la très grande variété de polymères. On peut avantageusement les représenter dans une pyramide (Figure 6) où l'on retrouve, sous forme d'abréviations, toutes les molécules mentionnées. Un point majeur, qui accroît l'extrême variété du potentiel des polymères, c'est la possibilité de **combiner les performances en ajoutant des additifs appropriés, c'est-à-dire par la formulation.**

La première propriété des polymères, c'est la **légèreté**. C'est elle qui rend les polymères aussi appréciés par

les qualités d'usage : elle se traduit en **économie d'énergie** pour les objets qui roulent mais aussi en **facilité d'utilisation** : si nos téléphones ou nos ordinateurs portables ont été autant miniaturisés, c'est beaucoup grâce à cette légèreté des polymères. Autre avantage, à la légèreté on peut associer une quantité de propriétés : inertie chimique, résistance aux intempéries, protection à la corrosion, propriétés électromagnétiques, propriétés thermiques, propriétés de résistance à la rupture, etc. Et le transformateur peut alors combiner ces propriétés en fonction de l'application visée. Plus on monte dans la pyramide de la Figure 6, plus on va avoir des propriétés spécifiques recherchées dans les applications de nouvelles générations,

mieux pour les intégrer dans le polymère et lui conférer ainsi la bonne combinaison de propriétés.

Un bon exemple de cette nécessité de combiner diverses compétences, et d'ailleurs spécialement critique à l'heure actuelle, est celui de la recherche de nouveaux polymères pour le développement des batteries. Il faut du minéral : lithium, cobalt, manganèse, nickel, etc., pour assurer les propriétés électrochimiques, mais il faut également des polymères dans les séparateurs, dans l'enveloppe des batteries et chaque fois avec des propriétés très particulières, pas seulement électrochimiques, mais aussi par exemple de résistance au feu. Ces combinaisons optimisées doivent permettre d'aller vers des batteries « tout solide ».

2 Les grands défis

2.1. En général : des problèmes posés à la chimie

Le grand défi posé devant le développement de l'utilisation (et donc de l'industrie) des polymères, c'est de faire que leur synthèse et leur utilisation soient « durables » au sens où elles doivent économiser les ressources et l'énergie de la nature, et contribuer au respect de l'environnement.

Il devient de ce fait indispensable que les polymères soient désormais des « **matériaux renouvelables** », à **faible impact environnemental**. Une voie à développer peut être de les fabriquer à partir de la **biomasse**, à condition que l'accès à celle-ci soit pérenne

en termes de coût et de spécifications, et ceci sur le temps long. L'analyse complète des cycles de vie (en termes de coûts et d'impact environnemental) permet d'avoir une évaluation précise du procédé envisagé et peut révéler des surprises ! Une autre voie peut être le **recyclage**, mais ce n'est pas toujours sans difficulté non plus. Dans tous les cas, les options doivent être bien pesées et évaluées avec les outils adéquats.

La technique de recyclage peut être mécanique et destiner le matériau à une utilisation « bas de gamme », comme le remplissage dans des goudrons. Elle peut aussi être chimique et permettre de redescendre au monomère, voire à la molécule. Cette technique recrée une filière pour disposer de molécules de façon économique : cela pourrait alors conduire à la construction de bioraffineries, sur le modèle de la filière du pétrole où l'on dispose de toutes les molécules « au robinet », avec malheureusement aujourd'hui un impact environnemental élevé. Le problème est que dans les bioraffineries d'aujourd'hui, on ne produit parfois que quelques molécules. Un objectif ambitieux sera de développer des systèmes qui fournissent toutes les molécules dont on a besoin (ou un grand nombre), comme molécules biosourcées ou comme molécules recyclées. On se doute bien que cela prendra du temps, mais les efforts dans ce sens doivent être soutenus.

Tous les progrès dans cette voie, c'est la chimie qui les concevra et en fera une réalité.

Ces objectifs, vertueux mais obligatoires, posent les bases d'un **programme de travail aux laboratoires** :

- Travailler énormément sur l'accès à la matière première, les synthèses et les procédés associés.
- Perfectionner l'analyse environnementale. L'analyse de cycle de vie est primordiale parce que la mise en œuvre d'un nouveau procédé de fabrication pour un composé primaire à partir de recyclages de biomasse⁸ doit reposer sur une idée précise de l'impact environnemental.
- Évidemment, diminuer les coûts parce que retravailler ces chaînes de recyclage ou d'obtention de polymères à partir de la biomasse accroît aujourd'hui tendanciellement les coûts de production.
- Enfin, travailler les propriétés. Cela concerne au premier chef les laboratoires de science des matériaux. On a vu les propriétés clés : réduction du poids, propriétés thermomécaniques, résistance au feu, propriétés électromagnétiques, rhéologiques, etc., le tout en maîtrisant la formulation pour l'intégration des phases actives dans les polymères.
- Pour cela, il faudra déborder d'**imagination scientifique** pour accéder à ces synthèses innovantes, tout en gardant l'accès aux propriétés différenciantes des formulations de polymères.

8. La biomasse est la matière organique d'origine végétale (microalgues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons), utilisable comme source d'énergie.

2.2. Zoom sur l'enjeu du « sourcing⁹ »

La production mondiale de plastiques (**Figure 7**) est de l'ordre de 350 millions de tonnes. Cela paraît considérable, mais, comparé à la production annuelle de pétrole qui reste actuellement le « sourcing » majeur de notre carbone, c'est mineur. Les coûts des polymères sont affectés de toute façon, la réserve en carbone représentée par les polymères reste secondaire. La réflexion sur la remise en question du « sourcing » des matériaux polymères doit être faite à partir de sa place environnementale plutôt que sur les aspects de géopolitique, en se disant « comment avoir un sourcing qui permette d'avoir

9. « Sourcing » désigne l'« origine de la matière ou de l'élément considéré ».

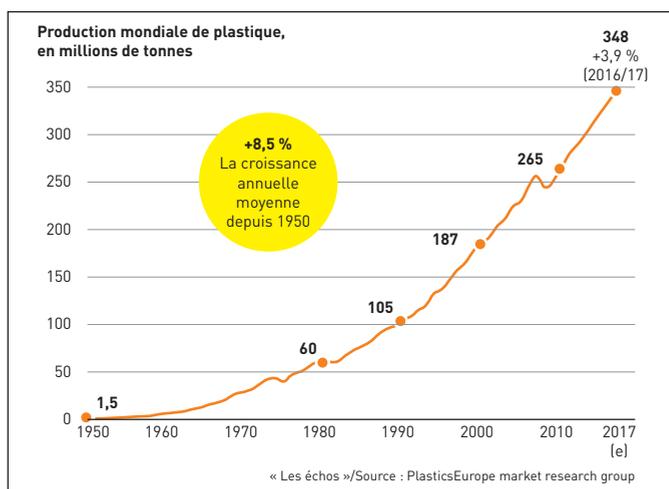


Figure 7

Évolution de la production mondiale de plastique en millions de tonnes de 1950 à 2017.

un meilleur impact environnemental ? », plutôt que « est-ce qu'on va trouver dans le monde suffisamment de carbone pour notre industrie des polymères ? ».

Quoi qu'il en soit, l'industrie des polymères comme toute industrie doit réfléchir à son impact environnemental (quelle est la fin de vie des matériaux ?) et en particulier à son impact en termes d'émissions de CO₂.

Pour les polymères, deux voies de gestion du carbone se présentent : d'une part, la voie « biosourcée » qui se résume par la question « comment, au lieu de partir du pétrole (un matériau pétrolier que j'extrait du sol) **avoir un carbone qui vient de l'atmosphère par une boucle courte** : CO₂ dans l'atmosphère, plante, utilisation dans un polymère, et retour dans l'atmosphère ? ». L'autre voie bien sûr c'est le recyclage : « Je fabrique un objet, je l'utilise, je le récupère, je retrouve le carbone dans son état de départ et je le réutilise

comme matière première ! ». J'ai ainsi une boucle vertueuse puisque mon matériau ne termine ni dans l'environnement ni dans l'atmosphère. C'est de cet aspect « **recyclage** » que l'on va traiter maintenant.

3 Le recyclage des polymères

3.1. Les technologies

Le recyclage des polymères existe déjà. Ainsi, dans le « packaging », une industrie pour laquelle la collecte est bien organisée, ou dans l'industrie des bouteilles, le recyclage des polymères fonctionne assez bien et de mieux en mieux (**Figure 8**). Malgré tout, sur l'ensemble des polymères, seulement environ le tiers est recyclé (**Figure 9**), une situation qu'il faut améliorer.

Mais comment ? Pour répondre à la question, il convient de regarder les technologies utilisées qui sont citées sur la **Figure 10**. Cet

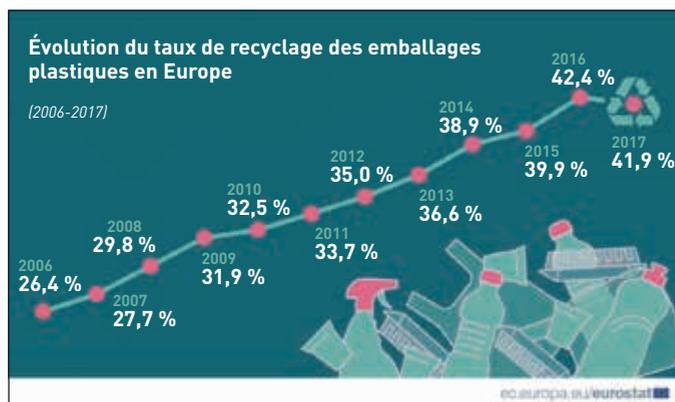


Figure 8

Évolution du taux de recyclage des emballages plastiques en Europe entre 2006 et 2017.

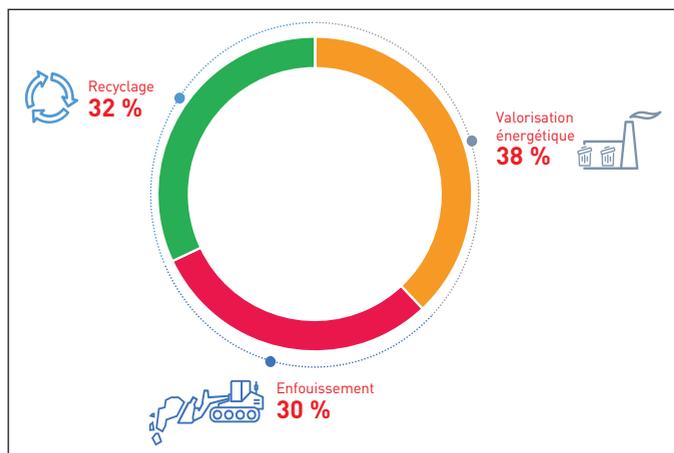


Figure 9
Répartition des différentes fins des vies possibles pour un polymère.

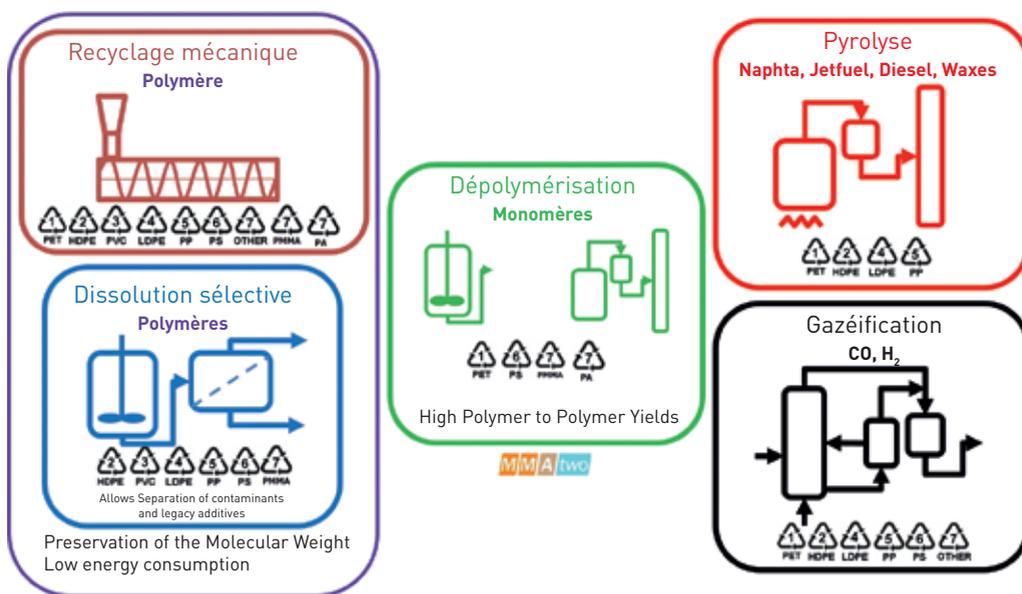


Figure 10
Technologies employées pour recycler les polymères.

aspect « technologie » est lié au problème de la collecte, c'est-à-dire de choisir ce que l'on récupère, un point majeur pour la chaîne du recyclage.

- Une première technologie est le **recyclage mécanique**, dans lequel on broie l'objet récupéré puis on l'injecte en filière

de fabrication. Si le produit est constitué de façon homogène, on peut effectivement procéder de cette façon-là. Le recyclage mécanique peut fonctionner mais il réclame un « sourcing » propre.

- Les polymères thermoplastiques des produits usagés,

quant à eux, peuvent être **refondus et renvoyés en fabrication**. Cette technique fonctionne bien si le produit de départ est pur, ce qui n'est pas garanti : dans un téléphone portable, même si on enlève les éléments mécaniques, il reste énormément de matériaux polymères différents, et on a affaire au recyclage d'un mélange compliqué dont les propriétés sont complexes et souvent inutilisables.

Cette situation conduit à un premier message sur lequel il convient d'insister : pour valoriser le recyclage par ces techniques, **il faut aller vers un éco-design des produits**, pour n'avoir à récupérer que des produits aussi purs et homogènes que possible.

- On a aussi des technologies à base de dissolution par des solvants.
- Des **techniques de dépolymérisation** peuvent aussi s'appliquer. C'est le cas où le polymère peut être ramené à l'échelle du monomère donc à son point de départ, purifié assez facilement et retrouver son état d'origine. Cette technologie s'adapte et permet **d'avoir un vrai recyclage**.
- Si ces séparations sont impossibles, car le mélange dans le produit est trop complexe, on peut avoir recours à des **technologies de pyrolyse**¹⁰. Pour simplifier, cela consiste à « tout brûler » sauf, qu'au lieu de brûler jusqu'à arriver au CO₂, on se limite à une pyrolyse intermédiaire, en général

10. Décomposition chimique d'un composé organique par une augmentation importante de sa température pour obtenir d'autres produits.

en l'absence d'oxygène. On récupère par ces techniques des mélanges complexes qui se rapprochent finalement du naphta¹¹ des raffineries et que l'on introduit dans le cycle industriel par les mêmes techniques.

Toutes ces technologies demandent encore des recherches pour être optimisées ; il reste beaucoup de choses à améliorer dans chacune d'elles pour qu'elles soient réellement applicables avec un bénéfice incontestable.

3.2. Exemple de la dépolymérisation des pales d'éoliennes

L'exemple des pales d'éolienne est intéressant. L'exploitation de l'énergie éolienne est soutenue par presque tout le monde (**Figure 11A**) mais, entre l'objectif écologique et la réalité, évidemment il y a trop de contraste, comme illustré par l'enfouissement des pales montré sur la **Figure 11B**. Les éoliennes, généralement faites en polymères époxy¹², sont difficiles à recycler. Le matériau Elium[®] mis au point par Arkema et mentionné sur la **Figure 12** a été utilisé pour fabriquer des pales. Il fait partie des polymères totalement dépolymérisables (**Figure 13**). Produit par un traitement thermique approprié, il peut être

11. Issu de la distillation fractionnée du pétrole, le naphta est un intermédiaire entre l'essence et le kérosène.

12. Se dit d'un corps formé à partir d'un époxyde, un composé à chaîne fermée dans lequel la fermeture du cycle est assurée par un atome d'oxygène reliant deux atomes de carbone.



Figure 11

L'éolien, un problème de recyclage des pales.



Figure 12

L'Elium®, un polymère dépolymérisable développé par Arkema.



Figure 13

Photographie d'une pale d'éolienne.

ramené jusqu'à l'échelle des monomères, purifié, et à ce moment-là refaire le matériau natif. C'est donc un matériau totalement recyclable.

3.3. Exemple du recyclage mécanique

Le recyclage mécanique comme vu plus haut et illustré (**Figure 14**) consiste à prendre un matériau, à le broyer puis à le réinjecter dans un procédé de fabrication (reprocesser). Ceci réclame un fort degré de pureté du matériau recyclé pour éviter les réactions et comportements parasites des impuretés.

Un deuxième message est important à faire passer : c'est que ces techniques de recyclage mécanique doivent être mises en œuvre sur des

matériaux purs. Or les matériaux purs, ce n'est pas forcément en fin de vie qu'un objet complet les offre. C'est en fait au cours du cycle de fabrication qu'on les trouve. Explication : la fabrication par injection, par exemple des pièces qui vont constituer les objets finis (chaussures de sport, de ski, etc.), ne se fait pas sans un certain taux de rebut. Ces rebus sont en général assez purs parce qu'ils correspondent à des pièces élémentaires et les recycler est tout à fait faisable et efficace.

Autre point important encore : **le recyclage de l'avenir commencera par la mise au point de « boucles courtes »** : le recyclage des rebus de fabrication. C'est beaucoup plus



Figure 14

Le processus du recyclage mécanique des polymères.

profitable, en termes de bénéfice environnemental, qu'une boucle longue où l'on fabrique un objet complet, l'amène en fin de vie, puis le recycle.

3.4. L'importance de l'éco-design

Un dernier **point important est l'éco-design**. Pour bien recycler, il est intéressant d'avoir des pièces homogènes en termes de matériaux. Cette chaussure (**Figure 15**), c'est la Cyclon™ : elle est faite presque intégralement



Figure 15

Photographie de la Cyclon™.

à partir de matériaux polyamides biosourcés (incidemment fabriqués par Arkema). Cela permet à cette chaussure en fin de vie d'être soumise à un broyage complet et réintroduite en fabrication pour refaire le même objet, puisque son design a été prévu pour cela. Cette façon de faire a une conséquence étonnante : cette chaussure n'est pas vendue mais louée aux utilisateurs ! On la loue et au bout de 6 mois, on la ramène au fabricant qui vous en donne une deuxième paire dans le cadre du contrat de location ; la vieille chaussure est passée dans le broyeur puis à nouveau dans l'injecteuse. Ce très intéressant concept de circuit fermé ne va peut-être pas se généraliser du jour au lendemain à l'ensemble des paires de chaussures, mais il illustre très bien l'importance de **faciliter le recyclage en repensant le design**.

Le recyclage : une aventure technique et scientifique qui commence !

Ce n'est pas forcément très glamour de travailler dans le recyclage... Ça fait un peu chiffonnier tout ça. En fait, **c'est vraiment une aventure qui commence** et c'est tout à fait passionnant.

Prenons l'exemple de la société Carbios qui industrialise une dépolymérisation par des procédés enzymatiques. Ils développent des procédés utilisant des enzymes¹³, donc des procédés du vivant, pour effectuer la dépolymérisation de bouteilles en PET¹⁴ et revenir au monomère. C'est vraiment une technologie de rupture.

L'industrie du recyclage va aussi voir des changements dans l'organisation des différents acteurs en faisant émerger des boucles courtes de recyclage ; de nouveaux acteurs se positionneront sur ce genre de technologies. Insistons encore une fois sur la nécessité de prendre en compte du recyclage dès le design. Nos adhésifs en donnent un exemple : sous la marque Bostik, nous avons déjà de nombreux projets de collage compatibles à un décollage facile pour permettre un démontage et une recyclabilité des objets.

La vigueur, le dynamisme et la richesse de l'industrie du recyclage, les thématiques scientifiques et industrielles impliquées **devraient attirer beaucoup de talents dans le proche avenir**, un résultat positif des changements culturels actuellement à l'œuvre vers les dimensions écologiques, les économies de ressources, naturelles, la prise en compte des bilans carbone, etc. **qui sont aujourd'hui réellement au premier rang des préoccupations de la société.**

13. Une enzyme est une protéine dotée de propriétés catalytiques c'est-à-dire qu'elle est capable d'accélérer une réaction chimique.

14. Le PET (PolyÉthylène Téréphtalate) est un polymère de type polyester.

Partie 3

Ressources et matériaux
pour la transition
énergétique

Transition énergétique, un accélérateur de notre dépendance aux métaux stratégiques

Patrick D'HUGUES, Christophe POINSSOT et l'équipe d'Intelligence minérale, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Présentation du BRGM

Le BRGM, Service géologique national, est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol dans une perspective de développement durable. Partenaire de nombreux acteurs publics et privés, son action est orientée vers la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques et la coopération internationale. Depuis sa création en 1959, le BRGM porte notamment la question des approvisionnements en ressources

minérales au cœur de ses missions et de son activité, à la fois sur le territoire national et à l'international (Afrique, Moyen-Orient et Amérique latine). Tout au long de son histoire, le BRGM n'a eu de cesse de développer ses compétences et connaissances tant en exploration minière qu'en développement de procédés de traitement ou de recyclage, et en intelligence minérale, le tout afin de fournir aux pouvoirs publics et aux industriels une veille stratégique et des actions de R&D pertinentes sur l'approvisionnement responsable en ressources minérales des filières industrielles.

1 Une augmentation de la demande – De la dépendance aux énergies fossiles à celle aux métaux

Il est clairement et scientifiquement établi que pour limiter l'ampleur du changement climatique, il faut mettre en place une « révolution énergétique » permettant de réduire significativement l'émission de gaz à effet de serre. Cette transition a commencé. Elle implique, bien évidemment, une diminution des consommations mais également une augmentation de l'efficacité énergétique, la mise en place de systèmes énergétiques bas carbone, de « réseaux intelligents » et de moyens de stockage de l'énergie. Dès 2015, un rapport de l'alliance Ancre¹ mettait en évidence que les quantités de béton, acier, cuivre et aluminium pour fabriquer les infrastructures de production d'électricité à partir d'ENR sont globalement supérieures à celles utilisées pour des installations utilisant des combustibles fossiles (pour une même quantité d'énergie délivrée). C'est dans ce contexte qu'a été réalisé le projet Surfer² en partenariat entre le BRGM, l'ADEME et le CNRS ISTER.

Ce projet visait à fournir des éléments de réponses sur la faisabilité de la TE française au regard des besoins en matière, eau et sol qui en découlent. Ce projet s'est plus précisément attaché à la caractérisation des intensités matières des principales technologies du système énergétique, c'est-à-dire la quantité de matière mobilisée pour une performance donnée. Parmi les ordres de grandeur à garder en mémoire, il faut 5 200 ha (52 km², la moitié de Paris) pour mettre en place des panneaux photovoltaïques (facteur de charge 15 %) permettant de remplacer un réacteur nucléaire de 1 GW fonctionnant à 75 %. Il faut environ 1 700 éoliennes de 2 MW (22 % de facteur de charge) pour remplacer un réacteur nucléaire de 1 GW fonctionnant à 75 %, soit 340 000 tonnes d'acier, ce qui représente 50 fois l'acier contenu dans la tour Eiffel. Le projet Surfer a également permis d'introduire la notion de besoins indirects (approche cycle de vie) associés à la mise en place des technologies de la TE. Ainsi une éolienne de 2 MW est constituée en moyenne de 446 tonnes d'acier, mais sur l'ensemble de son cycle de vie (donnée Ecoinvent), elle en a mobilisé quasiment le double (796 tonnes). Lorsque les intensités matières, telles que proposées par le projet Surfer ou par d'autres approches (modélisation), sont croisées avec des scénarios de transition énergétique, il est possible d'estimer des besoins matières dans le temps. De nombreuses études mettant en jeu des scénarios très contrastés ont été réalisées. Il est possible de citer les travaux de la

1. Ressources minérales et énergie – Rapport du groupe « Sol et sous-sol » de l'alliance Ancre (2015).

2. Projet Surfer : Inventaires des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique. Décembre 2020. Monfort D., Laurent F., Le Boulzec H., Lefebvre G., Muller S., Francois C., Andrieu B., Villeneuve J. <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4654-surfer.html>.

Commission européenne³, ceux de l'Agence Internationale de l'Énergie⁴ ou ceux d'Eurométaux et KU Leuven⁵. Quels que soient les scénarios utilisés et leurs ambitions en termes de transition énergétique ou de mobilité électrique, il est clairement établi que ces transitions sont très consommatrices de matières premières minérales et de métaux. Pour son scénario SDS (*Sustainable*

Development Scenario 2040) (Figure 1), l'AIE 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 et ceux en terres rares 7 fois supérieurs. Le lithium, le nickel, le cobalt sont des éléments intégrés aux électrodes des batteries Li-ion aujourd'hui utilisées dans les véhicules électriques. Les terres rares sont indispensables à la fabrication d'aimants permanents de grande puissance utilisés dans les éoliennes off-shore ou les moteurs électriques les plus performants.

L'étude KU Leuven-Eurométaux montre que le passage de la politique actuelle, en termes de prise en compte du changement climatique et de mise en place des énergies renouvelables (EnR), à une politique beaucoup plus ambitieuse aurait pour conséquence l'augmentation de la demande totale en

3. European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020

https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf.

4. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions World Energy Outlook Special Report (IAE 2021) - <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

5. Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. <https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf>.

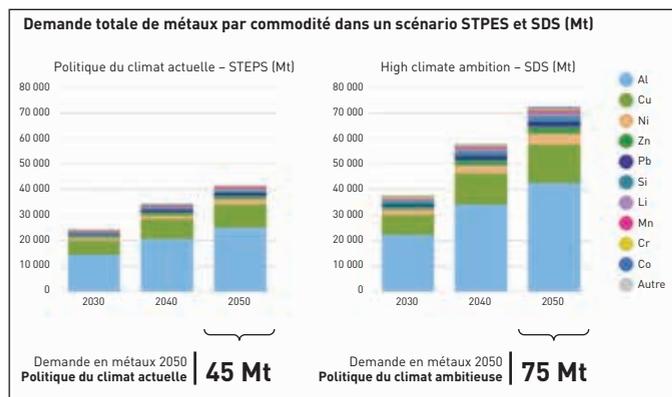


Figure 1

Demande totale par commodité selon 2 scénarios de l'AIE.

Extrait du rapport KU Leuven et Eurométaux. Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. <https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf>

commodités de 45 Mtonnes à 75 Mtonnes (en 2050). Il est important de noter ici que cette augmentation significative de la demande entre 2030 et 2050 affecte bien évidemment tous les métaux, mais qu'elle est particulièrement marquée (en tonnage total) pour les métaux de base comme le cuivre, l'aluminium et le nickel.

Lors de la publication de son étude sur les enjeux matière du réseau électrique français, RTE met en perspective que l'économie de la transition énergétique peut générer des tensions sur l'approvisionnement en ressources minérales, particulièrement pour certains métaux, qu'il sera nécessaire d'anticiper.

Les nouvelles technologies accompagnant la transition énergétique mais également celles accompagnant la

transition numérique sont très « gourmandes » en ressources minérales (**Figure 2**). C'est aujourd'hui plus d'une cinquantaine d'éléments chimiques qui sont mobilisés pour produire notre énergie quand seulement cinq étaient concernés au XVIII^e siècle et pas plus de vingt lors de la révolution industrielle. Les objets conçus sont de plus en plus complexes et les évolutions technologiques sont permanentes. La demande en métaux augmente donc en quantité mais aussi en diversité, ce qui peut générer des conflits d'usage avec des besoins qui se recoupent entre les différentes technologies et les différentes transitions. L'augmentation de la demande a pour conséquence directe une augmentation des risques de tension et de rupture sur

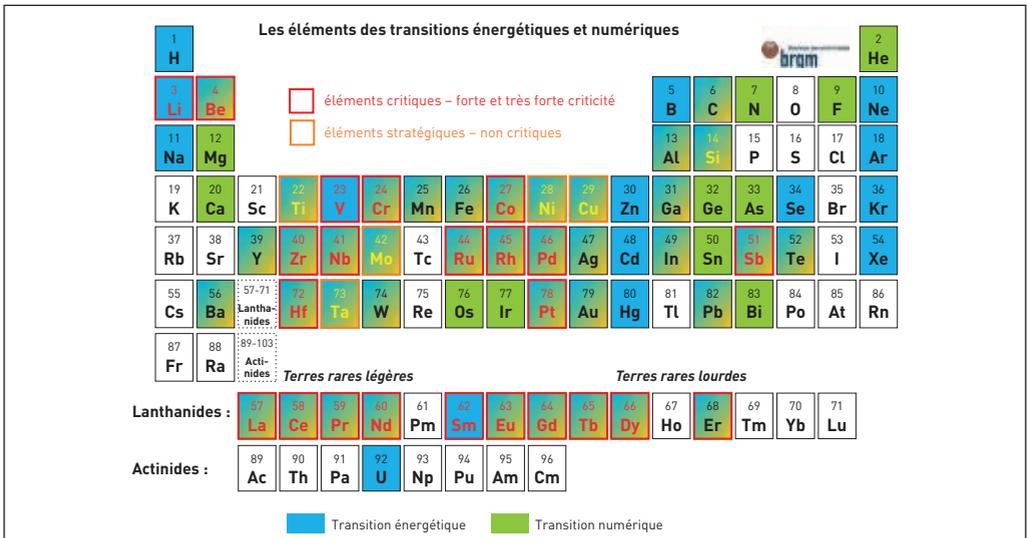


Figure 2

Diversité des éléments mobilisés dans les transitions numériques et énergétiques.

D'après les travaux de l'équipe d'Intelligence minérale du BRGM.

les chaînes d'approvisionnement. La prise en compte de ce risque sur la disponibilité de la ressource combinée à l'importance économique associée à certains métaux se traduit dans des analyses de criticité qui vont être réalisées par différents acteurs, publics ou privés. La Commission européenne publie ainsi une liste des métaux/substances critiques pour les politiques européennes. Cette liste contenait une quinzaine de substances en 2011 pour plus de 30 en 2020. Comme illustré sur le tableau ci-dessus (Figure 2), transition numérique et énergétique font souvent appel aux mêmes métaux et substances et un grand nombre d'entre elles sont considérées comme critiques. Cette criticité est liée à leur importance économique, mais également à des enjeux

et des risques majeurs sur leur chaîne d'approvisionnement.

En conclusion, il est possible d'affirmer que la transition énergétique va donc requérir des quantités importantes de ressources minérales, nous faisant passer *de facto* d'une dépendance au pétrole et au gaz et à une dépendance aux métaux.

2 Une dépendance européenne aux approvisionnements en métaux et des chaînes de valeur vulnérables

Comme illustré dans un récent document de la Commission européenne⁶, l'Europe est

6. *Raw Materials Scoreboard 2021*; European Innovation Partnership on Raw Materials.

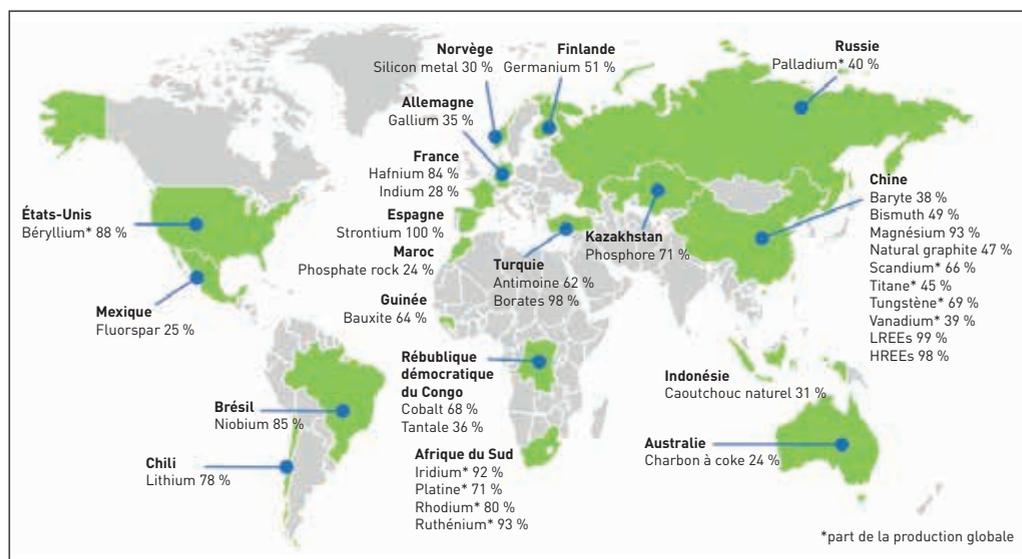


Figure 3

Principaux pays d'origine des matières premières critiques utilisées en Europe.

Extrait du *Raw Materials Scoreboard 2021*.

fortement dépendante aux métaux « venus d'ailleurs » ; 78 % du lithium européen provient du Chili, plus de 70 % des platinoïdes d'AFS, 70 % du cobalt de RDC et 99 % des terres rares de Chine (Figure 3).

L'Europe est dépendante à plus de 50 % concernant les importations d'une vingtaine de substances (Figure 4). La Chine est le premier producteur minier et/ou métallurgique mondial de plus d'une trentaine de matières premières minérales et depuis plus de 20 ans.

Au regard de ces chiffres, il est clair que les activités extractives et de premières transformations ont été progressivement transférées vers des pays à bas coût de main-d'œuvre et moins regardants sur la gestion des impacts environnementaux. En conséquence, l'Europe ne dispose pas à ce jour de capacités significatives de production des technologies nécessaires

à « l'électricité renouvelable » – éolien (terres rares, cuivre), photovoltaïque (silicium) – ou à l'électrification des usages – batteries (lithium, nickel, cobalt, graphite), moteurs électriques (terres rares, cuivre). Les chaînes de valeur sont complexes et les filières d'approvisionnement sont souvent mondialisées, difficiles à maîtriser et vulnérables (pour des raisons géopolitiques, économiques, environnementales ou sociales). La prise en compte des enjeux associés à l'approvisionnement de ces filières industrielles, dépendantes d'une offre en ressources minérales, ne peut uniquement se focaliser sur l'activité minière ou sur la première transformation (production de métaux par métallurgie extractive et raffinage), même si ces dernières ont un impact majeur sur le reste de la chaîne. Deux filières industrielles emblématiques, celle des éoliennes et celle des batteries, illustrent parfaitement la complexité de la question

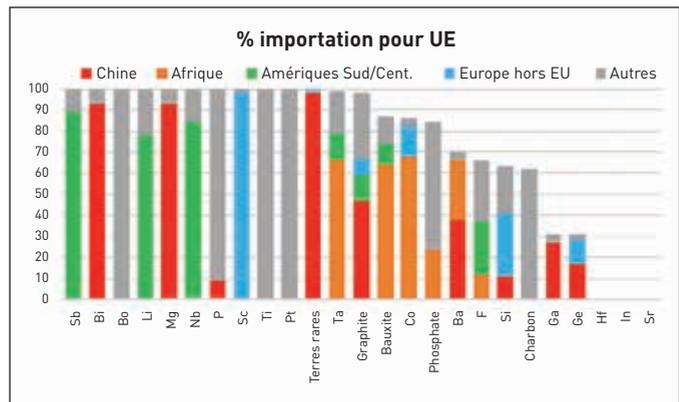


Figure 4

Dépendance européenne aux importations.

C. Poinsot d'après le Raw Materials Scoreboard 2021.

avec la mise en place de monopoles et la mondialisation des chaînes de valeur industrielles associées à la TE.

En assurant une position dominante sur l'extraction et la production de terres rares, la Chine a rapatrié sur son territoire depuis les années 2000 une grande partie de la chaîne de fabrication des aimants permanents et, en conséquence, domine le marché mondial des éoliennes. L'activité extractive est bien évidemment dépendante de la géologie et de la présence de gisements (et d'une volonté politique d'exploitation du sous-sol). Elle peut permettre d'asseoir une domination sur une chaîne de valeur complète.

Pour autant, un positionnement stratégique sur les premières étapes de transformation de la matière (métallurgie extractive et raffinage) ou sur la fabrication de précurseur peut également permettre de s'assurer un rôle majeur sur une chaîne de valeur. Ces prises de position sont souvent liées à des facteurs comme les coûts de production et les coûts énergétiques. Une forte compétition existe notamment sur les chaînes de fabrication des batteries. Avec pour conséquence une grande diversité d'acteurs et de pays impliqués entre l'extraction minière et l'incorporation de batteries dans des véhicules électriques. Il est ainsi intéressant de constater que le lithium contenu dans une batterie européenne peut avoir voyagé plus de 50 000 km.

Les chaînes d'approvisionnement sont donc vulnérables et complexes et la criticité

peut naître de la compétition entre filières industrielles, de la position de monopole d'un pays sur certaines étapes, ou du « statut » de métal associé (dépendant de la production d'un métal de base justifiant l'investissement minier).

3 La mine et le recyclage : des opportunités et des limites

Certaines analyses prospectives comparatives entre offre et demande font apparaître des projections inquiétantes de déficit de production à l'horizon 2030. C'est le cas notamment des études de l'IAE⁷ de 2021 qui identifient des risques de non-alignement « offre/demande » plus ou moins marqués en fonction des scénarios de transition retenus. Ce déficit sera potentiellement particulièrement marqué pour le cobalt et le lithium, mais il affectera également le cuivre dont les projections de production sont à la baisse alors que la demande continue d'augmenter. Ainsi l'IAE prévoit une production de cuivre en 2030 inférieure aux 20 Mtonnes de 2020, alors que les deux scénarios de développement de la TE (STEPS et SDS) anticipent une demande proche de 25 Mtonnes en 2030.

L'exemple du cuivre permet de mieux comprendre les enjeux associés à l'approvisionnement en métaux des secteurs

7. *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions World Energy Outlook Special Report* (IAE 2021) – <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

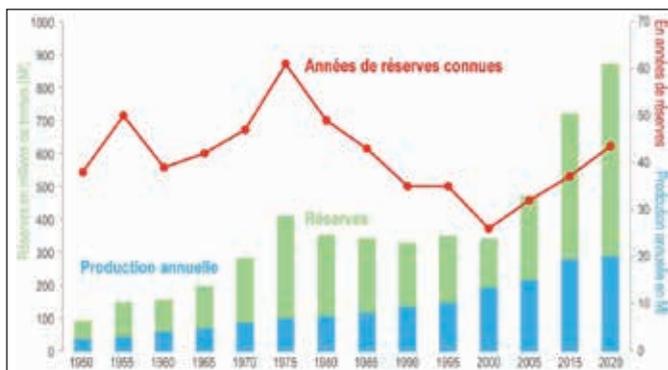


Figure 5

Cuivre : évolution de la production, des réserves et des années de réserves connues depuis 1950.

D'après Tilton et Lagos (2007) ; USGS pour les valeurs de 2015 (réelles) et 2020 (estimées).

industriels aval (**Figure 5**). Les statistiques historiques illustrent que le renouvellement des ressources économiquement exploitables (et donc classées comme réserve) est relativement cyclique à l'échelle du temps long, évoluant au gré des innovations technologiques, de l'amélioration des connaissances scientifiques et de l'évolution des marchés. Malgré l'évolution croissante de la demande, les réserves restent en moyenne d'une quarantaine d'années.

Pour autant, il est également admis que les nouveaux gisements sont moins concentrés et plus profonds et que les projets miniers sont de plus en plus complexes à faire émerger et démarrer. Le seul secteur des véhicules électrifiés demandera 7,5 Mtonnes supplémentaires par an d'ici 2040, soit plus d'un tiers de la production minière actuelle. Or, les principales entrées en production de mines, en voie de se

réaliser aujourd'hui, se limitent à quelques grands projets mondiaux, dont les productions initiales seraient de l'ordre de 0,3 à 0,5 Mtonne par an⁸. Sachant qu'il faut en moyenne 17 ans et plus de 500 projets d'exploration pour ouvrir une mine, les inquiétudes montent sur le cuivre mais aussi sur beaucoup d'autres métaux ayant souffert d'un déficit d'investissement dans l'exploration ces dernières années.

Malgré ces difficultés, le sous-sol renferme encore des ressources (susceptibles de devenir des réserves) et il existe des projets miniers sur tous les continents. Différents types de sociétés minières (junior, intermédiaire, major) sont impliqués selon le stade d'avancement des projets

8. Leguérinel M., Le Gleuher M. (2019) - Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019. Rapport final. BRGM/RP-69037-FR, 86 p., 62 fig., 10 tab.

(exploration, faisabilité, planification, construction) et selon la capitalisation nécessaire. L'or domine toujours le marché de l'exploration mais il est aujourd'hui accompagné de nombreux projets visant les substances des batteries comme le lithium, le cobalt et le graphite. D'après S&P Global, une reprise des investissements d'exploration de +35 % a été observée en 2021.

Bien qu'elle n'ait jamais été autosuffisante, la France a été historiquement un grand pays minier avec un nombre important de mines et d'industrie extractive jusqu'aux années 1980. C'est d'ailleurs à cette période (1975-1991) que sont menés les derniers travaux d'inventaire minier dans le

sous-sol français (**Figure 6**). Réalisé avec les techniques de l'époque, qui ne permettaient guère de descendre au-dessous de quelques centaines de mètres de profondeur, il représente le dernier inventaire exhaustif des ressources disponibles en France et met dès cette époque en exergue des gisements d'intérêts potentiels, notamment en tungstène (W), antimoine (Sb), or (Au), fluorine ou plomb-zinc, comme le montre la figure 6. De 2012 à 2015, un travail de ré-exploitation des données, notamment géochimiques, a été entrepris par le BRGM en collaboration avec le Bureau de la Politique des ressources minérales du MTE pour cerner le potentiel et réévaluer les priorités.

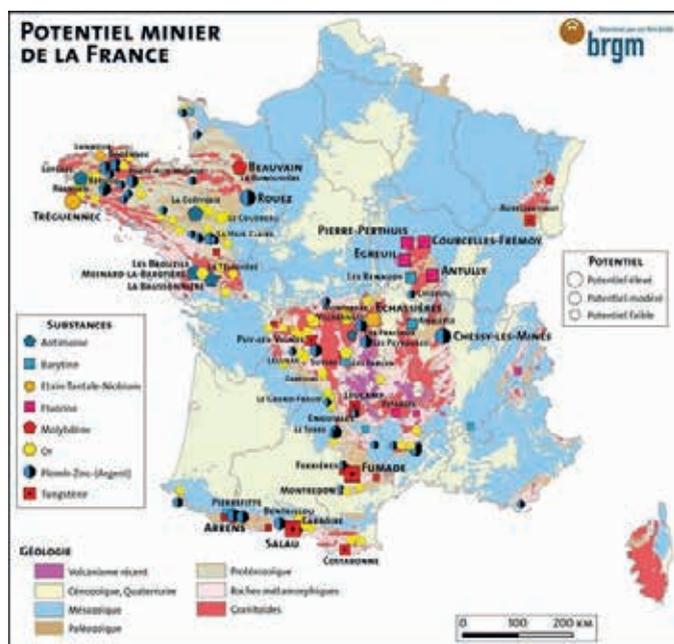


Figure 6

Carte des ressources minières d'intérêt potentiel connues en France métropolitaine.

Ainsi, à ce jour, même si la France n'a aucune autonomie et souveraineté minérale, et dépend pour ses activités industrielles intégralement des importations, elle n'est pas dépourvue de ressources comme le confirme par exemple la carte de favorabilité du lithium (**Figure 7**) produite à l'échelle européenne par le BRGM dans le cadre de projets européens.

Cependant, comme le montre un récent rapport du Groupe International d'Experts pour les Ressources des Nations unies (GIER) sur la gouvernance de l'industrie minérale

au XXI^e siècle⁹, l'industrie minérale n'intègre toujours pas suffisamment une juste répartition des impacts positifs et négatifs de l'activité entre les différentes parties prenantes concernées (industriels, administrations et populations). Pour contribuer au développement durable tel que décrit par les Nations unies, cette industrie doit encore mieux concilier les objectifs économiques,

9. *Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing extractive industries towards sustainable development (2021).*

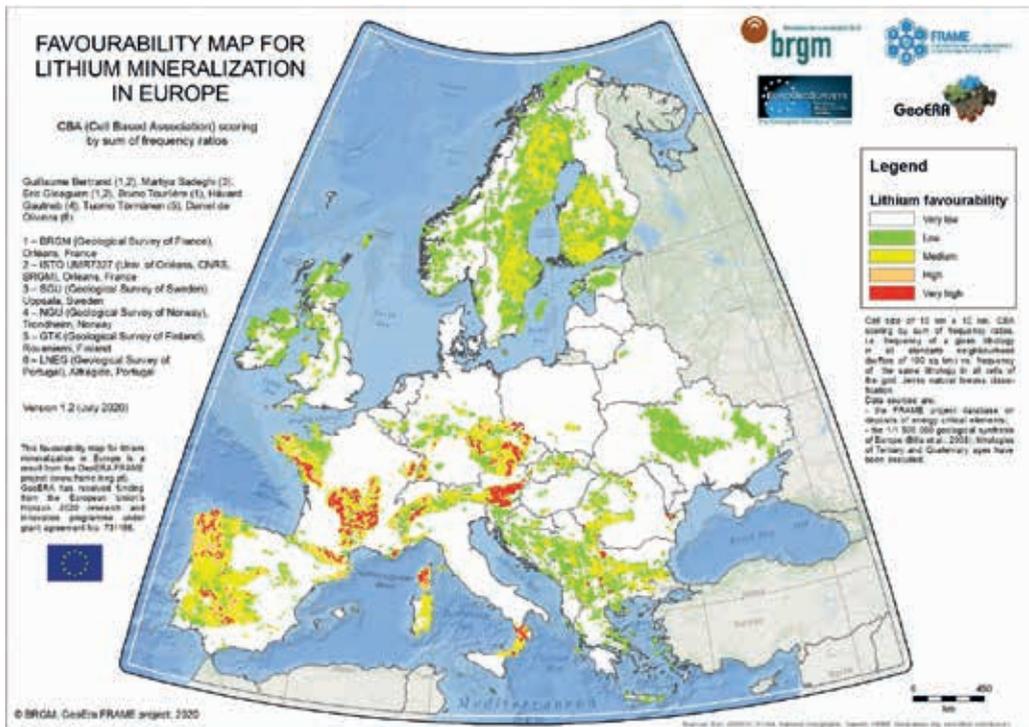


Figure 7

Carte prédictive des gisements potentiels de lithium en Europe réalisée par le BRGM dans le cadre du projet européen FRAME.

environnementaux et sociaux, et mettre en place une gouvernance adaptée à l'échelle internationale sur la base de principes partagés avec toutes les parties prenantes.

L'industrie minière est la source d'impacts environnementaux et sociaux qu'il faut gérer et atténuer. Les impacts environnementaux sont variés et parfois interdépendants. Il est notamment possible de citer l'impact climatique en lien avec la dépense énergétique, les conséquences sur les différents compartiments de l'environnement (eau, sol en quantité et qualité), la gestion des déchets ainsi que les impacts sur la biodiversité et les paysages. Aujourd'hui, 10 % de l'énergie mondiale est utilisée pour la mine et la première transformation et 70 % des opérations minières des six plus grandes sociétés minières sont localisées sur des zones en « stress hydrique ». Des actions de R&D importantes, directement au niveau des grands industriels du secteur ou à l'échelle européenne (H2020, Horizon Europe) sont menées sur le gain d'énergie associé aux étapes de concassage/broyage, sur l'optimisation des circuits d'eau de procédé et sur la minimisation et la valorisation des déchets miniers.

Les impacts sociaux potentiels de l'activité minière sont très dépendants des politiques et des législations effectivement en vigueur dans les pays producteurs. Ils peuvent apparaître très tôt et se traduire par une montée des oppositions aux projets miniers. Ces oppositions sont parfois très locales, liées au phénomène NIMBY (*Not In*

My BackYard). Elles sont parfois plus globales et embarquent des concepts très complexes en lien avec les besoins auxquels répond l'activité extractive (croissance vs décroissance, high tech vs low tech), avec la finitude des ressources ou avec la soutenabilité faible ou forte des activités humaines.

La non prise en compte des questions environnementales et sociales est aujourd'hui un risque majeur pour les industries en aval dont l'image peut être affectée durablement si elles sont associées à des mauvaises pratiques le long de leur chaîne de valeur et notamment au niveau des étapes extractives.

Pour réduire la pression sur les ressources naturelles, et notamment la production de métaux et matériaux à partir de gisements primaires (mines et carrières), de nombreuses ressources secondaires ou issues du recyclage sont aujourd'hui identifiées et parfois intégrées aux filières d'approvisionnement (déchets miniers, déchets industriels, produits en fin de vie). Le recyclage des métaux (dans les produits en fin de vie) présente un réel potentiel de développement sur la plupart des métaux (**Figure 8**). Comme détaillé dans le *Raw Materials Scoreboard* de la Commission européenne¹⁰, les taux de recyclage restent inférieurs à 50 % pour l'ensemble des métaux (42 % pour le tungstène, 28 % pour le cuivre, < 1 % pour le lithium). Le potentiel associé aux déchets produits le long

10. *Raw Materials Scoreboard 2021*; European Innovation Partnership on Raw Materials.

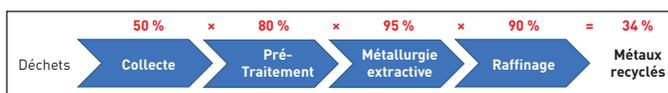


Figure 8

Simulation des pertes de matière sur une chaîne de recyclage théorique.

de la chaîne de valeur est beaucoup moins bien connu (déchets miniers, chutes de production) par méconnaissance du gisement. Pour autant, même si tous ces déchets représentent un réel potentiel, le recyclage ne pourra jamais répondre à l'intégralité des besoins. Il sera en effet impossible d'aboutir à une circularité totale du fait des pertes inévitables de matières à toutes les étapes de leur cycle de vie. Cette difficulté est amplifiée par la complexité des nouveaux objets et la dispersion de certains métaux présents à des teneurs trop faibles pour une récupération ayant du sens au niveau économique et environnemental (problème d'entropie).

Une autre limite du recyclage comme solution d'approvisionnement concerne les durées d'immobilisation dans l'anthroposphère. Dans un monde en croissance, même faible, il est facile de démontrer que le décalage entre la demande en métal et la possibilité de le recycler après son temps d'utilisation entraîne un « déficit matière » que l'activité extractive devra combler. Déployer le recyclage est donc un impératif industriel, économique et éthique qui permettra de reconquérir une partie de notre indépendance, mais qui sera largement insuffisant pour répondre à l'ensemble des besoins.

4 Quelles solutions pour répondre aux enjeux de l'approvisionnement en métaux de la transition énergétique

L'enchaînement de la crise sanitaire et de la guerre en Ukraine a mis en évidence notre grande vulnérabilité face aux enjeux d'approvisionnement responsable en métaux et matériaux nécessaires aux transitions énergétique et numérique. L'accessibilité à la ressource minérale est 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, économiques, réglementaires, sociaux et environnementaux associés à cette accessibilité sont de plus en plus prégnants. L'Europe est largement dépendante des importations en métaux ainsi que de l'approvisionnement en produits intermédiaires issus d'une production extérieure à son territoire. Ceci fragilise de nombreuses chaînes de valeurs très consommatrices de métaux et matériaux. 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. Cette dimension éthique est portée par les enjeux d’approvisionnement responsables associés aux filières en aval en contact avec les consommateurs européens.

Des solutions existent et se mettent en place. Au-delà d’une plus grande sobriété absolument nécessaire, elles combinent des actions d’observation stratégique du cycle des métaux et matériaux, 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 mise en place d’une économie circulaire. La relance industrielle française et européenne nécessitera de renforcer la résilience et la souveraineté nationale en sécurisant sur la durée des approvisionnements stratégiques et plus responsables. Pour faire face à cet enjeu, le BRGM contribue à un certain nombre d’actions telles que :

- La mise en place d’une veille prospective, permanente et mutualisée face aux risques de rupture d’approvisionnement de l’industrie française et européenne. À ce titre, le BRGM a porté la création de l’observatoire OFREMI en novembre 2022 (Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles). L’OFREMI va rassembler les compétences du BRGM, du CEA, de l’IFPEN, de l’ADEME, de l’IFRI et du CNAM, et mettre à disposition des pouvoirs publics et

des filières industrielles une analyse stratégique globale (technico-économique, environnementale, sociale, réglementaire, géopolitique) des filières d’approvisionnement.

- La prise en compte de la pensée « cycle de vie », à travers les outils de type ACV (Analyse du Cycle de Vie), et de l’écoconception pour optimiser la gestion durable des flux de matières premières primaires et secondaires, accompagner les réglementations européennes et françaises, et favoriser les filières industrielles les plus vertueuses.

- Le développement de solutions d’approvisionnement responsables basées sur une bonne connaissance des gisements primaires et secondaires, des procédés performants et écoresponsables pour la mine et le recyclage, la traçabilité des chaînes de valeur et une mine responsable (qui intègre l’environnement, les aspects sociaux et la gouvernance). Il est envisagé par exemple de relancer des études de prospection stratégique en France.

La France et l’Europe sont à la croisée des chemins pour accompagner la transition écologique. Cette dernière ne pourra se faire sans matières premières minérales et sans l’optimisation des approvisionnements, justifiant des actions diplomatiques auprès des pays producteurs actuels, mais également sans envisager la relocalisation de certaines activités (même extractives) et de certaines chaînes de valeur.

Risques et opportunités pour le nucléaire actuel et futur en termes de ressources minérales stratégiques

Christophe POINSSOT est directeur général délégué et directeur scientifique au BRGM.

1 Introduction

Dans le contexte actuel de la COP 27 qui s'est tenue¹ fin 2022, il est important de rappeler que nous sommes tous engagés sur une transition majeure qui est de réussir à réduire nos émissions de gaz à effet de serre pour limiter l'accroissement de la température à la surface du globe.

2 Le besoin de développer des énergies bas carbone

La **Figure 1** tirée du rapport du GIEC montre que nous sommes engagés sur une courbe qui nous amène inexorablement

d'ici le milieu de ce siècle à une élévation de température de 1,5 °C. Une élévation largement plus importante que l'engagement pris durant l'accord de Paris. Le mix énergétique² à l'échelle mondiale – incidemment, celui de la France en diffère – est schématisé sur la **Figure 1** où les différentes sources d'énergie sont représentées en fonction de leur importance : plus la bulle est grosse et plus elle est importante dans le mix énergétique mondial. En ordonnée, on a porté les émissions de gaz à effet de serre : plus on est vers le haut de la figure et plus l'émission est importante ; en abscisse, est porté le « facteur

1. La COP 27 s'est déroulée du 6 au 20 novembre 2022 à Charm el-Cheikh, Égypte.

2. Le mix énergétique est la nature des sources d'énergie utilisées, ainsi que leurs proportions.

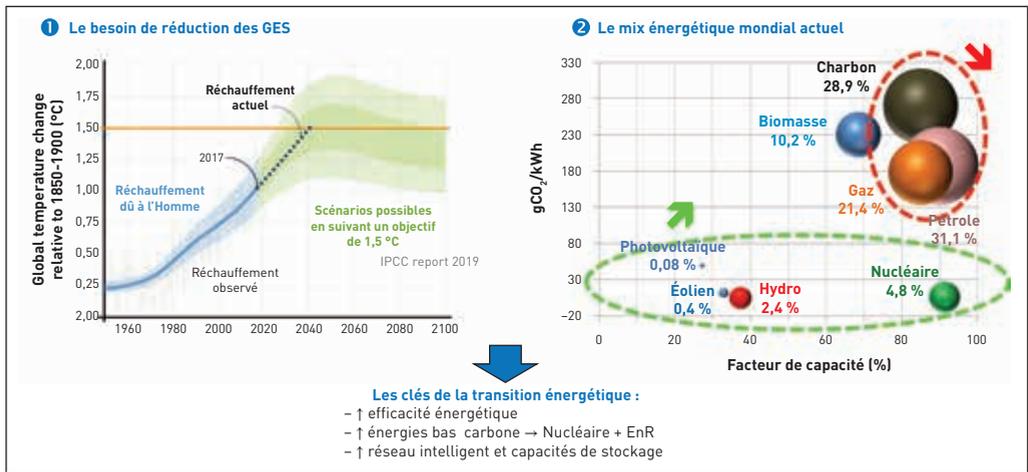


Figure 1

Limiter l'ampleur du changement climatique nécessite une révolution énergétique.

de capacité » c'est-à-dire la capacité à produire du kilowatt-heure quelles que soient les conditions extérieures³.

Aujourd'hui l'essentiel de l'énergie – plus de 80 % du mix énergétique mondial – est produit par les énergies fossiles. Elles ont certes un immense avantage qui est leur disponibilité à tout moment, quelle que soit la météo, quelle que soit l'heure du jour ou de la nuit, mais elles ont un énorme inconvénient : elles produisent énormément de gaz à effet de serre. C'est pourquoi la cible de la transition énergétique consiste à réduire les énergies fossiles et, pour ce faire, développer les énergies bas carbone. Celles-ci sont divisées en deux familles : d'une part, les

énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, hydro, etc.) qui représentent actuellement quelques pourcents du mix énergétique mondial et, d'autre part, le nucléaire qui se situe lui aussi à des niveaux d'émission de gaz à effet de serre extrêmement faibles mais qui peut produire quelles que soient les conditions d'environnement. La clé du succès de la transition énergétique au-delà de l'amélioration inévitable et indispensable de l'efficacité énergétique, sera donc de réussir à développer harmonieusement ces deux sources d'énergie et de les inscrire dans un réseau qui permet de les utiliser de manière harmonieuse les unes avec les autres.

3 Des énergies gourmandes en ressources minérales

La **Figure 2**, issue du rapport de l'AIE⁴ de 2021, présente la quantité de ressources minérales nécessaire pour une

3. Aussi appelé facteur de charge. Un facteur de capacité de 80 % signifie que sur une période donnée, une installation n'est capable de produire que 80 % de l'énergie prévue dans le cas idéal où elle fonctionnerait à puissance maximale durant toute la période étudiée. Pour compenser ce facteur de charge, il faut construire plus de centrales que nécessaire.

4. AIE : Agence Internationale de l'Énergie.

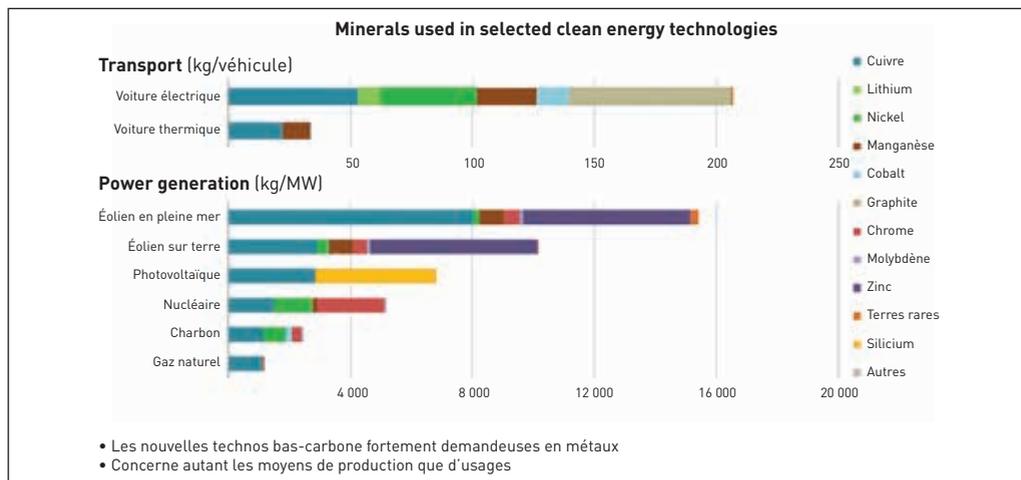


Figure 2

Besoins en ressources minérales des nouvelles sources d'énergie.

capacité d'un mégawatt⁵ installé⁶ selon le moyen de production employé. Sur le bas de la figure est porté l'essentiel du mix énergétique mondial actuel – le charbon et le gaz – sur lequel on a des teneurs, des besoins en ressources minérales assez faibles. Sur la partie haute sont portés les moyens de production de demain : l'éolien, le solaire, le nucléaire. Cette figure appelle plusieurs commentaires importants. Le premier, c'est que les besoins du nucléaire sont assez faibles. Le deuxième est l'importante différence qu'il y a entre les moyens actuels et les moyens qu'on cherche à développer : il s'agit d'un facteur 6 sur la

puissance installée. En corrigeant par le facteur de capacité présenté dans la **Figure 1**, on obtient un facteur de près de 20 par kilowatt produit : 1 kWh produit par de l'éolien offshore par exemple aura ainsi mobilisé 20 fois plus de ressources minérales qu'un kWh produit par une centrale thermique.

4 Présentation de la problématique

Cette situation explique pourquoi on s'attend à une explosion des besoins en ressources minérales indispensables pour mener la transition énergétique (**Figure 3**). Autant le sujet fait l'objet de nombreux débats sur les besoins liés aux renouvelables, autant c'est moins le cas pour le nucléaire et il paraît donc pertinent de s'interroger sur les besoins en ressources minérales de l'électronucléaire, tant les besoins en uranium pour fonctionner que ceux en métaux pour construire les installations (réacteurs, usines...).

Cette intervention abordera cette problématique selon trois

5. Rappelons les différents préfixes utilisés au cours de cette conférence : kilo : 10^3 ou mille, de symbole k ; méga : 10^6 ou un million, de symbole M ; giga : 10^9 ou un milliard, de symbole G.

6. La puissance installée ou puissance nominale est la puissance maximale que peut fournir une installation. À un instant donné, celle-ci délivre ainsi une puissance inférieure ou égale à cette puissance installée.

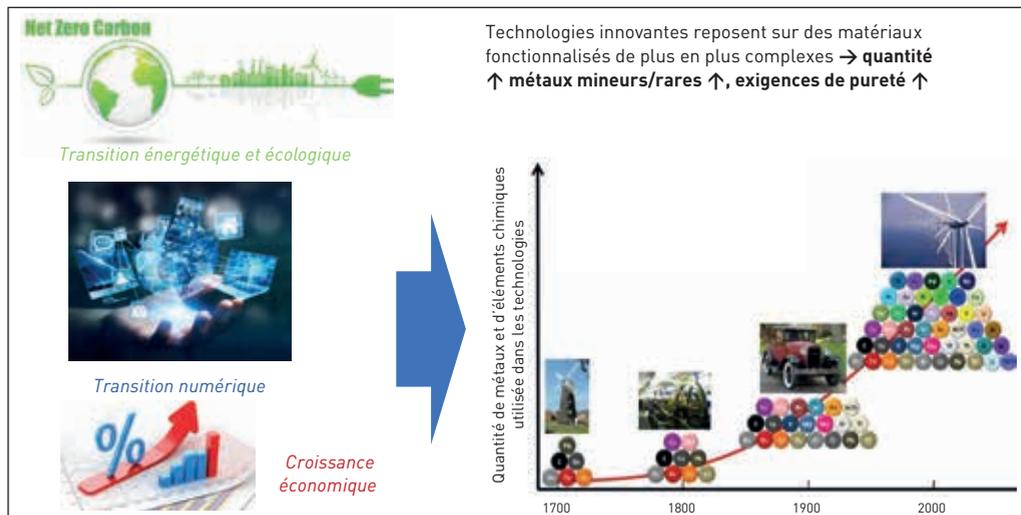


Figure 3

Une augmentation inévitable des besoins en ressources minérales.

axes. Le premier, en répondant à la question « Quels sont les besoins en métaux stratégiques pour le nucléaire ? ». Le deuxième, en éclairant sur les besoins de la filière électronucléaire en uranium qui constitue le combustible ; cela conduira à examiner les limitations éventuelles sur l'approvisionnement en combustible. Le troisième discutera d'une meilleure utilisation possible des ressources au sein de la filière nucléaire.

4.1. Les besoins en métaux stratégiques pour le nucléaire

4.1.1. Quelle est la demande attendue en ressources minérales pour la construction et le fonctionnement de centrales nucléaires ?

Commençons par les besoins en métaux stratégiques pour la construction et la mise en œuvre des centrales nucléaires. La partie gauche de la **Figure 4** montre le système primaire qui produit de

la chaleur par les réactions de fission⁷. Du circuit primaire, cette chaleur est transférée à un circuit secondaire (figuré en bleu) qui alimente une turbine qui produit l'électricité au moyen d'un alternateur⁸.

Quels sont les besoins principaux de ces installations en

7. Un réacteur nucléaire utilise un combustible tel que l'uranium 235 ou le plutonium 239. Lorsqu'il est percuté par un neutron, un tel noyau atomique réalise une fission nucléaire où il se divise en deux noyaux plus petits en libérant de la chaleur et plusieurs neutrons. Ces neutrons vont à leur tour percuter d'autres noyaux et déclencher leur fission, ce qui libère davantage de neutrons. Le nombre de neutrons, donc le nombre de réactions de fission et la chaleur libérée augmentent de façon exponentielle, il s'agit d'une réaction en chaîne. C'est la chaleur produite par ces réactions qui chauffe le circuit primaire.

8. Un troisième circuit (en vert ici) généralement alimenté par un fleuve permet de refroidir le circuit secondaire. Chacun des trois circuits est isolé des deux autres : il n'y a pas de mélange mais uniquement des transferts de chaleur de l'un à l'autre.

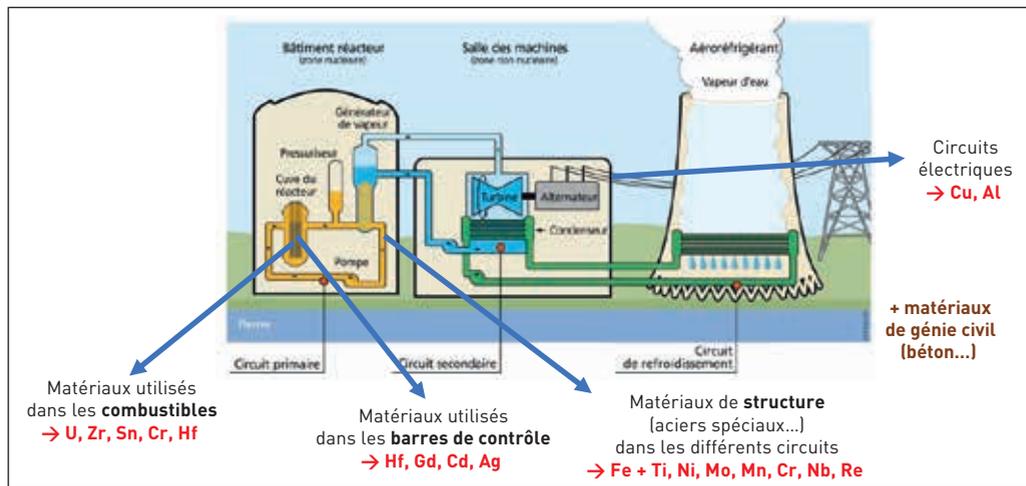


Figure 4

Schéma d'un réacteur nucléaire et principaux éléments requis.

termes de ressources minérales ? Évidemment, ce sont d'abord des matériaux de structure⁹ : dans une centrale nucléaire, ils travaillent dans des environnements très particuliers en termes d'irradiations et de températures. On utilise essentiellement des métaux ou des éléments¹⁰ métalliques dont un certain nombre sont listés ici. On trouve également bien sûr, des circuits électriques avec des conducteurs en cuivre ou

en aluminium¹¹ sur les lignes haute tension et les matériaux nécessaires pour conditionner le combustible : l'uranium et les gaines en zirconium qui vont autour avec des éléments d'alliage comme l'étain ou le chrome. On a encore affaire aux matériaux qui servent à contrôler la réaction nucléaire avec des éléments très spécifiques qui ont des capacités à piéger les neutrons¹². Malgré tout, l'énergie nucléaire requiert peu de ressources minérales par MWh produit comme le montre la **Figure 5**.

9. Un matériau de structure est un matériau choisi pour ses propriétés mécaniques telles que sa résistance ou sa densité. Les matériaux de structure constituent le gros d'un ouvrage.

10. Christophe Poinsot parle durant cette conférence d'éléments dans leur sens chimique : des atomes tels que le fer, le chrome ou l'étain qui seront assemblés sous forme d'alliages par exemple. Les éléments sont notés grâce à leur symbole chimique tels que Fe, Cr et Sn dans notre exemple. Nous invitons le lecteur à se référer à un tableau périodique pour connaître la signification des symboles utilisés dans les illustrations.

11. Ces deux éléments et les suivants sont des matériaux fonctionnels. Ils sont choisis pour leurs propriétés physiques, ici leurs capacités à conduire l'électricité ou à absorber les neutrons.

12. Cette capacité à absorber les neutrons est primordiale puisqu'elle permet d'atténuer la réaction en chaîne et de contrôler la vitesse de la réaction. Il est alors possible de choisir la puissance du réacteur mais surtout d'empêcher qu'il devienne instable. En leur absence, le nombre de fissions et la température augmentent continuellement jusqu'à l'explosion du réacteur.

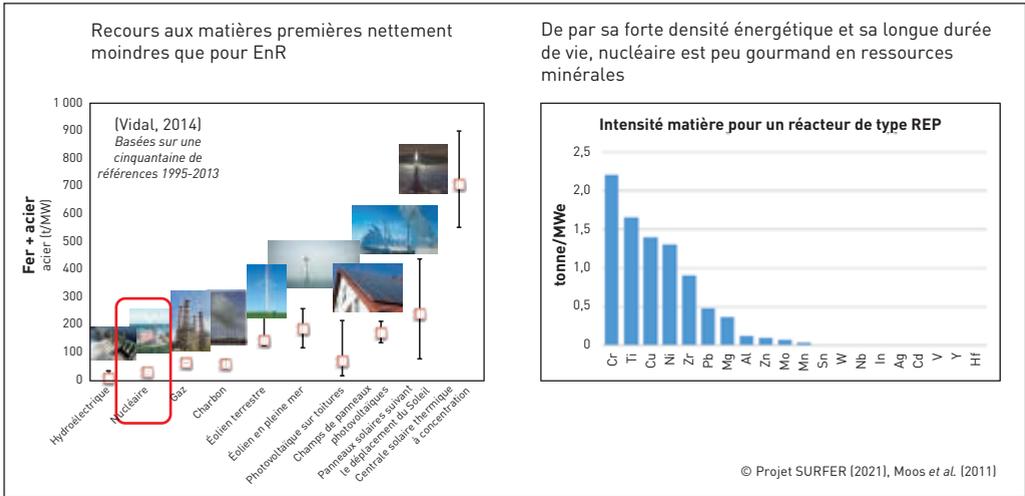


Figure 5

Quantité requise de chaque élément pour un réacteur nucléaire et comparaison avec les autres sources d'énergie des besoins en fer et acier. Estimations en tonnes par MWh installé.

La partie gauche de la **Figure 6** donne une première comparaison des besoins en éléments de structure, en l'occurrence de la quantité d'acier et de fer nécessaire par mégawatt installé selon les différentes sources d'énergie. Il ressort que le nucléaire est, sous ce rapport, sobre en besoins en ressources minérales, sensiblement au même niveau que l'hydroélectrique.

Au-delà de ces éléments majeurs de structure, d'autres éléments chimiques sont indispensables à des niveaux supérieurs à une tonne par mégawattheure produit, mais ils sont en nombre relativement restreint et représentent pour l'ensemble des mégawattheures produits par le nucléaire un volume faible par rapport aux besoins des autres moyens de production. Pour ces éléments, le

nucléaire va se positionner sur le marché de manière plus marginale : ce n'est pas lui qui donnera sa dynamique et imposera sa logique sur le marché. Il sera plutôt dans une logique de niche, et pourra passer au travers d'un certain nombre de difficultés.

En résumé, en termes de besoins en métaux, on a essentiellement affaire à des éléments de structure, à différents matériaux métalliques spéciaux et puis, évidemment, au cuivre qui, en servant à conduire l'électricité, est un invariant de l'ensemble des technologies.

Sur cette base, l'Agence Internationale de l'Énergie a estimé quels pourraient être les besoins pour les prochaines décennies : ils sont présentés sur la partie droite de la **Figure 6**. On distingue deux scénarios :

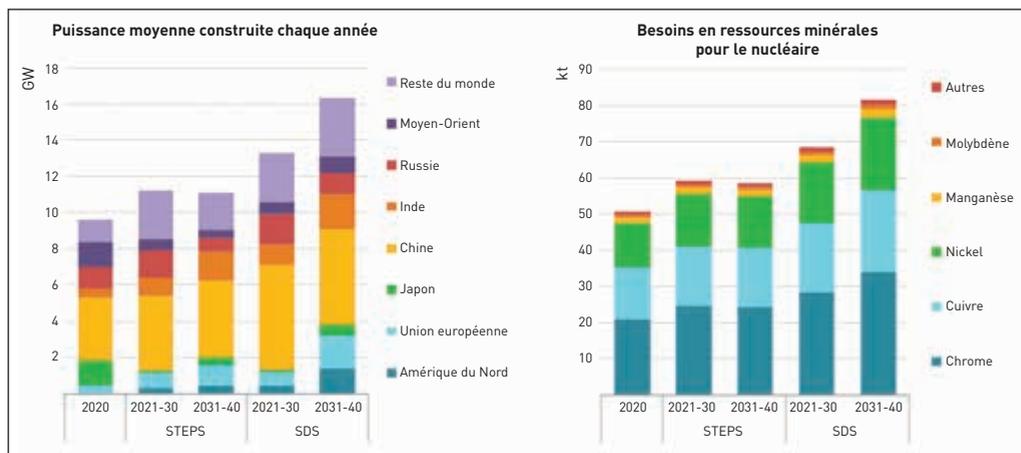


Figure 6

Évolution du parc nucléaire et des besoins associés en ressources minérales (RM).

STEPS¹³ qui correspond aux politiques actuellement décidées et SDS¹⁴ les politiques ambitieuses si l'on veut respecter le 2 °C d'augmentation de température à la fin du siècle. Les besoins sont croissants parce que le parc nucléaire est appelé à croître à l'échelle mondiale, même si ce n'est pas forcément le cas sur notre continent. Ils restent néanmoins faibles, moins de 100 000 tonnes de ressources minérales pour l'ensemble de la production électronucléaire, là où on parlait de dizaines de millions de tonnes toutes filières confondues (voir le chapitre de Patrick d'Hughes). Cela constitue un atout significatif pour le nucléaire dans le monde dans lequel on est en train d'entrer, dans lequel

les ressources minérales vont devenir un déterminant fort sur le développement des pays et sur leur souveraineté.

4.1.2. Quelles sont les menaces qui pèsent sur l'approvisionnement en ressources minérales ?

Pour apprécier l'importance de la disponibilité des ressources minérales dans la période de transition qui s'ouvre, il est important de traiter simultanément des objectifs sur l'énergie et des objectifs sur le numérique.

Les éléments chimiques impliqués sont soulignés sur le tableau de Mendeleïev (**Figure 7**). En bleu, sont indiqués l'ensemble des éléments utiles à la transition énergétique et en jaune, ceux qui sont utiles à la transition numérique. Environ les deux tiers des éléments du tableau de Mendeleïev sont concernés. Ceux qui sont essentiels pour le développement du nucléaire

13. STEPS : *Stated Policies Scenario*, Scénario des politiques décidées.

14. SDS : *Sustainable Development Scenario*, Scénario de développement durable.

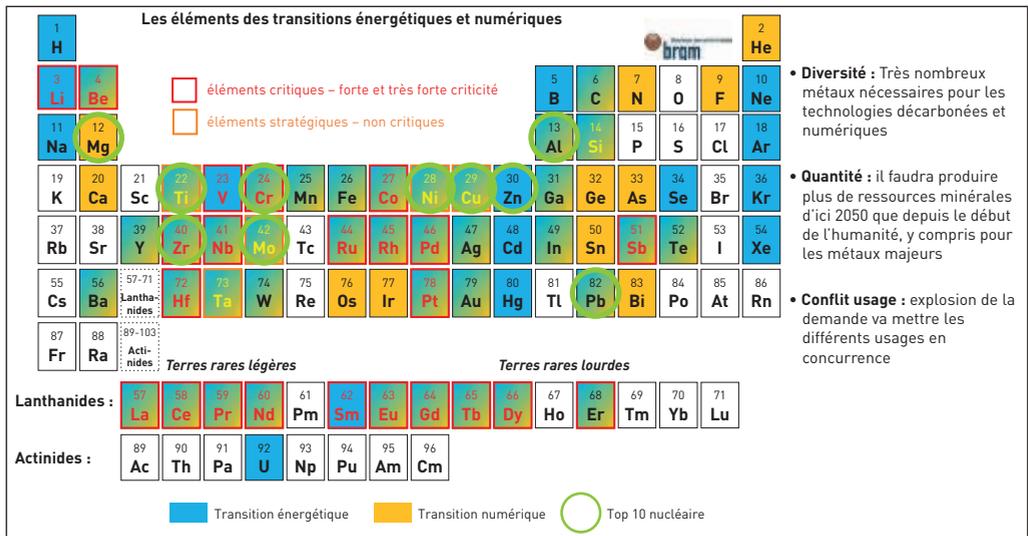


Figure 7

Éléments chimiques d'intérêt pour le nucléaire et les transitions énergétique et numériques.

apparaissent entourés en vert (le top 10).

Insistons sur le fait que malgré le contexte d'explosion de la demande, la situation se présente plutôt favorablement pour le nucléaire qui n'a besoin que de quantités relativement faibles. Néanmoins, il ne faut pas oublier le contexte de concurrence entre les moyens de production énergétique.

Quelques éléments de contexte sont toutefois permanents : un premier point est la **difficulté systémique qu'il y a à ajuster l'offre à la demande** pour les décennies qui viennent. Sur un certain nombre d'éléments majeurs, on va avoir sans doute un décrochage du marché par rapport aux besoins. La **Figure 8** illustre le cas du cuivre. Les mines qui sont aujourd'hui soit en fonctionnement, soit en projet (représentées par les surfaces présentes au bas de la figure), ne permettront pas d'ici 5 à 10 ans de répondre à l'ensemble de la demande qui va aller en s'accroissant, alors qu'il faut une quinzaine

d'années pour ouvrir de nouvelles mines. Nos trajectoires, en termes de décarbonation et de transition énergétique, ne sont pas forcément compatibles avec les ressources disponibles. Ce qui se passe pour le cuivre est exemplaire de la situation générale et impacte toute la filière énergétique : les prix sont extrêmement volatils et il est difficile pour les industriels d'investir dans ce contexte.

Un deuxième point est un message général qui concerne le nucléaire comme le reste. Aujourd'hui, quand on va chercher un certain nombre de métaux, certains n'existent pas tout seuls dans la nature à cause de la géologie et des processus physico-chimiques qui gouvernent la mise en place des gisements. Les métaux principaux que vous allez trouver naturellement sont ceux qui apparaissent dans le cercle bleu central, il y en a une douzaine (**Figure 9**). Ce sont les **éléments majeurs appelés éléments porteurs** et



Figure 8

Prévision du marché du cuivre (copper) et évolution passée de son prix.

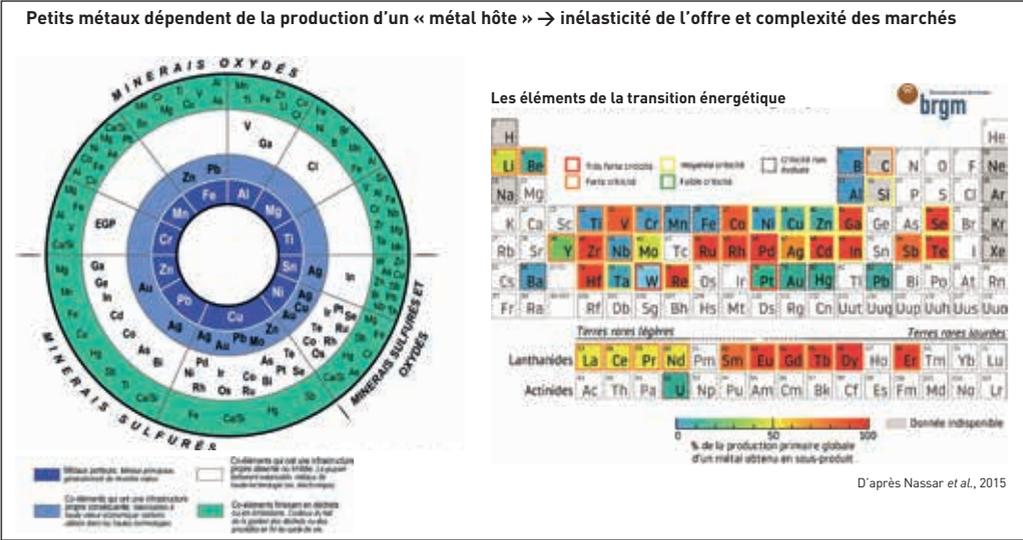


Figure 9

De nombreux éléments ne sont pas directement extraits.

ce sont les ressources principales recherchées dans un gisement. Tous les autres, vous allez les trouver en **produits secondaires**, c'est-à-dire qu'ils sont présents mais en faible quantité et ne justifient pas à eux seuls l'ouverture d'un gisement. Par contre, si vous allez ouvrir un gisement pour

la ressource principale, vous pouvez les récolter au passage. Une conséquence considérable est que, pour les éléments qui ne sont pas dans le cercle bleu, ce qui va gouverner leur disponibilité ou leur non-disponibilité n'est finalement pas le besoin que vous en avez, mais plutôt le besoin que vous avez

pour l'élément majeur qui gouverne le marché. Il s'agit là de quelque chose d'extrêmement important et impactant sur les marchés.

Quand on regarde quels sont les éléments concernés dans un tableau de Mendeleïev, ceux qui apparaissent en rouge sont les produits secondaires ; ils concernent un gros tiers du tableau de Mendeleïev, dont certains, en nombre relativement faible, sont nécessaires aux installations nucléaires comme le molybdène, le zirconium ou le cobalt. Cependant, **l'essentiel des éléments dont on aura besoin pour le nucléaire fait partie des éléments majeurs et aura peu de risques de rupture d'approvisionnement.**

4.1.3. Un approvisionnement maîtrisé en France : le hafnium

Le hafnium est un cas intéressant qui sert pour le nucléaire : il est utilisé dans la gestion des

réacteurs pour ses propriétés de poison neutronique¹⁵. On ne trouve pas d'hafnium tout seul dans la nature (**Figure 10**), mais seulement en ressource secondaire du zirconium qui sert lui-même pour le nucléaire, ce qui lie les deux marchés par un même usage. Le hafnium s'obtient en purifiant le zirconium où il est naturellement présent et cette purification est indispensable pour garantir le bon déroulement de la réaction neutronique. La France produit du zirconium pour ses usines de production de combustible nucléaire et est actuellement pour cette raison un des plus gros producteurs mondiaux d'hafnium. Signalons cette situation : le hafnium sert les besoins du nucléaire mais

15. Un tel matériau est utilisé afin de réguler la réaction en chaîne qui se produit dans le réacteur. Il est capable d'absorber des neutrons sans en réémettre, ce qui ralentit la réaction.

- Hafnium = **impurétés** dans les minéraux de Zr (zircon et baddeleyite) avec un ratio de 1/50.
- Pas de mine de Hf, la **production primaire est métallurgique**, à partir de résidus provenant de la purification du $ZrCl_4$ lors de la fabrication du Zr métal (gaine combustible nucléaire).
- Production d'hafnium métal est « **quasi-fatale** » puisqu'il est nécessaire de retirer le Hf du zirconium utilisé comme gaine pour les combustibles nucléaires.
- **Framatome (Jarrie)** : 1^{er} producteur mondial d'éponges d'hafnium métal devant US (EU, 2020)
- Mais reste **dépendant des importations de minerais de Zr** : 19 kt/an provenant à 87 % d'Afrique → **dépendance à l'évolution du marché des combustibles nucléaires**

Principaux pays fournisseurs



Source : https://tekiosque.finances.gouv.fr/site_fr/NC8/recherche.asp?t=2&iter=2&CS=zirconium

Figure 10

Le hafnium, un sous-produit du zirconium.

sert aussi dans d'autres technologies comme la microélectronique, une retombée du nucléaire intéressante souvent ignorée !

4.1.4. Comment sécuriser l'approvisionnement européen en ressources minérales ?

La discussion qui précède montre que l'Europe est dans une situation d'extrême dépendance vis-à-vis de ses importations de métaux (Figure 11). Cela a été dit de manière générale à propos du nucléaire, mais s'applique aux autres technologies. Cette situation résulte de ce que l'on a désinvesti notre industrie primaire et aussi notre industrie extractive pour investir dans des pays à bas coût de main-d'œuvre et à faible réglementation environnementale. Aujourd'hui, on est à quelques exceptions près absents du paysage mondial et on se repose intégralement sur les importations.

Pour corriger cette situation (Figure 12), il est indispensable :

– de développer une meilleure connaissance, une meilleure intelligence des chaînes de valeur minérale ;

– de développer **une industrie du recyclage**, indispensable mais qui ne répondra pas à l'intégralité de la demande ;

– de développer, par conséquent, **une industrie minière à l'échelle européenne** et française, les annonces récentes sur le lithium¹⁶ sont un premier pas mais on peut aller beaucoup plus loin.

Dernier point mais tout aussi important, il faut **maintenir notre positionnement à l'international** pour préserver les approvisionnements en ressources absentes du territoire européen, tout en garantissant les normes environnementales et sociétales les plus strictes. C'est le sens de l'engagement de la France

16. Le 17 octobre 2022, Emmanuel Macron a annoncé vouloir développer des mines de lithium en France afin d'exploiter les gisements relativement importants du pays.

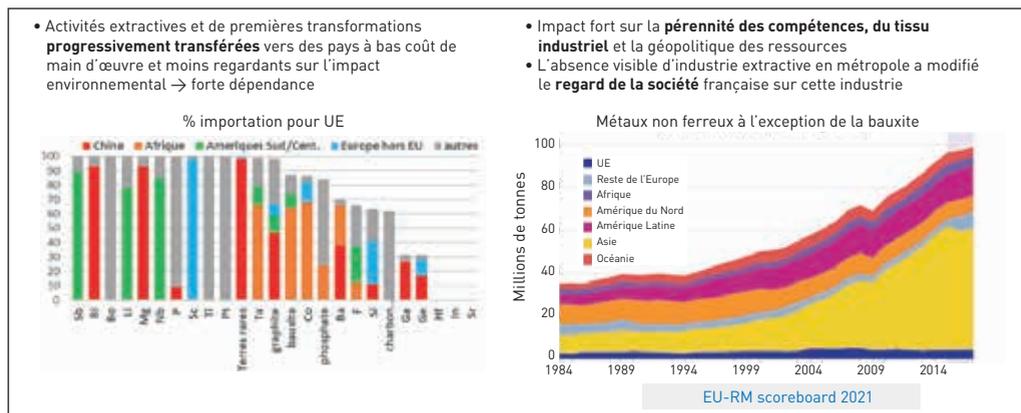


Figure 11

Origine des importations en Europe de métaux et principales régions productrices de métaux.

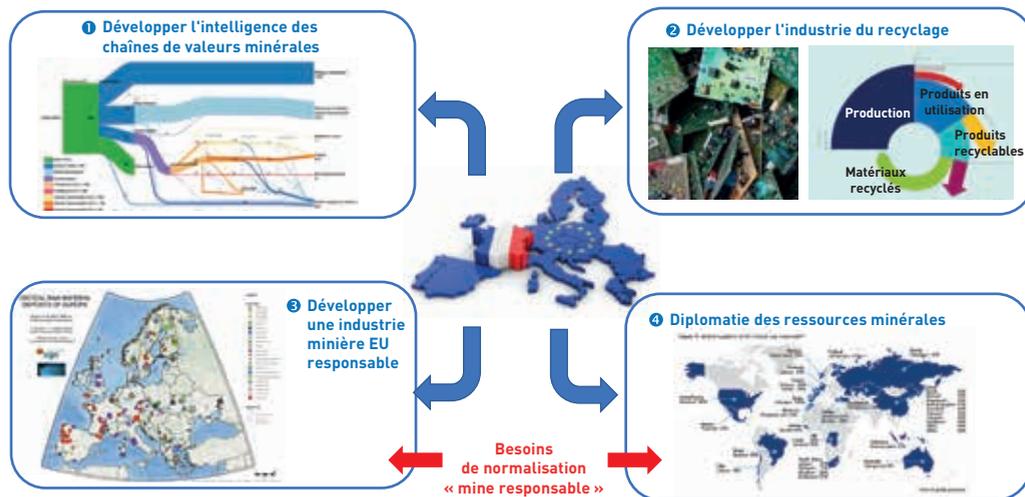


Figure 12

Stratégies possibles pour l'UE afin de garantir sa souveraineté en ressources minérales.

et des engagements que prend la France dans le développement de la normalisation de la mine responsable.

4.1.5. Conclusion sur les métaux stratégiques

Le paysage qui vient d'être présenté concernant les risques d'approvisionnement en matériaux stratégiques pour le nucléaire fait ressortir que, par rapport aux autres énergies – en particulier décarbonées –, l'énergie nucléaire est relativement désensibilisée. Ses besoins ne sont pas du tout du même ordre de grandeur que ceux des énergies renouvelables : il n'y a pas de gros risques même s'il faut rester vigilant.

4.2. L'approvisionnement en combustible

4.2.1. Cas du zirconium : peu de risques en termes d'approvisionnement

Au-delà des besoins en ressources minérales, l'électro-nucléaire a également besoin de combustibles. Il s'agit

essentiellement d'uranium dans une gaine métallique faite en alliage de zirconium.

Qu'en est-il aujourd'hui de la disponibilité de cette matière sur le marché mondial et du risque éventuel pour l'industrie nucléaire qui lui serait associé ? La **Figure 13** représente un assemblage de combustibles irradiés ; il s'agit d'une sorte de fagot de crayons de combustible dans lequel on a des gaines d'environ 1 cm de diamètre dans lesquelles on vient empiler sur 4 mètres de haut des pastilles d'uranium. Ces gaines sont faites d'un alliage de zirconium constitué principalement du zirconium et des éléments d'alliage comme l'étain, le fer, le chrome, le nickel et d'autres plus minoritaires. Le zirconium, qui reste l'essentiel de la matière dont on a besoin pour la gaine, est utilisé sous forme métallique qui ne représente pour le zirconium que 3 % du marché (1,3 million de tonnes). Dans ces 3 % de zirconium métallique, 2 % sont liés au nucléaire et 1 % à d'autres

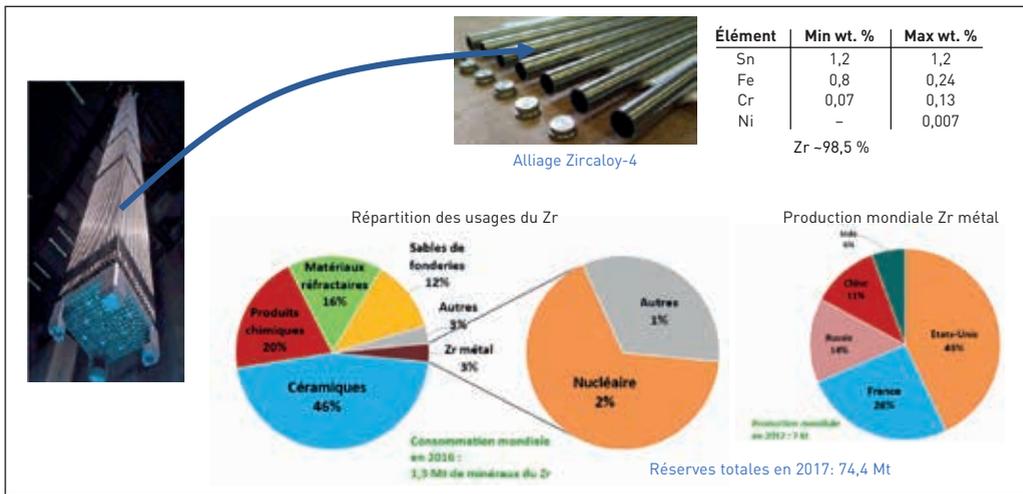


Figure 13

Marché du zirconium.

usages. Le nucléaire reste très minoritaire.

La répartition mondiale des sources de zirconium ne fait pas craindre une dépendance majeure envers un pays quelconque. Les deux grandes sources sont les États-Unis et la France, sachant que dans le graphe sont considérées la ressource minière et la localisation des industries de transformation, ce qui explique la présence de la France très active dans ce domaine via l'opérateur Framatome.

Les ressources mondiales sont estimées à 75 millions de tonnes. Comparé au faible volume dont on a besoin chaque année pour le nucléaire, il n'y a pas de problème d'approvisionnement à court terme : on a en fait plus de 50 ans d'autonomie sur ce sujet-là, ce qui nous laisse largement le temps pour anticiper et faire évoluer les technologies.

4.2.2. Étude du marché présent et futur de l'uranium

Aujourd'hui, les besoins en uranium à l'échelle mondiale

sont évalués à environ 60 000 tonnes par an pour les 400 réacteurs nucléaires dans le monde qui représentent à peu près 400 gigawatts électriques de puissance installée (Figure 14). Les demandes sont bien réparties entre l'Union européenne, l'Amérique du Nord et l'Asie qui représentent quasiment les trois quarts de la demande mondiale. Actuellement, quand on regarde du côté de la production, on est proche de 55 000 tonnes avec comme acteur principal le Kazakhstan qui représente environ 40 % du marché mondial, le Canada, l'Australie et la Namibie sont d'autres acteurs importants. La Figure 14 montre que les ressources disponibles sont réparties sur l'ensemble des continents, à l'inverse du pétrole qui est localisé dans certaines zones de façon très concentrée.

Qu'en est-il des besoins futurs ? La Figure 15 reproduit les chiffres qui proviennent du « livre rouge » écrit tous les deux ans par l'Agence pour

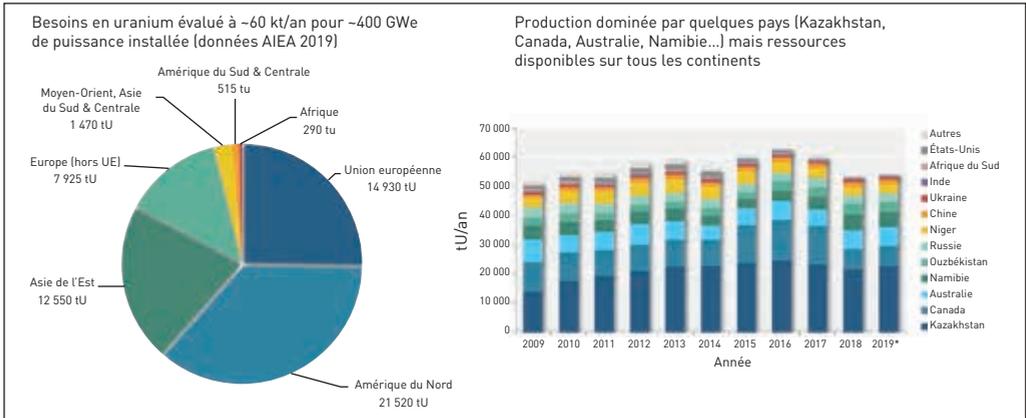


Figure 14

Marché de l'uranium.

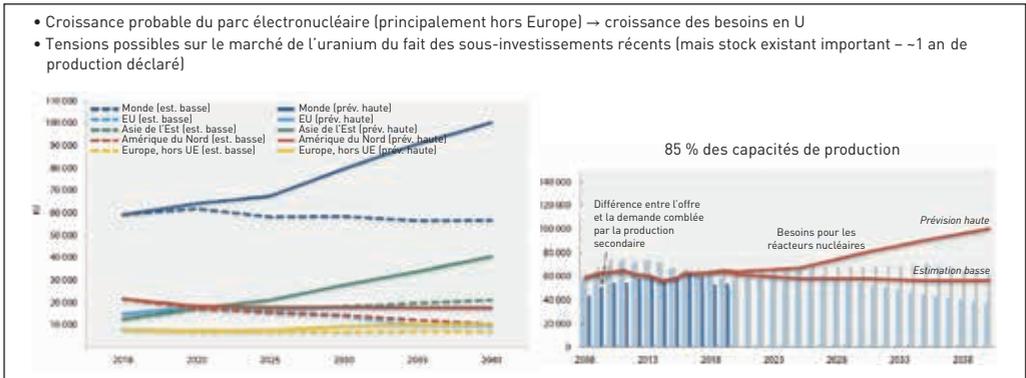


Figure 15

Prévision du marché mondial de l'uranium.

l'énergie nucléaire et l'Agence internationale de l'énergie atomique. Ils donnent les prévisions de croissance faites en 2020 sur les besoins en uranium pour les 20 ans qui viennent. Il y a deux scénarios : un scénario de valeurs hautes, optimiste sur le développement du nucléaire en traits continus, puis un scénario plus pessimiste, de valeurs basses

en traits pointillés. Dans le pire des cas, les besoins sont constants et, dans le cas le plus favorable au nucléaire, ils vont naturellement augmenter. Pour donner un ordre de grandeur, on parle d'un facteur légèrement inférieur à un facteur 2 en 20 ou 30 ans. Quand on compare ces prévisions à la situation du marché, on voit qu'à très court

terme il n'y a pas de risques.

Par contre, si l'on n'ouvre pas de nouvelles mines, on aura un écart qui se creusera sur le moyen-long terme. La **Figure 15** suppose qu'il n'y a que 85 % des mines qui sont en fonctionnement par suite des aléas de l'exploitation industrielle : cette valeur correspond à la moyenne constatée ces dernières décennies. Tout cela amène deux commentaires, le premier est qu'il faut avoir conscience que des mines sont aujourd'hui à l'arrêt parce qu'elles n'étaient pas rentables avec des cours de l'uranium très bas, et qu'elles réouvriront dès lors que les cours remonteront suite à des tensions sur le marché. Le deuxième point est que des réserves existent dans un certain nombre de pays, ce qui devrait permettre de lisser les cours.

Qu'en est-il sur le très long terme pour les ressources en uranium ?

La **Figure 16** donne la répartition des différentes ressources à l'échelle mondiale. Pour l'essentiel, on retrouve les pays mentionnés plus haut : l'Australie est clairement en tête en termes de ressources connues, suivie par le Canada, le Kazakhstan, la Namibie, le Niger et l'Afrique du Sud qui sont les principaux pays dans lesquels on a des réserves d'uranium conséquentes. Le trait continu en bas de la figure donne le besoin annuel mondial ; les réserves sont largement au-dessus, et ce ne sont que les réserves connues. Plus le cours de l'uranium va augmenter, plus on va investir pour faire de la prospection et plus on va trouver d'autres ressources. Aujourd'hui, on estime donc avoir plus de

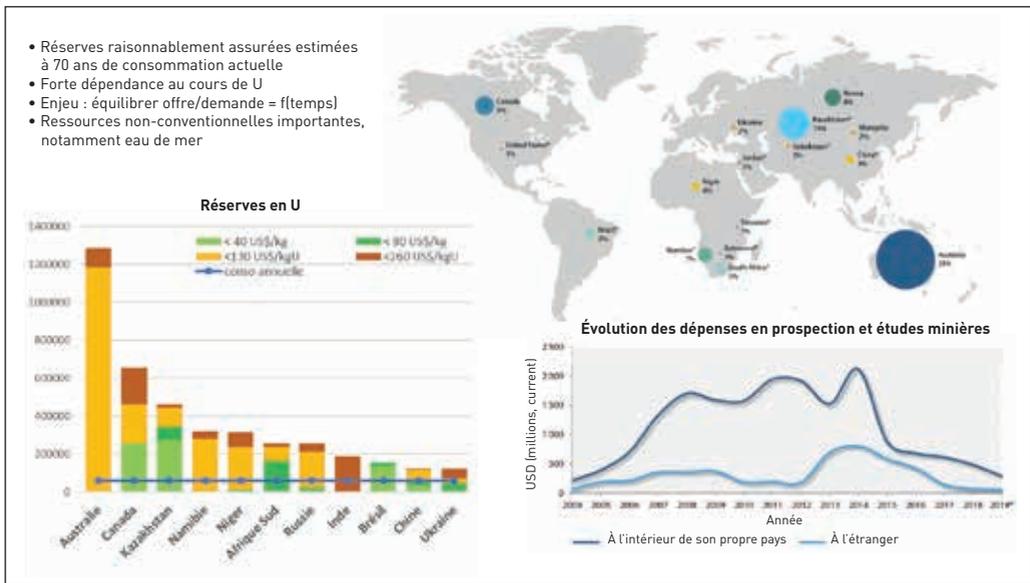


Figure 16

Réserves mondiales en uranium et importance de la prospection.

70 ans de disponibilité avec comme enjeu l'équilibre offre-demande en fonction du temps, et que cette valeur est susceptible de considérablement augmenter dès lors qu'une prospection plus active redémarrera.

4.2.3. Comment mieux utiliser nos réserves d'uranium ?

Dans le nucléaire comme ailleurs, le recyclage peut permettre d'économiser significativement la ressource naturelle, en l'occurrence l'uranium. La **Figure 17** montre les ordres de grandeur des besoins en uranium pour faire fonctionner le parc nucléaire français dans la décennie 2010 (la baisse de production électronucléaire en 2021-2022 n'est pas prise en compte). On voit qu'on a ainsi besoin de 1 200 tonnes de combustible (uranium enrichi)

année après année, ce qui requiert une quantité de minerai d'uranium naturel beaucoup plus importante du fait des pertes inévitables lors de l'enrichissement¹⁷ : de l'ordre de 9 500 tonnes de minerais d'uranium. On décharge pratiquement autant de combustible qu'on en charge, à savoir 1 200 tonnes. Dans le combustible utilisé, il reste encore environ 95 % de l'uranium qui n'a pas été transformé.

17. Le minerai d'uranium contient principalement deux isotopes qui diffèrent par leur nombre de neutrons : ^{238}U et ^{235}U . Seul ce dernier est capable de réaliser une fission nucléaire mais il n'est présent qu'à une concentration de 0,72 %. Des opérations de purification de cet isotope sont réalisées et c'est l'uranium enrichi obtenu qui est utilisé en tant que combustible dans les réacteurs. Le reste est appelé uranium appauvri et connaît d'autres applications.

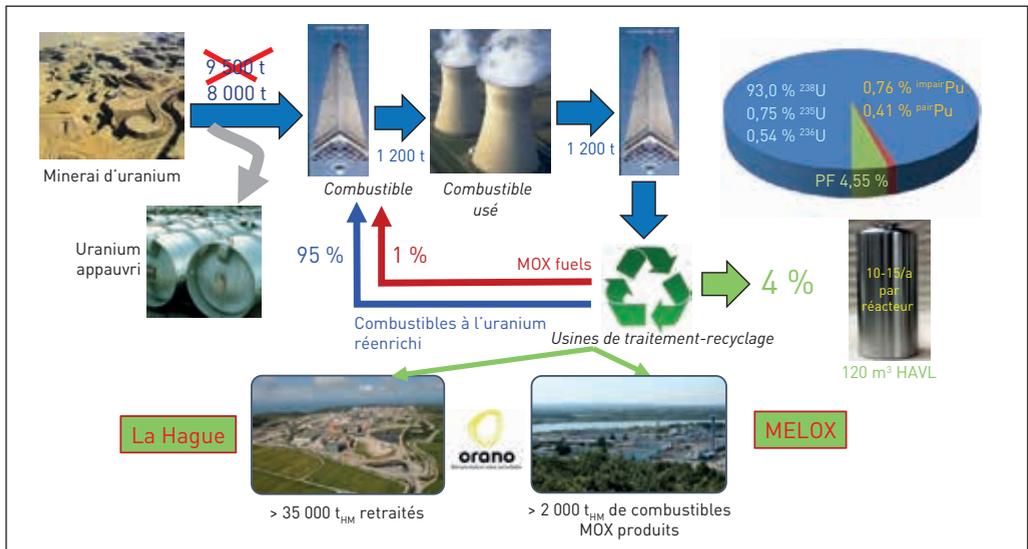


Figure 17

Cycle de l'uranium en France.

Une partie de cet uranium est utilisable : certes, l'isotope fissile a déchu puisqu'il a été largement utilisé, mais il reste néanmoins plus concentré que dans le minerai naturel. On a également du plutonium qui contient des isotopes fissiles. La partie des déchets ultimes¹⁸ qui ralentissent la réaction neutronique reste finalement relativement faible, entre 4 et 5 %.

Tout cela milite pour mettre en place un recyclage et réutiliser ces 95 % d'uranium ainsi que le plutonium fissile présent (1 %). C'est le choix qu'a fait la France depuis longtemps avec ses usines de traitement-recyclage qui recyclent les matières fissiles (uranium et le plutonium) sous forme de combustible MOX¹⁹ pour le plutonium, et de combustible URE (pour uranium réenrichi) pour l'uranium. En mettant en place ces deux recyclages, la France économise à peu près 20 % de la ressource en uranium : en ordre de grandeur, 10 % pour chacune des deux branches rouge et bleu. Cela permet aussi d'isoler les déchets

18. Déchets ultimes ou HAVL pour Haute Activité Vie Longue : il s'agit de la part de déchets nucléaires ne pouvant pas être recyclés du fait de leur dangerosité sur une longue période. Ils sont enrobés dans des fûts en verre pour éviter les fuites et sont généralement enfouis en profondeur.

19. MOX : *Mixed Oxydes*, mélange d'oxydes. Il s'agit d'un mélange contenant de l'uranium 238 et du plutonium pouvant être utilisés en tant que combustible. Le plutonium est radioactif et les neutrons émis par sa fission transforment l'uranium en davantage de plutonium, ce qui permet d'utiliser un isotope de l'uranium auparavant inutile.

radioactifs et de pouvoir les confiner dans une matrice beaucoup plus performante et efficace qu'en les laissant au sein des combustibles usés. Il s'agit là d'un savoir-faire qu'a développé la France au travers des usines de La Hague et de Melox qui fonctionnent avec succès depuis plus de 40 ans. Il s'agit d'un élément de réponse à la question : « Dans quelle mesure le recyclage est-il capable de réduire nos besoins en uranium et par conséquent d'augmenter la durée de vie et notre autonomie sur cette ressource ? »

Mais on pourrait faire encore mieux. En effet, en changeant les réacteurs actuels pour des réacteurs à neutrons rapides, c'est-à-dire utilisant des neutrons beaucoup plus énergétiques (**Figure 18**), on pourrait mettre en place un multirecyclage et gagner encore sur l'utilisation du combustible. On pourrait alors, en principe, utiliser tous les isotopes de l'uranium et du plutonium et aller beaucoup plus loin dans l'utilisation de la ressource, car on consommerait la totalité de l'uranium et du plutonium et non pas les seuls isotopes fissiles minoritaires. Les besoins en ressources naturelles seraient alors évidemment beaucoup plus faibles : pour alimenter un parc de réacteurs nucléaires comme celui que l'on a en France, 50 tonnes d'uranium appauvri par an seraient suffisantes au lieu des 8 000 tonnes d'uranium naturel dont on parlait tout à l'heure. Sachant qu'on dispose aujourd'hui en France d'environ 450 000 tonnes d'uranium appauvri résultant des opérations d'enrichissement

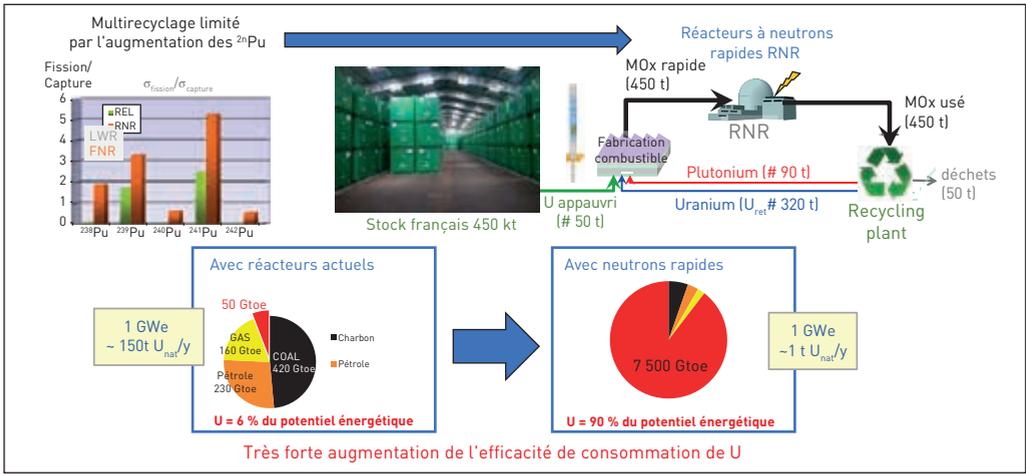


Figure 18

L'utilisation possible du plutonium en tant que combustible nucléaire.

conduites ces dernières décennies. Cette réserve est énorme et changerait considérablement le paysage si on se mettait en mesure de l'exploiter puisqu'elle permettrait de garantir une production électrique de plusieurs milliers d'années sans nécessiter aucune nouvelle extraction d'uranium du sous-sol, sans dépendre d'aucune importation.

La **Figure 18** donne une illustration de ces fonctionnements : sur la partie gauche, c'est le réacteur dit thermique (réacteur actuel) où on utilise 150 tonnes d'uranium naturel pour faire un gigawatt électrique. La quantité d'uranium sur terre

représente 50 gigatonnes équivalent pétrole, ce qui reste relativement faible par rapport aux ressources en pétrole, en gaz et en charbon. Mais si on utilise les réacteurs à neutrons rapides mentionnés précédemment, il ne faut plus qu'une tonne d'uranium pour faire un gigawatt : on obtient alors une équivalence d'environ 7 500 gigatonnes de pétrole. L'uranium devient alors la réserve énergétique principale car dans les filières de réacteurs à neutrons rapides, le potentiel énergétique de la ressource uranium est considérablement multiplié et que, d'autre part, les stocks d'uranium appauvri peuvent être utilisés.

Conclusion

Ce chapitre a voulu faire ressortir les messages suivants (**Figure 19**) :

- La transition énergétique requiert de **développer des énergies décarbonées** qui sont des énergies extrêmement gourmandes en ressources minérales, à l'exception de l'une

- Transition énergétique \Leftrightarrow énergies décarbonées \Rightarrow ressources minérales \uparrow
 - Passage d'une dépendance aux énergies fossiles à une dépendance aux ressources minérales
 - \Rightarrow nouvelles dépendances géopolitiques
- Dans ce contexte, **faible dépendance** du nucléaire aux ressources minérales est un atout indéniable alors que l'accès aux métaux stratégiques risque de devenir un frein à la transition énergétique
- Même si les ressources en U restent abondantes à l'échelle du siècle \Rightarrow incertitude sur l'adéquation offre / demande à moyen-terme
 - Augmenter les investissements dans l'amont du cycle.
 - Recyclage des combustibles permet un gain significatif en U.
 - Multirecyclage grâce à des RNR pourrait permettre à long-terme de s'affranchir de la problématique des ressources en U
- Combustibles nucléaires contiennent des **métaux stratégiques** (PF)
 - Seuls Ru et Rh présentent un intérêt malgré problématique du stockage
 - Opportunité d'utilisation dans la sphère nucléaire \Rightarrow Enjeu de traçabilité

Figure 19

Diapositive de conclusion.

d'entre elles qui est le nucléaire. De ce point de vue, le nucléaire présente un intérêt éminent pour pallier les éventuels risques de rupture sur les approvisionnements au-delà de l'intérêt évident qu'il présente du fait de sa capacité à produire en continu (sans intermittence) sur de très longues périodes (> année).

- Le deuxième point est qu'en termes de ressources de fonctionnement du nucléaire, il n'y a clairement **pas de risque à court terme de rupture d'approvisionnement**, ni sur l'uranium qui constitue le combustible, ni sur le zirconium qui permet de fabriquer les matériaux de gainage.

- À technologie de réacteurs constante, il y a néanmoins des risques d'à-coup à moyen terme et **il est indispensable de réinvestir dans l'amont du cycle** pour être en mesure de répondre aux besoins croissants. Le choix du recyclage qu'a fait la France constitue une option particulièrement pertinente pour réduire ces risques de tensions dans l'amont du cycle.

- En développant les **réacteurs à neutrons rapides** dont elle maîtrise la technologie, la France pourrait également s'affranchir totalement de tout nouveau besoin en uranium et être en capacité de produire de l'électricité

durant plusieurs millénaires en consommant les stocks d'uranium appauvri présents sur son territoire.

• **Dans les produits de fission sont présents des éléments stratégiques**, et il peut être intéressant d'en valoriser certains. Il faut toutefois une phase d'entreposage préalable pour permettre leur décroissance radioactive, principalement pour deux d'entre eux de la famille des platinoïdes utilisés pour la catalyse²⁰ : ruthénium et rhodium.

À retenir : le nucléaire est beaucoup moins consommateur que les énergies renouvelables en ressources minérales et présente de ce point de vue un intérêt économique, stratégique et environnemental certain dans le cadre de la transition énergétique.

20. Les catalyseurs sont des substances permettant par leur présence de réaliser plus facilement et rapidement un grand nombre de réactions chimiques. Ils ont généralement un coût très élevé.

Cycle des matériaux stratégiques, de l'éco-conception au recyclage appliqué aux nouvelles technologies de l'énergie

Étienne BOUYER est directeur du « programme exploratoire » au CEA.

Le présent chapitre examine une intéressante question de politique de recherche : pourquoi un organisme de recherches comme le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) s'est-il saisi du sujet des métaux stratégiques et comment le fait-il ?

On commence par donner des informations sur l'organisme afin de situer le contexte de cette question. Cela permettra d'apprécier les quelques stratégies proposées pour réduire les besoins en métaux stratégiques dans les technologies que l'on développe, à commencer par les nouvelles technologies pour l'énergie.

On illustrera ces stratégies par des exemples d'études et de

réalisations sur la production, le transport, la conversion et le stockage de l'énergie électrique. Un point très actuel – l'amélioration des aimants permanents – complétera le chapitre par un accent particulier.

1 Présentation du CEA

1.1. Le CEA en quelques chiffres

La marque du CEA, qui résume sa personnalité, c'est « De la recherche à l'industrie ! ». Que cette formule soit en effet la clef de l'activité de l'organisme est illustré par le nombre des brevets auxquels ses études donnent lieu (**Figure 1**).

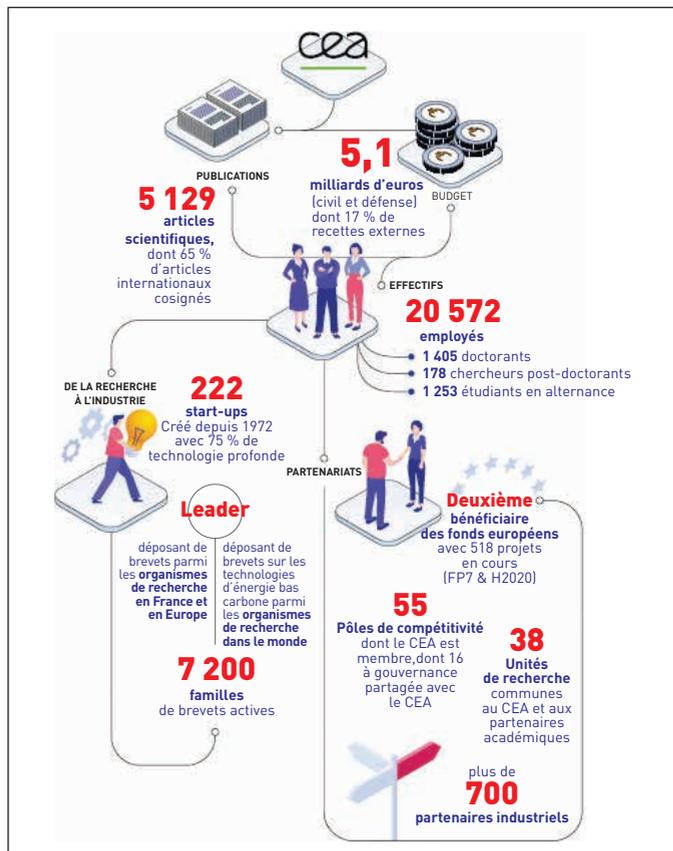


Figure 1

Chiffres présentant l'importance du CEA comme auteur de brevets.

Mais prendre un brevet n'est pas une fin en soi, et cet indicateur est important parce qu'il implique une très grande et très diverse activité qui suit son enregistrement.

On peut ainsi valoriser un brevet en le transférant à d'autres équipes pour qu'elles l'exploitent dans des objectifs plus directement industriels, ce qui conduit par exemple à la création de start-ups, puis d'entreprises de développement puis, éventuellement, à l'industrie commerciale.

Toutes les activités que l'on mène autour des brevets – études préalables, puis de développement, puis de

transfert – sont gérées dans le cadre de projets. Le financement de ces projets conduit à maintenir une politique de contacts très variés. Le niveau européen est particulièrement important sous ce rapport : le CEA est, derrière le CNRS, le deuxième bénéficiaire de budgets issus de projets européens. Ceci lui assure une place très solide dans des réseaux techniquement spécifiques et d'enrichir ainsi ses points de vue et objectifs techniques.

1.2. Une innovation de l'amont à l'aval

Les laboratoires, les instituts du CEA sont répartis en quatre divisions : les recherches pour la défense ; pour les énergies bas carbone, nucléaires et non nucléaires ; la recherche technologique ; puis en socle transversal, la recherche fondamentale (Figure 2) qui vient irriguer les technologies tirées par les applications.

La démarche des recherches au CEA va du matériau jusqu'au système. On part d'une recherche fondamentale dynamique et, en passant par le composant et la conception du système, on va vers l'objet intégré fini (Figure 3).

1.3. Genèse de l'implication du CEA dans l'efficacité des ressources matières

La préoccupation pour les matériaux « stratégiques », c'est-à-dire ceux dont on ne peut pas se passer mais qui deviennent rares, est apparue en Europe comme aux États-Unis au tournant des années

2000 à la suite de signaux d'alerte (rapports, études variées) sur les fluctuations des prix de certaines matières. Dans tous ces pays, des « indicateurs de criticité » ont été mis au point par, entre autres acteurs, en Europe les centres de recherche communs européens et aux États-Unis le département de l'Énergie, avec aussi le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) français et ses homologues – l'Institut britannique par exemple.

Ce mouvement a été repris par des autorités compétentes comme le Sénat, l'OPECST (l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques

et techniques) (Figure 4)... Un grand nombre de rapports de réflexion ont alors été publiés. Bien évidemment, le CEA a participé à ces mouvements et adopté dans sa politique les préoccupations techniques correspondantes.

Le fond du problème est aujourd'hui connu de tous : c'est que les nouvelles technologies pour l'énergie sont particulièrement impactées par les difficultés sur l'approvisionnement en métaux stratégiques. Les objectifs fixés aux équipes du CEA par son administrateur général pour répondre à ces préoccupations ont été formulés en 2011.

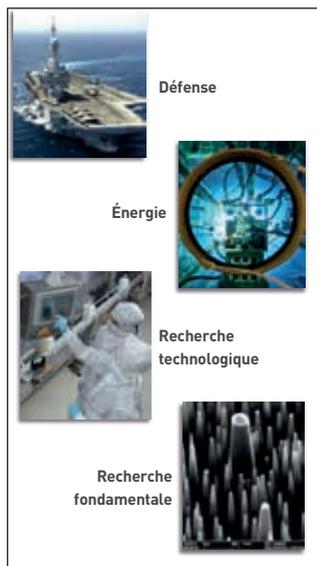


Figure 2

Les quatre divisions du CEA.

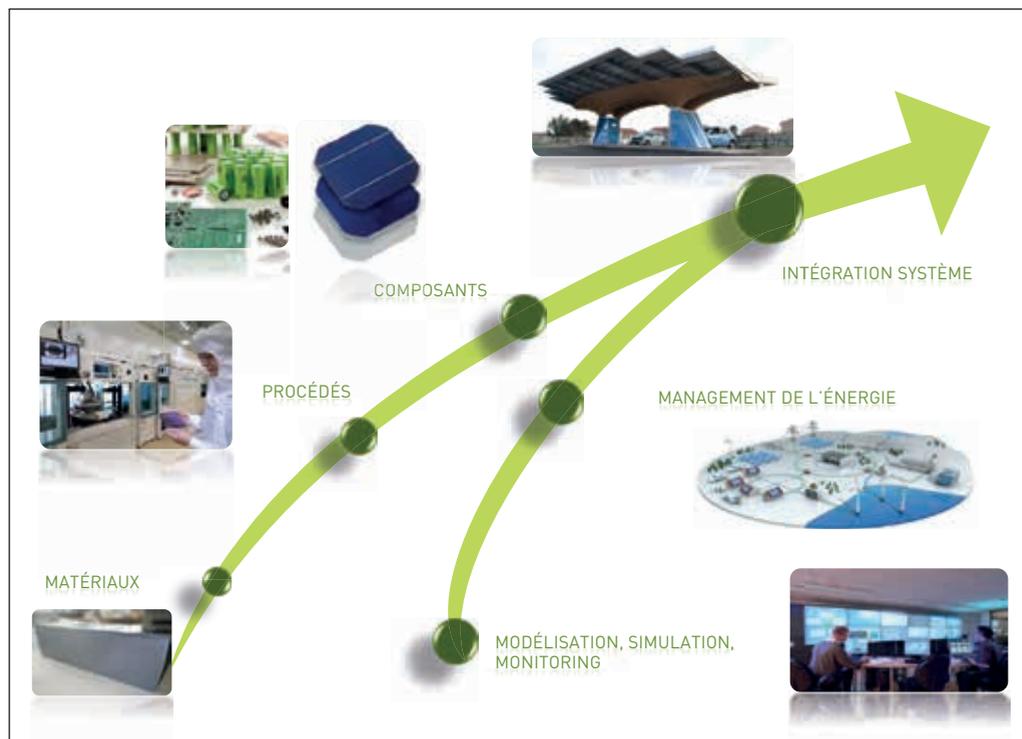


Figure 3

Des matériaux aux composants, des composants aux systèmes.

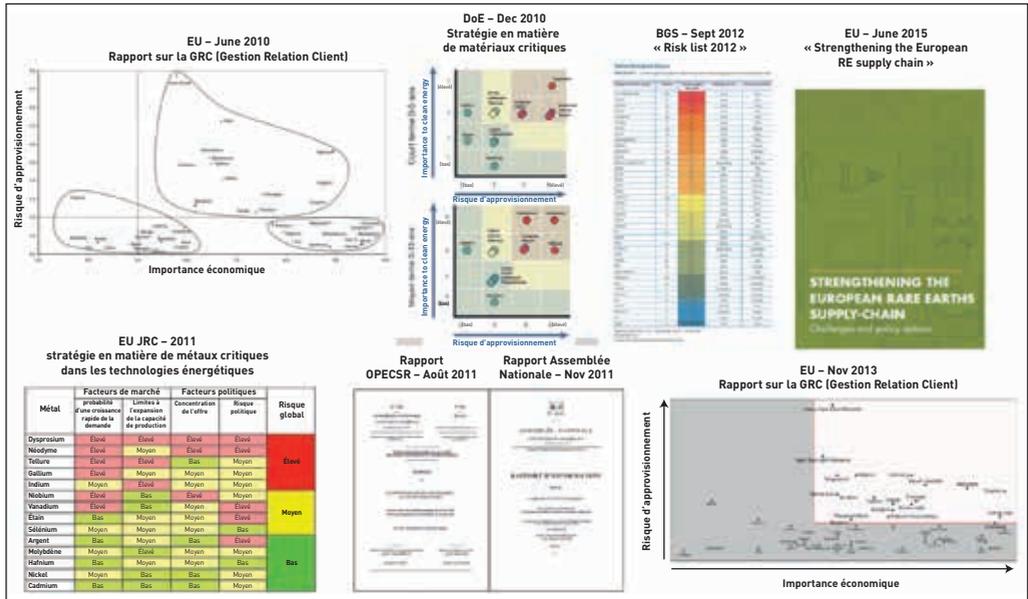


Figure 4
Liste des études sur les matériaux stratégiques citées.

Les principaux sont :
 – « Anticiper les tensions sur la disponibilité des matières stratégiques pour les besoins actuels et pour les technologies en développement et déjà développées au sein de notre organisme. »
 – « Sécuriser l’approvisionnement », c’est aussi savoir comment se passer de ces métaux stratégiques pour les technologies et utiliser nos moyens de recherche et d’innovation pour progresser en la matière.

1.4. Des éléments de contexte favorables, un écosystème dynamique

Pour nous au CEA, le démarrage dans les nouvelles technologies de l’énergie a été 2009, avec un partenariat fort avec Renault pour développer des nouvelles

chimies de batterie, car nous savons construire des batteries lithium-ion¹. La demande du partenaire a tout de suite été : construire, c’est bien, mais vous allez essayer de les déconstruire en fin de vie, donc commencer à travailler sur le **recyclage des batteries**.

C’était donc avant les encouragements formulés par les pouvoirs publics en faveur de la recherche sur les matériaux stratégiques, encouragements qui ont donné naissance à ces dispositifs listés sur la **Figure 5**.

Ces mesures ont créé un contexte extrêmement favorable à la recherche aux niveaux national et européen. Cela a été la création du COMES (Comité pour les métaux stratégiques),

1. Batteries lithium-ion : accumulateur électrochimique qui utilise du lithium sous forme ionique.



Figure 5

Liste des mesures mises en place pour encourager la recherche sur les matériaux stratégiques.

puis l'alliance assurée pour la coordination entre ANCRE et GP2, et encore le projet de réseau qui s'appelait Plat'inn porté par le BRGM et auquel le CEA participait, et enfin, des pôles de compétitivité nationaux (Axelera, Team2) ou encore des instruments européens car les collaborations européennes ont joué un rôle très important.

En fait on retrouve ce point bien connu que la recherche est une activité collaborative ; on ne peut pas la faire tout seul, même si on est un grand organisme de recherche comme le CNRS, le CEA ou le BRGM. La **Figure 5** cite un certain nombre d'autres initiatives, par exemple l'AERTO (Agence européenne des centres de recherches) avec qui on avait commencé à travailler sur le recyclage. Plus tard, d'autres instruments ont été construits, notamment une association initiée par le CEA – PROMETIA, un réseau (qui existe toujours) – qui a pour vocation de travailler sur les

procédés pour l'extraction de minerais et pour le recyclage. Enfin, il faut citer l'ERMA (European Raw Material Alliance) (**Figure 5**).

1.5. Les nouvelles technologies pour l'énergie sont gourmandes en matériaux stratégiques

Sur la dernière liste des métaux critiques européens, qui date de l'année 2020 (**Figure 6**), on note 4 substances rajoutées par rapport à la liste de 2017. Au-delà du fort besoin en métaux déjà souligné, on note aussi les mentions du graphite et de la fluorite pour toute la chimie du fluor.

Les recommandations pour optimiser la gestion de ces ressources concernent à la fois l'amont et l'aval. Elles visent à réduire l'empreinte technologique avec quelques priorités :

- Utiliser des matériaux et aussi les précurseurs de matériaux abondants.



Liste CRM 2020		
Antimoine	Hafnium	Phosphore
Baryte	Terres rares lourdes	Scandium
Beryllium	Terres rares légères	Silicium (métal)
Bismuth	Indium	Tantale
Borate	Magnésium	Tungstène
Cobalt	Graphite naturel	Vanadium
Coking coal	Caoutchouc naturel	Bauxite
Fluorite	Niobium	Lithium
Gallium	Platinoides	Titane
Germanium	Phosphate	Strontium

Figure 6

Listes des matières premières critiques.

- Minimiser voire éviter l'usage des matériaux stratégiques.
- Améliorer les procédés pour plus d'efficacité et moins de dommages à l'environnement.
- Passer de la conception à l'éco-conception et l'éco-innovation pour favoriser la réparation, éventuellement le ré-usage, les secondes vies, et, *in fine*, faciliter les processus liés au recyclage.

Pour favoriser ces objectifs, on étudie l'adoption de nouveaux matériaux à substituer aux matériaux stratégiques. On identifie 4 forces motrices :

- La première, c'est de vouloir se passer des métaux stratégiques, pourtant *a priori* choisis pour leur bonne adéquation technique.
- La deuxième, c'est de bannir des substances nocives comme le cadmium ou le chrome VI.
- La troisième, c'est de ne pas négliger les opportunités qui apparaissent en France ou à l'étranger ; des laboratoires

très forts en innovation de nouveaux matériaux abondants et non toxiques peuvent servir de modèles ou de motivation.

- La quatrième est la vigueur de la demande, qui reste toujours forte, pour les matériaux améliorés pour leur performance ou leur durabilité.

Il y a lieu, à ce stade, de ne pas oublier les gains en quantité de matière première que l'on peut atteindre en optimisant les procédés de fabrication. Citons par exemple ce qu'on appelle « fabrication soustractive » et « fabrication additive », en illustrant ces concepts sur la fabrication des aimants permanents² à partir d'un lingot de néodyme-fer-bore.

Méthode primaire : on usine le lingot puis on élimine les copeaux issus de cet usinage... c'est la « fabrication

2. Aimant permanent : matériau ferromagnétique qui peut être aimanté lorsqu'il subit un champ magnétique puissant.

soustractive ». Mais on peut aussi viser à se tenir dès le départ au plus près de la forme de l'objet aimant recherché, en ajoutant progressivement la matière qui manque... c'est la « fabrication additive » qui évite largement la production, donc le gaspillage, des copeaux. Ce procédé est donc synonyme d'économie de matière.

On peut aussi citer les procédés plus « verts », sans solvant, avec notamment l'usage de fluides supercritiques³, technique où le CEA a un positionnement fort, ou imaginer de convertir les procédés actuels pour qu'ils puissent accepter des matières premières ou des éléments entrants plus écologiques, ou valoriser le CO₂ émis lors de la fabrication, ou encore utiliser pour le procédé des matières biosourcées ou recyclées.

2 Production de l'énergie

On regarde, dans ce paragraphe, certaines actions menées par le CEA pour la production de l'énergie en veillant à la bonne gestion des matériaux stratégiques.

2.1. Substitution de l'ITO comme couche transparente conductrice

L'utilisation de l'ITO (oxyde d'indium et d'étain) sera notre premier exemple. Cette fameuse couche transparente

3. Fluide supercritique : fluide chauffé au-delà de sa température critique et comprimé au-dessus de sa pression critique, informations données par les diagrammes pression-température.

oxydée a le tort d'être basée sur l'indium qui est un métal stratégique dont les coûts sont élevés, et il est fragile. Parmi les différents substituants possibles, on a choisi de travailler sur des nanofils d'argent qui est un métal noble mais pas un métal critique. Ces nanofils présentent l'avantage d'avoir effectivement la fonction de conducteur transparent mais, de surcroît, ils peuvent donner des composants assez flexibles pour s'adapter à d'autres applications et pas seulement au photovoltaïque (**Figure 7**).

La technique de synthèse retenue produit les nanofils d'argent à l'état de suspension (**Figure 8**). Pour les appliquer sur un substrat, on utilise une technique peu coûteuse, la pulvérisation : un « spray » permet d'étaler les nanofils sur la cible. Pour que le dispositif fonctionne, il faut que le système soit percolant, c'est-à-dire qu'on puisse connecter tous les nanofils pour réaliser le passage du courant de



Figure 7

Substitution de l'ITO (MS = Matériau Stratégique).

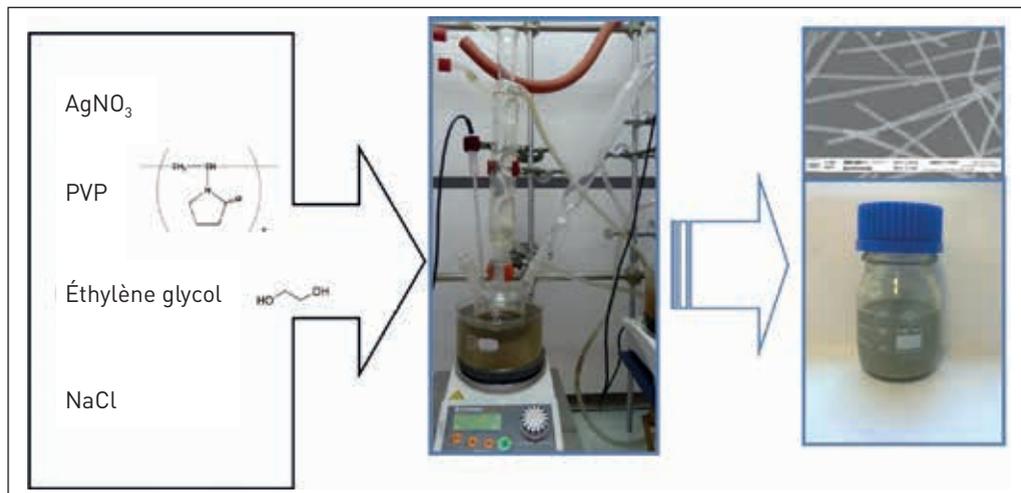


Figure 8

Procédé de synthèse des nanofils d'argent (PVP). PVP : Polyvinylpyrrolidone

l'électrode positive à l'électrode négative (**Figure 9**).

L'intérêt des nanofils d'argent est double : on substitue à l'indium une substance moins critique et on fait une économie de matière parce qu'on remplace une couche continue par une couche discontinue dont le taux de recouvrement est d'à peu près 30 % (**Figure 10**).

Par ailleurs, on obtient un bon recouvrement quelle que soit la rugosité du substrat.

Les nanofils d'argent (**Figure 11**) sont utiles pour beaucoup d'applications. Initialement, c'est beaucoup pour les composants en photovoltaïque organique, pour lesquels les résultats étaient comparables à ceux de l'ITO.

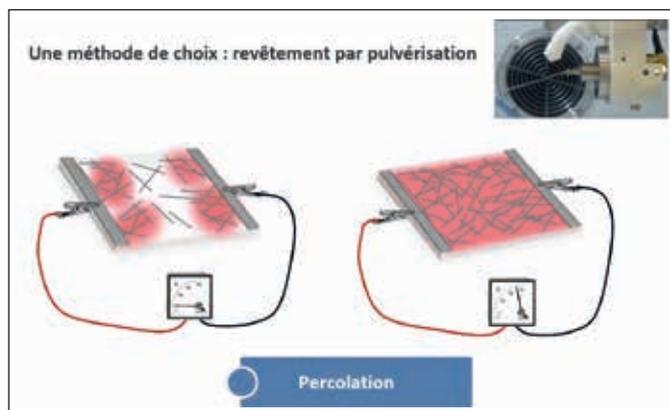


Figure 9

Schéma de la percolation*.

* Percolation : passage d'un fluide à travers un milieu poreux ou fissuré, ici un liquide conducteur dit électrolyte.



Figure 10

Image au microscope du réseau percolant obtenu.

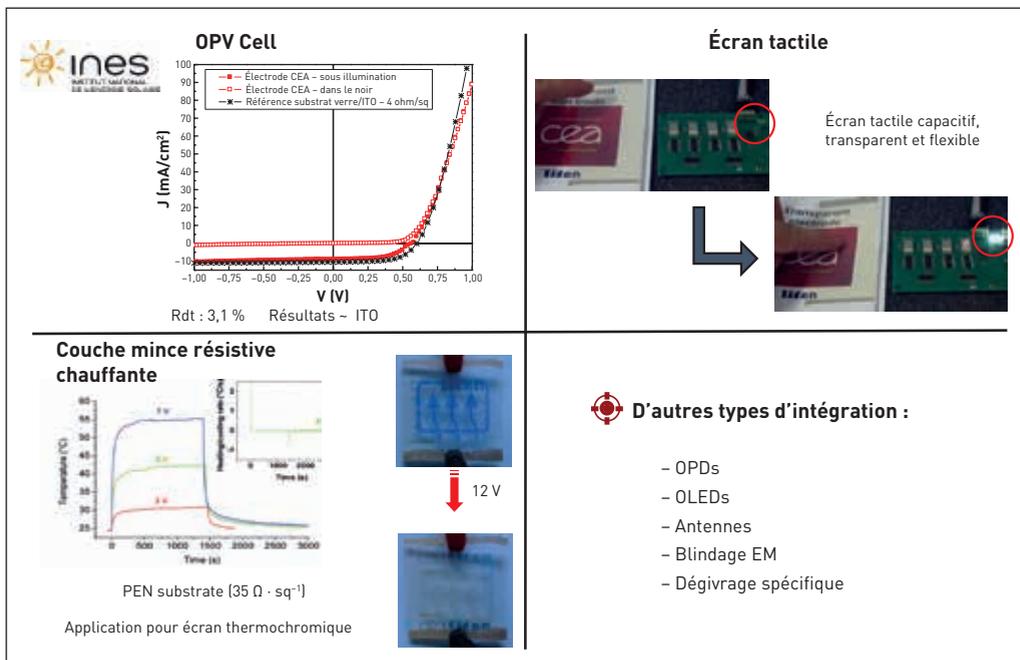


Figure 11

Applications des nanofils d'argent (OPV cell désigne « cellule Organique PhotoVoltaïque »).

Ultérieurement, il a été possible de transférer cette technologie en dehors du photovoltaïque et de réaliser des couches de résistances chauffantes.

Entre l'idée de travailler sur la technologie des nanofils

d'argent, le développement du procédé de synthèse, le passage à l'échelle, l'intégration dans les dispositifs, le transfert de technologie, etc., il s'est passé à peu près 10 ans. C'était du temps passé dans les laboratoires de recherche, des

thèses de doctorat, la direction de nombreuses équipes et pas seulement du CEA, la constitution de partenariats...

2.2. Aspect systémique des panneaux photovoltaïques

Du matériau pour le photovoltaïque, on passe à l'aspect système (Figure 12), plus précisément au développement de modules photovoltaïques légers.

Actuellement, un module photovoltaïque standard a un poids de 11 à 12 kg/m². Pour certaines applications militaires, un cahier des charges précis a été défini : réaliser des modules photovoltaïques de poids inférieur à 4 kg/m². Dans le cadre d'un projet

financé notamment par la DGA (Direction générale de l'Armement), nous avons travaillé sur l'économie matière et sur l'efficacité de tout le système. Le résultat a été là : on a réussi à développer des panneaux solaires légers (Figure 13) qui sont aujourd'hui fixés sur les toits de bâtiments démontables ou de véhicules...

Nous nous sommes par ailleurs impliqués, avec Thales Alenia et son projet « strato-bus », dans les programmes de dirigeables stratosphériques autonomes, qui fonctionnent avec des moteurs électriques et nécessitent donc une production d'énergie à bord à partir de panneaux solaires (Figure 14). Ils évoluent à peu près à 20 km d'altitude et il

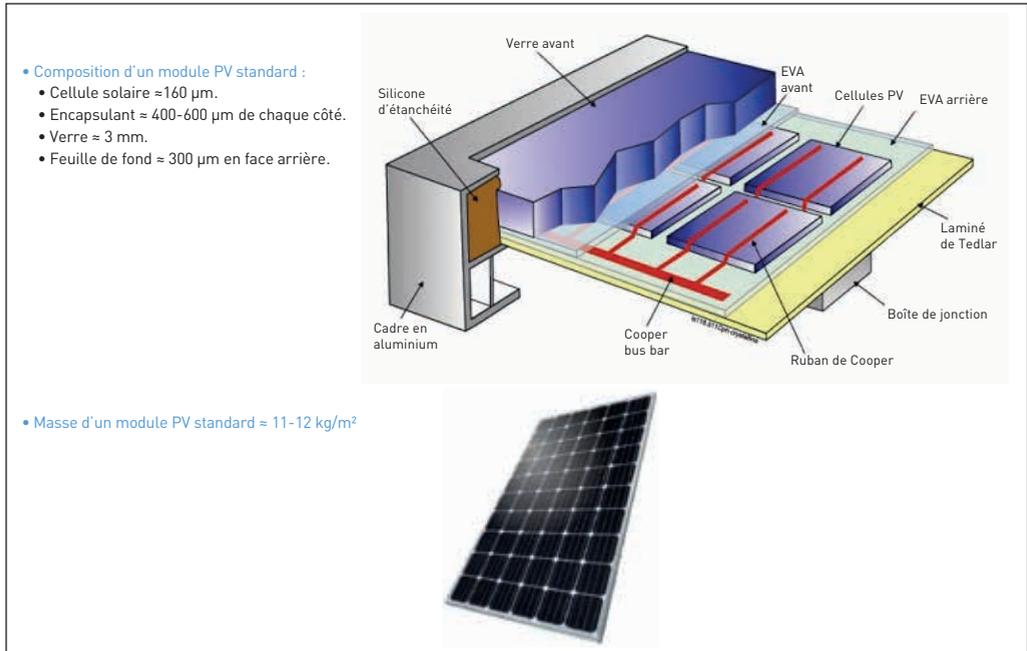


Figure 12

Représentation de modules photovoltaïques (PV) standards.

Besoins des forces armées : autonomie énergétique durant les déploiements rapides en opérations

- Module PV légers < 4 kg/m² (gain > 70 % vs standard 12 kg/m²)
- Installation facile, « Customisable »




Structure	Honeycomb sandwich	Classical Glass/Backsheet/Frame
Encapsulant	Pre-impregnated	EVA
Thickness	14 mm	30-40 mm
Area	1,6 m ²	1,6 m ²
Weight	6,3 kg	16-20 kg

- Réduction du poids
- Préservation des propriétés d'un module PV standard
- Facilité de mise en œuvre
- Produit personnalisé adapté à l'application




Figure 13
Représentation des modules photovoltaïques réalisés pour la DGA.



Dirigeable stratosphérique autonome multi-missions, à mi-chemin entre un drone et un satellite

Spécifications très strictes dans un environnement difficile

- Forte puissance (jusqu'en fin de vie)
- Ultra-léger (< 800 g/m²)
- Longue durée de vie
- Sécurité



Module ultra-léger & fin de 4 m²

	Masse (g/m ²)	Puissance AM1,5 (W/m ²)
Ciblé	< 800 g/m ²	≥ 180 W/m ²
Mesuré	750 g/m ²	187 W/m ²

*High Altitude Pseudo Satellite

Figure 14
Représentation de modules photovoltaïques pour les strabobus Thales Alenia.

fallait des panneaux encore nettement plus légers que ce que l'on a pu voir plus haut. Le cahier des charges était maintenant de 800 g/m². Des efforts considérables ont été nécessaires. Pour réussir

un tel objectif, une vision systémique a été essentielle : savoir où « gratter » du poids, où diminuer l'épaisseur, où substituer, etc. On a réussi à descendre jusqu'à 750 g/m². À ces épaisseurs-là, toujours sur

les technologies silicium, on arrivait à avoir des panneaux qui soient souples et conformables, ce qui était nécessaire car ils sont fixés non pas sur un support plat, mais sur le dirigeable lui-même... des conditions un peu extrêmes...

Un autre projet sur lequel nous sommes impliqués est l'intégration du photovoltaïque

sur des véhicules (**Figure 15**), que ce soit sur le toit, sur les portes ou sur le capot... Ceci peut augmenter l'autonomie du véhicule de 110 km sur une semaine. L'entreprise allemande commanditaire prévoit d'installer un tel système sur des camions (**Figure 16**).

La tendance est de mettre du photovoltaïque partout pour pallier l'inconvénient des centrales solaires, qui ont besoin d'une emprise au sol importante (**Figure 17**). Une des réponses serait d'intégrer le photovoltaïque là où il est le moins impactant, et, notamment dans les bâtiments, technique qui s'appelle en anglais le BIPV (*Building Integrated PhotoVoltaic*)⁴. On utilise le bâti pour positionner le photovoltaïque et alléger ainsi les tensions sur les matières structurales. On les place donc sur les toits, sur les routes, on peut faire de l'agri-voltaïsme, du photovoltaïque flottant, ou encore, pour le résidentiel, en l'intégrant sur des tuiles, etc.

Ces usages conduisent à développer des modules spécifiques. C'est ce qu'ont fait les équipes évoquées plus haut à propos de l'allègement et qui ont travaillé dans le domaine militaire ainsi que dans le domaine spatial. Cela les a conduits à la création, fin 2022, d'une start-up qui s'appelle HELIOP et qui vise le déploiement de modules légers sur les toitures. Cette approche de « niches » nous sert de modèles que nous déclinons pour le grand public ou pour l'industrie, souvent en créant



Figure 15

Intégration des modules photovoltaïques sur des voitures.



Figure 16

Intégration des modules photovoltaïques sur des camions.

4. BIPV (*Building Integrated PhotoVoltaic*) : installation photovoltaïque intégrée aux bâtiments.



Figure 17

Schématisme de la tendance du PV partout.

des start-ups. C'est vraiment notre méthode de base rendue possible par notre politique dynamique de brevets.

3 Transport de l'énergie

L'A380 (Figure 18) était le plus gros transporteur existant, même si bientôt il n'existera plus. Dans cet A380, naturellement il y a besoin d'électricité et il contient donc beaucoup de câbles : 500 km soit 4 tonnes. Or pour tout ce qui vole, l'ennemi c'est le poids. D'où l'objectif : peut-on trouver un substitut important et léger au cuivre dont sont faits les câbles ?

La solution envisagée a été de remplacer le cuivre par des

nanotubes de carbone, une technologie mûre pour laquelle le CEA avait déjà une sérieuse expérience. Les nanotubes de carbone (Figure 19) permettent des densités de courant bien supérieures à celles permises par le cuivre, une conductivité thermique encore plus importante (et, de plus, indépendante de la température contrairement à celle du cuivre), une tenue mécanique

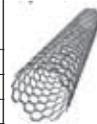


Figure 18

Photo d'un A380.

Matériau léger combinant de manière unique à la fois de bonnes propriétés électriques, thermiques et mécaniques.

	NTCs	Cu
Densité de courant [$A \cdot cm^{-2}$]	10^9	10^6-10^7
Conductivité thermique [$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$]	2 000-6 000	400
Module d'Young (GPa)	> 1 000	125
Densité [$g \cdot cm^{-3}$]	1,3 à 1,4	8,9



Comment assembler à l'échelle macroscopique ces nanomatériaux tout en conservant leurs propriétés exceptionnelles?

Figure 19

Comparaison entre les propriétés du cuivre et celles des nanotubes de carbone.

(le module d'Young⁵) qui est de beaucoup meilleure que celle du cuivre et une densité beaucoup plus basse.

L'examen comparé des propriétés respectives du cuivre et des nanotubes de carbone donne *a priori* l'avantage à ces derniers. Mais la question n'est pas tranchée pour autant : il faut aussi étudier les changements d'échelle : comment passer de l'échelle

nano aux échelles micro, voire millimétrique, centimétrique ? On a travaillé avec une méthode chimique classique, le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma atmosphérique⁶ (Figure 20), qui permet de faire croître à partir d'un catalyseur des tapis de nanotubes qui seront placés verticalement.

Question suivante : comment peut-on faire pour passer de ces tapis à des câbles ? On a

5. Module d'Young : module d'élasticité qui relie la contrainte de traction à l'allongement de manière linéaire dans le domaine d'élasticité d'un matériau.

6. Plasma atmosphérique : gaz à pression atmosphérique dont les atomes, sous l'effet de la température, ont été dissociés.

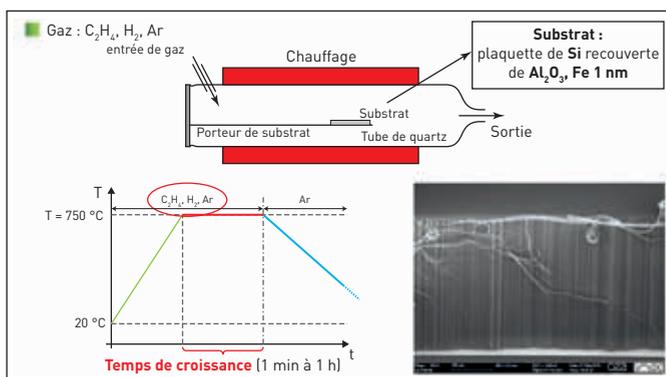


Figure 20

Méthode pour le changement d'échelle des nanotubes de carbone.

développé un système qui permet de torsader et regrouper ces nanotubes pour en faire des brins, puis associer ces brins ensemble. *In fine* on a gagné 3 ordres de grandeur, passant du nano au micro, puisqu'on a réussi à faire des câbles de 15 microns de diamètre. On a même réussi à faire des nœuds, ce qui prouve la souplesse du système.

En fait, tout n'est pas parfait comme le montre une coupe de ce câble : il n'est pas suffisamment dense (**Figure 21**). On n'a donc pas une complète analogie avec le cuivre, mais tout de même un gros progrès dans cette voie, qui ouvre la perspective de beaucoup d'applications.

Une des premières réussites de cette technologie a été dans la connexion pour la micro-électronique. Dans le cadre d'un projet européen avec IBM Zurich, on a réussi à faire de la connectique micro-électrique

en substituant l'or par des nanotubes de carbone.

Il y a évidemment encore du travail. Par exemple avec RTE (Réseau de transport d'électricité) qui cherche à limiter la consommation de cuivre tout en conservant une tenue mécanique importante et se tourne pour cela vers les composites nanotubes de carbone/cuivre.

4 Conversion de l'énergie

4.1. L'hydrogène, un autre vecteur énergétique

Abordons maintenant l'hydrogène et son utilisation dans la gestion de l'énergie, un secteur dont on parle énormément ces temps-ci. Quelques chiffres sont présentés sur la **Figure 22**, un exemple sur l'utilisation d'hydrogène comme carburant automobile : avec 1 kg d'hydrogène, on peut alimenter un véhicule, par

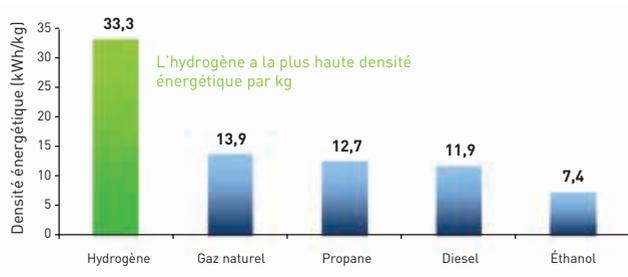


Figure 21

Résultats obtenus lors du filage de tapis.

1 kg d'hydrogène, c'est :

- 33,33 kWh (pouvoir calorifique inférieur, 120 MJ)
- ~ 16 kWh électriques en sortie de pile (rendement électrique ~ 50 %)
- 1 à 2 jours d'autonomie pour une maison tout confort (hors chauffage)
- ~ 100 km pour un véhicule de classe moyenne
- l'équivalent de 2,75 kg d'essence (soit 3,7 l)
- ~ 25 litres à 700 bars (poids du réservoir env. 20 kg/kg H₂)
- 2 à 10 € selon les méthodes de production et transport utilisées

**Figure 22**

Chiffres sur l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie.

exemple la Toyota Mirai, déjà commercialisée, qui fonctionne à l'hydrogène et parcourt 100 km avec 1 kg.

Le coût de production de l'hydrogène dépend beaucoup des méthodes utilisées. La solution privilégiée pour nos études est de le produire par électrolyse en partant d'énergie électrique décarbonée et faire ce qu'on appelle l'hydrogène vert (**Figure 23**).

Sur le diagramme de Sankey (**Figure 24**), est représentée la connexion entre la production d'hydrogène et ses usages, l'épaisseur du trait ou de la flèche étant proportionnelle au flux. Ce qu'on souhaiterait pour la maîtrise du bilan carbone, c'est produire l'hydrogène à partir d'électricité verte, diminuer voire supprimer le recours aux techniques classiques, le reformage du méthane par exemple, et surtout l'utiliser massivement dans les transports ou dans des

industries énergivores, notamment dans les aciéries, en développant la réduction directe du fer.

4.2. Les électrolyseurs basse température

Exploiter le potentiel de l'hydrogène passe par le développement d'électrolyseurs performants (**Figure 25**). Dans l'électrolyse de l'eau, un courant électrique casse la molécule d'eau en hydrogène et oxygène. Dans ces dispositifs-là, contrairement à ce qu'on fait en chimie avec un électrolyte liquide et deux électrodes, on a quelque chose de quasi solide. Les électrolyseurs, dits basse température, fonctionnent à température ambiante jusqu'à 90 °C grâce à l'action de catalyseurs qui sont des platinoïdes (de l'iridium par exemple). Dans ces électrolyseurs, l'électrolyte est

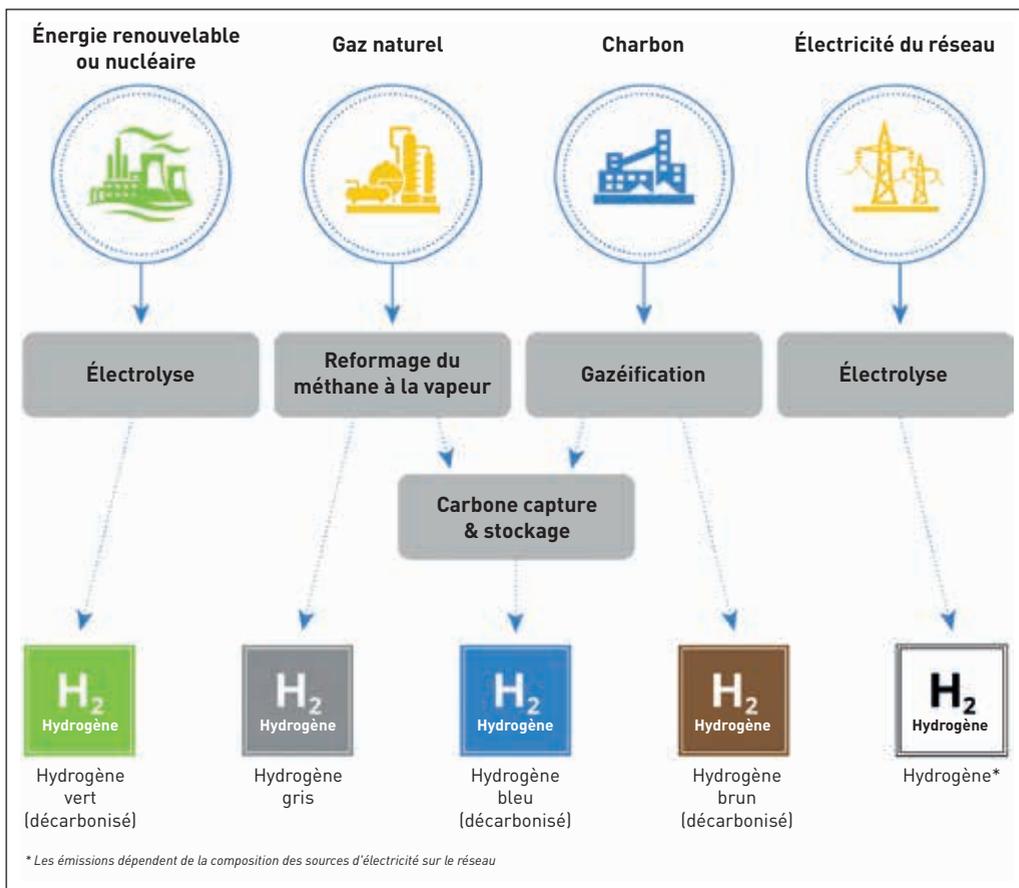


Figure 23

Les différentes « couleurs » de l'hydrogène.

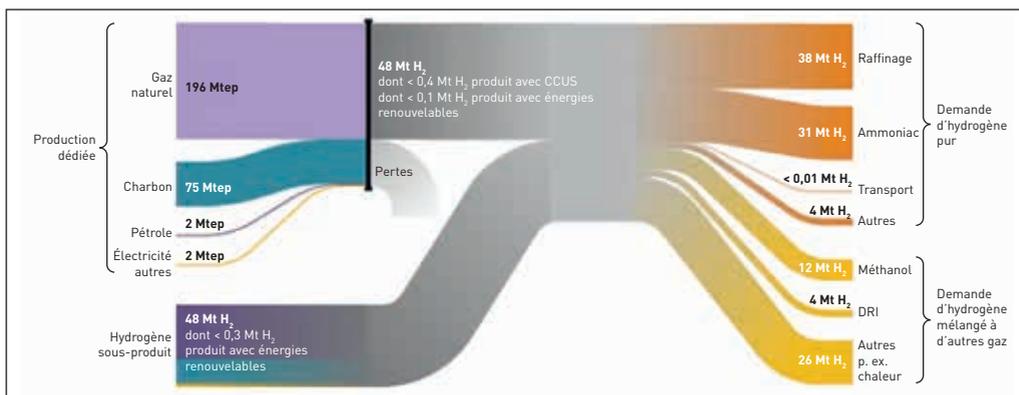


Figure 24

Diagramme de Sankey pour l'hydrogène.

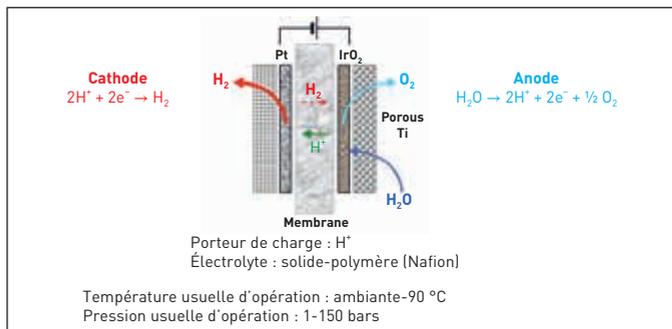


Figure 25

Schéma d'un électrolyseur basse température.

un polymère fluoré à la base de Nafion⁷, donc encore une fois un « matériau stratégique ». Pour se passer de matériaux stratégiques, on étudie des

7. Nafion : nom de marque d'un fluoropolymère, copolymère à base de tétrafluoroéthylène sulfonaté découvert à la fin des années 1960 par Walther Grot chez DuPont.

variantes aux catalyseurs nobles platinoïdes (Figure 26).

La ligne conductrice de ces études est d'utiliser d'autres systèmes vraiment en rupture, par exemple des catalyseurs à base de nickel bio-inspiré (on s'est basé sur des enzymes, les hydrogénases, qui permettent de casser la molécule d'hydrogène, et on a essayé de reproduire leurs réactions en laboratoire). Les résultats sont encourageants même si les cinétiques ne sont pas encore celles des platinoïdes. On a besoin de continuer les recherches sur ces sujets-là.

On peut, en attendant, faire de l'économie-matière sur les platinoïdes, diminuer la quantité de platine en développant des structures

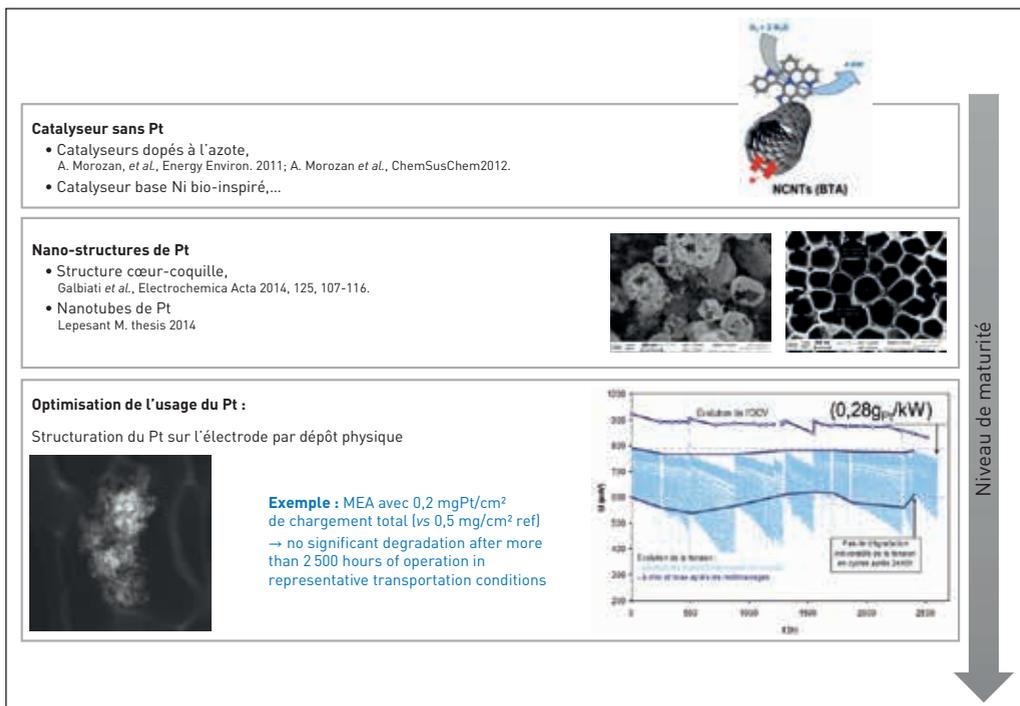


Figure 26

Échelles auxquelles on peut remplacer les platinoïdes.

cœurs-coquilles, en concentrant le platinoïde sur la coquille, car pour les catalyseurs, on n'a pas besoin du cœur mais de la surface.

Une autre voie possible est de travailler sur les procédés d'élaboration ou de dépôts de platine pour minimiser la quantité nécessaire.

4.3. Les électrolyseurs haute température

Une autre classe d'électrolyse se fait dans des « électrolyseurs haute température ». Ils fonctionnent entre 600 °C et 850 °C, une température assez élevée pour qu'on puisse se passer de catalyseurs. Ces électrolyseurs sont « tout solides » (Figure 27), avec deux électrodes, cathode et anode, et l'électrolyte solide conducteur d'ions O²⁻.

La coupe de l'élément cœur d'un électrolyseur haute température (Figure 28) montre la multiplicité des couches à empiler : à côté des fonctions électriques, il faut assurer

par exemple la tenue mécanique. Dans la composition des couches, on reconnaît des éléments « matériaux stratégiques », dont des terres rares comme le lanthane, le cérium, le gadolinium ainsi que le zirconium, le nickel. Les fonctions de ces couches sont en effet complexes : dès lors que l'on travaille à trop haute température, s'activent des phénomènes de diffusion que l'on ne souhaite pas voir

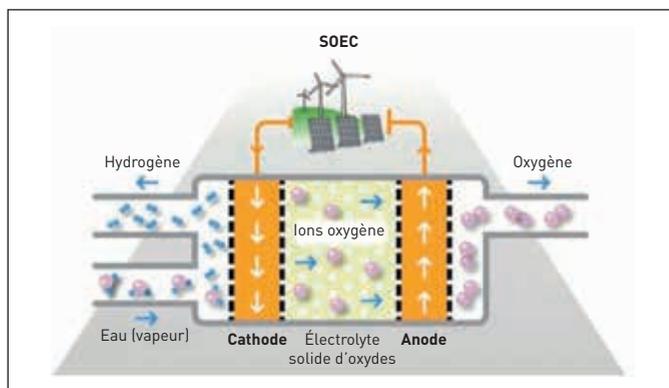


Figure 27

Schéma d'un électrolyseur haute température.

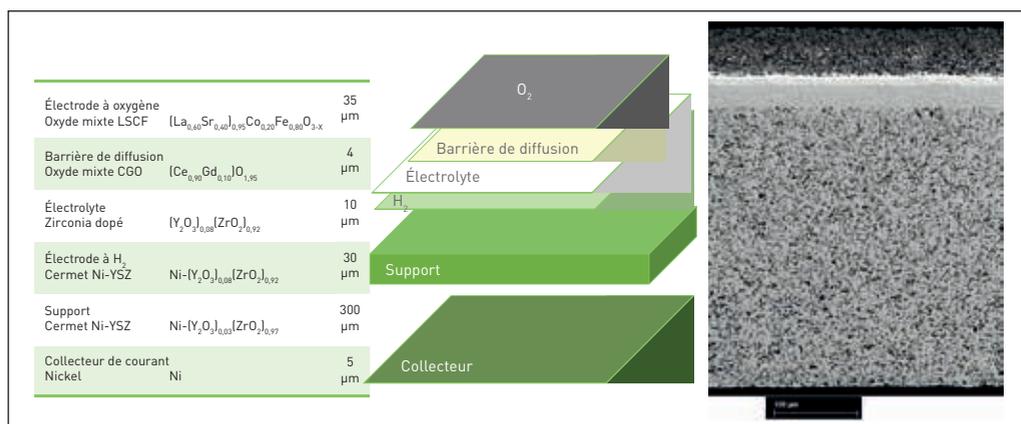


Figure 28

Les différentes couches d'un électrolyseur haute température.

dans le dispositif et que l'on contrôle par des couches barrières. D'un autre côté, comme ces systèmes fonctionnent à haute température, il faut commencer par les chauffer ; les matériaux se dilatent, mais pas tous de la même manière. Cela conduit à déployer des gradients⁸ de composition pour accommoder les différences de gradients de coefficients de dilatation... Ces technologies sont encore en phase de transfert vers l'industrie.

8. Gradient : taux de variation spatiale.

5 Stockage de l'énergie

5.1. Des batteries pour succéder aux batteries lithium-ion

La **Figure 29** schématise les batteries lithium-ion.

La **Figure 30** montre la composition des matériaux des cathodes et les nombreuses options possibles pour le choix des éléments. On a mentionné quelques matériaux clés, notamment le lithium, le fer et le phosphate, mais aussi le NMC (pour Nickel/Manganèse/

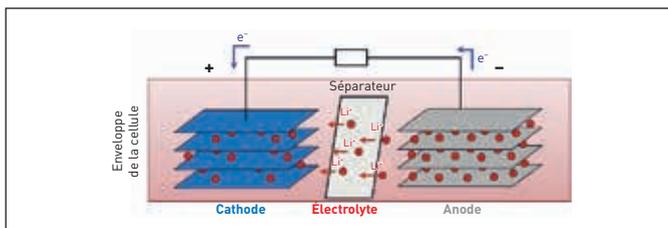


Figure 29

Schéma d'une batterie lithium-ion.

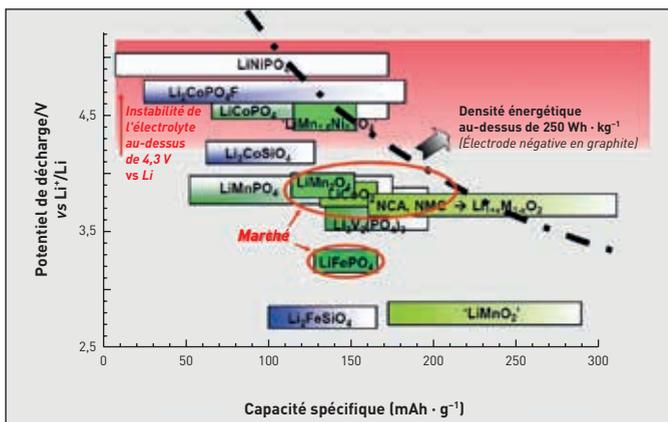


Figure 30

Représentation de la capacité spécifique en fonction du potentiel des matériaux de cathode.

Cobalt). Beaucoup d'études se font sur ces compositions, notamment avec des industriels chimistes européens, avec pour objectif de diminuer les quantités de cobalt nécessaires sans se pénaliser par une augmentation du nickel.

Du côté anode, un objectif est de remplacer le carbone (graphite) par le silicium, en principe beaucoup plus performant (Figure 31).

Les batteries lithium-ion sont aujourd'hui les plus avancées, mais il y a beaucoup de développements possibles sur d'autres solutions (Figure 32). La batterie sodium-ion, développée notamment par la société TIAMAT, une start-up issue de l'Université d'Amiens, est ainsi souvent évoquée. Via le réseau des batteries RS2E en France, on a pu réaliser la première batterie réelle sodium-ion. Il y a aussi beaucoup d'autres pistes comme le lithium-soufre, les batteries organiques, etc.

5.2. Un exemple : le projet SIRIUS

Un projet particulièrement prometteur, SIRIUS, est conduit avec la participation du CEA et de l'entreprise Varta Micro Innovation (Figure 33). Il consiste à substituer le graphite de l'anode d'une batterie lithium-ion par un composite silicium-carbone de fabrication originale basé sur une technologie développée par la société Nano Makers à partir de brevets CEA. Ces brevets décrivent la création de nanoparticules de silicium par l'irradiation au laser d'un gaz de fluorure de silicium qui dissocie la molécule en produisant des atomes de silicium à l'état atomique, précurseurs qui forment, par nucléation, des nanoparticules de granulométrie bien contrôlée (Figure 34). Cette technologie est maintenant développée et commercialisée.

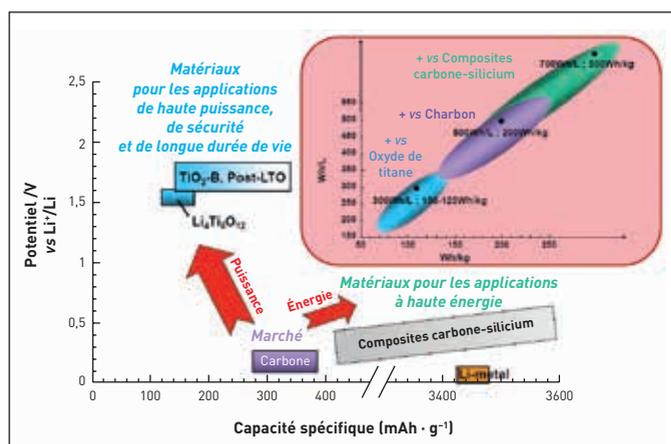


Figure 31

Représentation du potentiel des matériaux d'anode en fonction de la capacité spécifique.

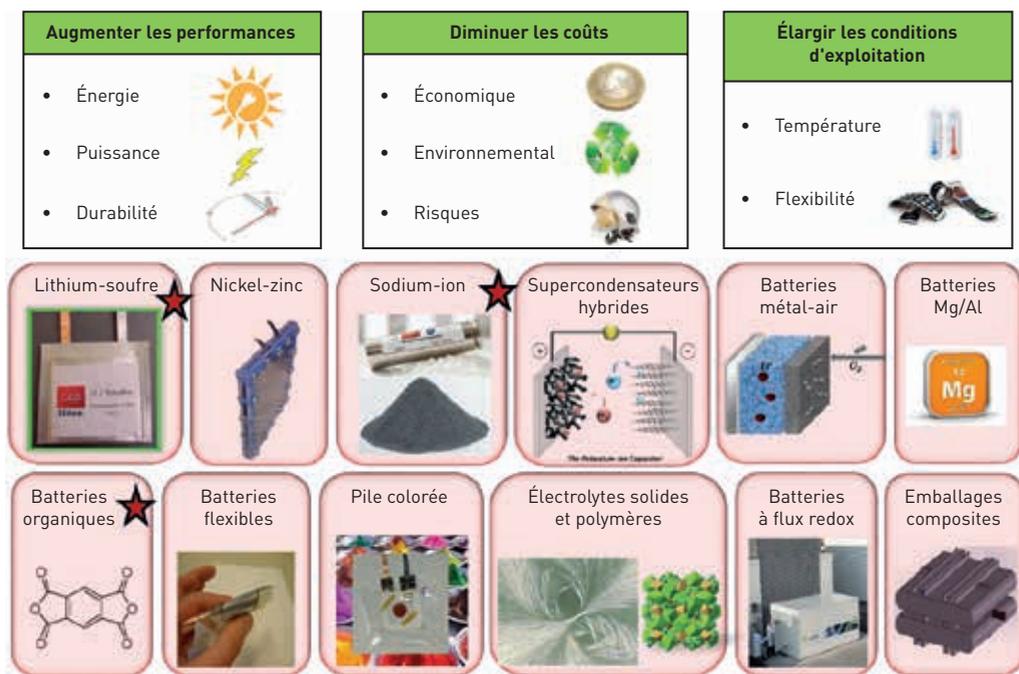


Figure 32

Possibilités futures pour des batteries autres que lithium-ion.



Figure 33

Partenaires du projet SIRIUS.

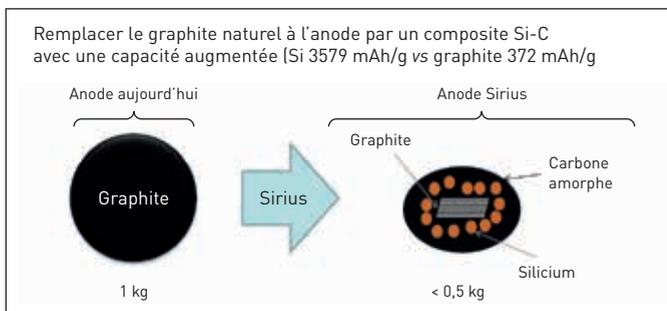


Figure 34

Schématisation des résultats obtenus avec le projet SIRIUS.

5.3. Intérêt des néodymes/fer/bore pour les aimants permanents (Figure 35)

Un projet franco-allemand, démarré il y a quelques années, est exemplaire sur les stratégies industrielles du recyclage des métaux. Le célèbre fabricant Bosch faisait l'observation que tous ses matériels électroportatifs comportent des moteurs électriques à aimants permanents et questionnait : « J'ai tous mes moteurs électriques et

beaucoup d'éléments dedans dont on ne sait que faire. Ne pourrait-on pas, par hasard, les récupérer et les revaloriser après la fin de vie des équipements pour refaire des aimants ? »

Cette stratégie est celle des « 3 R » que l'on déploie au CEA (Figure 36). Les objectifs à poursuivre sont :

1. Remplacer. On cherche à remplacer les terres rares les plus critiques dans les nouvelles compositions,

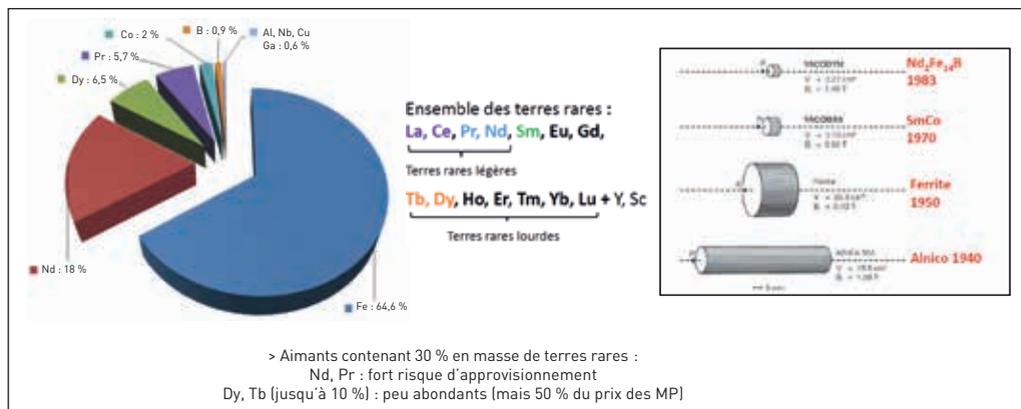


Figure 35

Information sur la composition des aimants permanents.

REMPLENER avec de nouvelles compositions
Substitution Ndpar Ce/La
Nouvelles phases

REDUIRE la consommation de TR
Localiser les TR lourdes (Dy) aux joints de grains
Réduction des déchets par fabrication additive

RECYCLER en boucle fermée
Aimants usagers
Rebuts de production



Figure 36

Stratégie employée au CEA.

notamment en substituant le néodyme par le cérium et le lanthane.

2. Réduire. On doit travailler sur des nouvelles phases complètement disruptives sans terres rares et commencer par réduire la consommation de terres notamment de l'élément le plus critique, le dysprosium.

3. Recycler. On doit tirer avantage des techniques de

recyclage – en boucle fermée ou en boucle courte – comme on le fait déjà avec General Electric sur des aimants d'éoliennes. Il y a à peu près 800 kg d'aimants par mégawatt d'éolienne et l'idée était d'intégrer jusqu'à 50 % de matière recyclée et donc 50 % de matière vierge en maintenant les mêmes propriétés magnétiques.

Conclusion : on ne fait rien sans la chimie

- L'efficacité des matières est capitale pour accélérer la transition énergétique.
- La substitution n'est pas seulement une question de matériaux, il y a aussi les aspects procédés.
- L'écoconception, l'éco-innovation, qui conduisent à de nouvelles méthodes sont très importantes à déployer.
- Porter attention au cycle de vie : on déploie des formations spécifiques d'analyse de cycle de vie auprès de nos chercheurs pour qu'ils puissent avoir des outils de développement et d'aide à la décision.

J'espère que j'ai pu démontrer l'utilité de la chimie sous toutes ses formes pour contrecarrer la problématique des métaux stratégiques.

Deux points très rapides sur l'actualité : on rappelle les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), notamment le **PEPR Diadème** qui permet de développer des nouveaux matériaux grâce au numérique et à l'intelligence artificielle. L'idée est de diminuer

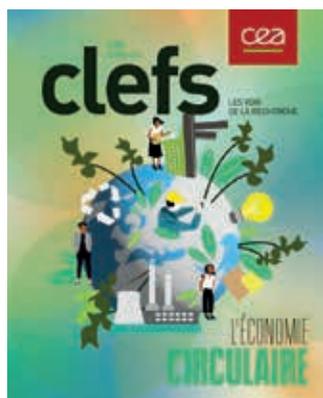


Figure 37

Numéro 75 de la revue clefs du CEA.

le temps entre la conception en laboratoire et la fabrication : comment accélérer ces développements en utilisant tous les outils numériques comme l'intelligence artificielle ? De la même manière, il y a aussi **un PEPR RRR dédié à la recyclabilité, au recyclage et à la réincorporation des matières.**⁹

9. On ne peut que vous encourager à regarder le numéro de *clefs* (**Figure 37**), une revue du CEA, qui est dédié à l'économie circulaire et dans lequel on fait beaucoup allusion aux métaux stratégiques.

Partie 4

Pénurie des matériaux
Solutions apportées par la chimie

Chimie métallurgique et métaux rares

Jean-Claude BERNIER est professeur émérite à l'Université de Strasbourg, il fut directeur à l'ECPM et directeur du département de Chimie du CNRS.

1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'examiner les contributions de la chimie à la production des métaux, pas toujours rares, mais souvent indispensables à notre vie quotidienne et donc parfois stratégiques.

1.1. Les éléments concernés

Sur la **Figure 1** est représenté un tableau de Mendeleïev un peu particulier. Il date d'il y a quelques années et a été montré lors du World

Materials Forum² qui se tient chaque année à Nancy. Les cases de certains éléments vont du rouge/violet foncé au jaune plus ou moins clair en fonction de leur difficulté d'approvisionnement que l'on appelle la criticité. On peut voir que le cobalt, l'étain, le tungstène et les terres rares posent de réels problèmes d'approvisionnement, suivis par le cuivre, le nickel et le zinc qui en posent un peu moins, mais, depuis 2022, d'autres métaux s'y sont associés.

Ils sont treize maintenant avec le lithium, le manganèse, le

1. ECPM : École européenne de Chimie, Polymères et Matériaux de Strasbourg.

2. World Materials Forum : Forum mondial des matériaux.

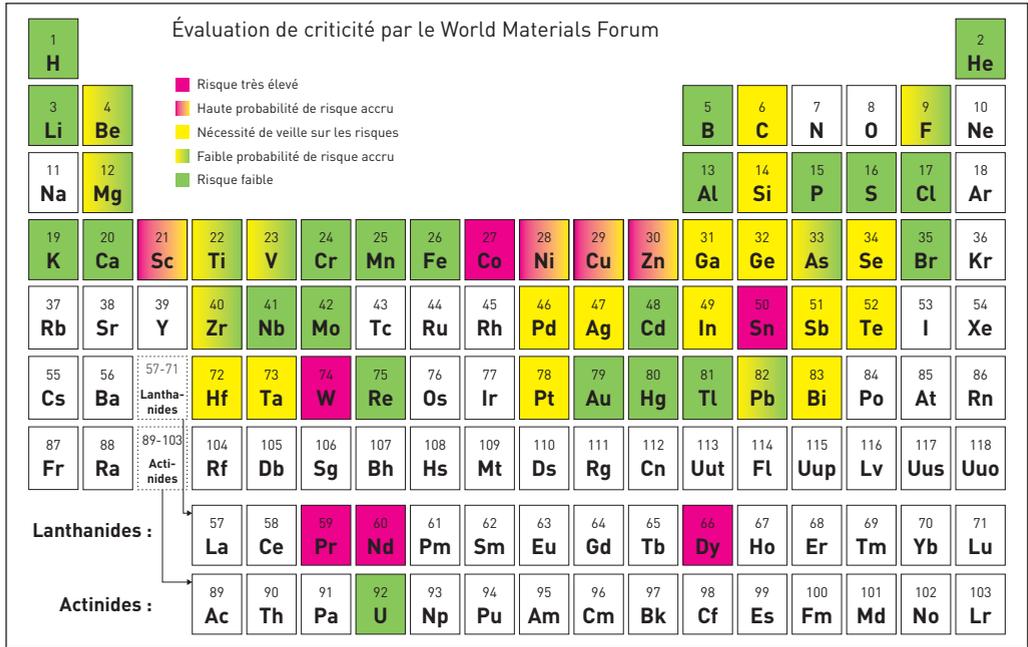


Figure 1

Tableau périodique et criticité.

- Selon le World Materials forum : augmentation du nombre de matériaux critiques en 7 ans
- Ni, Co, Li, Cu, Mn , TR (Nd, Pr, Dy), W, Ti, Pd...
- C graphite

Figure 2

Les métaux critiques en France en 2022.

titane, le palladium, sans compter le carbone sous sa forme graphite (avec ses propriétés, et ses qualités électrochimiques) (Figure 2).

Et pourtant, si nous comparons l'abondance de ces métaux dans la croûte terrestre, exprimée ici en échelle logarithmique par rapport à la référence du silicium qui est le plus abondant (Figure 3), nous voyons qu'à part les métaux très précieux du côté de la mine de platine, ces éléments ne sont pas moins rares, ni

moins abondants dans les roches, en particulier les terres rares qui finalement ne sont pas plus abondantes ou plus rares que d'autres.

1.2. Les raisons des risques de criticité

Alors quelles sont les raisons de ces risques de criticité ? On peut en citer au moins huit (Figure 4) : la demande qui a augmenté énormément, la diminution de la richesse de la concentration des minerais

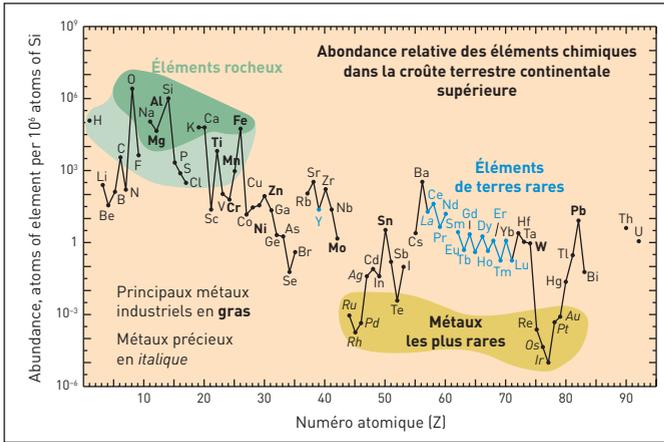


Figure 3

Abondance des métaux critiques dans la croûte terrestre.

Source : https://www.researchgate.net/figure/Abundance-fraction-atomique-des-elements-chimiques-de-la-croûte-continentale_fig9_317989282

- La demande augmentée depuis 1990 (Al)
- La baisse de la concentration des minerais (Ni)
- Le coût des investissements et traitements (Cu)
- La concentration géographique de production (TR)
- Les raisons géopolitiques (Pd)
- La transition écologique (Li)
- Le besoin toujours plus grand du numérique (Ga) (In)
- Des raisons d'acceptation sociale

Figure 4

Les raisons de la criticité en 2022.

qui entraîne des coûts d'investissements et d'exploitation considérables, les concentrations dans quelques zones géographiques particulières, des raisons géopolitiques à partir d'États qui veulent en faire un commerce important, la transition écologique pour certains métaux, et les besoins toujours plus grands pour le numérique. Il faut également ajouter une raison plus sociologique : peu de gens souhaitent avoir une mine au bout de leur jardin !

Quelques exemples vont illustrer ces huit raisons.

Le premier est l'augmentation de la demande pour un métal tel que l'aluminium qui ne peut être classé critique, bien qu'il y ait eu il y a quelques années, des problèmes d'approvisionnement, en particulier pour la fabrication des nouvelles rames de TGV en aluminium pour lesquelles on n'arrivait pas très bien à se fournir en tôle d'aluminium. La courbe de gauche de la **Figure 5** montre

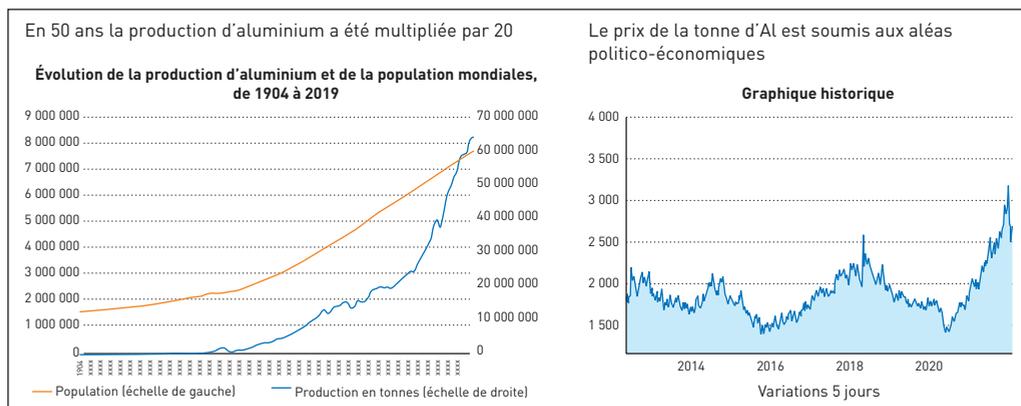


Figure 5

La pression de l'augmentation de la demande pour un jeune métal léger.

Sources : D'après « De la structuration des chaînes de valeurs aux mécanismes de formation des prix – une analyse englobante des marchés des métaux de base » – par Patrice Christmann et Yves Jegourel – p. 8. Cours de l'aluminium, octobre 2022 - data Bourse.com ou investing.com

pour ce métal, relativement jeune puisqu'il a été découvert à la fin du XIX^e siècle, que la consommation a suivi globalement la courbe d'augmentation de la population pour atteindre actuellement une demande de plus de 70 millions de tonnes d'aluminium par an. La courbe de droite montre les soubresauts du cours de l'aluminium avec un premier pic en 2018 lors du coup d'état en Guinée qui est le principal fournisseur de bauxite. Le cours actuel, autour de trois à quatre mille dollars la tonne, reste à des valeurs élevées à cause des petits problèmes de marché, notamment avec l'aluminium qui vient de Russie.

La deuxième raison est l'appauvrissement des minerais. Comme au cours du XX^e siècle, on a extrait autant de tonnes de métaux que dans tous les siècles précédents, inévitablement les teneurs en minerais exploitables se tarissent. L'exemple du nickel

est particulièrement parlant (**Figure 6**). On part d'une teneur de 6 à 8 % du minerai au début du XX^e siècle et, cent ans après, on tombe à des valeurs de l'ordre de 2 à 1,5 %. C'est un cas général pour tous les autres métaux du bas de la figure : le cuivre, l'argent, sans même parler de l'or.

Évidemment, avec l'épuisement des minerais, les frais d'extraction, les frais d'enrichissement et les frais de traitement augmentent ; il faut creuser plus profond, enrichir par hydrométallurgie³ des tonnages toujours plus importants et tout cela coûte cher. Les spécialistes disent qu'on a quasiment mangé notre pain blanc au cours des siècles précédents, et que l'on va se heurter à la barrière minéralogique qui est la teneur minimale dans

3. Hydrométallurgie : procédé d'extraction des métaux par voie liquide qui comporte une étape où le métal est solubilisé pour sa purification.

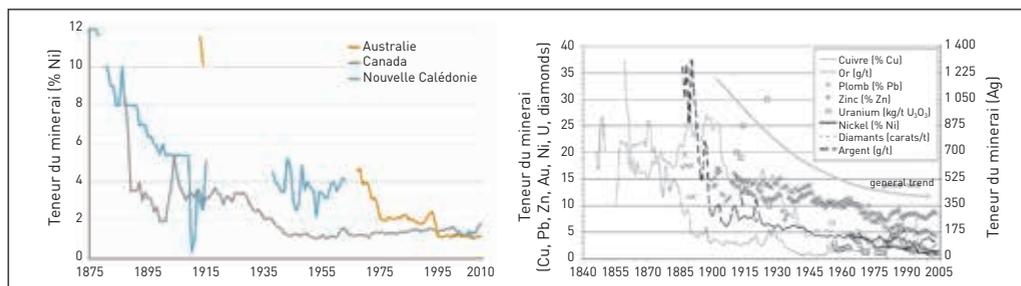


Figure 6

L'appauvrissement des minerais : à gauche, cas du nickel ; à droite, autres cas.

un filon en dessous de laquelle il n'est plus possible pour des raisons de dimensionnement et de coût, de l'exploiter. L'exemple du cuivre (**Figure 7**) est symptomatique. La courbe à gauche montre que son prix frise les 10 000 dollars la tonne en 2022, ce prix reflète une demande croissante du cuivre, mais également la difficulté des investissements dans de nouvelles mines.

La concentration de la production dans quelques pays

qui dominent le marché (partie gauche de la **Figure 8**) fait une pression à la fois financière et politique sur les approvisionnements. C'est le cas de l'extraction du cuivre au Chili, du nickel en Indonésie, du cobalt dans la République démocratique du Congo, du lithium en Australie et bien sûr des terres rares en Chine. Sur la partie droite de la **Figure 8**, on peut voir que la domination chinoise est partout prépondérante pour les traitements

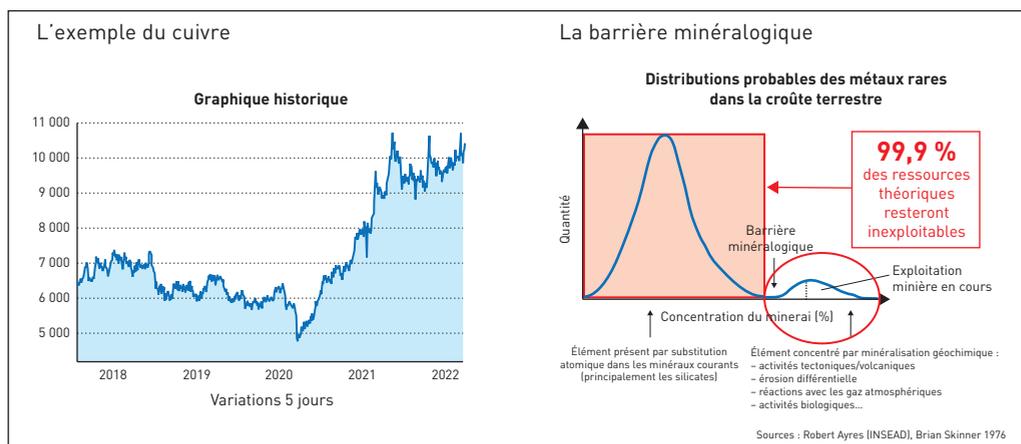


Figure 7

La barrière minéralogique : l'exemple du cuivre.

Source : Cours du cuivre, octobre 2022 - data Bourse.com ou investing.com

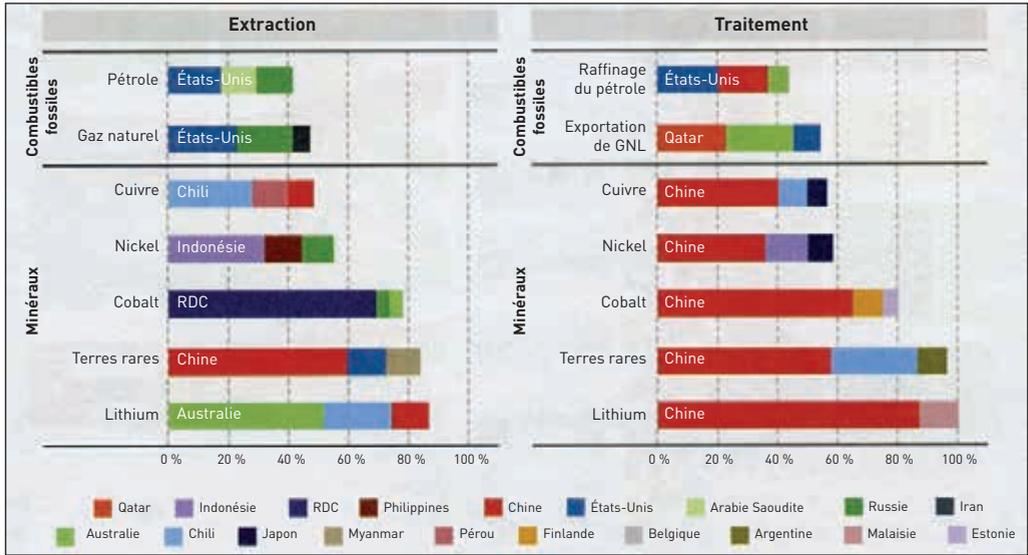


Figure 8

La production mondiale de matières premières est concentrée entre quelques pays.

et la mise sur le marché. Il est important de remarquer qu'aucun pays européen n'est présent de façon notable, et donc que nous sommes très vulnérables aux risques géopolitiques, comme l'Allemagne le fut très récemment avec le gaz russe.

L'Europe est d'autant plus vulnérable qu'elle se veut championne dans le domaine de la transition énergétique, ce qui a accéléré les demandes en matériaux de hautes technologies. Deux exemples sont présentés sur la **Figure 9**. Dans le cas de la mobilité électrique, le schéma de gauche montre qu'une voiture électrique contient à peu près cinq fois plus de métaux sensibles qu'une voiture thermique : notamment le cuivre bien sûr, mais également le nickel, le lithium et le manganèse. Les éoliennes pour les énergies

renouvelables consomment également beaucoup de métaux, surtout l'offshore⁴ qui, pour des raisons de moindre entretien en mer, en comporte plusieurs dizaines de tonnes. Il y en a moins dans les éoliennes terrestres, mais c'est bien plus que pour les centrales thermiques classiques au gaz ou au charbon.

Ces évolutions entraînent les experts à des prévisions affolantes pour tenir le grail du zéro carbone en 2050. La **Figure 10** montre la multiplication de la demande de matières premières critiques pour 2030 et 2050 avec des facteurs de multiplicité de 2 à 15 pour des échelles de 1 kilotonne à 250 kilotonnes, avec parfois, pour certains métaux,

4. Offshore : en mer. Plateformes pétrolières installées en pleine mer pour le forage.

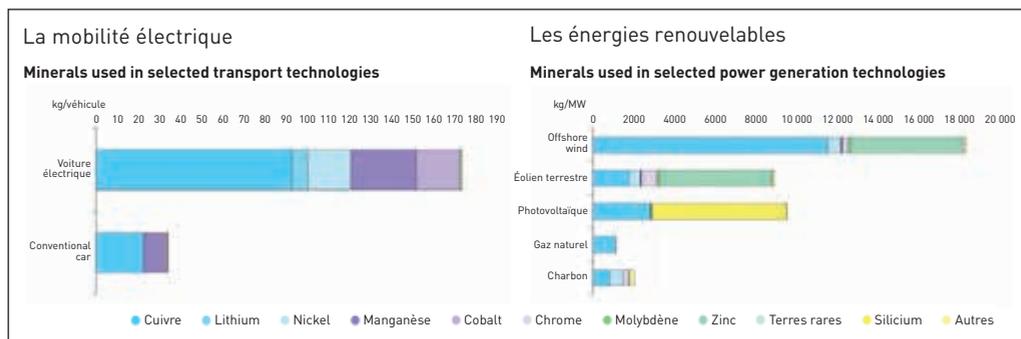


Figure 9

La transition énergétique accélère la demande en métaux sensibles.

Source : Les matériaux au cœur des enjeux stratégiques post Covid – livre blanc de la SF2M – Chapitre 2 : On ne pourra jamais se passer des matériaux, p. 5 (tiré d'une publication : *Clean energy program after the covid 19 - Crisis will need reliable supplies of crystallised minerals*).

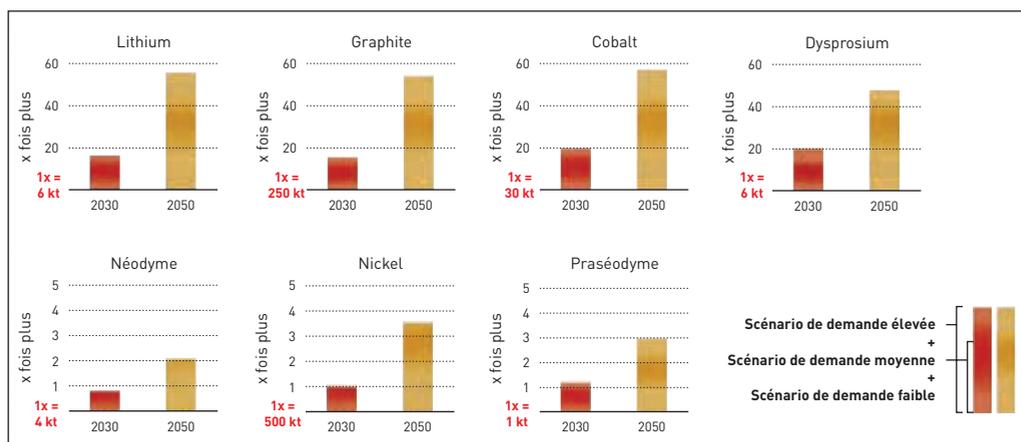


Figure 10

Prévisions des augmentations de la demande de matières premières critiques pour 2030 et 2050.

l'impossibilité de savoir si les réserves prouvées seront capables de satisfaire ces demandes.

Nous avons tous un ou plusieurs ordinateurs ou tablettes, ainsi qu'un téléphone portable. Ces instruments de notre vie quotidienne comportent une quarantaine de matériaux et de métaux.

Leur taux, compris entre 0,01 et 0,02 %, reste parfois infime par rapport au poids total (**Figure 11**), c'est-à-dire de l'ordre de quelques centaines de milligrammes pour l'or, pour le palladium, etc. Mais multiplié par des milliards d'ordinateurs et de smartphones, on arrive très vite à des centaines de tonnes.

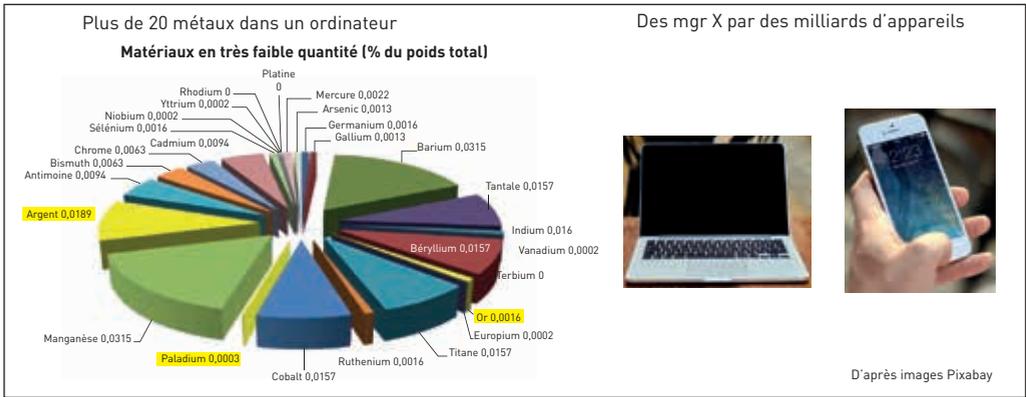


Figure 11

Les métaux de haute technologie pour les TIC.

2 Chimie de la production des métaux

2.1. Chimie de la production de l'aluminium

Abordons maintenant la chimie de la production de quelques métaux et, tout d'abord, la contribution à un métal qui n'est pas très rare, mais qui peut être stratégique et qui

sera demandé de plus en plus pour sa légèreté dans les moyens de communication par exemple. L'aluminium vient de la bauxite qui est un mélange d'alumine et de silicate de fer (**Figure 12**). On traite donc par la soude dans d'énormes réacteurs et on sépare l'hydroxyde d'aluminium de l'hydroxyde ferrique qui va donner les fameuses boues rouges qui ont entraîné

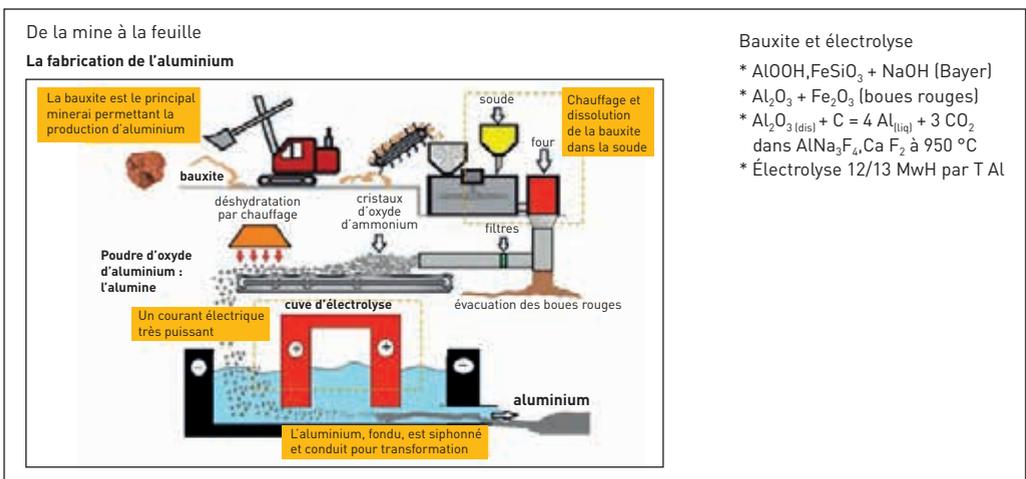


Figure 12

La chimie de la production de l'aluminium.

Source : D'après espace pédagogique académie de Poitiers/ L'aluminium prof : 2.ac-poitiers.fr

quelques polémiques de par le monde. Après séchage, la poudre d'alumine est dissoute à 950 °C dans un mélange de fluorure, de cryolite et de fluorure de calcium. L'électrolyse se fait dans des cuves en carbone avec des électrodes⁵ en graphite et conduit à de l'aluminium fondu et du gaz carbonique (CO₂). Avec un très bon rendement de Faraday⁶, on consomme entre 11 et 12 MW par tonne d'aluminium.

C'est une industrie électro-intensive⁷. C'est pourquoi Péchiney en France était installé près des barrages hydrauliques des Pyrénées et des Alpes. L'aluminium recyclé de seconde fusion (**Figure 13**) utilise quatre fois moins d'énergie, à peu près 3 MW, et il n'y a aucun dégagement de CO₂. En France, à peu près 60 % de l'aluminium est recyclé. Cela n'empêche pas les grands industriels de l'aluminium (Péchiney, Alcoa, Rio Tinto, Alcan) depuis les années 1995 à peu près, à chercher à faire de l'électrolyse sans dégager de gaz carbonique et donc à réduire l'aluminium avec une électrode inerte⁸. On y est arrivé à peu près en 2022, donc pratiquement 30 ans après,

5. Électrode : pièce conductrice destinée à être mise en contact avec un milieu de conductivité différente.

6. Rendement de Faraday : rapport entre le volume de gaz théoriquement produit par une réaction et celui réellement produit lors d'une électrolyse.

7. Électro-intensive : qui consomme beaucoup d'électricité.

8. Électrode inerte : électrode faite à partir d'une substance inerte, c'est-à-dire qui n'intervient pas dans les réactions du milieu.

Aluminium de re-fusion



- Pour refondre l'aluminium il faut 3 MWh/ T soit 4 fois moins d'électricité et aucun dégagement de CO₂
- Plus de 60 % de l'aluminium en France est issu du recyclage

Anodes inertes

- Remplacer les anodes en carbone par des anodes céramiques (FexNiyO₂)
- La réaction : $2 \text{Al}_2\text{O}_3(\text{dis}) = 4 \text{Al}_{(\text{liq})} + 3 \text{O}_2$
- Après 30 ans la recherche Péchiney, Rio Tinto, Alcoa co entreprise ELYSIS

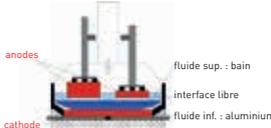


Figure 13

Production de l'aluminium « vert ».

Illustration de gauche : Image Adobe Stock : 580999585

en utilisant des cuves d'électrolyse avec des électrodes inertes qui sont en général des céramiques à base de ferrites, de type ferrites de nickel substituées et on prépare l'aluminium dit « vert ». Plusieurs tonnes d'aluminium au Canada par une société mixte : où ELYSIS, Péchiney (qui ne s'appelle à présent plus Péchiney), Rio Tinto et Alcoa sont en co-entreprise et ont fait des tonnes d'aluminium « vert » avec de l'électricité venant des barrages hydroélectriques du Canada.

2.2. Chimie de la production du nickel

Pour le nickel, grâce aux mines de Nouvelle-Calédonie, la France est dans le top dix des productions industrielles. Les minerais étaient soit sulfurés comme la garniérite, mais maintenant c'est plutôt la latérite qui peut être exploitée si elle contient un peu plus que 1,3 ou 1,5 % de nickel et de cobalt. La chimie extractive du nickel est résumée sur la **Figure 14**. Après broyage et

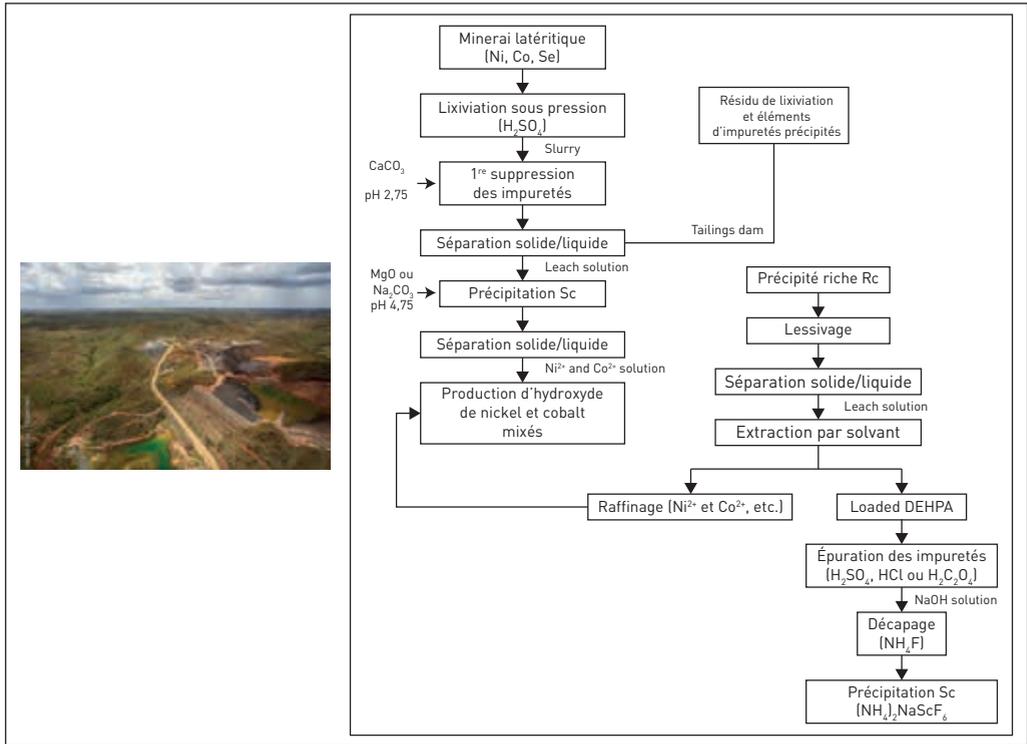


Figure 14

Chimie extractive du nickel.

Illustration de gauche : Image Adobe Stock 302807965

enrichissement par flottation⁹ et hydrométallurgie, on dissout le minerai sous pression par l'acide sulfurique à 250 °C, et ensuite on opère toutes les précipitations : c'est-à-dire on élimine d'abord le calcium, ensuite le magnésium, puis les autres impuretés pour obtenir *in fine* des solutions qui contiennent le nickel et le cobalt. Ces solutions peuvent être affinées par séparation liquide-liquide et par des précipitations spécifiques des hydroxydes de nickel et des hydroxydes de cobalt.

9. Flottation : processus de séparation par différence de densité et d'affinité avec l'eau.

2.3. Chimie extractive du cuivre

Le cuivre est surtout obtenu à partir du minerai sulfuré, la chalcoppyrite, qui est un mélange de sulfure de fer et de sulfure de cuivre (**Figure 15**). Par flottation et par hydrométallurgie, on enrichit le minerai et ensuite on grille les sulfures pour obtenir un mélange d'oxyde et de sulfure que l'on fond à haute température pour obtenir ce qu'on appelle la « matte ». On va progressivement la débarrasser du fer pour obtenir un mélange de cuivre et d'oxyde de cuivre, que l'on appelle « blister », qui va être purifié *in fine* pour

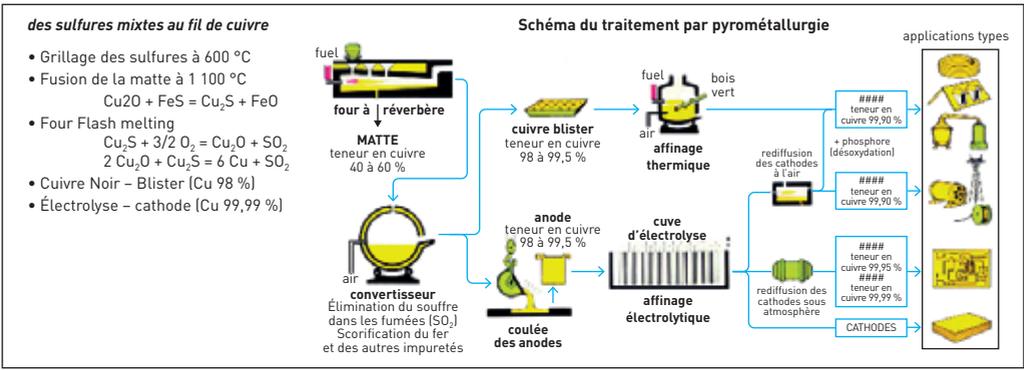


Figure 15

Chimie extractive du cuivre.

Source : La filière du cuivre – open ressources.fr : élaboration et raffinage (source Institut européen du cuivre 2015).

obtenir du cuivre à 99,5 %. Ce cuivre que l'on va raffiner par électrochimie sera mis à l'anode, et à la cathode¹⁰ on va récupérer un cuivre à 99,99 % pour les usages multiples bien connus : les fils conducteurs, les contacts électriques...

10. Anode et cathode : électrodes où ont lieu les réactions d'électrochimie respectivement d'oxydation et de réduction.

La **Figure 16** montre une installation intégrée de chimie extractive du cuivre. Le premier stade se fait par « flash smelting¹¹ », puis à droite, la fusion de la matte et on

11. Flash smelting : fusion éclair, il s'agit d'un procédé permettant d'extraire les métaux non ferreux. Il consiste à oxyder et fondre simultanément les métaux contenus dans un minerai contenant du soufre comme la chalcopryrite.

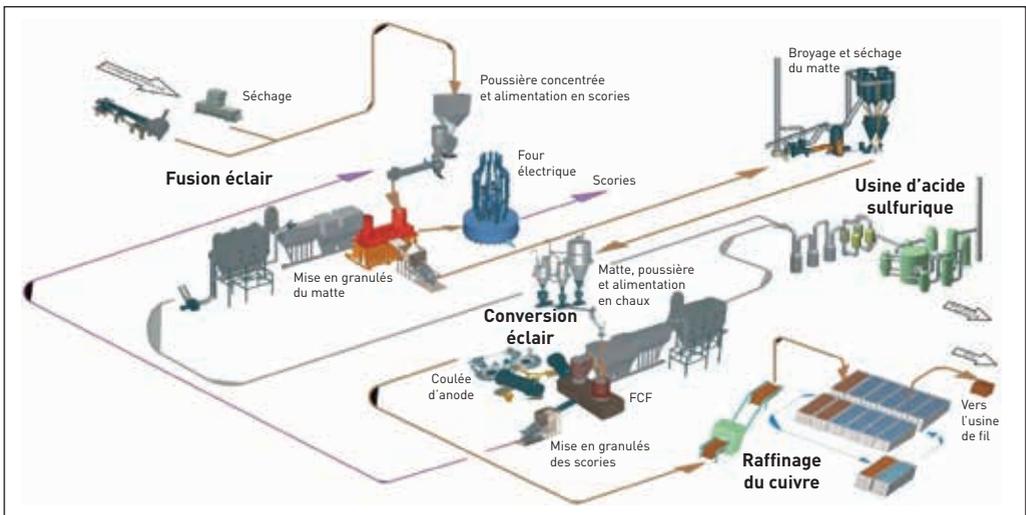


Figure 16

Installation de métallurgie intégrée du cuivre.

recupère les vapeurs d'oxyde de soufre SO_2 pour une installation d'acide sulfurique qui servira ensuite à dissoudre le cuivre pour faire l'affinage électrolytique. Cette figure montre les nécessaires et très lourds investissements qui doivent être faits pour exploiter, traiter, séparer, affiner le métal. Ces investissements sont rentables à partir du moment où le marché est porteur, ce qui est le cas du cuivre pour l'instant.

Une méthode plus douce pour valoriser les minerais de faible teneur (**Figure 17**) a été trouvée grâce des bactéries extrêmophiles car elles vivent dans des milieux acides et parfois jusqu'à 100 °C. Ce sont des bactéries sulfato et oxydo-réductrices. C'est un moyen élégant de valoriser les montagnes de déchets qui résultent de l'enrichissement des minerais, ces déchets étant trop pauvres pour être exploités par voie chimique normale. L'exemple donné ici est issu de la valorisation de déchets de minerais de cuivre qui contiennent à peine 0,4 % de cuivre. On peut obtenir des

quantités appréciables de ce métal. Le BRGM¹² met au point de nouvelles méthodes dites d'hydrobiométaballurgie avec des nouvelles bactéries qui pourraient s'appliquer à d'autres déchets miniers.

2.4. Chimie extractive du lithium

Le lithium est un métal qui avant était utilisé simplement pour les verres et quelques médicaments. Depuis la découverte des batteries au lithium et surtout la commercialisation de ces batteries, son intérêt et sa production ont été multipliés par dix, ainsi d'ailleurs que le prix du carbonate de lithium. Il y a deux sources de lithium, la première est un silicate double : le spodumène ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), exploité notamment en Australie qui en est le premier producteur. Avec des surfactants¹³ adaptés, qui

12. BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

13. Surfactant : ou tensioactif, composé qui modifie la tension superficielle entre deux surfaces.



Figure 17

Valoriser les déchets miniers de faible teneur par biolixiviation.

Illustrations : D'après la revue *Bioscience* n° 26, p. 76. Valoriser les déchets miniers et limiter leur impact sur l'environnement. Anne Gwenaëlle Guezennec et Françoise Bodemnan.

d'ailleurs viennent de chez Arkema, on enrichit le minerai (**Figure 18**) en spodumène, et parfois le spodumène est directement utilisé tel quel en verrerie. Mais pour répondre aux besoins des gigafactories¹⁴, ce minerai doit subir un traitement chimique après décrépitaiton¹⁵, parce que le spodumène a deux formes cristallines dont l'une, quand elle est chauffée, conduit à une forme cristalline de volume nettement différent et donc, par simple chauffage, on peut obtenir une poudre. On attaque cette poudre par

l'acide sulfurique, suivi d'un lavage pour récupérer le sulfate de lithium et enfin d'une précipitation des carbonates par ajout de carbonate de sodium. Tesla au Texas, à côté de sa gigafactory, a installé une usine qui travaille à la purification du spodumène pour obtenir le lithium pour sa gigafactory.

L'autre source de lithium provient des « salars » de la cordillère des Andes, au Chili ou en Bolivie, qui sont d'immenses champs salins (**Figure 19**) qui profitent du soleil, et de l'évaporation des saumures naturelles pour précipiter le sel : d'abord le chlorure de potassium, puis les saumures enrichies en lithium. Les saumures en

14. Gigafactories : « giga usines », usines permettant la production de très grands volumes.

15. Décrépitaiton : fragmentation des roches par la chaleur.

Minerais de spodumène
ou de mica lithié enrichi



Obtention du carbonate de Lithium

- Flottation pour enrichir le minerai jusqu'à 6 % en Li
- Calcination à 1 100 °C pour transformation de phase et décrépitaiton
- Rebroyage fin
- Traitement à SO₃H₂ à 250 °C séparation des métaux
- Lavage pour récupérer Li₂SO₄
- Précipitation du CO₃Li₂

Figure 18

Extraction et chimie du lithium.

Illustration de gauche : Image Adobe Stock 556562236

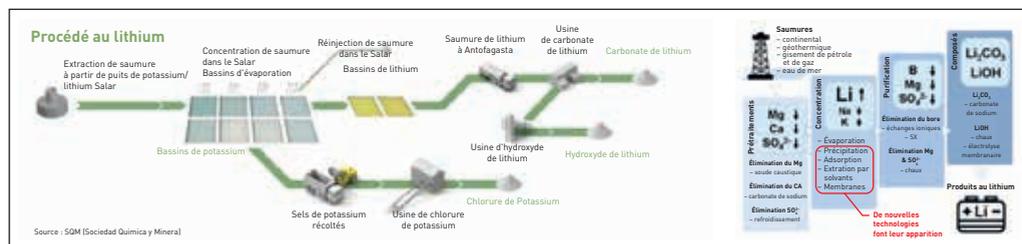


Figure 19

Extraction et chimie du lithium (bis).

lithium sont descendues sur la côte chilienne à Antofagasta où on effectue la précipitation du carbonate ou de l'hydroxyde, qui est ensuite envoyé par bateau vers les fabricants de batteries mais surtout vers les affineurs. La qualité électronique nécessite effectivement plusieurs stades d'affinage puis de purification pour éliminer les traces de calcium et les traces de magnésium, et pour éliminer les restes de sulfates et les borates. Ce raffinage assez coûteux est principalement fait en Chine, en Russie et aux États-Unis.

Cette extraction par les saumures exige beaucoup d'eau et a suscité des plaintes sur les dégâts sur l'environnement des hauts plateaux andins et sur l'épuisement des nappes phréatiques. Cela a conduit les grandes sociétés d'exploitation, ici notamment Eramet, à mettre au point une technique d'échange

cationique sur résine ou alumine (**Figure 20**), pour fixer le lithium. Ensuite on peut réinjecter les saumures débarrassées du lithium dans le sous-sol et rétablir l'équilibre hydrique. Cette solution, obtenue par élution des résines, est ensuite concentrée, et, par purification, donne un hydroxyde ou un carbonate de bonne pureté. Ce procédé peut être exploité en Europe, et particulièrement dans le fossé rhénan, dans le Bade-Wurtemberg et en Alsace, en couplant une station géothermique profonde avec ce procédé de récupération du lithium sur résine ou sur alumine avec des concentrations inférieures à 0,5 %, même parfois inférieures à 0,1 %. Plusieurs exploitations et un pilote laissent à penser que près des 10 % des besoins lithium en France et en Allemagne pourraient être obtenus de cette façon.

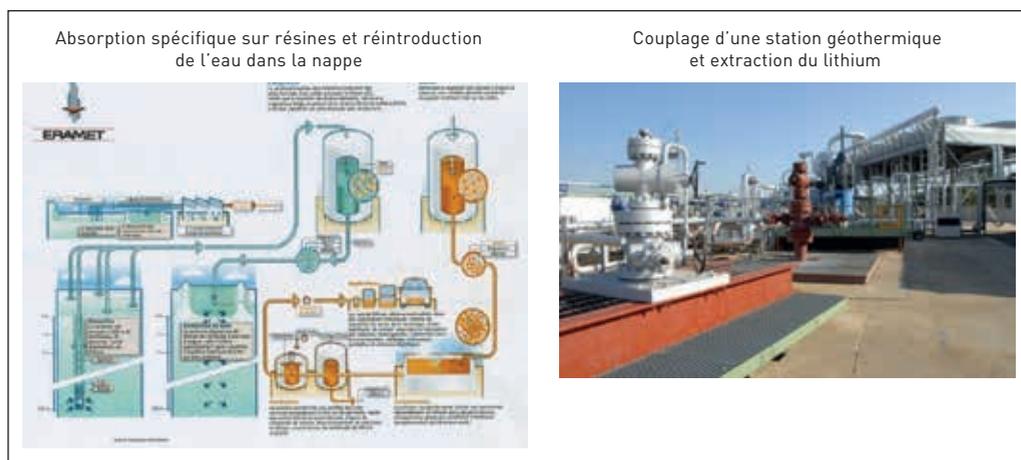


Figure 20

Procédé de récupération du lithium sur résine.

Source : D'après <https://www.lalsace.fr/encadres/2020/11/17/une-rentabilite-liee-au-tarif-de-rachat-du-kwh-par-l-etat> - Ph.R. avec G.J. - 17 nov. 2020.

3 Les terres rares

3.1. Présentation et usage des terres rares

Les terres rares sont des matériaux spécialement précieux pour la haute technologie. Ces éléments ne sont pas tellement rares, mais ils sont souvent obtenus en faibles quantités à partir de l'exploitation d'un autre majeur, d'un autre métal majoritaire, et ils sont donc difficilement extraits et surtout difficilement purifiés à cause de leurs propriétés extrêmement voisines (**Figure 21**).

Le problème pour les terres rares, c'est qu'elles sont malheureusement mal réparties sur la planète. La Chine et la Russie en capitalisent à peu près les deux tiers, et la Chine plutôt que d'exporter les oxydes, a trouvé plus intelligent et plus intéressant d'exporter des produits à plus fortes valeurs ajoutées comme les aimants

ou les photophores qu'on utilise dans les lampes LED et les alliages. De telle sorte que la Chine monopolise près de 80 % de la production actuellement (**Figure 22**), mettant notamment le secteur automobile dans une dépendance dangereuse tel que visible sur la figure de droite qui montre que l'on utilise les terres rares pour beaucoup de choses : les pots catalytiques, les additifs au carburant, les écrans, et surtout pour les véhicules électriques comme on l'a déjà vu, pour les moteurs à base d'aimants néodyme-fer-bore.

3.2. Procédés d'exploitation des terres rares

Le schéma de la **Figure 23** présente le principe de la séparation des terres rares. C'est un schéma qui est directement inspiré du procédé mis au point par Rhône-Poulenc (devenu maintenant Solvay), qui, dans les années soixante-dix, a été

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	Lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra	Actinides	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Uus	Uuo
Lanthanides :			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Actinides :			89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

14 éléments du Lanthane au Lutécium dont les propriétés chimiques sont très proches. Souvent présents en faible pourcentage dans des minerais d'autres métaux : Al, Fe, Cu, Ni ...
Exigent une extraction et séparation souvent complexes

Figure 21

Les lanthanides précieuses pour le High-Tech.

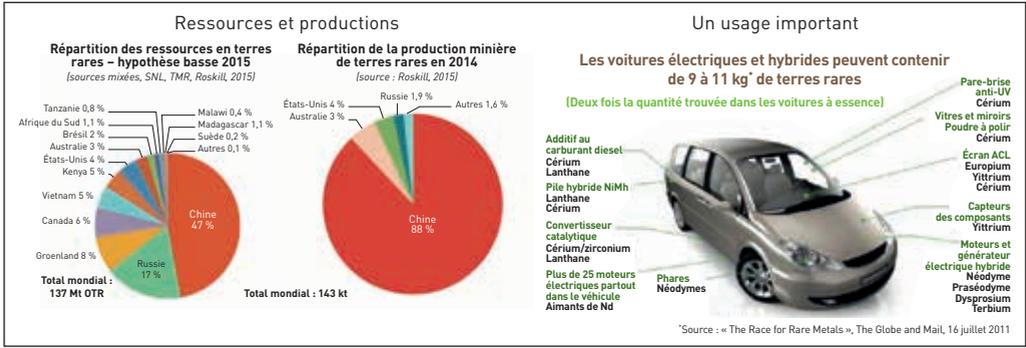


Figure 22

Les terres rares, ressources et usages.

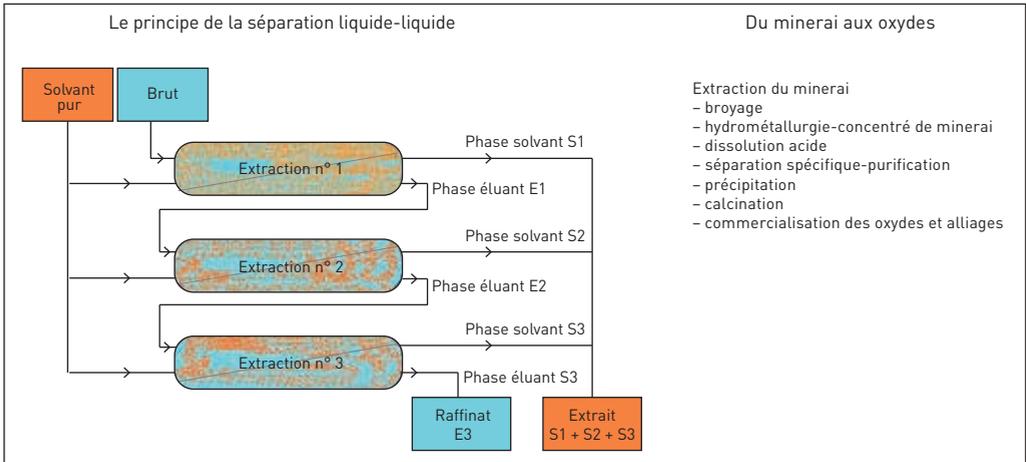


Figure 23

Les étapes du traitement des terres rares.

le champion mondial de la séparation et de la production des terres rares. Les différentes étapes du traitement sont : extraction des minerais, broyage, enrichissement, hydrométallurgie, dissolution acide, séparation spécifique, purification et séparation liquide-liquide et calcination.

La **Figure 24** résume la chimie du traitement des terres rares : suspension, attaque, séparation des terres rares par extraction liquide-liquide, ensuite filtration et calcination. Telle est la batterie des séparateurs à La Rochelle.

4 Enjeux de la production des métaux

4.1. Énergie mise en jeu

L'industrie minière, la métallurgie, la chimie de la production sont des industries capitalistiques exigeant de gros investissements et électro ou gazo-intensives, c'est-à-dire consommatrices de beaucoup d'énergie. Sur la **Figure 25** sont donnés plusieurs exemples. À gauche, pour obtenir 1 kg de cuivre à partir d'un minerai à 0,5 % de

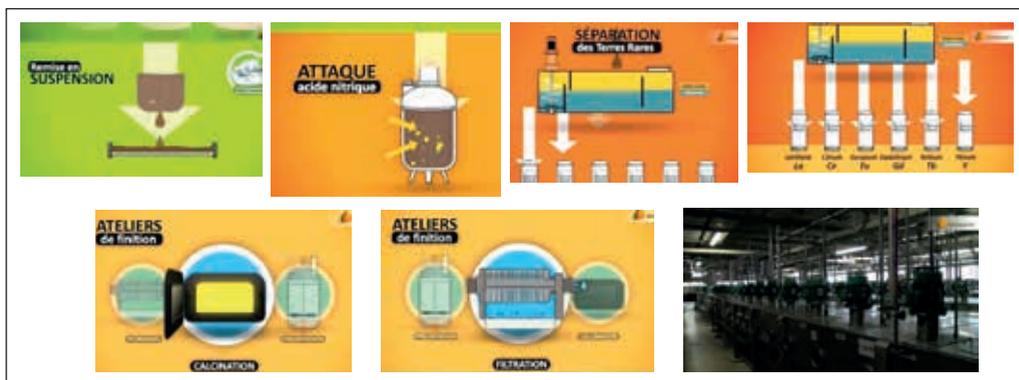


Figure 24

Chimie du traitement des terres rares.

Source : D'après captures d'écrans - reportage terres rares You tube - Usine de La Rochelle - Solvay 2013.

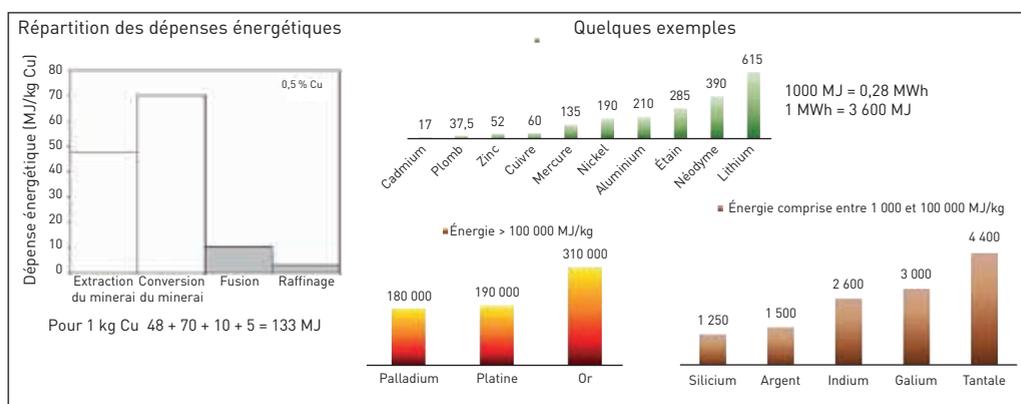


Figure 25

Énergie nécessaire pour obtenir les métaux.

cuivre, il faut dépenser dans les mines 48 MJ pour le traitement des minerais, 70 MJ pour le traitement et 10 et 5 MJ pour la purification chimique, ce qui fait de l'ordre de 133 kWh/kg. À droite, quelques exemples de l'énergie exigée en moyenne par kilo, de 1 000 à 100 000 MJ, du lithium, à l'or ou au tantale.

4.2. Recyclage des métaux et terres rares

Devant cette débauche d'énergie nécessaire pour la production, doit se poser la question

du recyclage et d'une économie circulaire. Car contrairement au gaz et au pétrole, un métal ne disparaît pas après son utilisation. Après usages, on peut théoriquement l'utiliser et le recycler à l'infini. En fait c'est un peu plus compliqué. Sur le tableau périodique à gauche de la **Figure 26**, les cases en bleu sont celles des éléments pour lesquels le recyclage est appréciable et de l'ordre de 40 à 50 %. À droite, les économies d'énergie que l'on peut faire en recyclant ces métaux : près de 92 % de

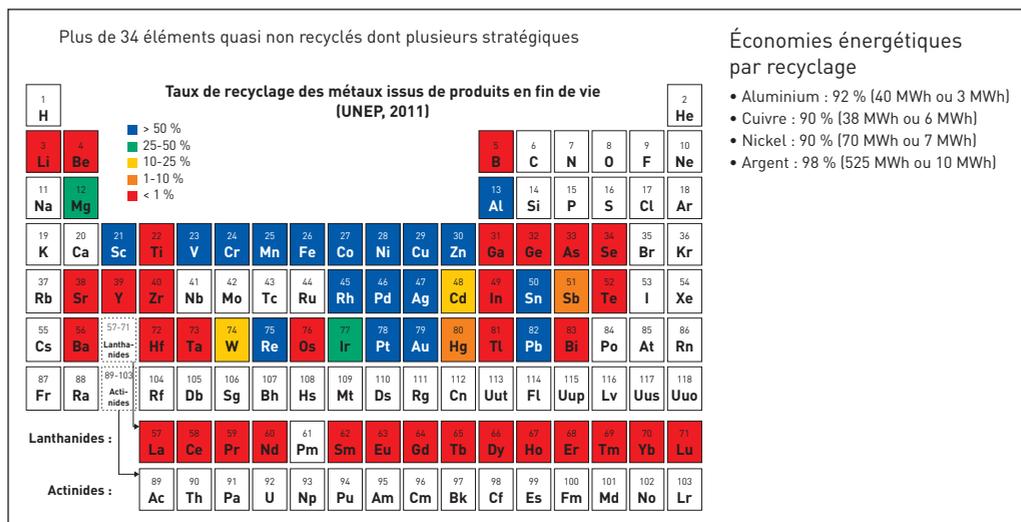


Figure 26

Le recyclage des métaux.

l'énergie pour l'aluminium, 90 % pour le cuivre, 90 % pour le nickel, 98 % pour l'argent puisque là on n'a dépensé que de l'énergie pour le collecter et le fondre. Mais on peut voir à gauche beaucoup de cases rouges et marron, pour lesquelles le recyclage de ces métaux est quasi inférieur à 1 %, alors que beaucoup d'entre eux sont nécessaires à nos usages high-techs.

Nous avons dans nos placards des tonnes de déchets de télécommunication et de télévision : nos déchets TIC¹⁶. Dans cette mine à ciel ouvert, un certain nombre de métaux sont récupérés : le cuivre, l'argent, l'or des contacts électriques entre autres, en revanche les autres peu ou pas (Figure 27). Toute une série de métaux et de composés est recyclée à moins

de 1 %. Les raisons en sont diverses : une concentration faible et assez dispersée, le coût du recyclage, la pureté non électronique obtenue sur les métaux recyclés.

Toutes ces bonnes raisons devraient inciter des programmes de recherches importants, intelligents, pour trouver des procédés efficaces et surtout rentables économiquement, à moins que n'intervienne une injonction européenne imposant comme pour les plastiques un pourcentage de matières recyclées dans les instruments. Dans le cas des batteries au lithium, l'Europe veut imposer 45 % de recyclées en 2025, et quasi les deux tiers en 2030. C'est pourquoi plusieurs grands groupes spécialistes des déchets et de la chimie se mettent en route en France et en Europe. Le challenge n'est pas facile.

16. TIC : Technologies de l'Information et de la Communication.

Il y a des tonnes de cartes électroniques disponibles (dans vos placards ?)



Une partie est recyclée

- Al, Ag, Cu, Sn, Au, Pt, Pd, Pb entre 25 et 50 %
- Be, In, Ga, Ge, Li, Si, Ta, TR à moins de 1 %
- **Pb** : cours des métaux, taux de collecte, faibles quantités dispersées, coûts du recyclage, niveau de pureté

Figure 27

Recyclage des déchets TIC.

Illustration de gauche : © BRGM.

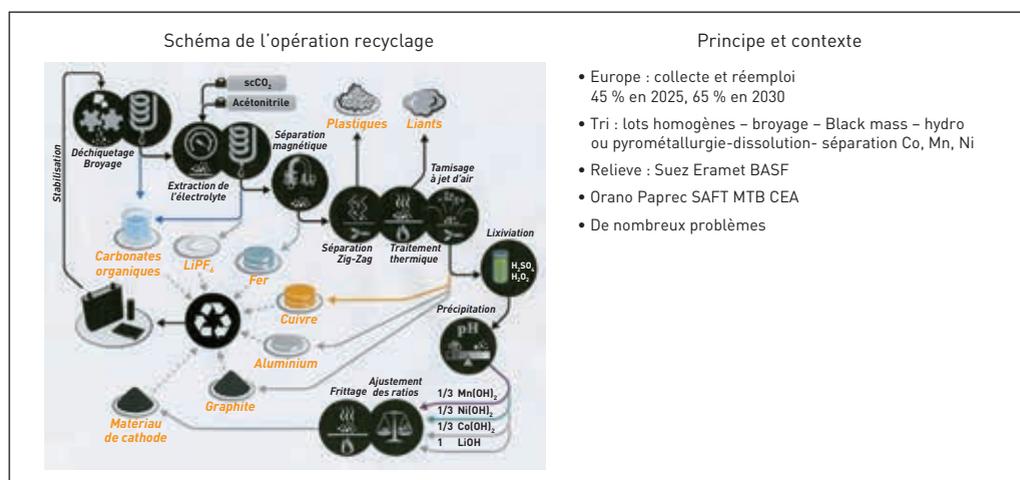


Figure 28

Recyclage des batteries Ion-Li.

Source : CultureScience Chimie - mars 2021 [schéma adapté de Chemsuschem 9- 2016 -3473].

La partie gauche de la **Figure 28** résume les opérations de recyclage des batteries Ion-Li : après collecte, il faut décharger la batterie sous peine d'incendie, ensuite, trier pour avoir des lots homogènes, puis séparer les lithiums-cobalts des cobalts-nickels-manganèses-lithiums, des phosphates de fer-lithiums, etc. Les lots homogènes obtenus sont broyés sous gaz neutre,

on brûle les polymères ou on les récupère, on les dissout sous gaz carbonique critique, puis on sépare les électrolytes et les métaux libres par séparation magnétique. On récupère à ce moment-là ce qu'on appelle la « *black mass*¹⁷ », cette *black mass* est traitée par l'acide sulfurique, pour obtenir une solution de sulfates

17. *Black mass* : masse noire.

métalliques qu'on va séparer par précipitation sélective à pH variable des hydroxydes. Plusieurs sociétés en France se sont alliées pour réaliser ces opérations, en particulier Suez, Eramet et BASF, Orano Paprec SAFT MTB et le CEA. Évidemment les problèmes d'ingénierie sont nombreux, mais certaines usines pilotes démarrent ; pour l'instant les procédés les plus rentables sont ceux qui récupèrent le cobalt et le graphite. Mais on espère que cela va se développer, le tout est d'avoir suffisamment de batteries au lithium qui ont une durée de vie de l'ordre d'une dizaine d'années.

La **Figure 29** montre la récupération des terres rares par traitement des luminophores des milliards de lampes LED que l'on va récupérer et traiter. Ceci avait été fait à La Rochelle en 2016 pour les luminophores. Malheureusement, à ce moment-là, la Chine a fait du dumping¹⁸ sur le coût des terres rares et l'opération

18. Dumping : économie ; pratique qui consiste à vendre un produit moins cher à l'international que sur le territoire national.

momentanément arrêtée a redémarré en 2022 sur les luminophores et également sur les aimants terres rares et les terres rares qui sont sur les écrans électroniques.

4.3. L'Europe et la France dans la chaîne d'exploitation

La **Figure 30** montre la fragilité de l'Europe dans la chaîne de valeurs de production des métaux rares. Nous sommes très peu présents dans la partie rouge du tableau qui regroupe les ressources géologiques, l'exploration, le développement, l'extraction minière et la minéralurgie. Dans la partie jaune, pour la purification et le raffinage par métallurgie, nous sommes un peu présents, et enfin, dans la partie bleu clair pour l'usinage, la production de composants et les produits finaux, là nous savons faire en Europe et nous sommes présents.

L'Europe minière existe un peu (**Figure 31**) mais le pourcentage de producteurs européens est faible comme montré sur la carte à gauche et la majorité des tonnages est inférieure au 1 % mondial. À droite,



Figure 29

Chimie et recyclage industriel des terres rares.

Source : Solvay La Rochelle.

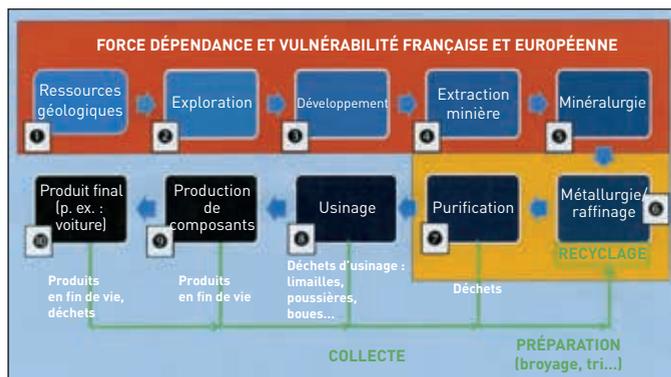


Figure 30

Fragilité de l'Europe dans la chaîne de valeurs.

Source : Responsabilité & Environnement n° 99 - Juillet 2020 - Matières premières et nouvelles dépendances (annales.org)

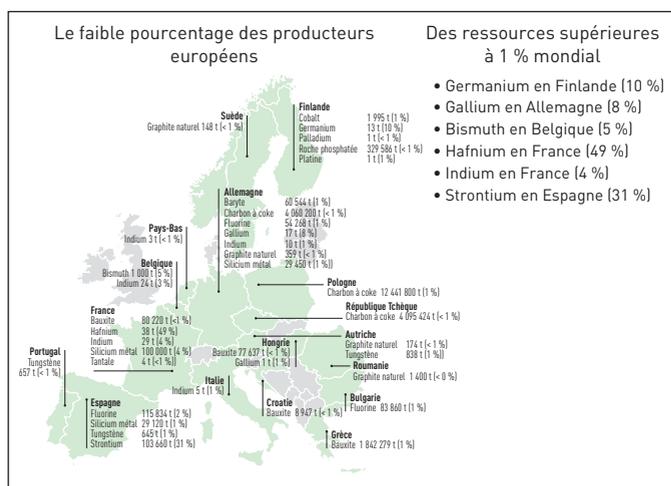


Figure 31

L'Europe minière.

Source : BRGM - Geoscience - D'après revue du BRGM n° 26 juin 2022 : Métaux critiques, concilier Éthique et souveraineté - dépendance de l'UE à l'égard des métaux stratégiques par Milan Grohol, p. 22.

figurent quelques métaux pour lesquels la production n'est pas ridicule : le germanium en Finlande, le gallium en Allemagne, le bismuth en Belgique, le hafnium et l'indium en France et le strontium

en Espagne. En dehors de ces exemples, la plupart des mines produisent de l'ordre du pourcentage mondial.

Même en France il y a eu des activités minières (Figure 32) : nous étions le premier

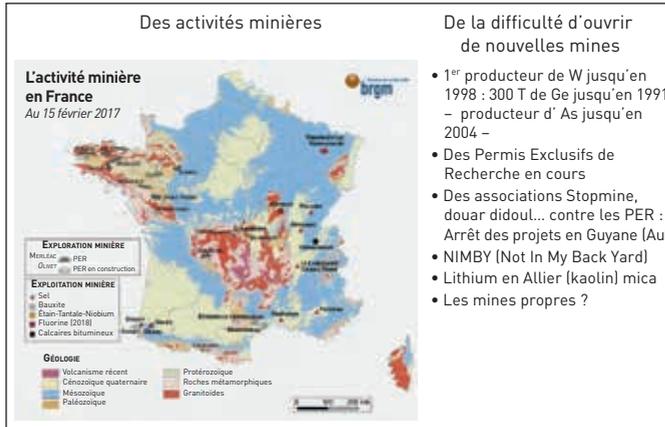


Figure 32

Possibilités en France ?

Source : D'après le BRGM.

producteur de tungstène jusqu'en 1998, de germanium jusqu'en 1991, et nous produisons aussi de l'arsenic jusqu'en 2004. Des permis exclusifs de recherches ont été délivrés par l'État et sont en cours, mais il y a évidemment beaucoup d'associations écologiques qui ont fait des recours administratifs contre ces permis d'exploitation. Nous avons également un projet de lithium dans l'Allier, où nous avons actuellement une mine de kaolin, et il y a du mica lithié en profondeur qui pourrait être exploité d'ici 2026-2027.

Conclusion

Quelles solutions proposer en conclusion (**Figure 33**) ? Je pense qu'il faut essayer de s'affranchir des dépendances géopolitiques, en prenant des participations dans des sociétés et des industries minières dans les compagnies en Australie, en Afrique, en Amérique, relocaliser en France des industries de traitement et de raffinage, développer des procédés de recyclage rentables économiquement, et enfin se lancer sur la recherche de moyens de remplacement. On peut citer par exemple les moteurs électriques des voitures Renault, où le rotor en aimant néodyme-fer-bore est remplacé par un rotor bobiné en cuivre. C'est un moyen de s'émanciper des aimants.

- Nous devons nous affranchir de dépendances géopolitiques
- Développer une nouvelle industrie minière ou prendre des participations dans les compagnies en Afrique, Australie, Amérique
- Relocaliser les usines de traitement et d'affinages métallurgiques
- Développer des chaînes de recyclage rentables
- Rechercher des solutions alternatives de remplacement

Figure 33

Conclusions.

Les céramiques et les réfractaires indispensables à l'industrie primaire

Jacques POIRIER est professeur émérite du laboratoire Conditions extrêmes et matériaux : haute température et irradiation, UPR CNRS 30 79 à l'Université d'Orléans, fellow de l'European Ceramic Society et président du Groupe français de la céramique (GFC).

Ce thème va nous conduire dans le monde des très hautes températures (**Figure 1**).

1 L'histoire des réfractaires

L'histoire des réfractaires s'enracine dans la nuit des temps. À l'origine, il y a eu la glaise calcinée par le feu du foyer. Les réfractaires sont liés à la conquête des hautes températures depuis que l'Homme a acquis la maîtrise du feu. La découverte du feu date d'il y a 790 000 ans (**Figure 2**). L'argile, trouvée en abondance (c'est l'un des premiers matériaux les plus

importants sur notre croûte terrestre), mélangée tout simplement avec de l'eau, puis cuite, va donner naissance au premier réfractaire, et à partir de là, à l'émergence d'une industrie clé.

Les performances de ces réfractaires doivent beaucoup aux savoir-faire du passé : d'abord aux métiers des arts céramiques, en particulier la faïence et la porcelaine, puis à l'industrie du bâtiment : briques de construction, terre cuite (**Figure 3**).

Mais c'est avec la sidérurgie qu'on pousse les limites d'usage des réfractaires au-delà des températures



Figure 1

Les très hautes températures.

Les réfractaires sont intimement liés à la conquête des hautes températures depuis que l'homme a acquis la maîtrise du feu

Argile trouvée en abondance
mélangée avec de l'eau puis cuite

Naissance du 1^{er} réfractaire
Émergence d'une industrie-clé



Bol néolithique

Creuset en Plumbago

Figure 2

Les premiers réfractaires.

Les performances des céramiques réfractaires doivent beaucoup au savoir-faire du passé

D'abord aux métiers des arts céramiques, en particulier la faïence et la porcelaine



et aux industries du bâtiment (briques de construction, terre cuite, ...)

Figure 3

Application quotidienne des céramiques réfractaires.

de 1 500 °C. La **Figure 4**, à gauche, présente une magnifique gravure extraite de *De Re Metallica* (1556), qui est un très bel ouvrage du maître de la métallurgie, Agricola. On y voit aussi (au centre) un four du XX^e siècle. Sachez qu'en 1897, le four à arc a atteint la température de 2 000 °C.

Les performances des céramiques réfractaires doivent aussi beaucoup à la science : au XXI^e siècle, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) mettra en œuvre des matériaux réfractaires pour porter le plasma à 150 millions de degrés dans le cœur de la machine (**Figure 5**).



Figure 4

Évolution de la sidérurgie avec le temps.

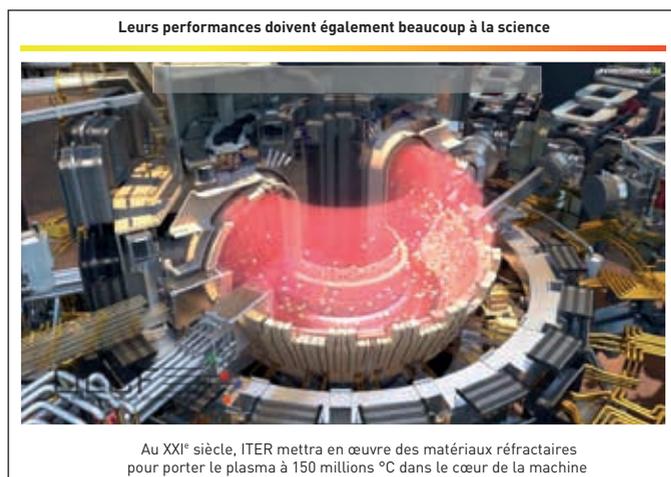


Figure 5

Image d'un tokamak.

2 La demande de matériaux réfractaires dans les secteurs économiques clés

Les matériaux réfractaires répondent à une réelle demande de nombreux secteurs économiques clés (*Figure 6*).



Figure 6

Les secteurs économiques clés des réfractaires.

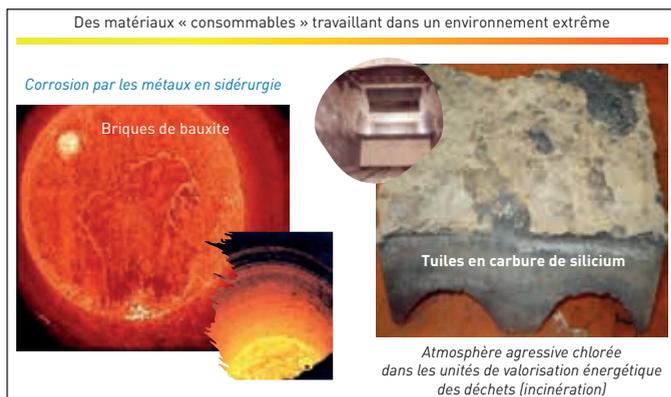


Figure 7

Conditions extrêmes de travail des matériaux réfractaires.

Ces matériaux sont des matériaux dits de grande diffusion, consommables, travaillant dans un environnement extrême. La *Figure 7* montre à gauche la corrosion de briques de bauxite par les métaux en sidérurgie et, à droite, la corrosion des tuiles de carbure de silicium ainsi que le dépôt que l'on peut observer à leur surface dans des unités d'incinération de déchets où règne une atmosphère agressive chlorée.

La production mondiale des réfractaires est de 42 millions de tonnes par an pour un chiffre d'affaires d'environ 25 milliards de dollars. La sidérurgie, à elle seule, concentre 70 % de la production mondiale des réfractaires, dont 55 % en Europe. Ce sont des procédés fonctionnant à des niveaux de température qui peuvent atteindre 1 700 °C. Les matériaux réfractaires sont donc des matériaux essentiels pour notre monde moderne. Pour produire une tonne de béton, il faut 1 kg de réfractaire ; pour une tonne de cuivre, il en faudra 3 kg ; pour une tonne d'acier, c'est 10 à 15 kg (c'est énorme), le verre en nécessite 4 kg et l'aluminium 6 kg (*Figure 8*).

Les matériaux réfractaires ont donc un impact stratégique considérable : sans réfractaires, pas d'acier, pas de verre, pas de ciment, pas d'aluminium, bien sûr, pas de matériaux de construction, pas de voiture, pas d'avion, pas d'énergie... et notre vie serait sans doute triste ou du moins tout à fait différente de celle que nous avons actuellement (*Figure 9*).

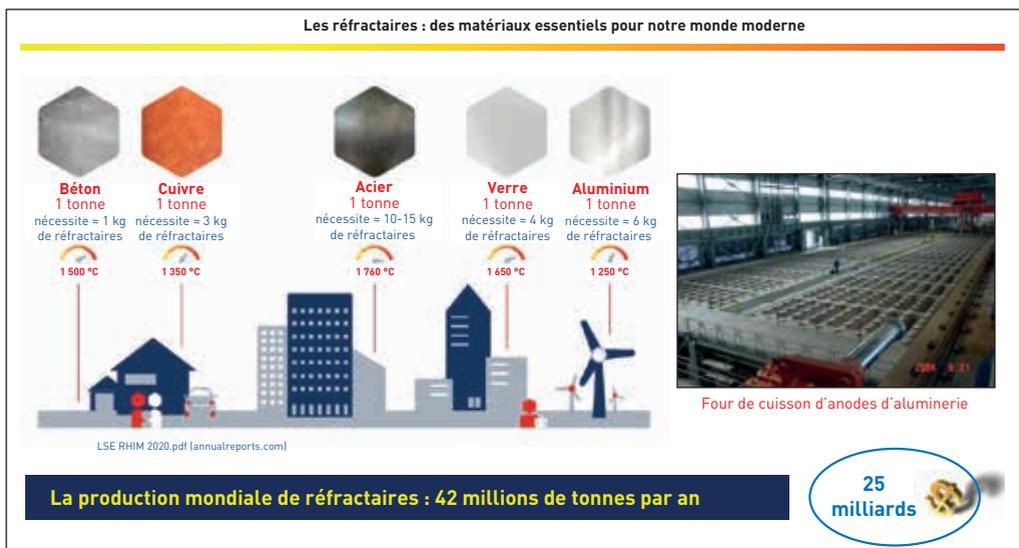


Figure 8

Emploi des réfractaires dans la sidérurgie.



Figure 9

Un impact stratégique considérable.

3 La conception des réfractaires : des matières premières aux microstructures

Le mot réfractaire a été recensé par Robert Estienne en 1539, il vient du latin d'église « *Refractarius* » qui veut dire

résister, refuser de se soumettre. Dans le cas d'une céramique, c'est une céramique qui résiste aux hautes températures, qui peut se présenter sous forme de briques ou de matériaux non façonnés, comme on peut le voir sur les deux exemples de la **Figure 10**

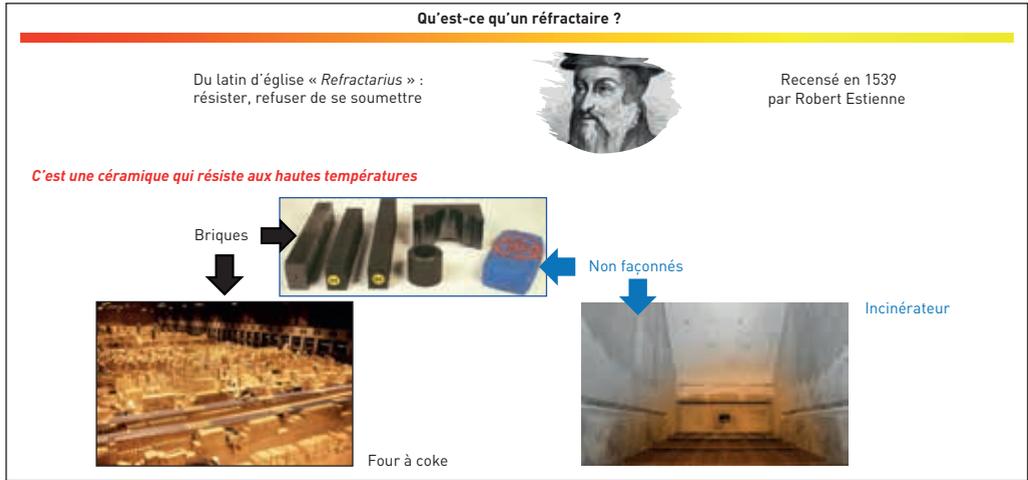


Figure 10

Exemples de réfractaires.

où l'on observe un four à coke qui est une véritable cathédrale de briques de silice, et un incinérateur construit à partir de bétons réfractaires.

Ces matériaux ont plusieurs fonctions :

- La première est de confiner la matière chaude et l'énergie.
- La deuxième est de protéger les installations industrielles et les hommes.
- La troisième est l'isolation thermique.

Les constituants des réfractaires sont issus de nombreuses matières premières minérales : bauxite, périclase (magnésite), kaolinite, graphite, silice, corindon, andalousite, chromite, carbure de silicium (**Figure 11**). Parmi ces matières premières, certaines sont relativement critiques telles que la magnésite, la bauxite ou le graphite. Ces matières premières minérales donnent naissance à six oxydes stables : l'alumine, la silice, la magnésite, la chaux,

le zircon et dans une moindre mesure l'oxyde de chrome (de moins en moins pour des raisons environnementales et de santé), plus du carbone, qui peuvent s'associer les uns aux autres pour former des oxydes mixtes, des composés définis, voire des carbures.

La **Figure 12** présente les nombreuses phases minérales pouvant être obtenues à partir de ces oxydes. Prenons le cas du sable, c'est-à-dire de la silice, plus exactement la cristobalite, qui fond à 1 723 °C, et du corindon (l'alumine), qui fond à 2 020 °C. Avec le mélange des deux, on peut obtenir un composé défini qui s'appelle la mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) dont la température de fusion est de 1 850 °C.

De même, entre l'alumine, la magnésite ou l'oxyde de chrome, on peut définir toute une famille de spinelles (le groupe du spinelle rassemble des minéraux de formule $ROR'2O_4$) ou de solutions solides.



Figure 11

Les constituants des réfractaires.

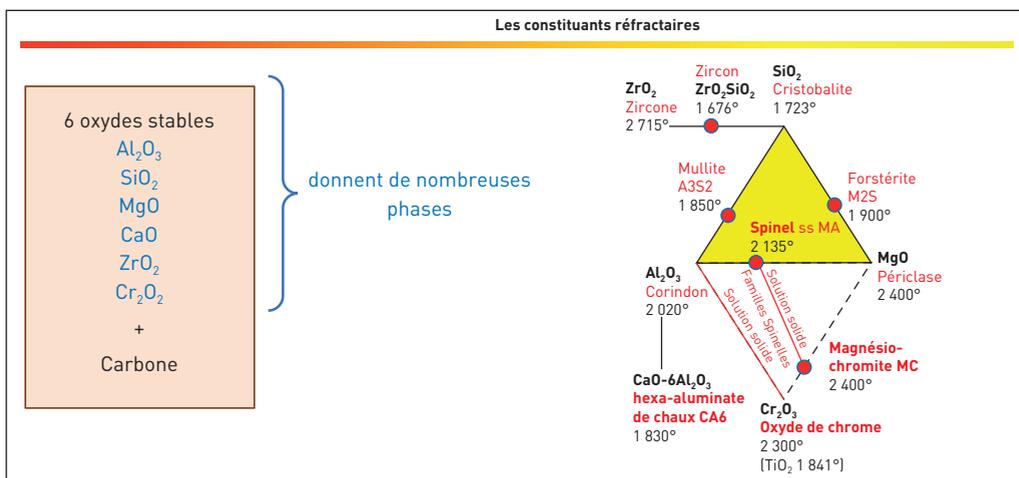


Figure 12

Différentes phases constituant les réfractaires.

En termes de microstructure, ces matériaux sont constitués d'agrégats et d'additifs formant un squelette de particules grossières liées par une matrice de granulométrie fine. Ce sont des matériaux hétérogènes, souvent polycristallins et polyphasés.

Les agrégats constituent les deux tiers du matériau avec

une granulométrie grossière. Ils vont induire les caractéristiques principales. La matrice de granulométrie fine est constituée d'additifs (ces poudres fines et ultrafines renforcent les caractéristiques particulières du réfractaire), d'une liaison qui assure la cohésion de l'ensemble et d'une porosité ouverte autour de 10 à 25 % (**Figure 13**).

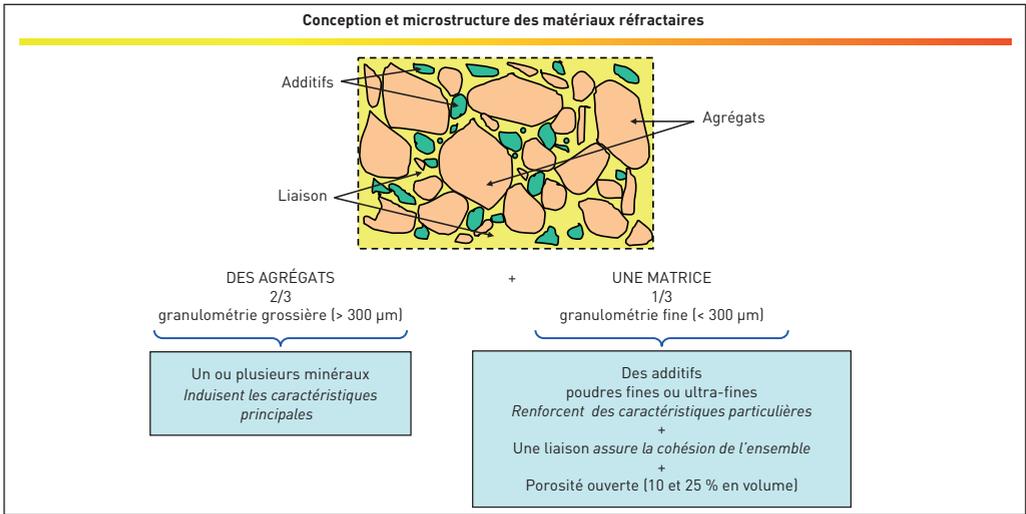
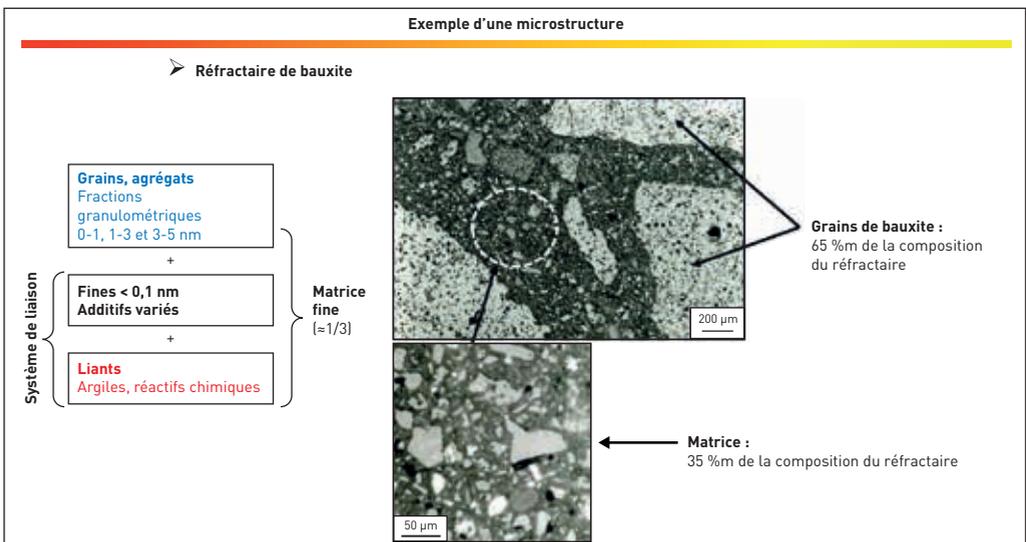


Figure 13

Organisation de la microstructure des réfractaires.

La **Figure 14** est un exemple de réfractaire de bauxite : on y observe les grains de bauxite (65 % de la composition du matériau), et la matrice qui est constituée de particules fines, d'additifs et de liant. Dans cet exemple, le liant est constitué d'argiles et de réactifs chimiques.

Quand on examine de plus près la matrice (**Figure 15**), elle apparaît constituée d'un liant phosphatique associé à 15 % de particules relativement fines d'argile, 5 % de bauxite de Guyane et 15 % d'alumine ultra fine, le tout donnant naissance à une porosité ouverte de 14 %. On notera également



Matrice : 35 %m de la composition du réfractaire

Figure 14

Microstructure d'un réfractaire de bauxite.

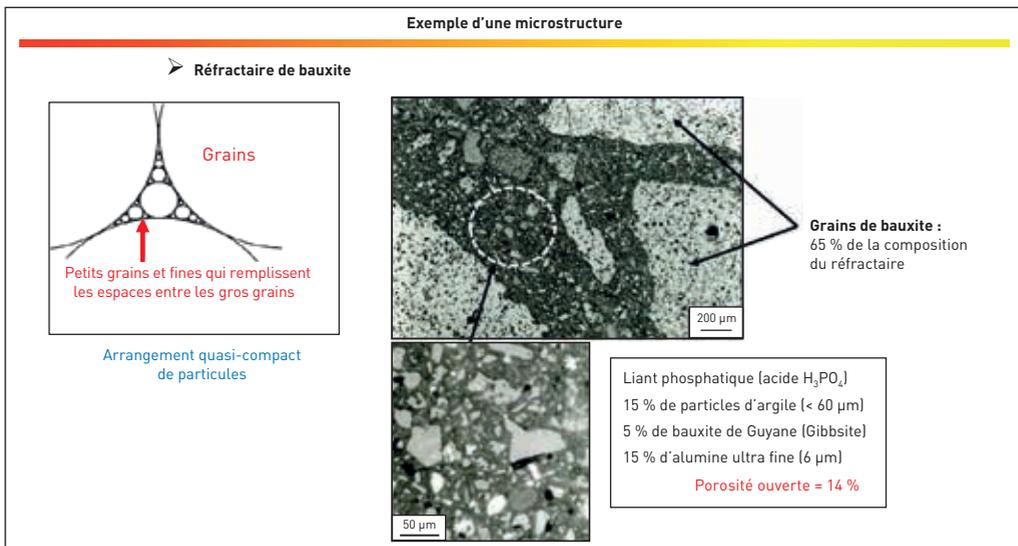


Figure 15

Zoom sur la microstructure d'un réfractaire de bauxite.

l'arrangement quasi compact de gros grains de bauxite entre lesquels on remplit les espaces par des moyens grains et, entre ces espaces, on mettra des particules fines et ultra-fines.

La matrice est le maillon le plus faible du réfractaire. À cause de sa réactivité, de sa porosité et de sa grande surface spécifique, sa résistance, notamment à la corrosion, sera souvent plus faible que celle des agrégats, malgré

l'utilisation de matières premières plus nobles (Figure 16). Il y a trois grandes familles de réfractaires : les réfractaires qualifiés d'acides (c'est un terme qui peut paraître un peu impropre, mais en réalité ce n'est pas tout à fait le cas) du système silice-alumine, les réfractaires basiques à base de magnésie, de dolomie et de chromite, et les réfractaires spéciaux (carbone, spinelles, zircones...). La Figure 17 montre la très

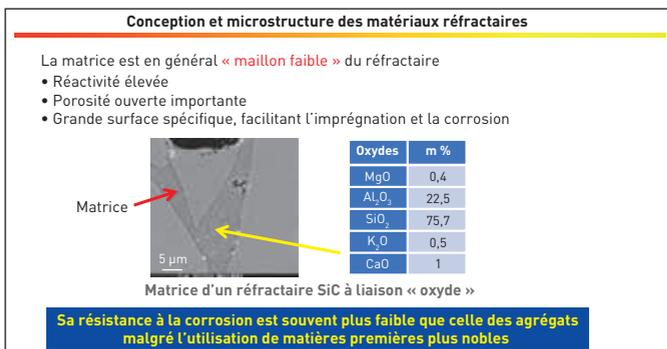


Figure 16

La matrice est le maillon faible du réfractaire.

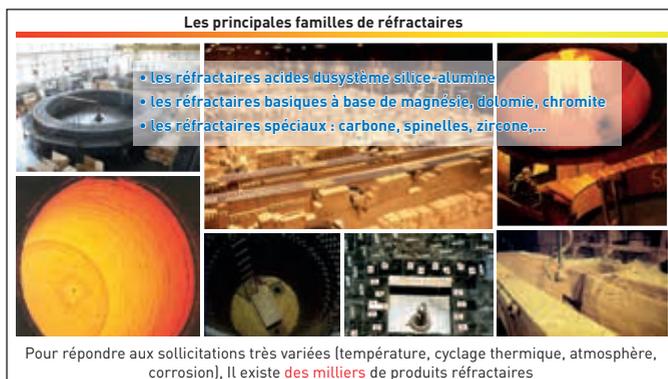


Figure 17

Les principales familles de réfractaires.

grande variété des applications de ces réfractaires, qui vont du creuset de hauts fourneaux à la poche à acier. Cela va nécessiter de concevoir des produits réfractaires extrêmement différents pour répondre à des sollicitations très variées (températures, cyclage thermique, atmosphère, tenue à la corrosion). En pratique, on dénombre des milliers de produits réfractaires différents.

4 Quelques exemples de céramiques réfractaires aux propriétés exceptionnelles

Avant d'évoquer les défis futurs auxquels seront confrontés les réfractaires, examinons les propriétés exceptionnelles de ces céramiques à travers quelques exemples.

Sur la droite en bas de la **Figure 18**, on peut voir des plis qui sont en réalité des feuillettes de graphite qui ont subi des sollicitations thermomécaniques et qui ont su s'adapter aux contraintes qui leur ont été imposées.

Ces matériaux réfractaires doivent supporter, sans se fissurer, des chocs thermiques extrêmes. C'est le cas pour l'exemple de la **Figure 19** qui montre une coulée continue d'acier juste avant la solidification totale de l'acier. Les matériaux utilisés subissent un choc thermique extrême, de la température ambiante à 1 600 °C sans dégradation, car ils sont spécialement conçus pour y résister. Pour cela, ils ont des faibles coefficients de dilatation, des conductivités thermiques élevées, des bas modules d'élasticité. L'exemple présenté est un mélange d'alumine et de graphite dont la structure est très hétérogène (**Figure 19**). Ce sont des matériaux présentant volontairement de nombreux « défauts », tels que des microfissurations, de nombreuses interfaces entre les agrégats et les additifs, pour permettre une bonne tenue aux chocs thermiques.

Ces matériaux doivent supporter la corrosion due en partie aux oxydes liquides qu'on appelle les laitiers.

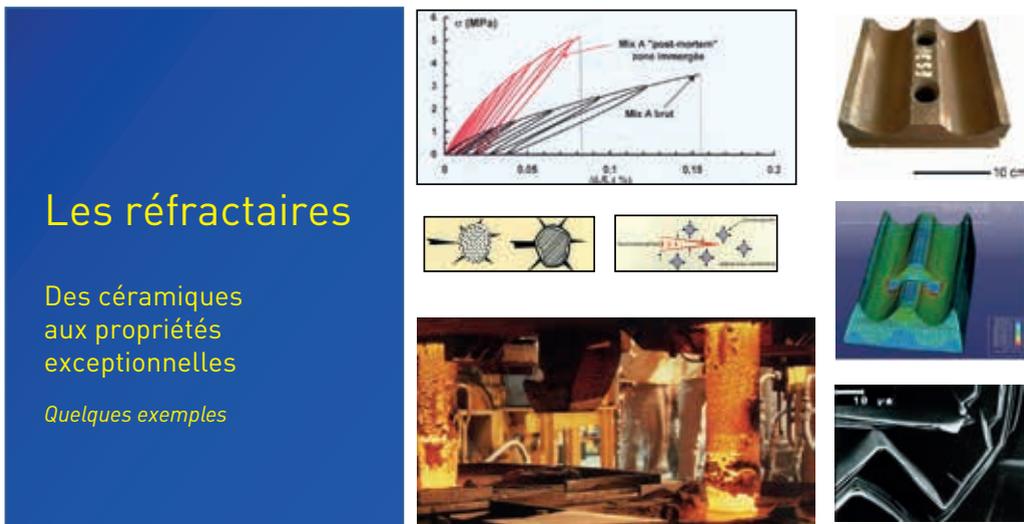


Figure 18
Exemples de céramiques aux propriétés exceptionnelles.

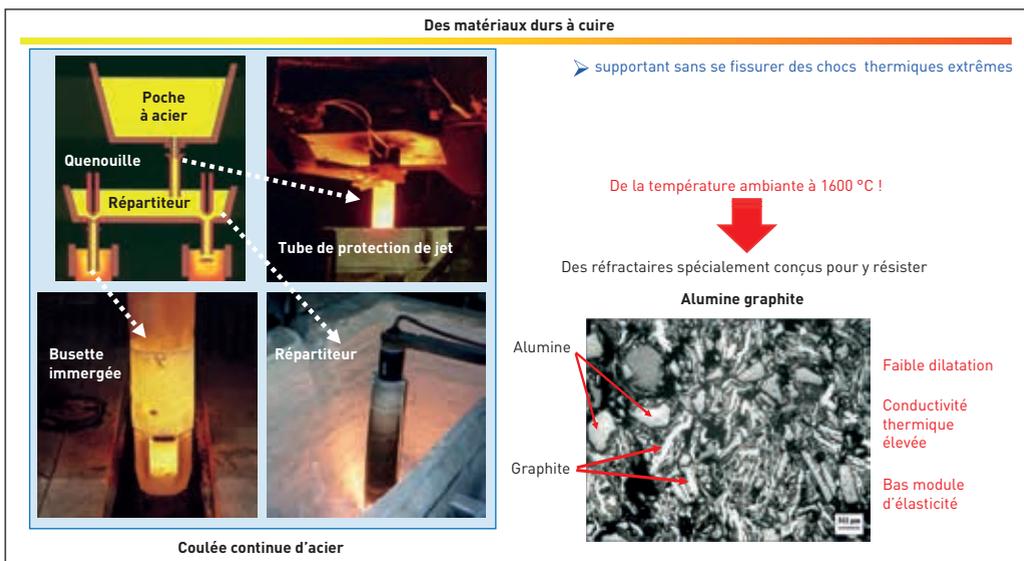


Figure 19
Exemple de réfractaire résistant aux chocs thermiques extrêmes.

La **Figure 20** est un exemple d'imprégnation réactive d'un réfractaire d'alumine par des oxydes liquides agressifs. Sur la partie droite de la **Figure 20**,

trois zones ont été caractérisées : à une corrosion initiée en surface du réfractaire succède une zone réactionnelle avec des phénomènes de

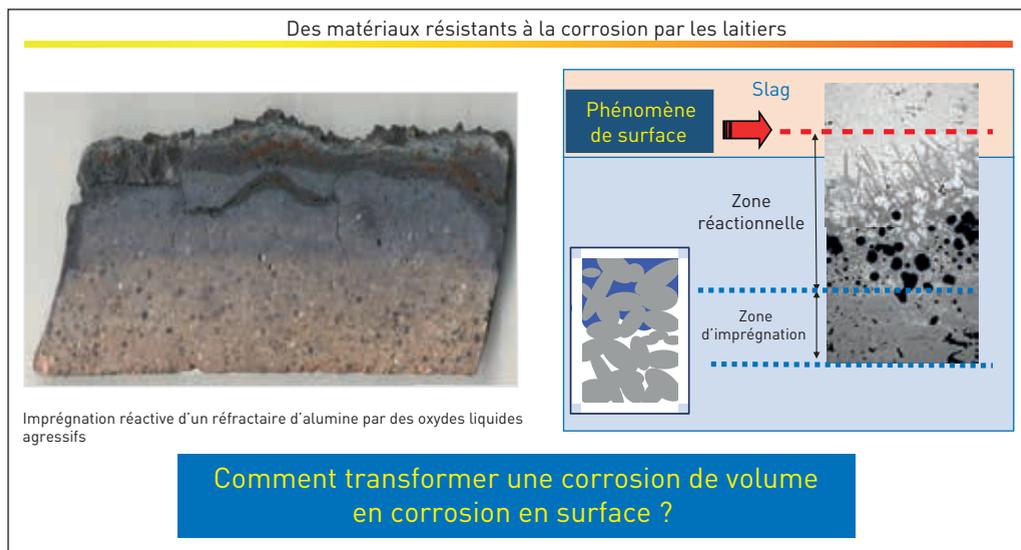


Figure 20

Corrosion par les laitiers d'un réfractaire d'alumine.

dissolution et de précipitation, puis, dans la zone un peu plus basse, des phénomènes d'imprégnations capillaires. On constate que le volume affecté par la corrosion est important, ce qui soulève la question suivante : **comment transformer cette corrosion de volume en corrosion de surface ?**

L'effet du carbone sur la mouillabilité¹ des réfractaires par les oxydes liquides est bénéfique. L'exemple de la **Figure 21** est un réfractaire MgO-C. La partie supérieure du schéma central de la **Figure 21** montre un réfractaire de magnésie mouillé par les oxydes liquides : quand on ajoute du carbone à la magnésie (partie inférieure), son effet non mouillant va se traduire par une infiltration extrêmement limitée de ces réfractaires.

1. Propriété d'un matériau au contact d'un liquide (forme des gouttes résultant de l'affinité liquide/solide).

On peut jouer sur la taille, la nature, la microstructure pour limiter fortement cette imprégnation comme on peut le voir sur les exemples de réfractaires MgO-C qui se situent à droite de la **Figure 21**.

La nature se protège elle-même : la corrosion est ralentie par des transformations de phases. La **Figure 22** présente un béton alumine-magnésie. Le cercle rouge sur la **Figure 22** montre que les agrégats d'alumine vont naturellement se protéger des laitiers en précipitant à leur surface de l'hexaaluminate de chaux qui va les protéger de la corrosion.

Mais l'homme peut aider ce phénomène naturel en introduisant des composés qui forment des spinelles $MgOAl_2O_3$ (parties en noir fléchées par le cercle bleu) qui vont piéger les éléments oxydes de fer et oxydes de manganèse présents dans le laitier (éléments qui

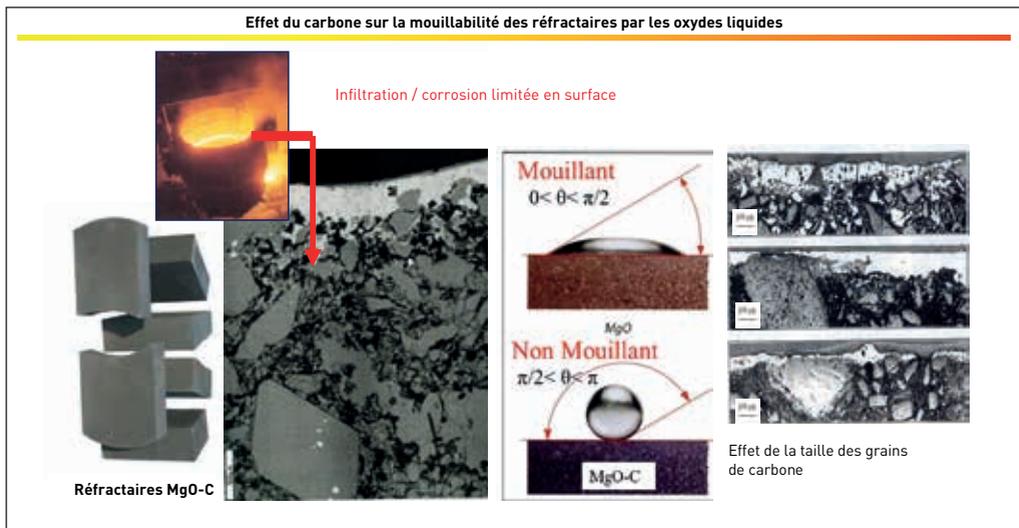


Figure 21

Effet du carbone sur la mouillabilité des réfractaires magnésie-carbone.

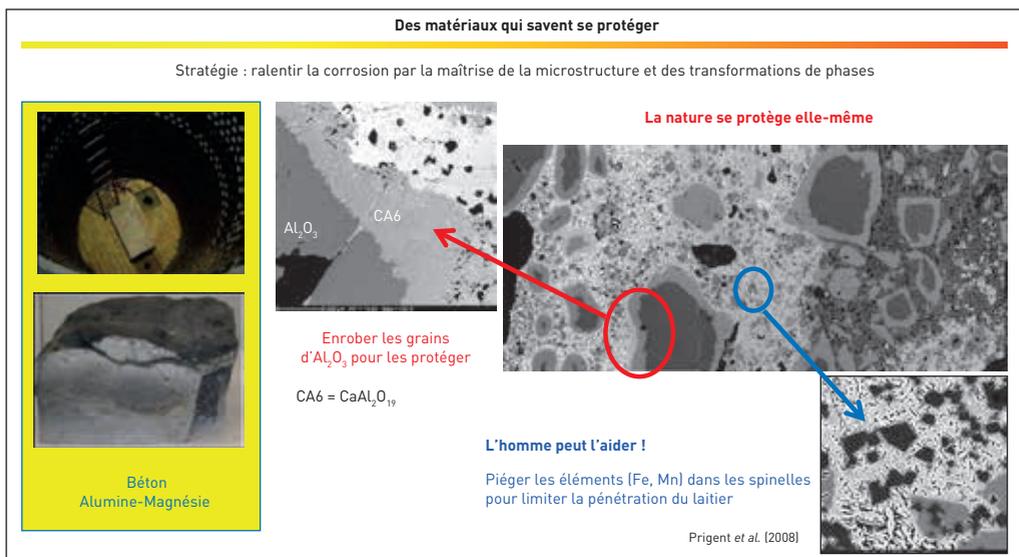


Figure 22

Des matériaux pouvant se protéger eux-mêmes.

rendent le laitier relativement fluide) pour épurer ce laitier et, à partir de là, limiter son imprégnation par un accroissement de sa viscosité.

Les matériaux réfractaires avancés sont des matériaux actuellement développés en laboratoire (**Figure 23**) en vue d'applications industrielles.

Dans notre laboratoire, nous avons développé, en partenariat avec un fabricant de réfractaires, un réfractaire de zircon mullite à partir de deux matières premières : le zircon et l'andalousite. Le problème du zircon est que sa décomposition en zircon se produit à une très haute température (1 800 °C), incompatible avec les procédés de fabrication des réfractaires (pour des raisons économiques et techniques). Mais, quand le zircon est associé à l'andalousite, des éléments présents dans l'andalousite permettent une décomposition du zircon en zircon dès 1 600 °C (micrographie de la **Figure 23**). Ceci nous a permis de produire à une échelle industrielle, après beaucoup d'efforts (55 formulations prototypes ont été testées), des matériaux présentant des propriétés mécaniques exceptionnelles, et qui,

en utilisation, n'ont pratiquement pas d'infiltration par les laitiers (oxydes liquides), ni de fissures.

5 Comment limiter la dégradation des matériaux réfractaires ?

5.1. L'observation des échantillons : les expertises industrielles

Les matériaux réfractaires subissent des dégradations : il faut commencer par une expertise extrêmement fine pour connaître les mécanismes à l'origine des dégradations pour déterminer quel remède doit être appliqué.

Quelques exemples de dégradation sont présentés sur la **Figure 24**. On observe des ruptures, de la fusion, de l'érosion, de l'écaillage, de la corrosion localisée, de l'imprégnation,

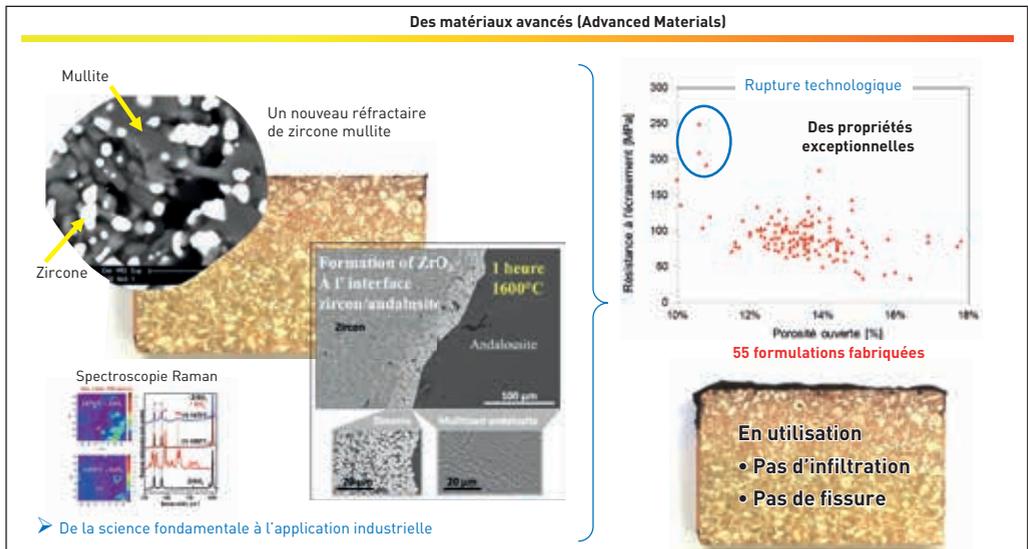


Figure 23

Un nouveau réfractaire avancé de zircon mullite.

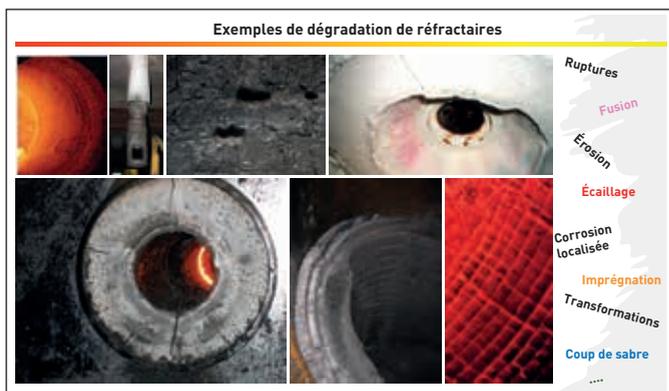


Figure 24

Exemples de dégradation des réfractaires.

des transformations, des coups de sabre.

Sur la **Figure 25**, on peut voir un réfractaire utilisé en sidérurgie (transport de la fonte en poche tonneau) et des réfractaires de laboratoire qui ont subi une dégradation quasiment totale par un simple gaz, le monoxyde de carbone.

Le monoxyde de carbone, à une température entre 400 et 900 °C, se décompose pour donner du carbone et du CO₂. Ce carbone pénètre dans la porosité du réfractaire, va y croître. Cette croissance est catalysée par les oxydes de fer naturellement présents dans le réfractaire, ce qui entraîne



Figure 25

Destruction d'un réfractaire sous atmosphère de CO à haute température.

une destruction un peu longue mais radicale.

Dans le cas de la **Figure 26** où l'on est en présence d'une atmosphère de CO et d'hydrogène, les particules qui catalysent la croissance du carbone sont des nanoparticules carbures de fer. Ces dernières vont dissoudre le carbone issu de la décomposition du CO, et, par un phénomène de nucléation² et de croissance, elles vont donner naissance à des nanofibres de carbone qui auront un effet extrêmement destructeur et rapide.

Comprendre les dégradations pour améliorer les performances est un problème difficile qui s'apparente à l'archéologie ; cette sentence d'Edgard Poe : « L'important, le principal est de savoir ce qu'il faut observer », s'applique à ce problème.

L'observation des réfractaires passe d'abord par de l'expertise

2. Formation, dans un milieu de structure et de compositions définies, de germes constituant des centres de développement d'une nouvelle structure physique ou chimique.

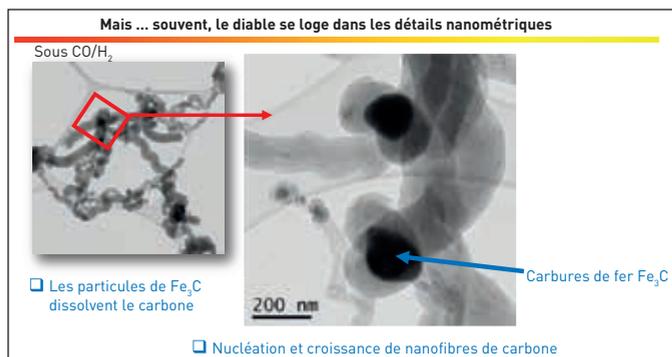


Figure 26

Processus de destruction d'un réfractaire en présence de CO et H₂

industrielle, complétée par une approche globale : observer l'installation industrielle, observer le revêtement, observer la brique, observer la microstructure. Cette approche est donc multi-échelle dans un facteur 10⁷ : de la dizaine de mètres au micromètre.

5.2. Caractérisations des dégradations

5.2.1. Expérimentation en laboratoire

Après l'observation des dégradations, il faut les caractériser (**Figure 27**) pour en comprendre l'origine. Cette démarche passe par de l'expérimentation en laboratoire : des essais classiques de comparaison entre différents produits réfractaires, ou bien des essais *in situ* instrumentés notamment pour déterminer les cinétiques³ de dégradation.

5.2.2. Caractérisation des échantillons corrodés

Un réfractaire d'andalousite corrodé par un laitier alumineux est pris comme exemple sur la **Figure 28**.

À partir de la micrographie du réfractaire d'andalousite corrodé par un laitier alumineux (en haut de la **Figure 28**), l'analyse de l'évolution des phases minérales (en rouge) et des compositions des liquides (alumine, silice et chaux) à l'interface laitier-réfractaire à haute température (1 600 °C) a pu être faite et comparée à l'image que l'on observe sous le microscope. Le bas de la **Figure 28** montre les phases minérales qui se développent

3. Vitesse de réaction.

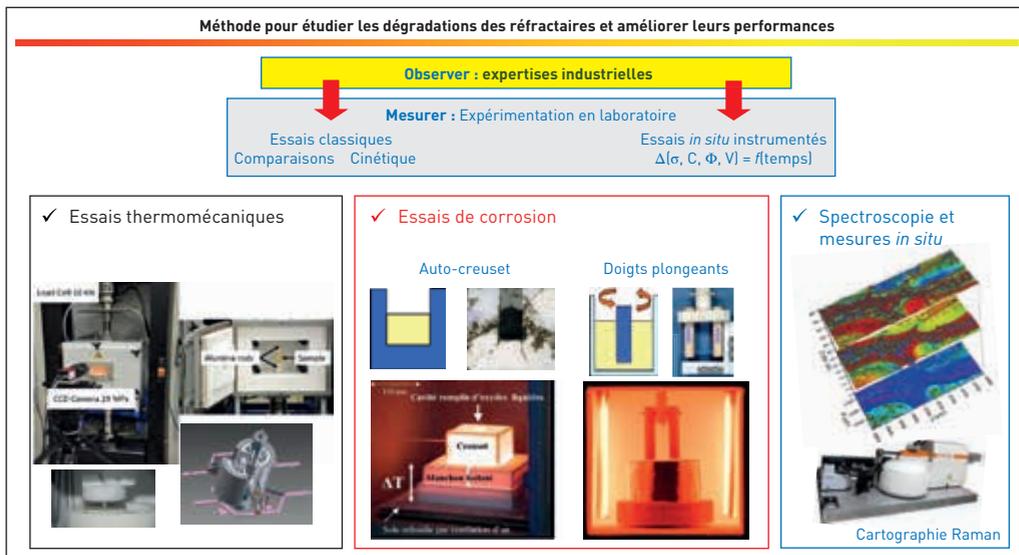


Figure 27

Les méthodes d'étude de la dégradation des réfractaires.

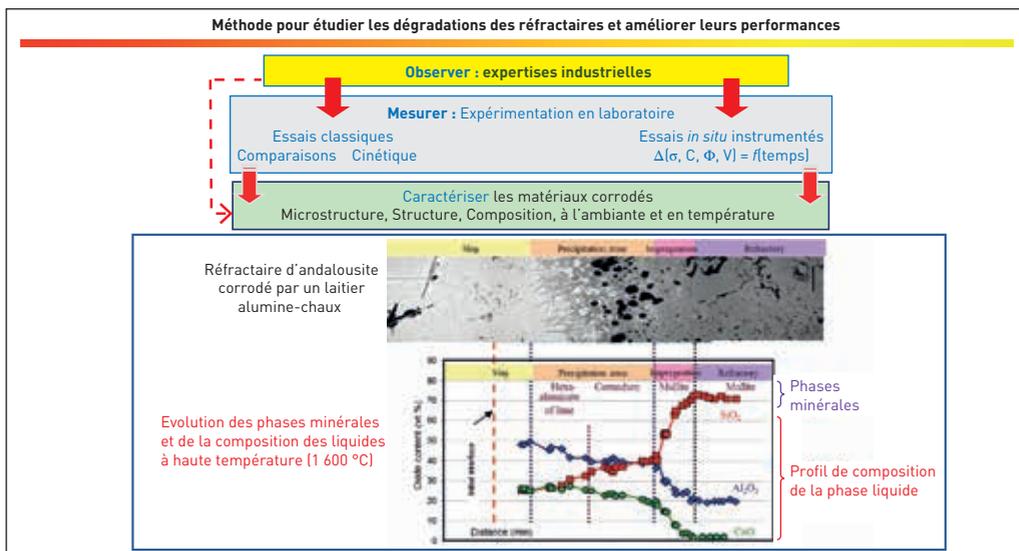


Figure 28

Caractérisation d'un réfractaire corrodé.

ainsi que le profil de composition de la phase liquide à l'interface.

Des calculs thermodynamiques permettent ensuite de prédire la nature des phases comme on peut le voir sur la **Figure 29** dans le

cas d'un « slag⁴ » produit par des cendres de biomasse où les conditions d'atmosphère peuvent totalement modifier la nature des phases présentes.

4. Scories ou laitiers.

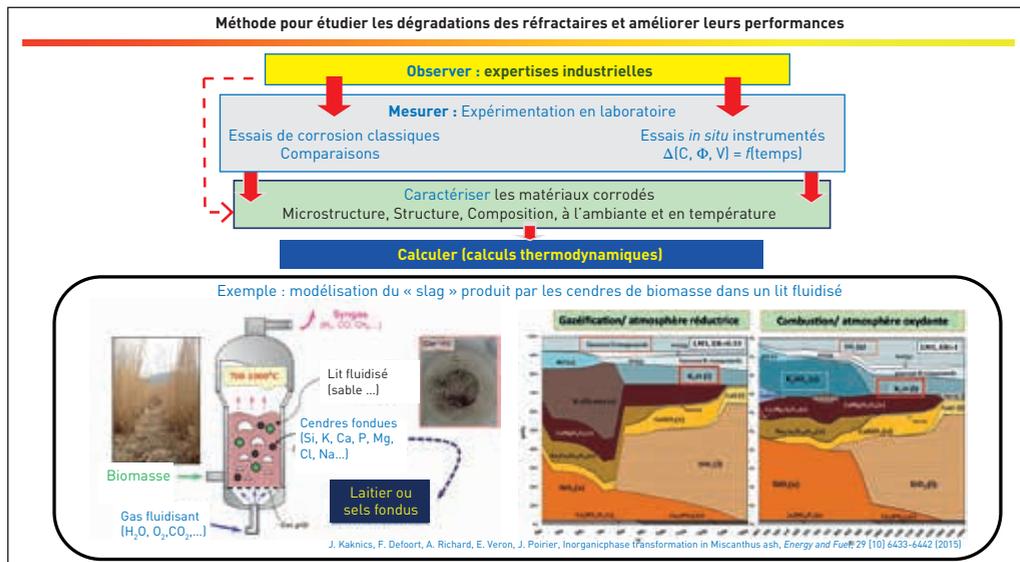


Figure 29

Modélisation (par des calculs thermodynamiques) des scories produites par les cendres de biomasse dans un lit fluidisé, selon que l'atmosphère est réductrice ou oxydante.

5.2.3. Identification des mécanismes de dégradation

Prenons le cas de la **Figure 30** dans un four rotatif pour lequel le mécanisme de dégradation mis en jeu est relativement simple : infiltration, formation de fissures, croissance des fissures et écaillage.

La caractérisation des matériaux corrodés faite, il faut modéliser le système. L'exemple de la modélisation des réactions est présenté sur la **Figure 31** avec la détermination des cinétiques réactionnelles de formation de la forstérite (à droite), obtenues à partir d'une étude *in situ* par spectroscopie Raman⁵ (à gauche).

La modélisation permet aussi de prédire la durée de vie à une échelle industrielle, comme

5. Une lumière monochromatique diffusée à travers un matériau permet de déterminer certaines de ses propriétés.

sur la **Figure 32** qui présente un modèle statistique d'usure multivariable de convertisseurs d'aciérie. Ce modèle prend en compte les caractéristiques des matériaux et les conditions de process. Ce type de modélisation est un outil opérationnel pour les opérateurs des convertisseurs d'aciérie.

5.2.4. Amélioration des performances et développement de nouveaux matériaux

Le point le plus important, le plus critique et souvent le plus négligé, est de valider les choix faits à l'issue des études précédentes par des essais industriels avec des mesures rigoureuses et scientifiques. La **Figure 33** présente l'exemple d'un matériau de référence pour un four d'incinération, pour lequel une nouvelle qualité de matériau apporte manifestement une performance supérieure.

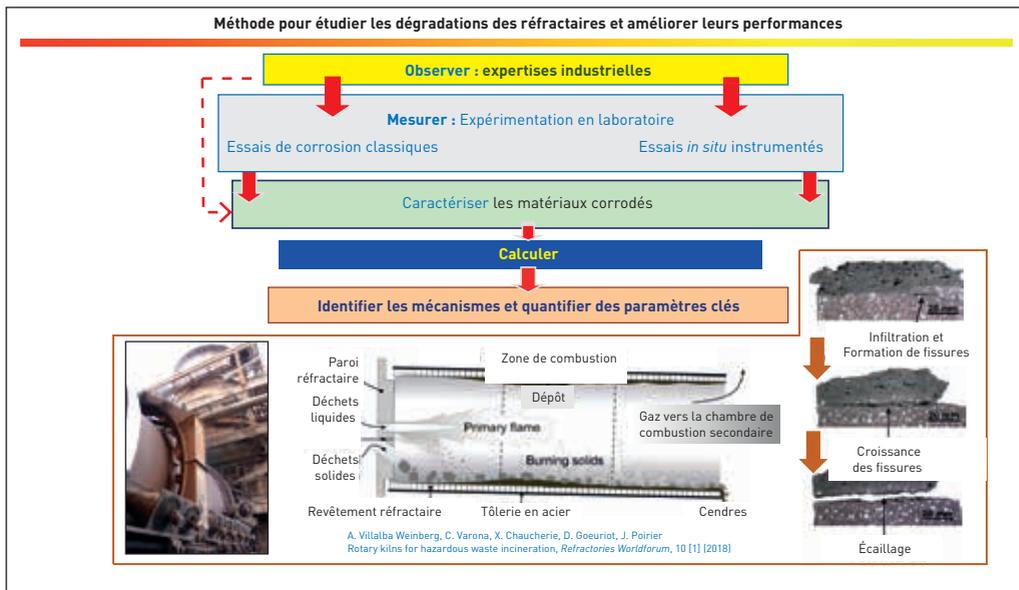


Figure 30

Identification des mécanismes de dégradation dans un four rotatif.

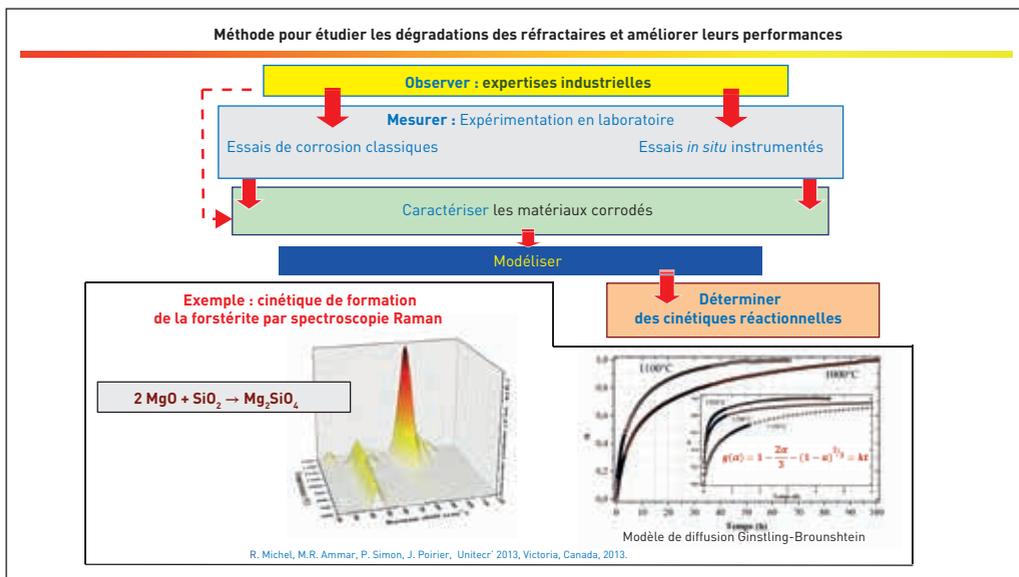


Figure 31

Modélisation des phénomènes de dégradation.

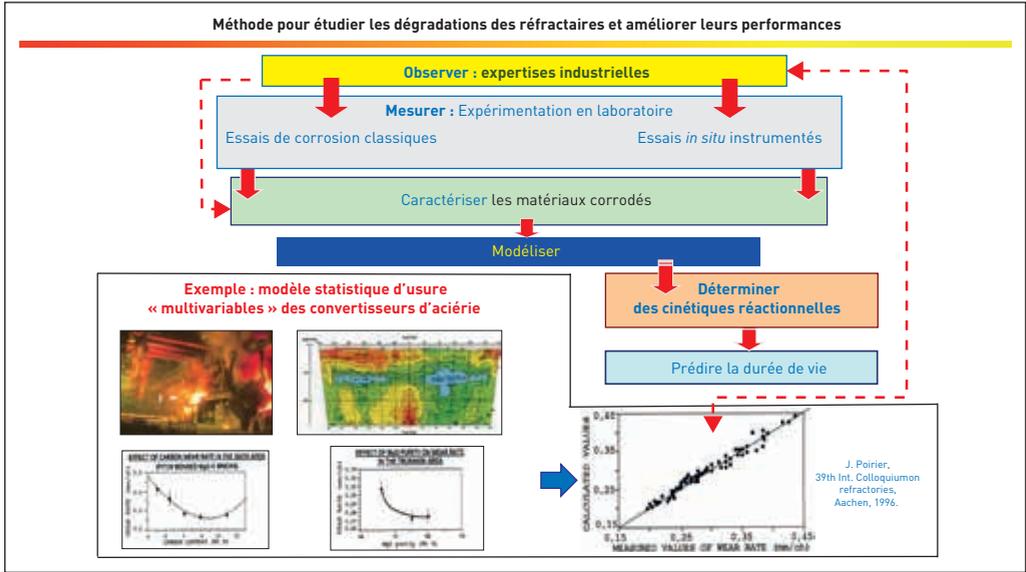


Figure 32

Modèle statistique d'usure multivariante des convertisseurs d'aciérie.

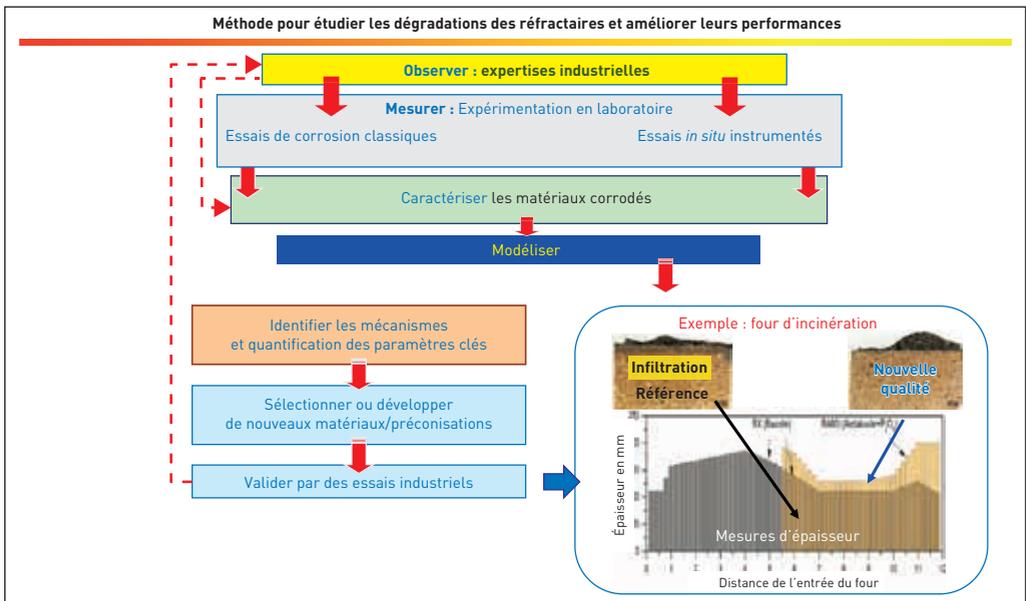


Figure 33

Validation des propositions d'amélioration des performances des matériaux réfractaires par des essais industriels.

6 Les facteurs clés de progrès pour le futur

Le moteur des progrès futurs est le couple recherche et formation.

Considérons quelques exemples de thématiques de recherches.

6.1. Comprendre la matière dans tous ses états à haute température

La **Figure 34** présente une technique de laboratoire appelée lévitation aérodynamique. On maintient en lévitation sans contact une petite goutte d'alumine chauffée à 2 000 °C par des lasers avec un lévitateur à très haute température. Cette goutte d'alumine va vibrer avec une fréquence de vibration propre. À partir des données recueillies dans cette expérience, on va pouvoir en déduire la viscosité de cette alumine

en fonction de la température. **La viscosité de ces phases liquides à haute température a un impact considérable sur l'impregnation capillaire et la réactivité de nos réfractaires.**

Un deuxième exemple (**Figure 35**) est l'utilisation de l'analyse par diffraction des rayons X *in situ* pour déterminer les cinétiques des réactions de corrosion entre un réfractaire à base d'alumine et un laitier à base d'alumine/chaux.

Cette étude renseigne sur l'évolution de la dissolution du réfractaire d'alumine en fonction du temps, et la précipitation de l'hexa-aluminate de chaux qui va le protéger. D'un point de vue cinétique, on est relativement loin de l'équilibre thermodynamique puisque cet équilibre est représenté par ces traits horizontaux en pointillé. Il y a donc bien dissolution et précipitation.

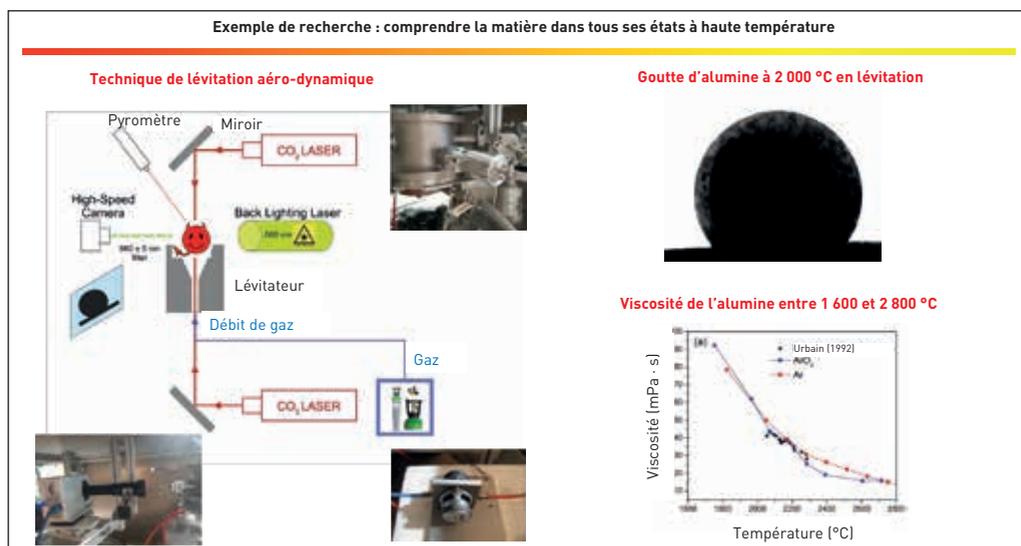


Figure 34

Comprendre la matière dans tous ses états à haute température par la technique de lévitation aérodynamique.

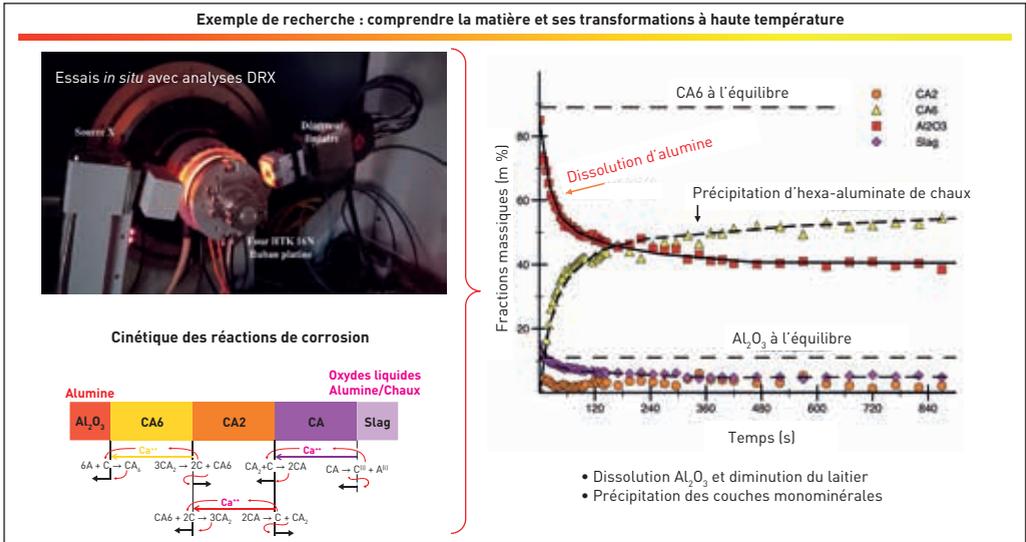


Figure 35

Études de cinétique de corrosion par analyses DRX *in situ*.

6.2. Modélisation du comportement thermomécanique des réfractaires en utilisation

L'exemple résumé sur la **Figure 36** concerne le domaine de l'incinération. Le réfractaire est une tuile en carbure de silicium utilisée dans une chambre de combustion. C'est le profil thermique dans la tuile, la cinétique d'oxydation du carbure de silicium, et l'effet de cette oxydation sur les contraintes et les déformations mécaniques de la tuile, qui est représenté sur cet exemple.

6.3. Formation : transmettre oui... mais comment ?

La formation, et donc la transmission du savoir et des compétences, sont peut-être le point le plus fondamental à prendre en compte pour

que dans le futur on puisse répondre aux attentes.

Un exemple intéressant, qui a été réalisé à l'initiative de quelques collègues, a été la création d'une fédération internationale de recherche et d'éducation dans le domaine des réfractaires, intitulée FIRE. C'est une entité indépendante, une association loi 1901, qui a permis l'association de 25 partenaires, universitaires et académiques, pour promouvoir la formation des étudiants dans le domaine des réfractaires, et qui permet à des sociétés de réfractaires différentes, voire concurrentes, de pouvoir partager des savoir-faire et mettre en commun des moyens pour le bien de notre métier (**Figure 37**).

Cette fédération permet l'échange d'étudiants dans les universités du monde

Exemple de recherche : modéliser le comportement thermomécanique des réfractaires en utilisation

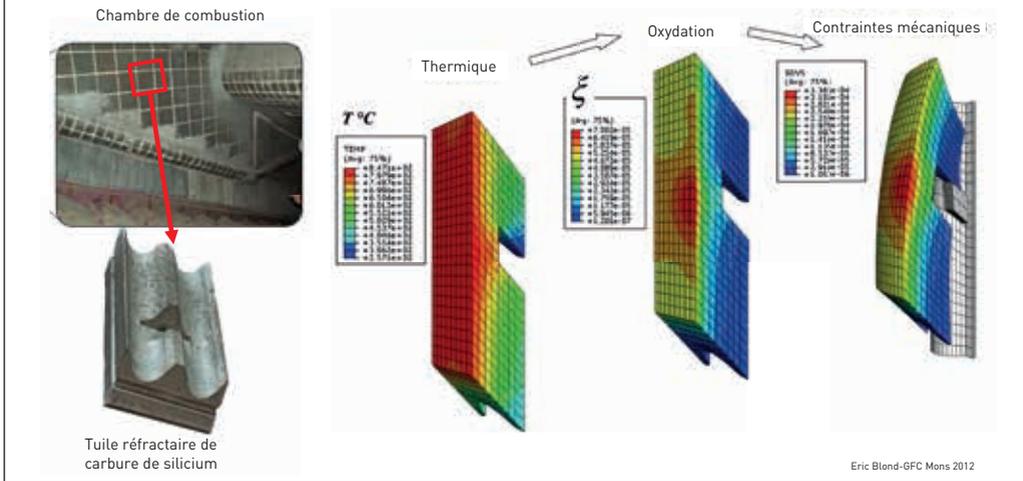


Figure 36

Exemple de modélisation thermomécanique.

Formation : transmettre oui ... mais comment ?



Figure 37

Federation for International Refractory Research and Education.

entier, des projets de recherche collaborative, des publications et ouvrages, des *Summer Schools* (écoles d'été), des séminaires.

Mais la formation, c'est avant tout transmettre : transmettre aux opérateurs, transmettre

sur le terrain et transmettre finalement aux opérateurs et aux ouvriers. Les actions de formation pour les opérateurs sont un point essentiel pour améliorer la compétence, partager l'expérience, mettre en place une méthode et une

démarche, transmettre des connaissances, transmettre un savoir-faire et informer de l'avancement de la recherche et du développement.

7 Rêver le futur

Projetons-nous maintenant vers le futur et vers les défis qui nous attendent notamment en termes de matière première et en termes de réduction de CO₂. Il nous faut donc parler d'éco-conception, d'auto-cicatrisation, de décarbonation, de big data, de modélisation et d'intelligence artificielle, appliqués au domaine des réfractaires (**Figure 38**).

7.1. Des réfractaires auto-cicatrisants

La **Figure 39** présente un exemple de réfractaire auto-cicatrisant. On voit clairement sur la photo de gauche une fissure initiale par choc thermique. Sur la photo de droite, la fissure a disparu après deux

heures à 1 200 °C : on a une cicatrisation de la fissure par cristallisation d'une phase secondaire qui est la mullite.

7.2. Des bétons réfractaires sans ciment utilisant des nanoparticules

Le deuxième exemple est l'élaboration de réfractaires non façonnés (bétons réfractaires) sans ciment, en utilisant des nanoparticules. Ce sont des gels, notamment des gels de microsilice, qui sont constitués de microsphères de 150 nm, à partir desquels on est capables d'élaborer des bétons réfractaires sans ciment qui commencent à trouver des applications notamment dans les fours de cimenterie (**Figure 40**).

7.3. Des réfractaires bio-inspirés de la nacre

Le troisième exemple est inspiré de la nature (**Figure 41**). C'est une nacre constituée de tablettes d'alumine de quelques

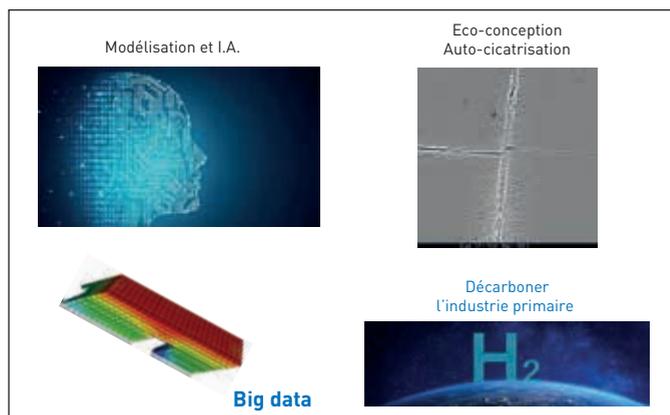


Figure 38

Les réfractaires et le futur.

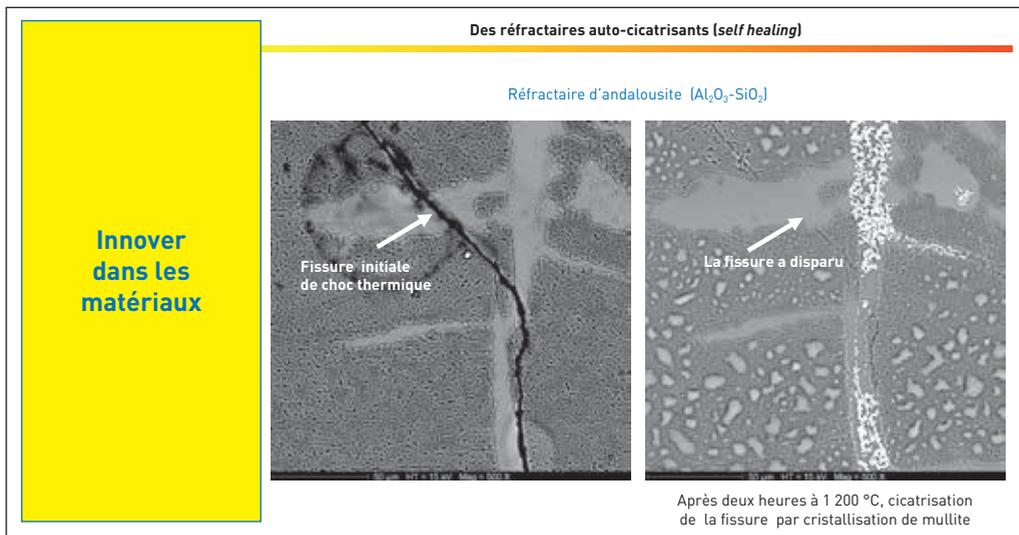


Figure 39

Des réfractaires auto-cicatrisants.

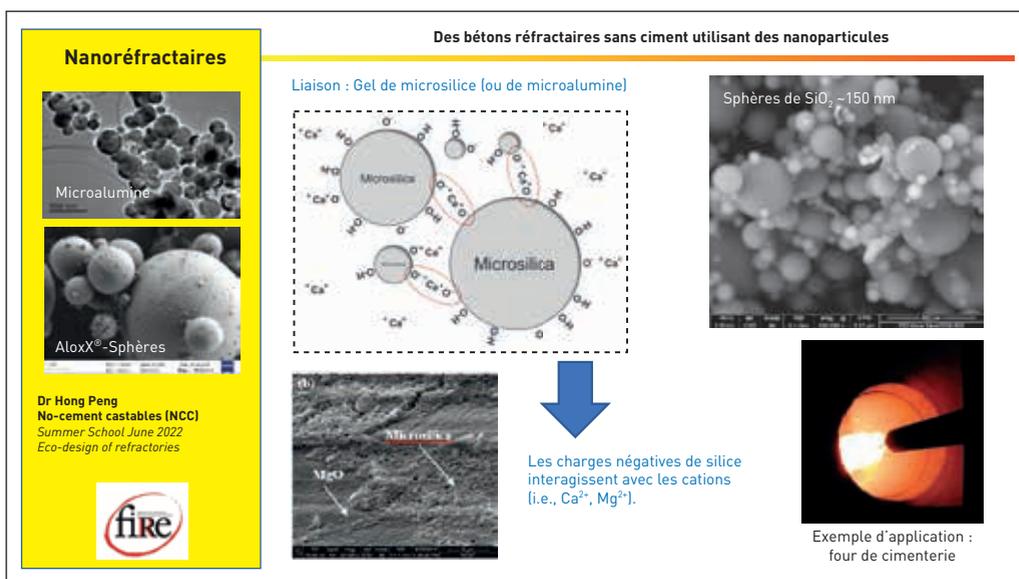


Figure 40

Des bétons réfractaires sans ciment.

nanomètres, parfaitement imbriquées comme on le voit sur la partie gauche de la **Figure 41**. Ces tablettes constituent une microstructure et sont séparées par une interphase de borate d'aluminium.

Ces réfractaires présentent des caractéristiques intéressantes dans leur limite d'emploi qui est entre 25 °C et 1 200 °C (**Figure 42**). Leurs propriétés mécaniques sont supérieures à celles des

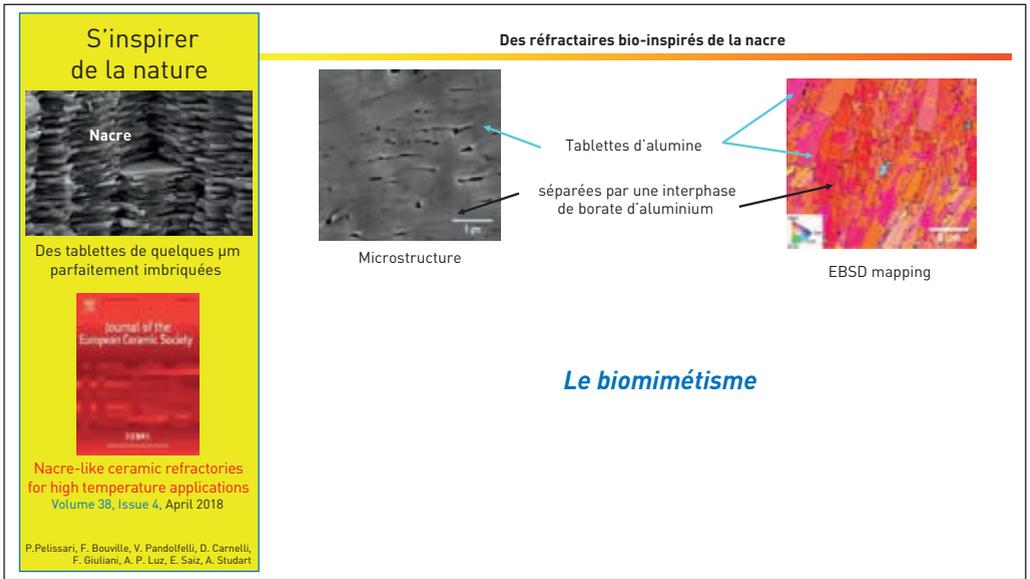


Figure 41
S'inspirer de la nature pour faire des nouveaux réfractaires.

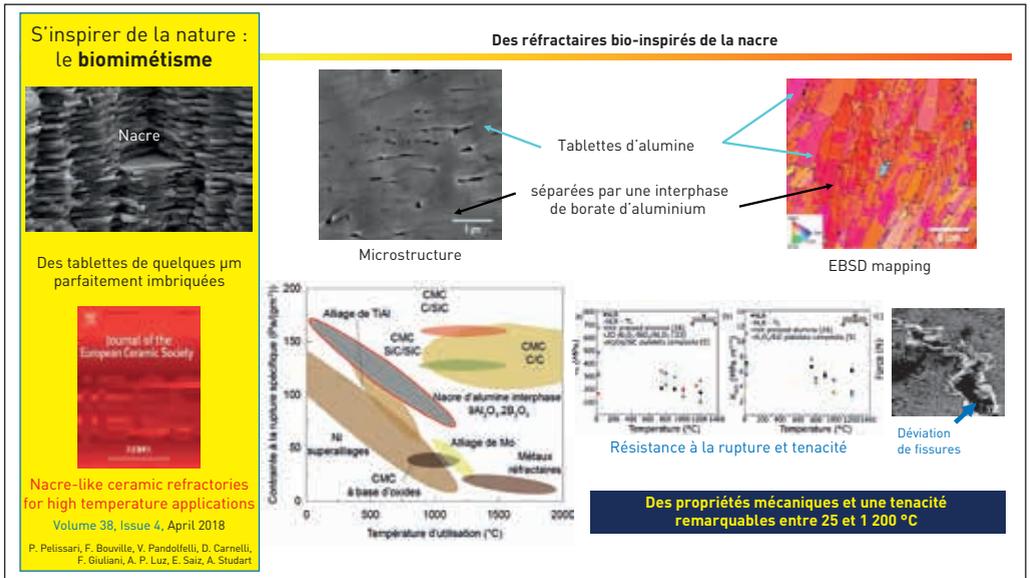


Figure 42
Propriétés mécaniques de nouveaux réfractaires bio-inspirés des nacres.

superalliages. Ils ont des propriétés de résistance à la rupture et de ténacité⁶ tout à fait intéressantes ou remarquables comparative- ment à d'autres matériaux réfractaires, et permettent notamment les déviations de fissures.

6. Capacité d'un matériau à résis- ter à la propagation d'une fissure.

7.4. Le recyclage des réfractaires

Il faut savoir que 40 % à 60 % des réfractaires, après leur utilisation, restent en place ou ne sont pas forcément valorisés. Il faut donc promouvoir l'économie circulaire et valoriser ces matières premières par un tri, une collecte, découpe, broyage... pour obtenir des poudres ou des grains que l'on peut friter dans les fours pour les réutiliser (**Figure 43**).

7.5. Les réfractaires et l'Intelligence artificielle

Comme tous les matériaux, le réfractaire est complexe, et donc l'intelligence artificielle et le traitement des données peuvent apporter beaucoup à l'amélioration de ses performances, à travers les bases de données, le data mining, les

statistiques, le e-learning, le machine learning. La **Figure 44** présente un exemple d'intelligence artificielle qui a été utilisé dans le domaine des hauts fourneaux, avec toutes les différentes étapes : brainstorming, collecte des données, mise en forme des données, analyse des données, validation et implémentation.

7.6. Décarboner la sidérurgie

Le dernier exemple extrêmement important est la décarbonation de la sidérurgie, une industrie des hautes températures responsable de 18 % des émissions de CO₂, ce qui constitue un défi majeur pour le futur. L'hydrogène peut apporter beaucoup, en substitution des énergies fossiles qui sont utilisées actuellement, pour alimenter en énergie décarbonée les unités industrielles



Figure 43

Le recyclage des réfractaires.

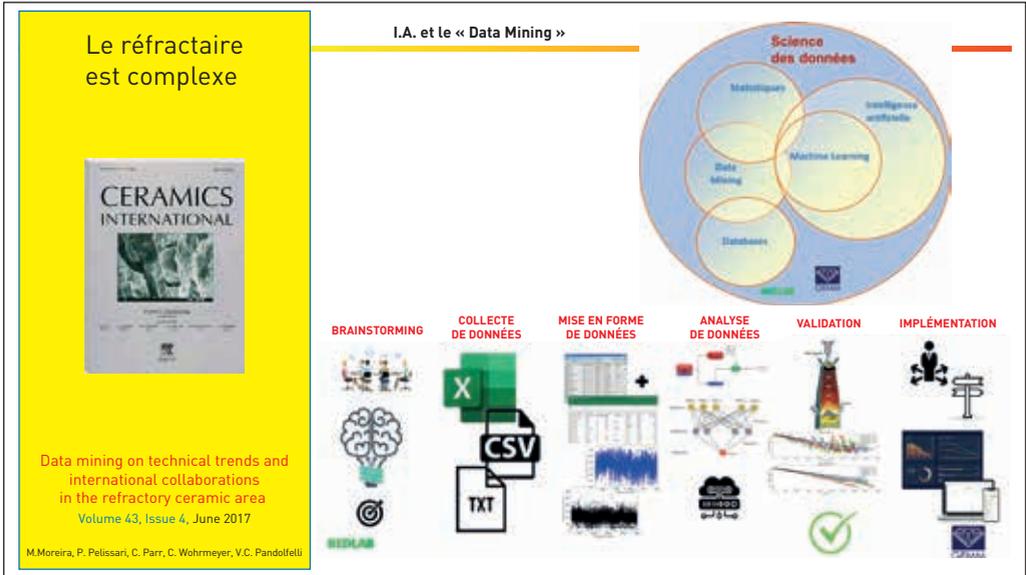


Figure 44
Exemple d'application de l'intelligence artificielle.

et contribuer à la décarbonation des procédés. L'exemple le plus emblématique est la fabrication de l'acier : pourquoi ne pas réduire les minerais de fer par l'hydrogène décarboné ?

La **Figure 45** schématise une unité de fabrication

sidérurgique, appelée complexe sidérurgique, dont l'étendue est gigantesque : environ 7 km de long. On peut y reconnaître le stockage des matières premières : minerai de fer et charbon, les fours à coke, les hauts-fourneaux, l'aciérie, les laminoirs...



Figure 45
Unité de fabrication sidérurgique actuelle.

Les bases de la sidérurgie sont très simples puisque basées sur deux réactions chimiques : l'oxydation du carbone par l'oxygène qui produit du CO et la réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone pour former du fer avec un peu de carbone, ce qui s'appelle l'acier, avec production de CO₂. Cette usine sidérurgique, en réalité, est une usine à production de CO₂ puisque, pour une tonne d'acier, on produit 1,8 tonne de CO₂, et, en 2022, la sidérurgie a produit 2,6 milliards de tonnes de CO₂, soit entre 7 et 9 % des émissions mondiales, ce qui est colossal.

Le futur c'est une diminution en 2030 de 30 % du CO₂ produit pour atteindre la neutralité carbone en 2050, grâce à un acier « vert ».

Dans ce cas, au lieu de réduire les oxydes de fer par le monoxyde de carbone, on utilise une réduction par l'hydrogène : on n'a plus qu'une seule réaction pour former du fer et de l'eau (Figure 46). L'usine est alors totalement

transformée, il n'y a plus de hauts-fourneaux, il y a une unité qu'on appelle unité de réduction directe et des fours électriques associés à une unité de production d'hydrogène.

Cette technologie DRI de réduction directe basée sur l'hydrogène est résumée sur la Figure 47. L'hydrogène est introduit dans un préchauffeur et envoyé dans le réacteur dont la température se situe entre 500 et 1 200 °C. On introduit le minerai de fer et on obtient des minerais de fer pré-réduits, ce qu'on appelle des DRI (*Direct Reduction Iron*), à travers la réduction par l'hydrogène de l'oxyde de fer.

Ces nouveaux procédés vont impacter les réfractaires, notamment parce qu'on aura de la corrosion par l'hydrogène qui va réduire la silice, et aussi par le monoxyde de carbone, parce qu'on en aura toujours un petit peu, par les acides, par l'abrasion, par les contraintes thermomécaniques... Actuellement, des équipes de Recherche et

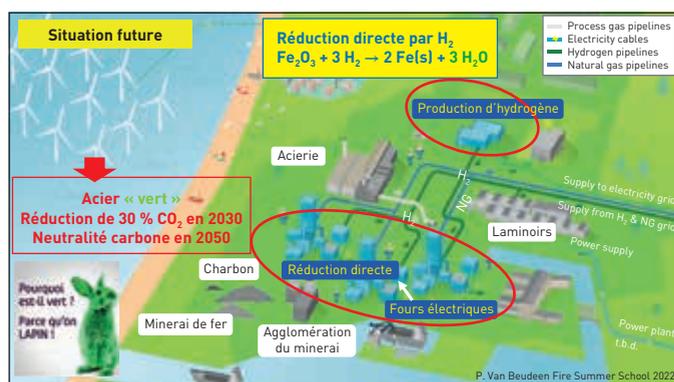


Figure 46

Unité sidérurgique du futur.

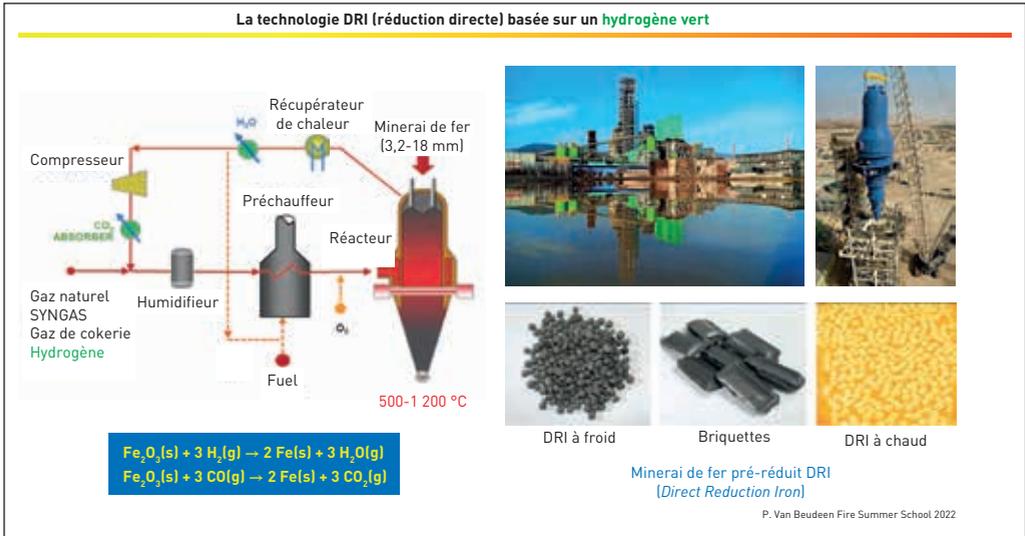


Figure 47

La technologie DRI.

développement réfléchissent au choix optimal de réfractaires à utiliser qui devrait s'orienter plutôt vers des réfractaires à base d'alumine. L'hydrogène vert est une piste prometteuse pour la transition

énergétique : le succès n'est pas une option. En revanche, un champ étendu de progrès scientifiques et technologiques reste à réaliser pour faire aboutir des filières matures et compétitives.

Conclusion

Reprenons pour conclure une citation de Pierre Dac : « C'est en voulant connaître toujours davantage qu'on se rend compte qu'on ne sait pas grand-chose. »

Si nous parvenons à mieux comprendre les sciences et techniques des céramiques hautes températures, qui sait ce dont nous serons capables pour l'avenir des industries de hautes températures.

Pour terminer, juste pour le plaisir des yeux, voici quelques microstructures de réfractaires (**Figure 48**) qui montrent que la science et l'art se marient très bien.

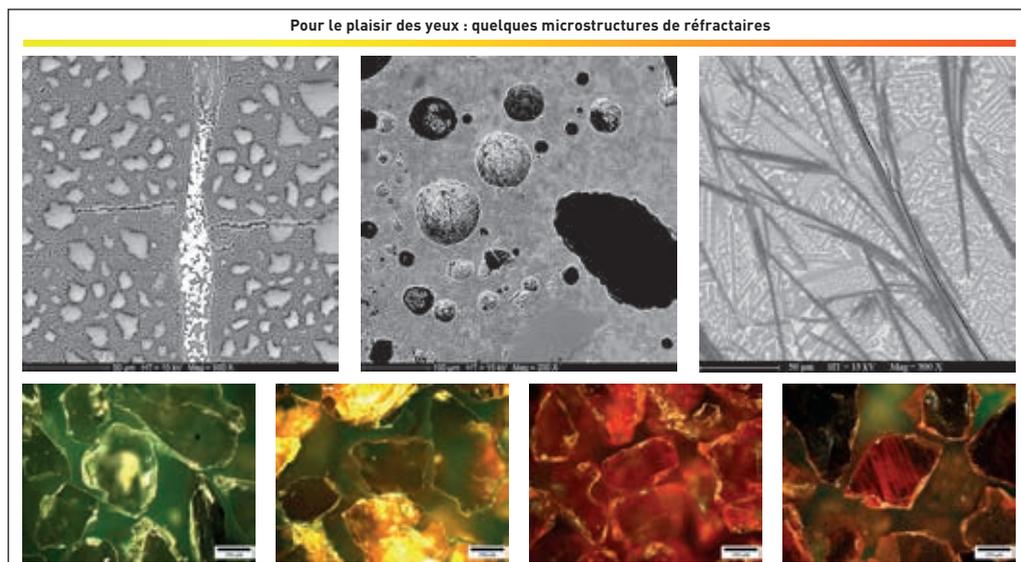


Figure 48

Microstructures de réfractaires.

Le défi des matériaux polymères biosourcés

Luc AVEROUS est professeur des universités à l'ECPM au sein de l'Université de Strasbourg.

1 Les polymères biosourcés : classification et origines

1.1. Matériaux biosourcés et biodégradables : définition et classification

1.1.1. Quelques définitions

Le terme « biosourcé » fait référence au début de la vie du matériau, notamment à l'origine du carbone et de ses différents atomes. Certains matériaux ont un carbone d'origine fossile et d'autres d'origine biosourcée, issu de la biomasse. La biomasse, c'est globalement tout ce qui est produit par des organismes vivants.

Le terme « biodégradable », lui, fait référence à la fin de vie

du matériau. C'est une des fins de vie possibles des matériaux au même titre que le recyclage, par exemple. Pour qu'un matériau soit dit biodégradable, il faut qu'il réponde à certaines normes : des normes sur la biodégradabilité en milieu compost (compostage) tel que la norme EN 13432, en milieu marin, en eau douce...

Aussi certains matériaux ne sont-ils que biosourcés ou que biodégradables.

1.1.2. Classification des polymères biodégradables

La **Figure 1** présente une classification des polymères biodégradables. Les matériaux des trois premières familles sont biosourcés et biodégradables, comme beaucoup

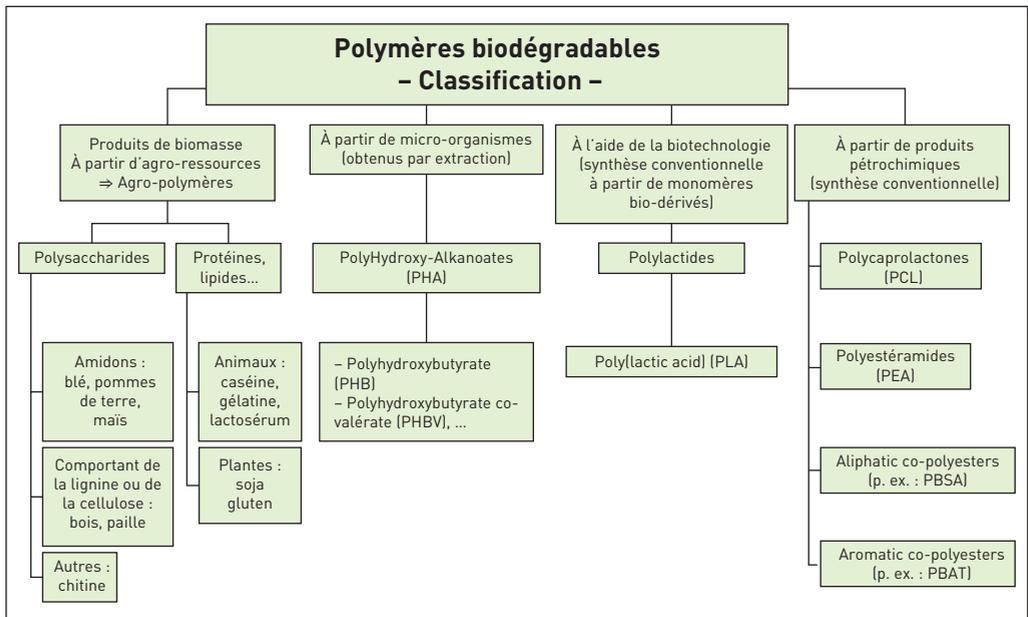


Figure 1

Classification des polymères biodégradables.

Nota : Classification publiée initialement dans : Avérous L. (2004). *Polymer Reviews*. Vol. 44, Issue 3, pp. 231-274, et largement reprise.

de polymères plus ou moins directement issus de la biomasse tels que les polysaccharides¹ ou les protéines. On trouve aussi les polymères bactériens, produits par fermentation, parmi lesquels se trouvent les polyhydroxyalcanoates² (PHA). On va trouver aussi des polymères dont les monomères ou synthons sont produits par fermentation, par exemple par lactofermentation pour l'acide lactique dont la polymérisation est ensuite faite par voie chimique, classiquement, pour obtenir l'acide polylactique (PLA). Mais on peut avoir aussi des polymères

biodégradables qui sont issus de ressources fossiles, parmi lesquels on va trouver les polycaprolactones³ et différents (co)polyesters, qui ne sont pas biosourcés. La tendance est de plus en plus de produire industriellement ces (co)polyesters à partir de ressources renouvelables.

1.2. Ressources fossiles et biomasse

La **Figure 2** présente le cycle du carbone dans la production notamment de polymères. Les ressources fossiles que l'on utilise actuellement résultent de transformations naturelles de la biomasse sur des millions d'années. À partir de ces

1. Sucres complexes composés de plusieurs unités de sucres simples, les plus connus sont l'amidon ou la cellulose.

2. Famille de polyesters biodégradables produits naturellement par fermentation bactérienne de sucres ou de lipides.

3. Polyesters biodégradables fréquemment utilisés dans l'emballage ou dans le biomédical grâce à leur biocompatibilité.

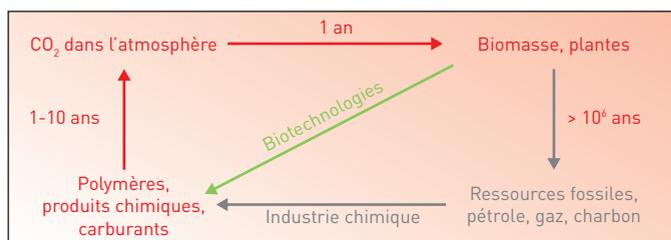


Figure 2

Le cycle de vie du carbone et l'association « chimie et biochimie », pour la production de polymères.

D'après le Pr. R. Narayan (MSU - USA).

ressources fossiles, on a synthétisé, notamment pendant tout le XX^e siècle, la majorité des composés chimiques organiques et des carburants.

Le CO₂ produit sur terre est naturellement réutilisé par les plantes pour permettre la croissance de la biomasse dans un cycle court. À partir de la biomasse est intervenu un réel changement de paradigme avec une production de polymères renouvelables, en combinant chimie et biochimie (les biotechnologies). Cette association chimie/biochimie est de plus en plus importante. Dans ce nouveau schéma, les ressources fossiles apparaissent dans un rôle de séquestration du carbone sur des temps longs.

1.3. Teneur en biosourcé

1.3.1. Le carbone 14

On détermine qu'un matériau est biosourcé notamment à partir de la mesure de sa teneur en carbone 14. Pour déterminer cette teneur, on utilise des normes qui portent sur l'analyse de ce radiocarbone.

Les organismes vivants ont une concentration positive en

carbone 14⁴ due aux échanges entre les organismes et l'environnement. La demi-vie du carbone 14 étant de 5 700 ans, la teneur en carbone 14 sera indétectable après 50 000 ans environ, ce qui fait que tous les matériaux issus totalement de ressources fossiles vont donc avoir une teneur en carbone 14 égale à zéro. Ce ne sera pas le cas des matériaux issus de la biomasse, et l'on va ainsi pouvoir déterminer la teneur en carbone biosourcé.

1.3.2. Teneur en carbone biosourcé et totale

La teneur en carbone biosourcé n'est pas équivalente à la teneur en biosourcé du matériau, comme le montre le cas très simple du PET⁵. Le PET est obtenu par réaction entre un diacide et un diol⁶. Ce dernier peut être assez facilement produit par fermentation

4. Isotope radioactif du carbone utilisé pour la datation de composés contenant du carbone.

5. Polyéthylène téréphtalate, polymère de la famille des polyesters notamment utilisé pour former des fibres synthétiques, des textiles ou des bouteilles d'eau ou d'autres emballages (barquettes).

6. Formule chimique : HO-CH₂-OH.

à partir de biomasse. On synthétise ainsi un PET partiellement biosourcé. Dans ce cas, la teneur en carbone biosourcé est de 20 % (2 atomes de carbone sur les 10 atomes de l'unité répétitive), alors qu'en prenant maintenant en compte l'ensemble des atomes du polymère et non pas seulement le carbone, on n'est pas à 20 % mais 31 %. La teneur en carbone biosourcé et la teneur totale biosourcée du matériau ne sont donc pas identiques !

C'est la raison pour laquelle des normes sont actuellement proposées qui prennent en compte la teneur totale biosourcée déterminée soit en combinant des analyses chimiques élémentaires et les mesures de radiocarbone, soit en se basant sur les équations chimiques utilisées pour la synthèse de ces polymères. Il existe donc différentes approches dans la détermination de la teneur en biosourcé avec différentes normes associées.

La **Figure 3** montre que des logos de certification tel que « OK Biobased » sur des produits (emballages...) vont donner une évaluation de ces

teneurs. On définit dans ce cas un matériau comme étant biosourcé, uniquement à partir de 20 %.

1.3.3. Les polymères biosourcés au sein de la bioéconomie

Les matériaux polymères biosourcés sont une petite partie de ce qu'on appelle la bioéconomie⁷. La production de produits chimiques ou de polymères biosourcés ne représente qu'une toute petite fraction de la bioéconomie : 0,05 milliard d'euros à comparer à 2,5 milliards d'euros pour le total (2018). Cette proportion tend à évoluer. On produit actuellement au niveau mondial environ 4 millions de tonnes de polymères biosourcés par an, à comparer au moins de 400 millions de tonnes de matières plastiques. Cela correspond donc à environ 1 % de polymères biosourcés, et ceci à partir d'environ 5 millions de tonnes de biomasse valorisés dans ce contexte par an. La marge potentielle de

7. La bioéconomie regroupe l'ensemble des activités de production, valorisation et de transformation de la biomasse.

			
Biosourcé à hauteur de 20 à 40 %	Biosourcé entre 40 et 60 %	Biosourcé entre 60 et 80 %	Biosourcé au-dessus de 80 %

Figure 3

Logos et classification des polymères biosourcés en fonction de leur teneur en biosourcé, selon une communication de TUV (Autriche).

progression reste importante, la limite étant la biomasse mobilisable. Il s'agit aussi de ne pas rentrer en compétition avec l'alimentaire. Mais on en est très loin ! La mobilisation des terres arables pour la production des polymères biosourcés n'est environ que de 0,01 % (Figure 4). On ne va donc pas affamer la planète en produisant des polymères biosourcés ! De plus, la plupart des projets industriels qui émergent prennent bien garde de ne pas valoriser des biomasses qui pourraient rentrer en compétition avec l'alimentaire.

1.4. Ressources pour les polymères biosourcés

Les polymères biosourcés ont différentes origines issues de différentes bioressources. On trouve de grands gisements tels que la cellulose ou l'hémicellulose, obtenus à partir de productions comme les forêts, la paille, etc. Dans ce

domaine, il existe d'autres ressources exploitables telles que la lignine et les tannins⁸. Ces composés sont très importants car ce sont des composés aromatiques⁹ et il y a actuellement un manque d'aromaticité sur ces ressources fossiles en raison des évolutions dans le raffinage du pétrole vers le gaz, avec la production des BTX (benzène, toluène, xylène).

On peut valoriser aussi des ressources telles que les amidons, voire les protéines, issus de grandes cultures. On a également les dérivés de l'oléochimie, liée à la valorisation principalement d'huiles végétales dans laquelle la France est bien positionnée.

De manière générale, on peut utiliser les biotechnologies blanches sur différents types de biomasses. Il s'agit de tout

8. Composés chimiques polyphénoliques portant des groupements -OH présents aussi naturellement dans le vin ou le thé par exemple.
9. Composés non aliphatiques.

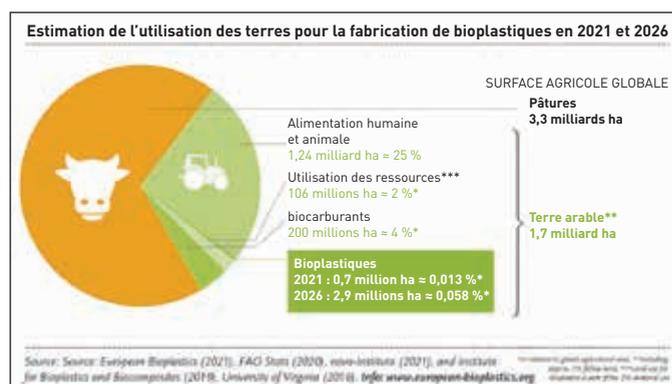


Figure 4

Part de l'utilisation de terres arables pour différents secteurs dont les polymères biosourcés en 2021 et l'estimation pour 2026, selon une communication de Nova-Institute (Allemagne).

un ensemble de molécules et de polymères produits par fermentation tels que par exemple les polymères bactériens (polyhydroxyalcanoates) obtenus par cultures bactériennes. On va aussi produire un grand nombre de synthons¹⁰, des briques (« Lego[®] ») qui permettront de construire des polymères, tels que des diols ou des diacides carboxyliques.

2 Applications à plus ou moins long terme des polymères biosourcés

Le secteur des polymères biosourcés s'inscrit dans deux grandes familles de matériaux :

- polymères biosourcés et biodégradables pour des applications à court terme, principalement pour les secteurs du packaging, de l'agriculture (films de paillage¹¹...),

10. Molécules de base qui permettent de former d'autres molécules en les assemblant telles que des monomères.

11. Bâche posée dans les champs pour conserver l'humidité du sol, empêcher l'herbe de pousser, éviter le refroidissement du sol...



Figure 5

Accumulation du PHA au sein de bactéries.

l'hygiène (cotons-tiges...) et le biomédical ;

- polymères biosourcés durables (non biodégradables) avec des applications à long terme : par exemple dans la construction, l'automobile, etc. Le terme durable a ici un double sens : « qui va durer dans le temps » mais aussi le sens de « développement durable ».

2.1. Polymères biodégradables et biosourcés

2.1.1. L'exemple des polyhydroxyalcanoates (PHA)

Comme exemple de polymères biodégradables et biosourcés, on a les PHA, une famille de polymères (polyesters) bactériens. La **Figure 5** montre l'accumulation du PHA (amas blancs) au sein de bactéries. Le PHA est une famille de polymères de réserve pour ses bactéries. En fonction du couple bactérie et alimentation, on obtiendra des architectures macromoléculaires différentes, ce qui est un gros avantage par rapport à la synthèse chimique classique.

On peut aussi produire des polymères biosourcés en utilisant des plantes transgéniques, une technique que Monsanto (USA) a employée dès les années 1990 pour la production de PHA par des plantes telles que le tabac ou le maïs (**Figure 6**).

Les PHA étant des polyesters, on a donc toutes les applications classiques des polyesters dans les domaines de l'emballage, du textile, agricole... De nombreuses applications de ces produits ont été développées dès la fin des années 1990.

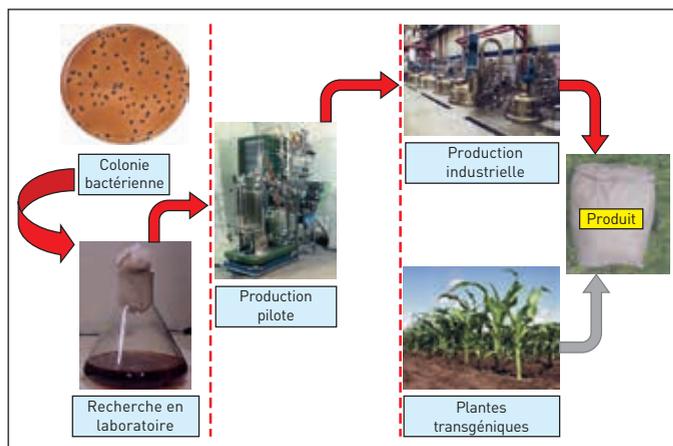


Figure 6

Processus de production du PHA par les biotechnologies blanches (flèches rouges) ou à partir de plantes OGM (flèche grise).

2.1.2. L'exemple de l'acide poly lactique (PLA)

Un autre exemple de polymère à la fois biodégradable et biosourcé est le PLA. Il est obtenu par fermentation (lacto-fermentation), soit à partir de polysaccharides, soit à partir de sucre. Après une première étape d'hydrolyse

enzymatique¹², on obtient la dextrose (ou le glucose) à partir de laquelle l'acide lactique pourra être obtenu (Figure 7). Le PLA est produit

12. Clivage d'une molécule à l'aide d'eau et d'enzymes (molécules catalyseurs accélérant la vitesse des réactions biochimiques).

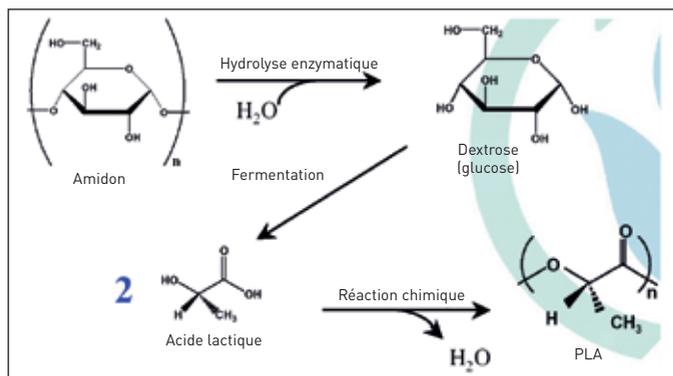


Figure 7

Procédé de synthèse du PLA à partir de l'amidon, selon une communication de NatureWorks (USA).

actuellement à partir de l'acide lactique aux alentours de 200 000 à 300 000 tonnes par an.

Pour sa synthèse, on passe généralement par un composé intermédiaire à partir du prépolymère obtenu par polycondensation directe. Il s'agit de lactides. Le PLA est ensuite obtenu par polymérisation par ouverture de cycle de lactides. Cela permet ainsi d'obtenir un polymère de masse molaire très élevée¹³ (Figure 8).

La production de PLA est relativement importante avec de nombreuses applications dans le monde : dans le textile, le packaging, le domaine agricole, l'automobile, le bâtiment, le loisir, l'hygiène, etc.

13. Plus la masse molaire du polymère est importante, plus les chaînes formées sont longues.

Toutes les voies de recyclage connues pour les polyesters sont applicables au PLA. Le choix que l'on fera en fin de vie du matériau devra être fondé sur l'analyse du cycle de vie du matériau : que ce soit une biodégradation en compost industriel ou encore un recyclage très conventionnel, le recyclage thermomécanique ou le recyclage chimique.

2.1.3. Problématiques de circularité liées à l'utilisation de nouveaux polymères biosourcés

Le recyclage des objets d'usage peut poser des problèmes que l'on a du mal à anticiper avec de potentielles réactivités chimiques entre les composants mis en présence.

Un exemple illustrant ceci est donné par le recyclage thermomécanique des bouteilles de polyesters. Pour fabriquer les bouteilles, on peut remplacer

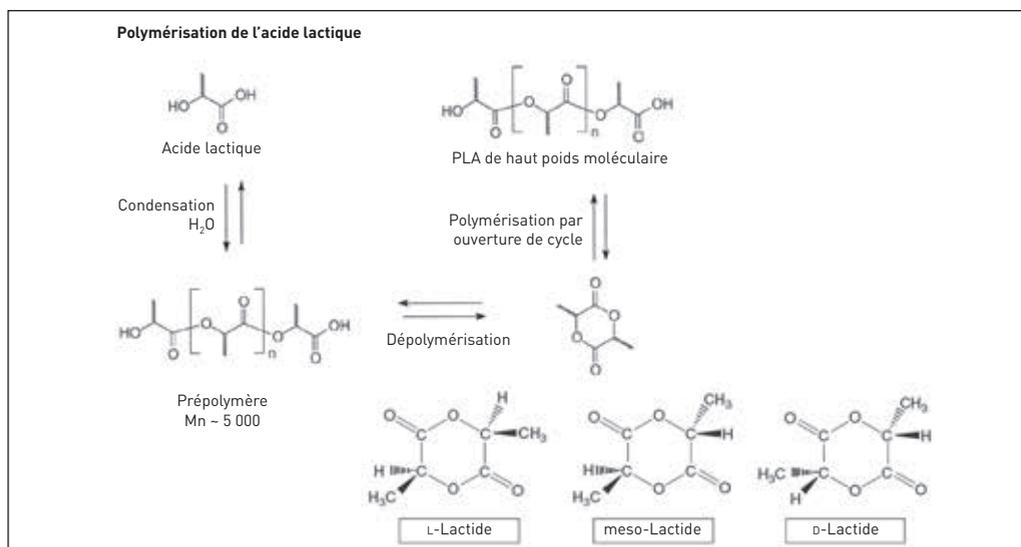


Figure 8

Polymérisation de l'acide lactique pour produire du PLA en passant par des lactides comme intermédiaire, selon une communication de NatureWorks (USA).

le PET par le PLA, cela se fait depuis fort longtemps. Mais si quelques bouteilles de PLA se retrouvent mélangées par erreur avec des bouteilles de PET dans les lots destinés au recyclage, on génère des réactions chimiques lors du recyclage matière. Des réactions de transestérification¹⁴ entre le PLA et le PET vont avoir lieu avec *in fine* la perte des propriétés finales du PET récupéré.

Pour éviter cet inconvénient, il faudrait faire un tri en amont des déchets. Il faut dans ce cas disposer d'une technique adaptée, comme le triage automatique par infrarouge des bouteilles en PLA et de PET. Au niveau des filières de recyclage, ce procédé coûteux n'est pas pour le moment à l'ordre du jour.

2.1.4. L'évolution des applications du PLA : du court au long terme

À son origine dans les années 1990, le PLA était synthétisé pour faire des polyesters biodégradables, compostables, etc. Mais maintenant, et pour suivre l'évolution des demandes, on développe de plus en plus des matériaux durables biosourcés et non biodégradables, avec des tenues long terme. C'est ainsi que l'on fabrique à partir de PLA, des « blends », des mélanges de PLA avec d'autres composés non biodégradables comme le PLA/Plexiglass® ou le PLA/Polycarbonates. On va ainsi avoir des matériaux à base de PLA qui sont biosourcés pour

des applications durables dans l'automobile par exemple. Le PLA est aussi utilisé comme un polyol¹⁵ pour synthétiser des polyuréthanes biosourcés pour des applications durables par exemple dans le bâtiment¹⁶.

2.2. Polymères biosourcés durables

Abordons maintenant spécifiquement les matériaux polymères qui ont des applications à long terme. L'exemple le plus classique est le polyéthylène (PE). On peut faire industriellement du PE biosourcé avec une voie très simple. C'est une production qui vient largement de la société brésilienne Braskem. On part de canne à sucre, on obtient de l'éthanol par fermentation puis l'éthylène par déshydratation de l'éthanol : on peut introduire cet éthylène dans des unités de production de PE, qu'il soit biosourcé ou fossile (**Figure 9**). La seule différence entre ces deux origines concernera les teneurs en carbone 14, mais en termes de propriétés, ce seront exactement les mêmes. Mais son gros avantage est son « empreinte carbone » réduite car étant produit à partir de biomasse. Ce PE a une empreinte carbone plus faible que celle du PE conventionnel. L'exemple du PE n'est pas anecdotique car il compte pour près de la moitié de la production totale mondiale en matières plastiques.

15. Molécule comportant au moins deux groupes -OH.

16. Polymère utilisé notamment pour fabriquer des mousses souples ou rigides.

14. Mécanisme d'échange entre groupements esters, qui modifie leurs propriétés finales.

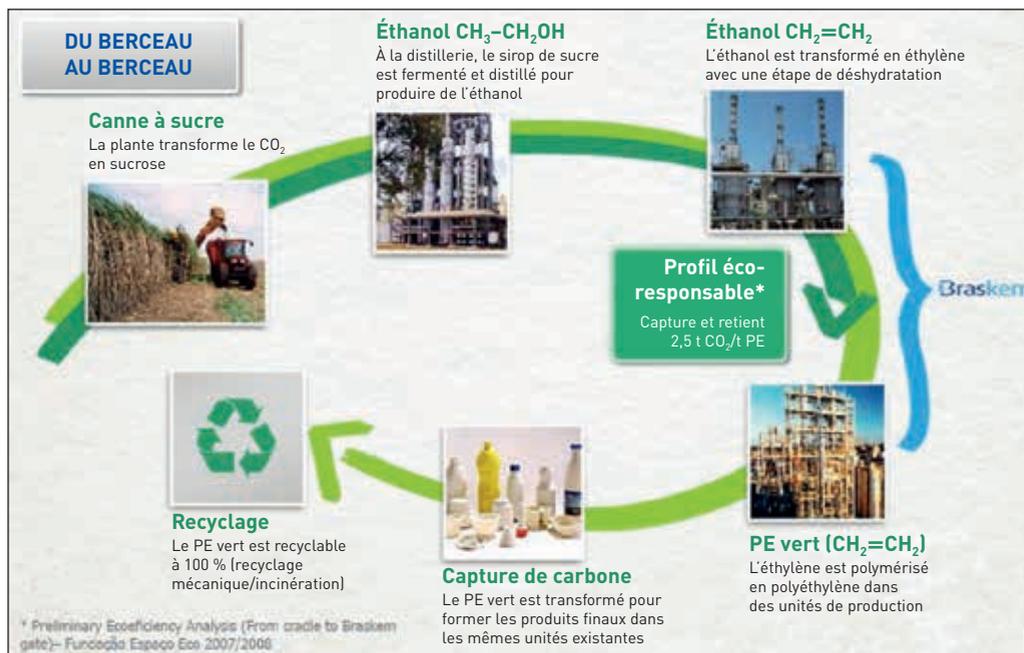


Figure 9

Processus global de la synthèse du PE et de son utilisation, selon une communication de Braskem (Brésil).

2.3. Au-delà du biosourcé : vers des matériaux plus « verts », durables et moins toxiques

Les grandes tendances sur les propriétés en relation avec les attentes des polymères biosourcés sont en évolution. **Le fait de montrer qu'un matériau est biosourcé n'est plus suffisant.** On doit maintenant améliorer différentes propriétés telles que la durabilité, la toxicité ou encore l'aspect « vert » de ces matériaux.

2.3.1. Diminution de la toxicité : l'exemple des polyuréthanes biosourcés (PU)

On va diminuer la toxicité en jouant sur le design¹⁷ des matériaux. Plus précisément,

on modifie la composition du polymère éliminant les causes de toxicité. L'exemple des polyuréthanes biosourcés (PU) va illustrer cette approche. Originellement, les PU sont obtenus par réaction entre des polyisocyanates¹⁸ et des polyols, mais la toxicité des isocyanates pose un gros problème car ils sont très toxiques, réactifs et cancérigènes.

Pour contourner cet obstacle, on remplace cette réaction par une réaction entre des polycyclocarbonates¹⁹ et des polyamines. *In fine*, on obtient un PU possédant un groupement -OH, un polyhydroxyuréthane et globalement on

18. Polymères comportant des groupes isocyanates -N=C=O.

19. Molécules cycliques comportant le motif -O-C(=O)-O-.

17. Conception.

parlera de **Nonisocyanate PolyUrethane²⁰ (NIPU)**.

Cependant ces polymères ne possèdent pas tout à fait les mêmes structures propriétés que ceux qui sont obtenus par des voies conventionnelles. Les masses molaires vont être plus réduites et la cinétique moins rapide. Néanmoins, ce type de développement existe et se révèle performant, notamment sur des applications avec des masses molaires limitées, comme les adhésifs.

2.3.2. Amélioration de la durabilité : vers des matériaux plus « verts »

Pour obtenir des matériaux plus verts, il faut prendre totalement en compte la fin de vie des matériaux, notamment au travers de problématiques de « circularité » qui prend en compte les différents procédés par lesquels les matériaux en fin de vie sont collectés et introduits dans une nouvelle chaîne de fabrication. Le néologisme « bioéconomie circulaire » met l'accent sur la double préoccupation à prendre en compte : « ressource » et « fin de vie ».

Illustrons ici la problématique de la prise en compte de la fin de vie des polymères avec 2 exemples récents et différents :

- 1) les réseaux covalents adaptables ;
- 2) le recyclage enzymatique (biorecyclage).

1) Les réseaux covalents adaptables (CAN²¹) : faciliter

20. Polyuréthane sans isocyanate.
21. Covalent Adaptable Networks : Réseaux covalents adaptables.

la déconstruction et le remodelage en fin de vie

Dans le domaine des matières plastiques, on distingue deux grandes familles : les thermoplastiques, facilement recyclables mais avec des propriétés mécaniques limitées, et les thermodurcissables, qui sont performants mais que l'on ne peut pas facilement recycler et qui sont infusibles et insolubles.

Depuis une dizaine d'années a été développée une troisième famille de matériaux polymères, des réseaux covalents adaptables, une famille dans laquelle on va notamment trouver les « matériaux vitrimères²² » (Figure 10). Les CAN sont à base de réactions covalentes réversibles, par exemple entre des diènes²³ et des diénophiles²⁴, comme dans

22. Matériaux pouvant être refondus et remoulés comme le verre tout en conservant des propriétés mécaniques supérieures aux thermoplastiques.

23. Molécules comportant deux groupements alcène conjugués (du type $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$).

24. Molécules comportant souvent un groupement alcène et réagissant avec un diène.

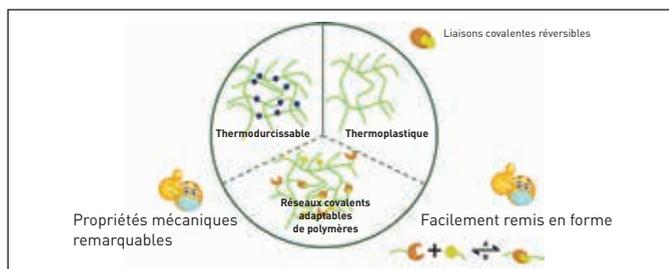


Figure 10

Illustration des CAN comme un nouveau type de polymères qui ont à la fois les avantages des thermoplastiques et des thermodurcissables.

le cas de la réaction de Diels Alder²⁵.

On peut par exemple utiliser des furanes, des composés obtenus par fermentation de cellulose ou d'hémicellulose, pour réaliser une chimie clic²⁶ (une technique récemment récompensée par le prix Nobel) où l'on va « clicker » un diène avec un diéophile et former un adduit²⁷. La température de la réaction conditionne la structure du produit de la réaction : on réalise ici une réaction de Diels-Alder de l'ordre de 60 °C. À une température un peu plus importante (de l'ordre de 120 °C), c'est la réaction inverse qui se produit avec une réaction dite de rétro-Diels-Alder (**Figure 11**). Ces stratégies pourront être

utilisées pour faire et défaire des structures avec des stimuli en fin de vie par exemple. On parle ici de stimuli thermiques mais ils peuvent être pH-métriques, photométriques, etc.

Tout cela ouvre des possibilités de déconstruction du matériau en fin de vie. Ces architectures vont contribuer à faciliter la circularité.

2) Développement du recyclage enzymatique

Il existe un certain nombre de types de recyclages (recyclage matière). Aux recyclages classiques, on peut aussi ajouter le recyclage biochimique avec une dégradation enzymatique contrôlée de la matière plastique en fin de vie, de manière à obtenir des synthons valorisables.

Prenons l'exemple d'un polyuréthane (PU) : il contient un certain nombre de fonctions différentes que l'on peut casser en fonction du type d'enzyme utilisé. Par exemple, avec un estérase on casse le groupement ester, en combinant l'amidase et l'estérase, on cassera le groupement

25. Réaction entre un diène et un diéophile pour former un cycle, réversible selon la température.

26. « Chimie clic » : type de réaction très sélective qui permet à deux molécules de se lier facilement (le terme clic évoque le bruit imaginaire du clipsage des deux molécules).

27. Adduit : produit unique d'une réaction d'addition entre deux molécules qui comporte tous les atomes initiaux mais liés différemment.

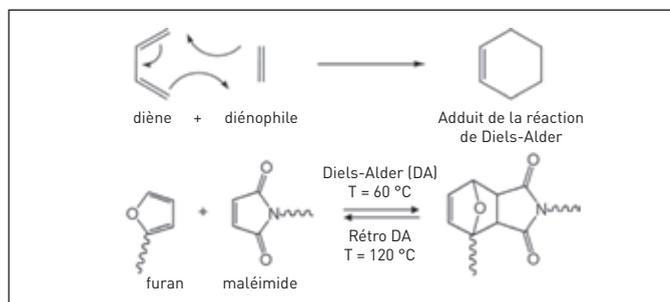


Figure 11

Réaction de Diels-Alder réversible selon la température.

uréthane²⁸, qui est pourtant un groupement chimique très robuste (ce qui est d'ailleurs une des raisons de son utilisation) (**Figure 12**).

Ces approches de dégradation enzymatique permettent d'envisager de déconstruire des produits compliqués tels que les mousses de polyuréthane qui sont infusibles et insolubles. On va faire une première étape avec des biotechnologies en utilisant des enzymes ciblées sur certaines fonctions des architectures polymères mais en préservant le groupement uréthane. Ceci va permettre d'obtenir un certain nombre

28. Groupement -NH-C(=O)-O- .

de molécules (de synthons) qui seront utilisées au cours d'une seconde étape de synthèse chimique pour fabriquer une seconde génération de polymères, par exemple ici des PU thermoplastiques. Ce procédé permet de préserver les groupements uréthanes sur les molécules afin d'obtenir une seconde génération de PU sans ajout d'isocyanate toxique dans un cycle durable (**Figure 13**).

Ces approches mixtes, combinant biotechnologie et chimie sont de plus en plus développées, notamment pour traiter la fin de vie des matériaux particulièrement résistants ou de mélanges de matières plastiques dans les déchets.

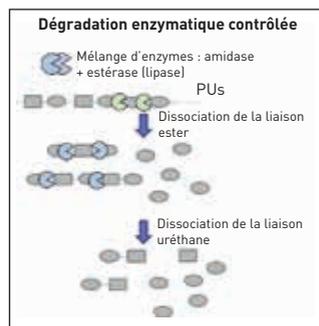


Figure 12

Action de l'estérase et de l'amidase sur le PU.

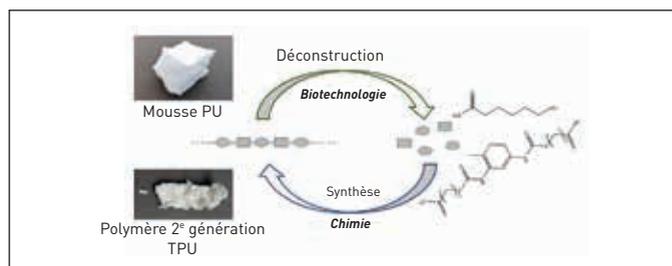


Figure 13

Processus et cycle biochimico-chimique de déconstruction-reconstruction du PU.

Conclusion : nouveaux besoins éthiques, nouvelle chimie et réponses aux attentes sociétales

Naguère portés au pinacle pour leurs incomparables propriétés et praticités, dénoncés ensuite pour leur incompatibilité avec l'environnement, les polymères sont l'exemple emblématique des rapports entre chimie et société. Par l'évoca-

tion de quelques exemples, ce chapitre montre quelques réponses du monde de la chimie dans le domaine des polymères : des inventions et avancées scientifiques adaptées aux dernières évolutions et attentes sociétales et environnementales.

Ce chapitre montre l'importance attachée aux polymères biosourcés. On a vu que des polymères issus de la biomasse peuvent remplacer ou s'associer aux matériaux fossiles existants. Ils peuvent aussi apporter de l'innovation avec de nouvelles architectures chimiques.

La nature biosourcée des matériaux n'est plus suffisante. Il s'agit aussi par exemple de limiter la toxicité des composés utilisés. Il faut aussi prévoir dès le design, dès l'origine du matériau, son adaptation aux attentes de « circularité ».

Ces approches restent ouvertes. Recherches fondamentales et appliquées permettent de développer des matériaux nouveaux tout en préservant l'environnement et la santé des consommateurs. Les polymères sont ici exemplaires d'une démarche qui concerne toute la chimie au service des citoyens pour un futur plus durable.