

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



Matières premières et nouvelles dépendances

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES
FONDÉES EN 1794

Publiées avec le soutien
de l'Institut MinesTélécom

N° 99
JUILLET 2020

UNE SÉRIE DES
**ANNALES
DES MINES**

FONDÉES EN 1794

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN : 1268-4783

Série trimestrielle • n°99 - juillet 2020

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGEJET), Ministère de l'Économie et des Finances
120, rue de Bercy - Télédéc 797 - 75572 Paris Cedex 12
Tél : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

François Valérian

Rédacteur en chef

Gérard Comby

Secrétaire général

Liliane Crapanzano

Correctrice

Myriam Michaux

Webmestre / Maquettiste

Membres du Comité de Rédaction

Pierre Couveinhes

Président du Comité de rédaction
Ingénieur général des Mines honoraire

Paul-Henri Bourrelrier

Ingénieur général des Mines honoraire, Association française pour la prévention des catastrophes naturelles

Mireille Campana

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Dominique Dron

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Pascal Dupuis

Chef du service du climat et de l'efficacité énergétique,
Direction générale de l'énergie et du climat, MTES

Jérôme Goellner

Chef du service des risques technologiques,
Direction générale de la prévention des risques, MTES

Jean-Luc Laurent

Ingénieur général des Mines honoraire

Richard Lavergne

Conseil général de l'Économie
Ministère de l'Économie et des Finances

Didier Pillet

Ingénieur général des Mines

Philippe Saint Raymond

Ingénieur général des Mines honoraire

Bruno Sauvalle

Ingénieur en chef des Mines, MINES ParisTech

Jacques Serris

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Claire Tutenuit

Déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (EPE)

François Valérian

Rédacteur en chef des Annales des Mines

Photo de couverture :

Extraction de terres rares dans la province de Jiangxi, Chine.

Photo ©Xinhua/ZUMA-REA

Iconographie

Christine de Coninck

Abonnements et ventes

COM & COM

Bâtiment Copernic - 20, avenue Édouard Herriot
92350 LE PLESSIS-ROBINSON

Alain Bruel

Tél. : 01 40 94 22 22 - Fax : 01 40 94 22 32

a.bruel@cometcom.fr

Mise en page : Nadine Namer

Impression : EspaceGrafic

Éditeur Délégué :

FFE - 15, rue des Sablons 75116 PARIS - www.ffe.fr

Fabrication : Aïda Pereira

aïda.pereira@belvederecom.fr - 01 53 36 20 46

Régie publicitaire : Belvédère Com

Directeur de la publicité : Bruno Slama - 01 40 09 66 17

bruno.slama@belvederecom.fr

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Matières premières et nouvelles dépendances

03

Introduction
Isabelle WALLARD

Une pression accrue sur les matières premières sous l'effet combiné des transitions énergétique et numérique des pays développés et du développement économique des autres pays

06

De la structuration des chaînes de valeur aux mécanismes de formation des prix : une analyse englobante des marchés des métaux de base
Patrice CHRISTMANN et Yves JÉGOUREL

19

Impact de différents scénarios énergétiques sur les matières premières et leur disponibilité future
Olivier VIDAL

24

L'importance des métaux rares pour le secteur des technologies de l'information et de la communication, le cas d'Orange
Samuli VAIJA et Éric PHILIPOT

Le recyclage ne suffira pas à répondre aux besoins

29

Illustration, à travers la légende classique des grains de blé placés sur un jeu d'échec, des limites incontournables de la croissance de la consommation des métaux et de la contribution du recyclage à leur approvisionnement
Jean-François LABBÉ

37

Le recyclage des cartes électroniques en France
Christian THOMAS

Les industriels français face aux risques qui pèsent sur leurs approvisionnements

41

Le CSF Mines et métallurgie et l'approvisionnement en métaux et matériaux stratégiques de l'industrie française
Christel BORIES

46

Les métaux critiques pour l'économie française
Gaétan LEFEBVRE

53

Les enjeux pour l'industrie française de son approvisionnement en titane : situation actuelle et analyses prospectives
Pierre-François LOUVIGNÉ

57

Ambition 2025 : la stratégie du Groupe Orange pour le développement d'un numérique plus sobre énergétiquement et plus économe en ressources et matériaux critiques
Philippe TUZZOLINO

60

Matières premières, criticités et axes stratégiques dans les industries de l'automobile
Gildas BUREAU

Les réponses des États et de la Commission européenne

74

La guerre des métaux rares ou la face cachée de la transition énergétique et numérique
Interview de Guillaume PITRON

76

La stratégie fédérale mise en place par les États-Unis pour sécuriser l'approvisionnement en minerais critiques de leurs industries
Alexis SAHAGUIAN, Matthieu FERNANDEZ et David KREMBEL

80

La consommation durable des ressources naturelles : un enjeu planétaire
Doris NICKLAUS et Dominique VIEL

84

La politique française des matières premières minérales non énergétiques
Rémi GALIN et Jean-François GAILLAUD

89

La stratégie européenne dans le domaine des matières premières
Gwenole COZIGOU

Hors dossier

93

Production d'hydrogène décarboné : la troisième voie
Laurent FULCHERI

101 Traductions des résumés

104 Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné par Isabelle WALLARD

Matières premières minérales et nouvelles dépendances

Introduction

Par Isabelle WALLARD

Ingénieure générale des Mines, Conseil général de l'Économie

Dix ans après la crise des terres rares des années 2010 et 2011, il est intéressant de faire le point sur les nouvelles dépendances en matières premières, métaux et minéraux, que font apparaître les transitions énergétique et numérique des pays développés, même si les conséquences de la pandémie de coronavirus sont encore difficiles à cerner à l'heure où ces lignes sont écrites.

La crise de 2011 est passée et les pénuries prédites à l'époque ne se sont pas concrétisées. Toutefois, la Chine reste le principal pays producteur des trois quarts des minéraux critiques qui figurent sur la liste publiée par la Commission européenne. Ce pays produit, par exemple, 94 % de la production mondiale estimée de gallium et environ 80 % de la production mondiale de tungstène et de terres rares... La Chine est le seul pays à disposer de l'intégralité de la chaîne de valeur des aimants permanents (de la mine à l'aimant), et plus de 90 % des terres rares utilisées dans les génératrices à aimants permanents des éoliennes (principalement du dysprosium et du néodyme) viennent de mines chinoises. Le poids de ce pays dans la production de ces matières premières lui permet donc, par le levier de sa politique commerciale, d'avoir toujours un effet significatif sur les prix et sur la disponibilité de nombreuses substances critiques pour l'industrie française et européenne.

La crise sanitaire mondiale du virus Covid-19 peut rebattre une partie des cartes, mais les recommandations des administrations, française et européenne, pour limiter la dépendance en minerais et métaux vis-à-vis de certains pays, restent d'actualité. Ainsi, le recyclage concourt à sécuriser nos approvisionnements, quel que soit le contexte. La pandémie peut toutefois mettre en évidence des fragilités supplémentaires dans les chaînes d'approvisionnement. Par exemple, si la situation se dégrade fortement dans certains pays d'Afrique ou en Amérique du Sud, il est possible de voir apparaître des tensions sur les approvisionnements en cuivre, en cobalt, en alumine... D'autant plus que l'économie chinoise en redémarrant va créer une tension supplémentaire sur les stocks.

Yves Jégourel et Patrice Christmann dressent un panorama mondial des marchés des métaux de base et décrivent la structuration complexe des chaînes de valeur liées aux matières premières minérales non énergétiques, des ressources géologiques aux produits finaux, en passant par la mine et la métallurgie. L'exemple des flux commerciaux mondiaux du cuivre (sous ses diverses formes) met en évidence de manière flagrante à la fois la stratégie hégémonique de la Chine, dans une démarche d'intégration verticale, et la dépendance de l'Europe.

Olivier Vidal décrit l'impact de différents scénarios énergétiques sur la consommation et la disponibilité future de matières premières telles que le fer, l'aluminium, le cuivre, le nickel et le lithium, aux niveaux mondial et français. L'impact des scénarios les plus ambitieux en termes d'énergies renouvelables, sur les besoins en aluminium, cuivre, nickel et lithium, est particulièrement frappant. C'est une démonstration de plus que les transitions énergétique et numérique des pays développés accélèrent la croissance de la demande d'un certain nombre de matières premières non énergétiques, et viennent renforcer les effets du développement économique du reste du monde.

Samuli Vaija et Éric Philipot nous montrent l'importance des métaux rares pour le secteur des technologies de l'information et de la communication, à partir de l'exemple de la société Orange. Des travaux internes réalisés au sein d'Orange Labs ont mis en évidence la présence de 18 matériaux critiques dans la composition des équipements réseaux achetés par la société, parmi lesquels le cobalt, le gallium, le germanium et les platinoïdes.

Le découplage entre croissance économique et croissance des besoins en ressources naturelles apparaît encore lointain. La deuxième partie de ce numéro aborde la problématique du recyclage, principal levier de ce découplage tant espéré, mais qui n'apportera au mieux qu'une partie de la solution.

Jean-François Labbé nous montre en effet les limites incontournables de la contribution du recyclage, qui ne peut pas être suffisant pour approvisionner une économie dont les besoins en matières premières croissent, même avec une croissance faible. Même optimal, même à 100 %, le recyclage ne peut pas rendre la croissance durable, ni permettre de nous passer des ressources naturelles primaires.

Christian Thomas dresse ensuite le bilan, mitigé, et les perspectives du recyclage des cartes électroniques en France. Composants essentiels des véhicules hors d'usage (VHU) et des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), celles-ci sont riches en métaux précieux et critiques (or, palladium, étain, tantale, cobalt...). La mise en place de dispositifs réglementaires sur le traitement des DEEE et des VHU a permis d'améliorer leur collecte et leur premier traitement. Mais la France, qui a entrepris un effort de R&D important pour extraire et purifier les métaux contenus dans ces déchets particulièrement difficiles à traiter, ne dispose cependant pas encore d'une industrie métallurgique suffisante, ni d'acteur industriel de taille significative pour qu'une part notable du recyclage des cartes électroniques puisse se faire sur le territoire national.

La production minière nationale ainsi que la production secondaire de matières issues du recyclage restent très minoritaires par rapport aux besoins des industriels français, qui, à l'exception notable du secteur BTP, importent la quasi-totalité des matières premières minérales qu'ils consomment. La troisième partie de ce numéro leur est consacrée.

Depuis quelques années, la criticité des matières premières non énergétiques (métaux et métaux rares essentiellement), fait l'objet d'études et de publications nationales, européennes et internationales. En France, c'est le COMES (Comité pour les métaux stratégiques) qui, avec l'aide du BRGM, analyse régulièrement les dépendances des principaux secteurs industriels. Gaëtan Lefebvre nous présente dans ce numéro l'approche méthodologique qui a permis de définir la liste des métaux critiques pour l'économie française⁽¹⁾.

Le cas du titane, décrit par Pierre-François Louvigné, est emblématique. Ce métal, irremplaçable pour de nombreuses applications industrielles de haute technologie, telles que l'aéronautique, l'espace, le nucléaire, l'armement, la pétrochimie, le médical..., fait l'objet d'une veille économique et géostratégique soutenue par des grands groupes industriels français et les services de l'État concernés par les problématiques d'accès aux matières premières. Une telle démarche gagnerait à être reproduite pour d'autres substances critiques.

Les grandes entreprises, comme Orange ou les constructeurs automobiles, sont davantage conscientes des enjeux d'approvisionnement qu'il y a dix ans et mettent progressivement en place des stratégies qui impliquent leurs instances de gouvernance au plus haut niveau. Gildas Bureau pour la PFA (l'industrie automobile française) et Philippe Tuzzolino pour Orange nous décrivent les méthodes de travail et les objectifs de ces sociétés pour prendre en compte la criticité de leurs approvisionnements spécifiques et les sécuriser.

La dernière partie de cette revue est consacrée aux réponses de la Commission européenne et de la France pour protéger leurs intérêts économiques et leur souveraineté. Sont également évoquées les politiques mises en place par deux pays particulièrement actifs face à cette problématique, la Chine et les États-Unis.

Dans son interview, Guillaume Pitron nous explique comment la Chine continue à organiser sa domination mondiale du marché des terres rares. Il évoque également le Japon qui a pris conscience très tôt des enjeux. Rappelons par ailleurs l'avance prise par le Japon dans l'exploration des grands fonds marins à la recherche de nouvelles productions de différents métaux.

Depuis fin 2017, les États-Unis ont pris un certain nombre d'initiatives gouvernementales dans le but de sécuriser l'approvisionnement de leur industrie en minerais et métaux critiques et, en particulier, contrebalancer le poids prépondérant des importations chinoises de terres rares. Alexis Sahaguan et ses co-auteurs nous en rappellent l'historique. Les principaux axes de cette nouvelle stratégie sont au nombre de trois : il s'agit de favoriser la coopération internationale en matière de production de substances critiques, d'encourager et de relancer une production minière nationale, et de se donner un outil et des moyens financiers. C'est ainsi qu'une nouvelle agence a été créée, la United States Development Finance Corporation (USDFC), qui peut notamment investir dans des projets miniers en dehors des États-Unis. Cette agence est pleinement opérationnelle depuis décembre 2019.

La politique française des matières premières minérales non énergétiques et ses principales évolutions depuis les années 1980, sont décrites par Rémi Galin et Jean-François Gaillaud. La dépendance de la France pour ce qui concerne les métaux n'est pas nouvelle, mais la vulnérabilité de nos filières industrielles d'excellence, la multiplication des substances ou la pression sur la planète sont autant de nouveaux paramètres qui nécessitent d'inscrire l'approvisionnement en ressources minérales dans un modèle économique plus vertueux qui est celui de l'économie circulaire. La France s'est dotée d'un cadre stratégique dynamique à travers le plan de programmation des ressources. De plus, elle peut s'appuyer sur l'expertise opérationnelle des Comités stratégiques de filières du CNI, notamment celui de la filière Mines et métallurgie.

Dominique Viel et Doris Nicklaus nous exposent les travaux du groupe d'experts sur les ressources minérales de la transition bas-carbone, qui serviront à préparer le futur plan de programmation des ressources nécessaires à cette transition d'ici à la fin de l'année 2021. La crise économique liée à la pandémie du coronavirus met l'accent sur les fragilités de nos

(1) Les métaux critiques sont des matières d'une grande importance économique pour le périmètre géographique considéré. Il sont en effet essentiels pour des secteurs tels que la mobilité électrique, les batteries, les énergies renouvelables, la pharmacie, la Défense et l'aéronautique, les applications numériques... et présentent en même temps un risque élevé de rupture d'approvisionnement.

approvisionnement et amènent les deux auteures précitées à s'interroger sur les enjeux de la relocalisation en France ou en Europe d'activités industrielles, y compris minières et de première transformation des métaux.

Ces dernières années, l'Union européenne a mis en place toute une série d'initiatives et des lignes de financement ; elle continuera à le faire, mais en privilégiant une approche qu'elle souhaite plus coordonnée et plus largement ouverte à la concertation, avec la participation de tous les acteurs concernés aux niveaux européen, national et régional. Pour Gwenole Cozigou, la Commission européenne doit poursuivre une approche plus géostratégique en définissant des partenariats internationaux pour faciliter ou garantir l'accès à des matières premières. La Commission européenne souhaite également que les pays européens utilisent davantage leurs ressources domestiques, primaires et secondaires (issues du recyclage).

Certes, le contexte économique mondial de 2020 est difficile. Déjà au début de cette année, l'Institut Cyclope annonçait pour la deuxième année consécutive un tassement global des cours des matières premières sur fond de stagnation industrielle mondiale. À l'époque, cette évolution moyenne recouvrait toutefois de fortes disparités selon les matières premières et les métaux. Le ralentissement de la demande mondiale et la mise à l'arrêt de certains secteurs industriels liée à la pandémie du coronavirus vont sans doute renforcer ces tendances évaluées en début d'année. La Banque mondiale anticipe fin avril 2020⁽²⁾ une baisse marquée des prix de l'énergie et des métaux (de base) à cause de « chocs sur le marché des matières premières touchant simultanément la demande et l'offre... ». Elle estime que cette baisse pourrait atteindre 13 % en 2020 pour les métaux, avant une lente remontée en 2021.

Dans ce contexte et en l'absence de flambée des prix des matières premières, la dépendance de la France et de l'Europe vis-à-vis de certains pays, la Chine en particulier pour ce qui concerne l'approvisionnement en minéraux et métaux des secteurs économiques, nous interpelle toujours. La pandémie du coronavirus a de plus favorisé la prise de conscience par le grand public de la fragilité de certains circuits d'approvisionnement. Des recommandations, des ébauches de solutions, sont esquissées par différents auteurs dans cette revue. Nous devons plus que jamais nous pencher sur cette question, et nous devons certainement un jour nous interroger sur la pertinence de nos modes de consommation.

(2) "Commodity Markets Outlook", a World Bank Report, April 2020.

De la structuration des chaînes de valeur aux mécanismes de formation des prix : une analyse englobante des marchés des métaux de base

Par Patrice CHRISTMANN

Consultant et chercheur indépendant, société Krysmine

Et Yves JÉGOUREL

Maître de conférences à l'Université de Bordeaux, directeur-adjoint de Cyclope et Senior Fellow au Policy Center for the New South

Les matières premières minérales non énergétiques sont des intrants indispensables au fonctionnement des sociétés humaines. Cet article présente la structuration des chaînes de la valeur complexes et globalisées qui sont à l'origine de la production de la plupart des biens et services que les sociétés contemporaines utilisent au quotidien et illustre cette présentation par un descriptif des principaux flux mondiaux d'échange du cuivre, depuis la production et le négoce mondial des concentrés de minerai de cuivre jusqu'aux flux de cuivre contenus dans les biens de consommation objets d'un négoce mondial. Les produits miniers (concentrés) et métallurgiques (métaux raffinés, alliages) font l'objet d'un intense négoce international selon des modalités diversifiées, au sein duquel les principaux acteurs, souvent, ne sont pas les sociétés minières ou métallurgiques. Ces mécanismes de commercialisation, les divers processus de fixation des prix liant les acteurs industriels miniers ou métallurgiques aux industries manufacturières en aval de la chaîne de la valeur, le rôle central joué à cet égard par les négociants en matières premières, ainsi que les fonctions des marchés de produits dérivés sont présentés dans la seconde partie de cet article.

La globalisation des chaînes de la valeur, la standardisation des produits commercialisés et une définition des prix dépendant des spécifications techniques des matières premières ont permis une production de plus en plus massive des biens de consommation et services au cours de la période de soixante-dix ans ayant succédé à la Seconde Guerre mondiale. Contraignant tous les producteurs à maintenir, sous peine de faillite, leurs coûts de production en-dessous des prix, très volatils, du marché, ce modèle entraîne de graves externalités environnementales et sociales, dont les principales sont :

- les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie minière ⁽¹⁾, aujourd'hui estimées à 16 % des émissions

(1) Cette expression désigne l'ensemble des activités d'exploration minière, d'extraction et de transformation de matières premières minérales brutes en produits commercialisables servant généralement d'intrants pour des activités manufacturières en aval. Cette définition inclut, dans le cas des métaux, la métallurgie et le raffinage.

mondiales ;

- la production de volumes énormes de déchets solides, se chiffrant en milliards de tonnes, dont certains présentent des risques pour l'homme et l'environnement pendant des siècles après l'arrêt des activités de production de minéraux ou de métaux ;
- la multiplication des conflits opposant les populations riveraines affectées par les projets miniers aux entreprises les développant.

Les menaces d'effondrement de l'écosystème mondial et de nombreux écosystèmes locaux liées aux diverses activités humaines rendent impératifs le développement d'une gouvernance mondiale des ressources minérales, avec une intégration des externalités dans les prix, et la reconnaissance par les marchés des produits reposant pour leur fabrication sur une démarche transparente et vérifiable de développement durable.

Structuration des chaînes de la valeur dépendant des matières premières minérales ⁽²⁾

Les matières premières minérales sont des intrants indispensables à la plupart des activités humaines, notamment à la production d'innombrables produits et services, dans des domaines aussi variés que l'agriculture, l'aéronautique, le bâtiment et les travaux publics, la Défense, la production et la distribution de l'électricité et, plus généralement, le domaine de l'énergie, les technologies de l'information et de la communication, les transports de toutes natures, la santé ou les technologies spatiales. Sans elles, les services et les produits de ces domaines n'existeraient tout simplement pas (Christmann, 2016). Les premiers usages des matières premières minérales remontent aux origines de l'humanité, lorsque nos lointains ancêtres découvrirent les services que pouvaient leur rendre, pour la chasse ou la guerre, des pierres grossièrement taillées. L'industrie minérale était née, devenant ainsi la plus ancienne des industries humaines.

Elle allait se développer et se complexifier au cours de l'histoire, les grandes découvertes de la physique et de la chimie, et les innovations technologiques qu'elles ont permises (par exemple, la machine à vapeur ; la dynamite et autres explosifs modernes ; la production électrique industrielle ; le machinisme industriel, l'automatisation et la robotisation ; les technologies de l'information et de la communication, dont l'Internet des objets ; les procédés de traitement des minerais et d'extraction/raffinage des métaux) ont conduit à la croissance exponentielle de la production mondiale des minéraux et métaux, qui est particulièrement nette à partir de la fin de la Seconde Guerre mondiale (voir la Figure 1 de la page suivante). Les innovations technologiques, qui se sont succédé à un rythme de plus en plus rapide, ont également permis la production de quantités sans cesse croissantes de biens de consommation. La croissance de la demande, et donc de la production de matières premières minérales, plus rapide que la croissance démographique mondiale, souligne l'intensité matérielle rapidement croissante de l'économie mondiale, cette croissance ayant lieu essentiellement dans les pays les plus développés, dont le stock *per capita* en métaux usuels (acier, acier inoxydable, aluminium, cuivre, fer, plomb, zinc...) est d'un ordre de grandeur 10 fois supérieur à celui observé dans les pays les moins développés (GIER, 2010).

L'existence de très nombreux produits et services dépendant de la disponibilité des minéraux et/ou des métaux implique des chaînes de la valeur complexes et globalisées, que décrivent de manière synthétique, et donc simplifiée, les Figures 2 de la page suivante (principaux éléments d'une chaîne de la valeur impliquant un ou plusieurs métaux) et 3 de la page 11 (géographie d'une chaîne de la valeur : cas du cuivre, s'appuyant sur l'étude de Tercero Espinoza *et al.* (2016)). Les chaînes de la valeur

sont à la fois :

- des étapes liées entre elles par des flux, qui ont pour aboutissement la production d'un produit fini (par exemple, une voiture, un scanner médical ou un *smartphone*) ou d'un service (par exemple, dans le domaine de la santé, des services nécessitant la mise en œuvre de nombreux biens matériels) ;
- et des segments, chacun étant caractérisé par des savoirs, des savoir-faire et, souvent, par des acteurs économiques spécifiques.

La localisation des premières étapes, numérotées 1 à 5 dans la Figure 2, est conditionnée, d'une part, par la géologie, car elle détermine la localisation des gisements, et, d'autre part, par l'attractivité de l'État auprès des investisseurs. Cette attractivité est déterminée par de nombreux facteurs comme le montre le classement annuel des pays et États (dans le cas de pays à structure fédérale) publié par l'institut canadien Fraser (Stedman *et al.*, 2020).

L'histoire géologique de la planète se caractérise par une grande hétérogénéité dans la distribution géographique des concentrations économiquement exploitables de métaux ou de minéraux (= gisements), cette distribution étant différente selon les métaux ou les minéraux en fonction de la nature des phénomènes géologiques, très divers (Dill, 2009 ; Jébrak *et al.*, 2008), qui ont conduit à la formation des gisements.

La localisation des étapes suivantes est beaucoup plus diversifiée, car indépendante de la géologie mais conditionnée par la compétitivité économique des sites de production (disponibilité et coût de la main-d'œuvre et des intrants, dont le prix de l'énergie ; acceptabilité sociale (ou soumission organisée par des régimes autocratiques)), souvent dans une optique de profitabilité à court terme et au mépris du concept de développement durable. Les acteurs de ces différents segments sont des plus divers :

- Segment 1 : reconnaissance à grande échelle des ressources géologiques : les acteurs quasi-exclusifs de ce segment sont les États, à travers leurs services géologiques nationaux ou régionaux. Cette connaissance de leur patrimoine géologique est utile aux autorités pour élaborer leurs stratégies de développement économique et d'aménagement de leur territoire. Elle est aussi un outil de promotion indispensable pour attirer les investisseurs. Les grandes sociétés minières, actives dans les segments 2 et 3, utilisent souvent les données publiques pour effectuer leurs propres analyses du potentiel minéral de régions s'étendant sur plusieurs pays en recourant à des techniques élaborées de traitement des données numériques (utilisation de l'intelligence artificielle, modélisations et analyses prédictives...) ;
- Segments 2 et 3 : exploration détaillée et développement de projets miniers (aussi appelée « exploration avancée » dans le monde anglo-saxon). Les activités liées à ces segments visent à identifier des concentrations minérales d'intérêt économique potentiel, puis, si la découverte présente un tel intérêt, à engager la réalisation de l'ensemble des études permettant de démontrer la faisabilité du projet minier envisagé.

(2) Bien que le champ de cet article soit limité aux matières premières minérales non énergétiques, l'analyse relative au développement durable développée dans la seconde moitié de cet article, peut largement s'appliquer aux ressources minérales énergétiques.

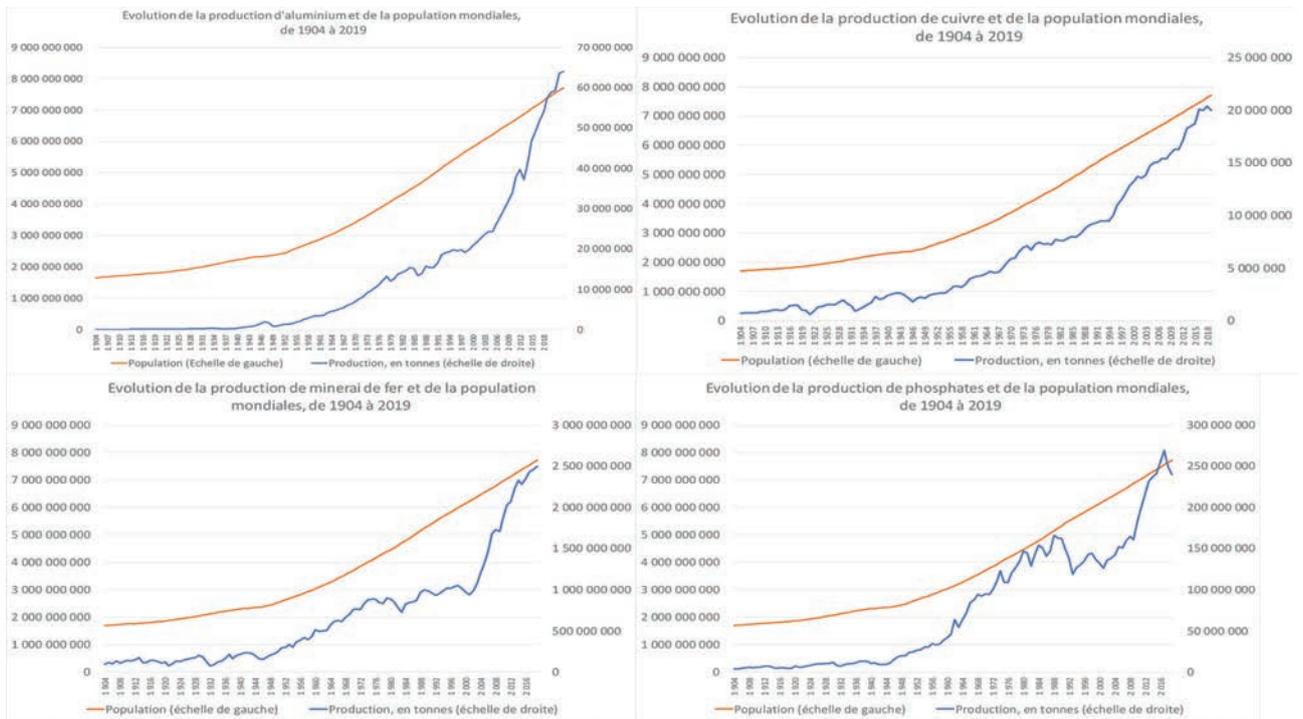


Figure 1 : Évolution de la production mondiale d'aluminium (en haut, à gauche), de cuivre contenu dans la production minière (en haut, à droite), de minerai de fer (en bas, à gauche) et de phosphates (en bas, à droite) entre 1904 et 2019 (sources : United States Geological Survey (USGS, données de production) ; Scott Manning et Nations Unies (données démographiques)).

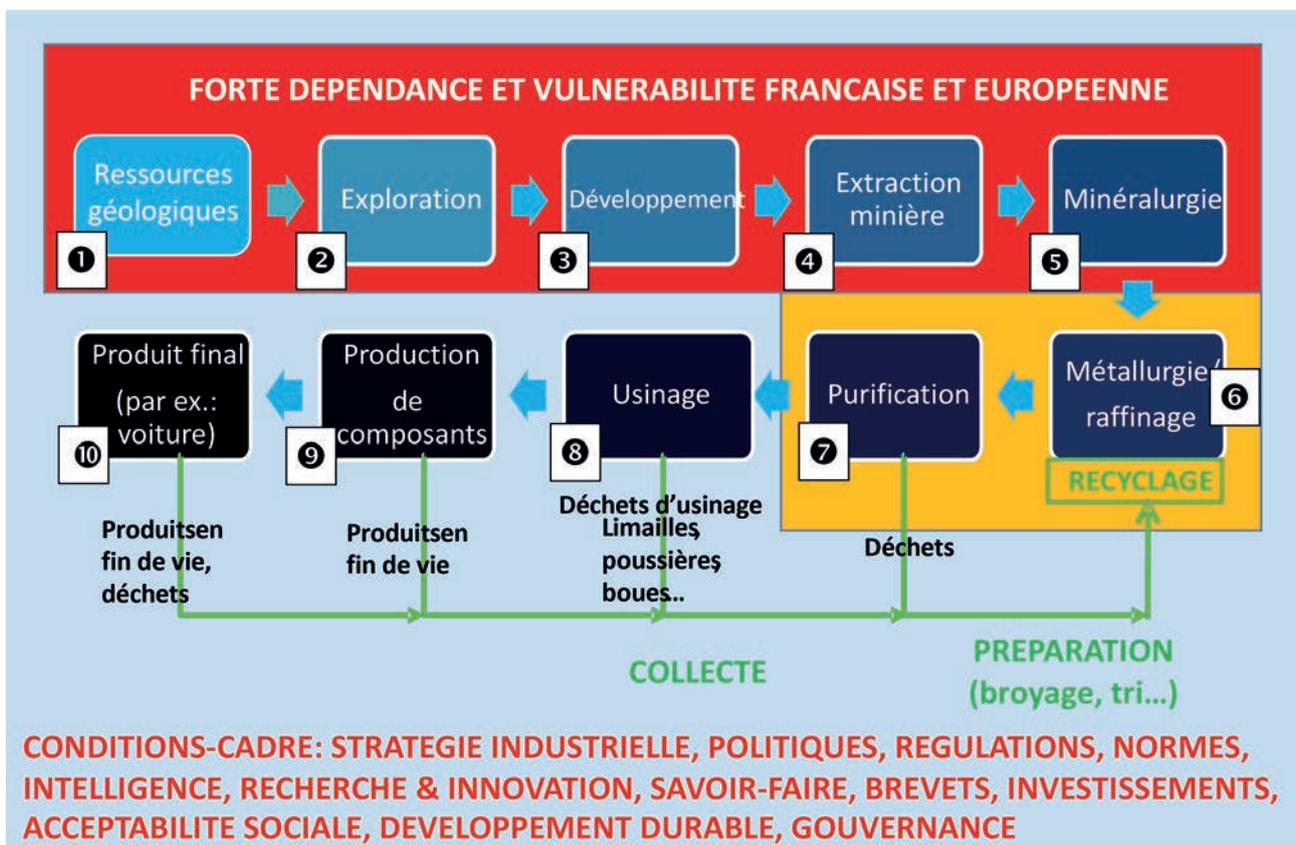


Figure 2 : Représentation schématique d'une chaîne de la valeur dépendant de la production de métaux.
 NB : Les étapes 1 à 5 (cadre rouge) sont sous-représentées au sein de l'Union européenne par rapport à sa consommation, d'où une forte dépendance par rapport aux importations et une soumission accrue aux aléas géopolitiques liés à la production et aux exportations par des pays producteurs de certaines matières premières jugées critiques pour l'UE (Commission européenne, 2017). Cette dépendance est un peu moins élevée pour les étapes 6 et 7, l'Union européenne disposant d'industries métallurgiques plus développées. Ces dernières jouent également un rôle déterminant dans le recyclage des métaux.

Ces deux étapes comportent d'importants risques économiques : en effet, peu de projets (moins de 1 %) d'exploration aboutissent à la mise en production d'une mine dont l'exploitation sera rentable. En 2019, selon le panorama de l'exploration minière mondiale ⁽³⁾ publié par Standard & Poor's, les principaux acteurs de ces deux segments de la chaîne de la valeur sont les grandes sociétés minières multinationales, essentiellement anglo-saxonnes (51 % des 9,8 Mds \$US d'investissements recensés en 2019), lesquelles recherchent essentiellement des extensions des gisements connus. Les États sont beaucoup plus rarement actifs sur ces segments, leurs activités se limitant le plus souvent à l'exploration d'indices prometteurs (segment 2), un effort supplémentaire consenti en vue d'attirer les entreprises privées. Ces sociétés figurent également parmi les principaux opérateurs des segments 4 et 5 et, plus rarement, des segments 6 et 7. Les segments 2 et 3 se distinguent aussi par la présence d'entreprises de très petite taille, souvent dénuées d'activités de production, les juniors minières. Elles représentent 11 % des investissements réalisés dans ces segments ; on en dénombre plus de 2 000 à l'échelle mondiale. Le plus souvent, ces sociétés financent leurs activités par l'émission d'actions cotées sur des bourses spécialisées dans le financement de ce type de sociétés (par exemple, Toronto et Vancouver au Canada, Sidney en Australie). S'apparentant à du capital-risque, elles peuvent être la source de très fortes plus-values en cas de découverte importante. Plus rarement, ces sociétés sont financées par des capitaux privés au travers de sociétés ou de fonds de capital-investissement (« *private equity* »).

- Segments 4 et 5 : extraction minière et minéralurgie. Il s'agit de l'ensemble des activités liées à l'extraction des ressources minérales brutes du sous-sol, qui, dans la plupart des cas, sont ensuite soumises à un ensemble de traitements physiques et/ou chimiques et/ou biologiques nécessaires pour aboutir à :
 - un produit directement commercialisable dans le cas des minéraux industriels (par exemple, du graphite industriel avec une certaine forme, une taille et un degré de pureté des paillettes, ou du talc présentant une granulométrie et un degré de pureté et de blancheur spécifiques),
 - un concentré de minéraux métallifères extraits du minerai répondant à des spécifications, notamment en termes de teneurs maximales en éléments pénalisants (par exemple, l'arsenic ou le mercure). Ces concentrés peuvent être des produits marchands vendus à des entreprises métallurgiques (étape 6).

Dans le domaine de la production des minerais, sources de métaux, et de certains minéraux industriels (à l'instar des phosphates ou de la potasse), ces segments sont dominés par de grandes entreprises fortement capitalisées sur les marchés boursiers, souvent multinationales. Mais on y trouve également de petites et moyennes entreprises

(PME), des exploitations artisanales, souvent informelles ou illégales. À la fin 2019, les cinquante plus grandes entreprises minières mondiales cotées en bourse ⁽⁴⁾ avaient une valeur boursière proche d'un trillion de \$US, les sept principales sociétés représentant environ 50 % de cette capitalisation. Plus de la moitié des entreprises cotées avaient leur siège en Australie (32 % du total de la valeur boursière), au Canada (14 %) ou aux États-Unis (11 %), les entreprises chinoises ne représentant que 7 % de cet ensemble. Cependant ces statistiques sont trompeuses, car de nombreuses entreprises minières chinoises sont des entreprises publiques non cotées en bourse.

Les PME jouent un rôle important dans la production de certains matériaux de construction (sable et gravier, argiles, enrochements et pierres ornementales). Les activités artisanales, souvent informelles voire illégales, concernent la production de matières premières à forte valeur à la tonne, exploitables sans exiger d'investissements autres que l'achat d'équipements rudimentaires, et commercialisables sans nécessiter des traitements complexes préalables (notamment l'or, le minerai de tantale ou d'étain, et certains minerais de cobalt, ainsi que certaines pierres précieuses). L'activité artisanale, dont le moteur est la pauvreté, est une source de revenus pour plusieurs dizaines de millions de personnes vivant dans des pays pauvres (GIER, 2020). Le secteur artisanal informel produirait 10 % de l'or mondial, 15-20 % des diamants, 80 % des pierres gemmes de couleur, et 20-25 % de l'étain et du tantale.

- Segment 6 : métallurgie et raffinage. Ce segment est caractéristique de la production de métaux. Il s'agit de l'ensemble des procédés physiques, chimiques et/ou biologiques nécessaires à l'extraction du métal ou des métaux contenus dans les concentrés produits au cours de l'étape 5. Nombre de minerais comportent un métal principal (par exemple, l'aluminium, le cuivre, le nickel, le plomb ou le zinc) et divers autres métaux associés en tant que sous-produits, qui ne peuvent être récupérés qu'au cours de cette étape : par exemple, le gallium lors de la production de l'alumine, étape obligatoire dans la production de l'aluminium, ou l'indium lors de la production du zinc. Le raffinage est l'ensemble des procédés permettant de purifier le métal produit grâce à un processus métallurgique afin de répondre aux cahiers des charges normalisés appliqués aux différents métaux par les marchés mondiaux *ad hoc*. Métallurgie et raffinage sont généralement des opérations réalisées en un même lieu afin de réduire les coûts de manutention et de transport. La localisation des installations est souvent indépendante de celles des étapes 4 et 5 ; les acteurs économiques sont donc souvent différents, la situation variant selon les métaux : les acteurs de la sidérurgie ou de la production sont très différents de ceux de la production de minerais et de concentrés de fer, alors que certaines des très grandes mines de cuivre, de nickel, de plomb ou de zinc, du fait des tonnages produits, sont en capacité d'alimenter des fonderies qui leur sont géographiquement associées et exploitées par les mêmes entreprises.

(3) Basé sur l'analyse des données techniques et économiques des sociétés ayant accepté de les publier, ce qui exclut les entreprises financées sur fonds privés (« *private equity* ») ou domiciliées dans des États, dans lesquels prédomine l'opacité des données financières et techniques (notamment la Chine).

(4) <https://brasilminingsite.com.br/top-50-biggest-mining-companies/>

Lorsqu'elles sont indépendantes des entreprises minières intervenant au niveau des étapes 4 et 5, les entreprises métallurgiques peuvent acheter les concentrés dont elles ont besoin soit par le biais des contrats commerciaux à court terme (*spot*) qu'elles renouvelleront périodiquement en ayant éventuellement recours à des négociants (*traders* physiques) ou à des courtiers (*brokers*) spécialisés, soit dans le cadre de contrats d'enlèvement à long terme conclus avec ces mêmes entreprises minières. Leur modèle économique peut également être fondé sur le travail à façon pour des entreprises minières qui leur fournissent les concentrés et paient, selon un barème, pour la métallurgie et le raffinage de métaux qui leur sont ensuite restitués.

Certaines entreprises métallurgiques ont des activités de fabrication de semi-produits relevant de l'étape 8.

Pour certains métaux (notamment le chrome, le lithium, le manganèse, le nickel, le silicium, le titane ou le vanadium), la production de métal pur n'est pas ou n'est que peu développée, car leurs débouchés commerciaux sont soit des sels (carbonate ou hydroxyde de lithium, par exemple), soit des alliages (ferrochrome, ferronickel, ferromanganèse ou ferrovanadium). La demande des marchés évolue de manière continue en fonction des innovations technologiques intervenant en aval (segments 8 à 10), lesquelles nécessitent des intrants dérivés de matières premières minérales adaptés à leurs besoins.

- Segment 7 : la purification. Les métaux nécessaires à la production de composants électroniques, par exemple le gallium, exigent une ultra-purification pour atteindre une pureté de 99,9999%, voire de 99,99999 % (1 g ou 0,1 g d'impuretés résiduelles par tonne), justifiant la mise en œuvre de cette étape supplémentaire, dont les acteurs sont de rares sociétés ultraspécialisées, généralement différentes des précédentes. Cette étape est absente lors de la production des métaux ou des alliages usuels, que sont l'acier, le cuivre, le plomb ou le zinc.
- Segments 8 à 10 : ils forment l'aval industriel des produits de l'industrie minérale, avec sa myriade de produits finis et de services impliquant une organisation complexe et géographiquement très diversifiée de la production. La science des matériaux, et les nombreux brevets qui en découlent, sont le moteur commun des progrès enregistrés depuis l'étape de la métallurgie à celle du raffinage, une adaptation permanente qui est nécessaire pour répondre aux besoins du lointain aval industriel. Les performances des matériaux jouent un rôle clef dans l'innovation industrielle et les performances des produits finis. La science des matériaux joue, quant à elle, un rôle déterminant dans le développement des performances (par exemple, efficacité énergétique, taux de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, puissance de calcul des micro-processeurs) de nombreux produits.

L'approvisionnement des industries des segments 8 à 10 peut se faire de nombreuses manières. Il peut se faire, selon la nature des matières premières minérales considérées, par des achats ponctuels (marché *spot*) ou sur la base de contrats à long terme conclus avec des sociétés

minières, un cas fréquent dans le domaine des matériaux de construction et les minéraux industriels, ou *via* des maisons de négoce, qu'il s'agisse de Glencore, Koch Metals, Mitsui ou Trafigura – parmi tant d'autres exemples – ou des courtiers spécialisés, dont le rôle économique est cependant bien plus réduit. La Figure 3 de la page suivante, dérivée de Tercero Espinoza *et al.* (2016), représente la cartographie des principaux flux mondiaux liés au cuivre. Elle montre la localisation, en 2014, pour les flux majeurs (> 100 kt de cuivre contenu), des zones géographiques concernées par :

- la production minière (voir la Figure 3.1 – chiffres indiqués en rouge), aboutissant à la production de concentrés de cuivre (étapes 4 et 5) et à l'exportation d'une part importante de cette production, notamment vers la Chine, un pays relativement mal doté en ressources en cuivre, bien qu'étant le leader mondial de la métallurgie et du raffinage de ce métal. Pour mémoire, en 2014, la production mondiale de cuivre contenu dans les minerais produits était de 18,4 Mt ;
- l'exportation et l'importation (voir la Figure 3.2) de cuivre métal (produit lors de l'étape 6), la Chine étant là aussi le premier importateur mondial ;
- l'exportation (voir la Figure 3.3) de produits semi-finis en cuivre, ou en alliages à base de cuivre. Elle ne représente que des flux assez modestes par rapport à la production minière de cuivre ou de cuivre métal ;
- l'exportation de cuivre (voir la Figure 3.4), ou d'alliages de cuivre, contenus dans des produits exportés, par exemple le bobinage en cuivre de moteurs électriques de machines à laver ou le cuivre contenu dans les transformateurs d'alimentation de nos ordinateurs portables. Cette activité montre la puissance manufacturière de la Chine : le cuivre contenu dans les exportations de biens de consommation de l'UE ou de l'Amérique ne représentent pas 10 % des exportations chinoises.

Ces figures montrent clairement la stratégie industrielle de la Chine qui vise, au niveau d'un pays, à créer une véritable intégration verticale allant de l'acquisition de productions minières et métallurgiques jusqu'à leur transformation en biens manufacturés à forte valeur ajoutée. Cette intégration ne se concrétise pas par l'existence d'un grand groupe industriel, mais s'opère grâce à une forte structuration, par l'État, à travers le financement des investissements, par :

- des prêts publics aux entreprises industrielles,
- un effort massif dans l'enseignement supérieur et la recherche dans les technologies innovantes et les matériaux qui sont nécessaires à leur développement,
- et un système complexe de règles restreignant les exportations de métaux non transformés (Korinek et Kim, 2013).

Ce mode d'organisation, piloté par l'État depuis plusieurs décennies, contraste fortement avec la dépendance de l'Union européenne (UE) et des autres économies de type libéral par rapport à des importations de matières premières et des productions industrielles qu'elles maîtrisent de moins en moins. L'UE, mosaïque fragile d'États aux intérêts tantôt divergents, tantôt concurrents, ne dispose

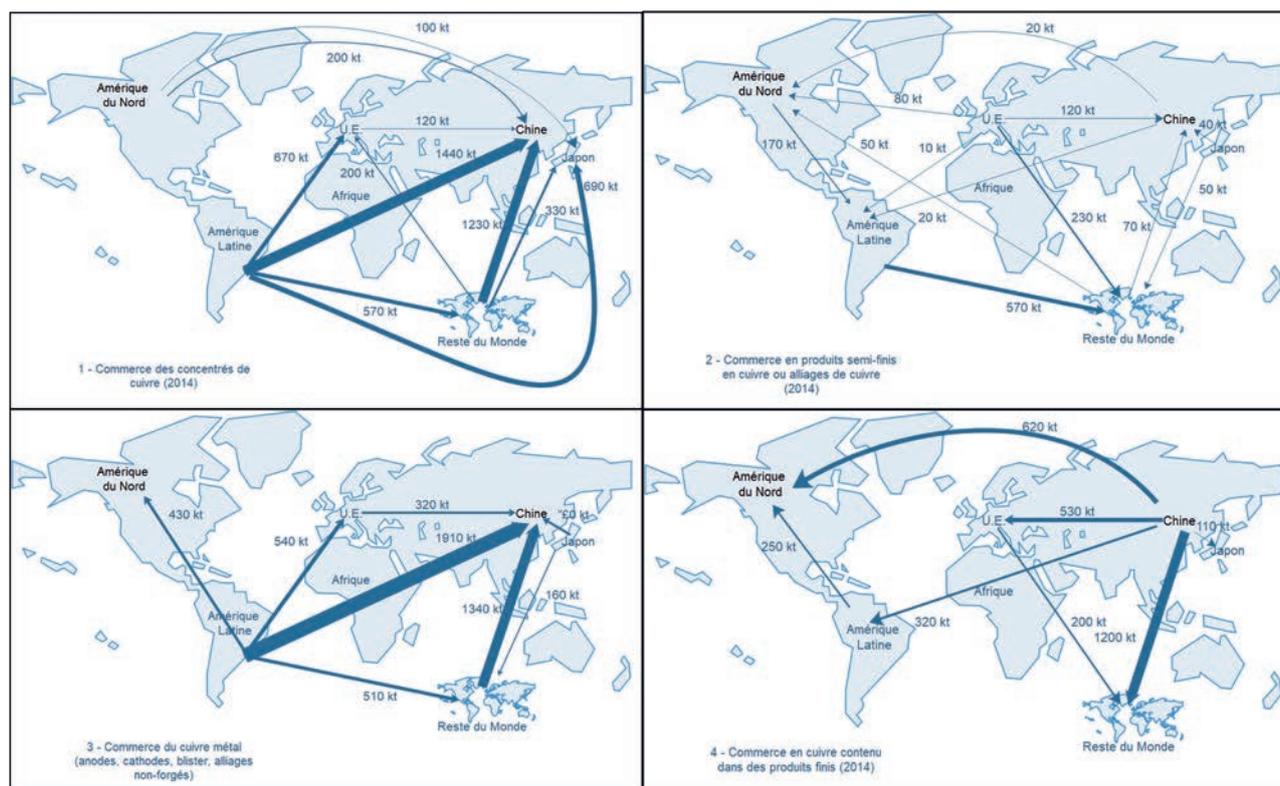


Figure 3 : Représentation simplifiée des flux commerciaux mondiaux de cuivre (d'après Tercero Spinoza et al. (2016)). Les chiffres en rouge de la carte n°1 indiquent les productions minières ; les chiffres en bleu, les flux échangés (ensemble des cartes).

pas des instruments juridiques nécessaires pour développer une stratégie industrielle incluant une politique d'approvisionnements sécurisés en matières premières minérales. Après des décennies d'une négligence sur le plan stratégique, une prise de conscience a cependant eu lieu, conduisant au lancement, en 2008, de l'Initiative Matières premières (Commission européenne) et à un premier effort dans le domaine de la recherche et de l'innovation au travers d'un investissement d'environ un milliard d'euros, réparti sur la période 2014-2020.

Des mécanismes de formation des prix aux fonctions des marchés dérivés sur matières premières

La section précédente a rappelé de manière extensive comment les chaînes de valeur des minerais et des métaux s'organisaient, privilégiant une approche majoritairement industrielle et globalisée. La question de la réalité des relations commerciales unissant les acteurs économiques de ces chaînes de valeur a également été évoquée et celle-ci est tout aussi fondamentale pour comprendre comment les filières vivent, de la mine à la production métallurgique.

Prix de transfert vs prix de marché

De manière schématique, deux grands modes d'organisation de ces filières peuvent être distingués : le premier privilégie le recours au « marché » pour échanger la matière

considérée. Les contreparties à l'échange sont alors des entités économiques distinctes et le transfert de la matière impose la rédaction de contrats commerciaux fixant les droits et obligations des co-contractants, au regard, de manière non exhaustive, de la quantité et de la qualité de la ressource, de son conditionnement, de son prix, de la date, de la période et des lieux de son embarquement/débarquement/déchargement, du partage des responsabilités ou des procédures arbitrales et juridiques en vigueur.

Le second mode d'organisation des échanges est, à l'inverse, un processus « hors marché », dans le sens où les échanges se font entre filiales d'un même groupe intégré verticalement. Le prix utilisé pour la transaction est alors qualifié de « prix de transfert » et échappe aux strictes logiques de l'offre et de la demande. Comprendre le fonctionnement des filières métallurgiques impose dès lors de comprendre les raisons pouvant expliquer le passage d'une situation où les mécanismes de marché prévalent à celle de l'intégration verticale, qu'elle soit initiée vers l'aval de la filière par un groupe minier ou, symétriquement, vers l'amont par une entreprise métallurgique ou sidérurgique⁽⁵⁾.

Une première réponse simple peut être apportée à ce questionnement dans le cas des processus d'intégration en amont. Lorsqu'il existe une tension sur l'offre d'un minerai, la sécurisation des approvisionnements physiques

(5) Comprendre la dynamique inverse étant tout aussi essentiel.

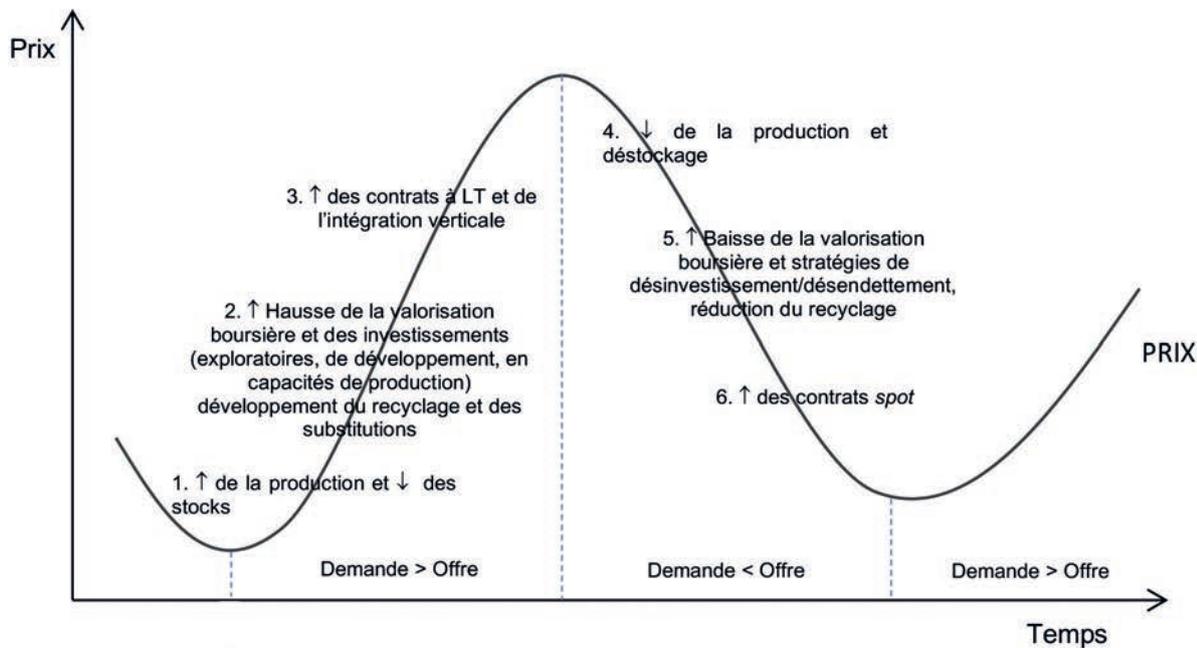


Figure 4 : Dynamique du prix d'une matière première et stratégies des firmes.

est, pour une entreprise métallurgique, une condition *sine qua non* de la pérennité de son activité industrielle. Prenant la forme d'une prise de participation majoritaire, le contrôle d'une entreprise minière exploitant une ressource est, de ce point de vue, la forme la plus aboutie de cette stratégie. Elle permet notamment de garantir l'accès physique aux ressources minérales, et ce, à un coût potentiellement inférieur à celui du marché, tout en étant plus stable. Il importe à cet égard de remarquer que cette « réorganisation » n'est pas toujours la conséquence de choix opérés par des acteurs privés. Certains États (comme la Chine ou le Japon) peuvent, par leurs politiques publiques, organiser des formes d'intégration verticale en encadrant le jeu de leurs acteurs économiques par des systèmes d'interventions publiques et/ou de prêts, éventuellement bonifiés. Par des interventions indirectes, ils peuvent, en outre, largement contribuer à l'émergence et à l'affirmation de géants nationaux sur les marchés de commodités. En Chine, le soutien public aux activités de recherche et développement dans le domaine des procédés électrolytiques conjugué à des tarifs d'électricité préférentiels a notamment été une des conditions permettant la domination des entreprises de ce pays sur le segment de l'aluminium primaire.

À titre d'illustration, l'essor de l'électromobilité a créé une forte tension sur l'offre de cobalt, ce qui a expliqué le développement de stratégies visant à sécuriser les approvisionnements des acteurs manufacturiers (constructeurs de batteries au lithium, constructeurs automobiles) situés en aval. Alors que les prix du cobalt oscillaient depuis le début de la dernière décennie au sein d'une bande comprise entre 20 000 et 40 000 \$US/t, les prix ont commencé, en 2017, à s'emballer devant la crainte suscitée par de possibles problèmes d'approvisionnement, un pic à plus de 90 000 \$US/t étant atteint en mars 2017.

Le positionnement stratégique des industriels chinois sur les segments à fort potentiel de développement de la batterie Li-ion et de l'électromobilité (dont la batterie est un

composant vital) leur imposait de disposer d'hydroxyde de cobalt en quantités suffisantes, et donc d'être présents dans les pays disposant de réserves intéressantes, notamment la République démocratique du Congo (Jégourel, 2020). La stratégie industrielle chinoise a non seulement consisté à maîtriser l'intégralité des étapes de production présentées ci-dessus, mais aussi à développer un nouveau matériau nickel-manganèse-cobalt (NMC 811) pour la production des cathodes, en substitution du matériau NMC 111, permettant ainsi une réduction d'environ 70 % de la quantité nécessaire de cobalt. Cette stratégie de substitution a contribué à la forte baisse du prix du cobalt, lequel est repassé sous la barre des 40 000 \$US/t depuis décembre 2018.

Lorsque cette stratégie porte sur une intégration en aval, l'exploitation de la ressource « en tension » offre à l'entreprise minière à la fois des revenus accrus et un avantage comparatif indéniable par rapport aux entreprises situées en aval. Le développement de la substitution et du recyclage peuvent néanmoins réduire la durée de cet avantage stratégique.

Cela peut alors légitimer un développement de la transformation de cette même ressource au sein des pays producteurs, perçu comme une opportunité de capter une part croissante de la valeur ajoutée au sein de la filière. C'est une des raisons fondamentales expliquant pourquoi nombre de pays miniers – de la Guinée (Conakry) à l'Indonésie, en passant par le Royaume du Maroc – se sont engagés dans des stratégies ambitieuses de transformation locale de leurs ressources minérales⁽⁶⁾.

Une seconde explication, plus élaborée, a été apportée par la théorie économique dans le cadre de la théorie dite « des contrats » visant à analyser, en fonction du contexte

(6) Cette même ambition se retrouve également dans certains secteurs agricoles, même si l'analyse qui doit en être faite diffère sensiblement.

informationnel, les déterminants de l'organisation industrielle optimale d'une chaîne de valeur ⁽⁷⁾. Initiée par le prix Nobel d'économie R. H. Coase dans un article désormais célèbre datant de 1937 ⁽⁸⁾, cette approche considère que l'entreprise peut être une solution alternative aux échanges de biens. Tandis que les transactions au sein d'un même groupe imposent une coordination administrative, celles utilisant de purs mécanismes de marché génèrent des coûts de transaction (Galiègue, 2012). Un arbitrage simple peut alors être fait : lorsque les coûts de coordination intra-firme sont supposément inférieurs à ces coûts de transaction, l'intégration verticale doit être privilégiée, la coordination marchande s'imposant dans le cas symétrique.

S'inscrivant dans le prolongement des travaux de Coase, O. Williamson (1979) précisera amplement la notion de coût de transaction, et partant, les déterminants de l'intégration en y adjoignant des hypothèses relatives au degré de rationalité et d'opportunisme des agents économiques. Il dépassera par ailleurs la simple opposition entre les échanges par le marché et ceux intra-firmes à travers la prise en compte d'organisations hybrides, telles que la négociation de contrats de long terme. Parmi les déterminants identifiés figurent la fréquence des transactions, l'ampleur des incertitudes qui les entourent, ainsi que ce que Williamson appelle la « spécificité des actifs ». Cette dernière notion est fondamentale. Comme le rappelle Ghertman (2006), « un actif est dit spécifique, lorsqu'un agent économique y aura investi d'une façon volontaire pour une transaction donnée et [que cet actif] ne pourra être redéployé pour une autre transaction sans un coût élevé » (p. 195).

Pouvant donc être assimilée au degré de « redéployabilité » de l'actif, cette spécificité peut être dite « de site », « de destination » ou être relative à des actifs physiques ou humains, tels que la connaissance. Il s'agit, en cela, d'une notion inter-temporelle. Si elle s'applique à une grande diversité de secteurs, elle demeure très pertinente pour comprendre la spécificité de l'organisation de certaines filières de matières premières. De la localisation d'une centrale électrique dédiée à l'approvisionnement énergétique d'une aluminerie (spécificité de site) aux entités de liquéfaction propres à l'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL), qui, *de facto*, imposent de disposer, en aval, d'une usine de regazéification dans le pays importateur (spécificité de destination) ; les exemples de ces actifs difficilement redéployables sont nombreux. Ainsi, « plus les biens échangés sont standards, c'est-à-dire ayant un très faible niveau de spécificité des actifs, et d'incertitude interne, plus les transactions seront fréquentes, et plus le marché sera le mode de gouvernance choisi. Par contre, plus la spécificité des actifs et l'incertitude interne seront élevées et la fréquence des transactions sera faible, et plus on aura affaire à un contrat ou à une opération interne au sein d'une hiérarchie » (Ghertman, 2006, p. 196).

Cela explique, en particulier, pourquoi la plupart des industries de « commodités », notamment celles des minerais et des métaux, sont très largement organisées autour de mécanismes purs de marché. La qualité d'un minerai ou d'un concentré est certes essentielle, mais elle n'est pas suffisante pour justifier, de la part des producteurs, des stratégies de différenciation par la qualité leur permettant d'être protégés de la concurrence ou de chocs négatifs d'offre ou de demande. Ainsi, un minerai de fer d'une teneur de 65 % en provenance du Brésil ne peut être assimilé à ce même minerai, mais titrant à 62 % ou 58 %, issu des mines australiennes. Pourtant, toute baisse significative de la demande, telle que celle observée lors de la crise financière de 2008, de l'érosion de la croissance économique chinoise à partir de 2014 ou, plus récemment, de la pandémie de Covid-19, affectera de façon peu différenciée le prix de l'ensemble de ces minerais. Une des particularités de ces marchés de commodités est en effet la structuration autour d'un prix de référence mondial ⁽⁹⁾, sur la base duquel sont appliqués des mécanismes de primes et de décotes variant selon les conditions de marché. Il faut, par ailleurs, rappeler que les marchés de matières premières sont caractérisés par une forte volatilité des prix et que, dans un tel contexte d'incertitude, le besoin de flexibilité peut imposer le recours à des contrats au comptant (spot), ou tout du moins, à court-terme, laissant intacte la capacité de renégociation à une date ultérieure. Cependant, dans des configurations particulières, le recours à d'autres formes d'organisation peut être privilégié, à l'instar de l'industrie du GNL, voire gazière, historiquement structurée autour de contrats de très long terme, à prix indexés néanmoins (Ruester, 2009). Cette approche explique également pourquoi un certain nombre de producteurs chinois d'aluminium primaire sont également producteurs d'électricité, l'électrolyse étant une étape tout aussi centrale qu'énergivore (consommation d'environ 14 000 kWh par tonne d'aluminium) de la transformation d'alumine en aluminium.

Le rôle prépondérant du négociant dans l'organisation des filières de matières premières

L'abondance et la solidité des travaux scientifiques découlant des théories de Coase et Williamson n'empêchent pas que certaines interrogations spécifiques aux matières premières restent en suspens. La première, et probablement la plus importante d'entre elles, tient à la justification de l'existence et du rôle quasi incontournable dans les filières agricoles, minérales ou énergétiques, des « grandes maisons de négoce » ou, selon l'anglicisme consacré, les *traders* physiques. Les échanges commerciaux de matières premières sont en effet trop souvent vus au travers du prisme du producteur et de l'utilisateur, reléguant alors le négociant à un simple rôle d'intermédiaire que la théorie économique peut ignorer. Un seul regard sur les volumes physiques et financiers traités par les entreprises précédemment citées permet pourtant de comprendre

(7) L'analyse n'est en rien spécifique aux industries extractives.

(8) COASE R. H. (1937), "The Nature of the Firm", *Economica* 4, pp. 386-405.

(9) Celui formé sur le London Metal Exchange pour la plupart des métaux de base, sur le Shanghai Futures Exchange pour les barres d'armature en acier ou celui du port chinois de Qingdao en référence « coût, assurance, fret » pour le minerai de fer.

le rôle stratégique qu'elles remplissent (voir le Tableau 1 ci-après). Alors qu'un courtier (*broker*) n'a pour seule ambition que de trouver une demande à l'offre qui lui est adressée, le négociant (*trader*) achète la matière première pour la revendre. Il prend donc un risque de prix considérable, ce qui n'est pas le cas du courtier. Il faut, pour comprendre la centralité de cette fonction économique, rappeler que producteurs et utilisateurs de matières premières n'ont *a priori* aucune raison de s'entendre commercialement. Ces deux opérateurs doivent chacun répondre à une problématique de gestion des flux et à une problématique de prix, celles-ci étant en opposition. Le producteur est en effet « condamné » à produire et recherche, en conséquence, un *timing* de vente, et ce aux prix les plus élevés possibles. Symétriquement, l'acheteur doit s'assurer de ses approvisionnements en fonction de ses propres ventes et rechercher un *timing* d'achat qui lui soit propre, pour des prix cette fois les plus faibles possibles. Il n'y a dès lors pas de raison de penser que ces « exigences » respectives soient par nature compatibles (Marquet, 1993). Cela est d'autant plus vrai que les commodités, qu'elles soient minérales ou non, sont échangées sur des marchés mondiaux présentant de fortes asymétries d'information entre acheteurs et vendeurs. Le rôle d'un *trader* va être dès lors de réconcilier, dans le temps et dans l'espace, vendeurs et acheteurs en achetant aux conditions de temps et de prix souhaitées par les premiers, puis en revendant aux conditions de temps et de prix souhaitées par les seconds. Il pourra même, de façon contre-intuitive de prime abord, acheter à un prix élevé et revendre à un prix plus faible, tout en s'assurant d'une marge commerciale positive en recourant aux produits dérivés financiers, notamment aux contrats à terme (*futures*).

Classement	Entreprise	Revenus	Profits nets
1	Vitol	231	1,7 (estimé)
2	Glencore	219	3,4
3	Trafigura	180,7	0,868
4	Mercuria	122	0,419
5	Cargill	114,7	3,1
6	Koch Industries	110	ND
7	Archer Daniel Midlands	64,34	1,81
8	Gunvor	63	-0,33
9	Bunge	45,7	0,267
10	Louis Dreyfus Commodities	43	0,357

Tableau 1 : Les plus grandes entreprises de négoce de matières premières, classées en fonction de leurs revenus ⁽¹⁰⁾ (2018, en milliards d'USD).

À l'instar des stratégies d'intégration verticale, l'importance du *trader* n'est pas permanente et est intrinsèquement dépendante du degré de disponibilité de la ressource, et donc du niveau des cours. Comme le rappelle Marquet

(10) Ce classement est établi sur la base des bilans financiers de ces entreprises, lorsqu'ils sont disponibles, et d'informations relayées par la presse. Il doit en cela être considéré avec prudence.

(2013), « en situation de tension sur les ressources, il s'agit pour l'essentiel de s'assurer, par la force ou la négociation, l'accès aux sources d'approvisionnement et/ou d'administrer des règles de répartition et de rationnement. Dans ce contexte, la place laissée au négoce est faible ; le stratégique domine l'économique et les monopoles prévalent sur la concurrence. En situation de surplus et donc d'accès facile aux ressources, les enjeux stratégiques perdent de leur importance. Les contrôles s'avèrent très onéreux et leurs coûts ne sont plus compensés par les rentes de monopole. Triomphent alors les marchés concurrentiels, et le négoce en charge de gérer les interfaces complexes entre producteurs et utilisateurs occupe une place privilégiée ». Cela ne signifie naturellement pas qu'un négociant subit nécessairement le contexte des marchés de matières premières. Au contraire, il s'y adapte, et peut, à l'instar des producteurs et des utilisateurs, s'engager sur la base de contrats commerciaux à long terme, voire s'intégrer lui-même verticalement, en amont ou en aval, si cela lui est profitable (Pirrong, 2014), comme ce fut le cas de Glencore, la plus grande maison mondiale de négoce de minéraux et de métaux, devenue une entreprise minière par sa fusion avec XStrata en 2012 et le premier producteur minier mondial de cobalt et un acteur majeur de la métallurgie de ce métal. De ce point de vue, force est de constater que, dans la chaîne de valeur du cobalt où le besoin de flexibilité dans la gestion des flux physiques est peu présent, tant du côté de l'offre de cobalt que de la demande, Glencore se positionne comme un producteur et non comme un négociant *stricto sensu*, le recours à l'activité de *trading* faisant peu sens dans un tel contexte.

Bien que considérant des organisations hybrides, l'approche développée par Williamson tend par ailleurs à opposer la coordination intra-firme (administrative) aux mécanismes de marché et n'interroge probablement pas suffisamment, au sein de ces derniers, sur les déterminants de l'arbitrage entre contrats au comptant et contrats de long terme. Peut-être n'est-il d'ailleurs guère pertinent de les comparer, les contrats à long terme pouvant être de différents types. Si l'on s'affranchit des garanties spécifiques qui les définissent (telles que celles propres aux clauses de « *take or pay* »), ou des différences d'échéance (annuelle, pluriannuelle), ceux-ci peuvent être soit « à prix fixe », soit « en prix à fixer ». Dans le second cas, les quantités échangées périodiquement sont fixées à la signature du contrat, tandis qu'une formule de prix est définie.

À titre d'exemple, un contrat annuel en prix à fixer portant sur le concentré de cuivre pourra spécifier que le prix payable lors des différentes livraisons mensuelles sera la somme des valeurs de chaque métal valorisable présent dans le concentré – celles-ci étant définies à leur tour comme la moyenne des cours journaliers de référence sur la période de cotation (ici, le mois) –, à laquelle un certain nombre de déductions et de pénalités pourront être appliquées. Le prix est donc variable, alors que les quantités livrées ne le sont pas. De ce point de vue, il convient plutôt d'opérer une distinction entre les transactions laissant subsister un risque de prix (opération *spot* et contrat à long terme en prix à fixer) et celles préservées de ce risque

(opération à terme, contrat à prix fixe) que d'opposer les contrats en fonction de leur durée (*spot* vs contrat à long terme). Cela soulève cependant de nouvelles questions : pour quelles raisons un acteur d'une filière de matières premières peut-il opter pour un contrat où ce risque de prix perdure et pourquoi ces contrats sont-ils, en définitive, majoritairement privilégiés ? Y répondre impose de rappeler les fonctions qu'assument les marchés de produits dérivés sur matières premières, tels que le London Metal Exchange (LME) – place boursière historique pour les métaux de base –, le Comex, filiale du Chicago Mercantile Exchange (CME), le Shanghai Futures Exchange (SHFE) où est notamment coté l'acier (fer ou rond à béton pour le secteur BTP), le Singapore Exchange (SGX), mais aussi, parmi tant d'autres exemples, le Jakarta Futures Exchange, une bourse moins emblématique mais désormais essentielle pour le commerce mondial de l'étain.

Marchés de produits dérivés, fixation des prix et spéculation

L'analyse précédente pourrait laisser à penser que les contrats en prix à fixer sont risqués, alors que les contrats à prix fixe ne le sont pas. Tel n'est pas le cas. Tout contrat commercial est porteur d'un nombre important de risques (sur la qualité, sur les délais de livraison, le transport maritime et la livraison effective si un sinistre survient), supportés par chaque co-contractant, selon des schémas de répartition en partie définis par les *incoterms*. Ainsi, si les contrats à prix fixe ne sont pas, par définition, exposés au risque de prix, ils subissent un risque de contrepartie d'autant plus élevé que la volatilité des cours du minerai ou du métal est importante. En effet, alors même que l'opportunité des agents évoqué par Williamson doit être prise en compte, tout écart important et durable entre le prix contractuel et le prix de marché peut conduire l'une ou l'autre des contreparties à ne pas respecter ses engagements afin de profiter d'un prix de marché plus favorable. Un contrat en prix à fixer est, symétriquement, exempt de ce type de risque, le prix contractuel étant peu ou prou celui du marché. Choisir entre un contrat en prix à fixer et un contrat à prix fixe revient donc en réalité à faire un arbitrage entre ces deux types de risques, et ceux-ci seront notamment fonction du degré de proximité entre les co-contractants et de l'ampleur de la volatilité du cours de la matière première considérée. Il dépendra également de l'existence, au sein de la filière, d'un marché de produits dérivés et de la capacité des co-contractants à y accéder. Le risque de prix est en effet d'autant plus facile à accepter qu'il existe des produits, tels que les *futures* ou – dans une moindre mesure⁽¹¹⁾ – les options, permettant de le gérer. La financiarisation, qui doit être fondamentalement définie comme l'affirmation de ces marchés de produits dérivés (Jégourel, 2018) – et non, au sens étroit,

comme la présence croissante de fonds d'investissement et autres acteurs financiers sur les marchés des matières premières –, explique alors pourquoi une grande majorité des opérations commerciales sur matières premières sont de type *spot* ou en prix à fixer.

Un marché de *futures* n'a pas pour seule – et première – fonction de produire des mécanismes de gestion du risque de prix (ou *hedging*). Il offre, avant toute chose, une référence de prix, observable par tous les opérateurs de la filière, sans coût et sans délai. Considéré comme non manipulable⁽¹²⁾ et donc, dans une logique libérale, comme « juste », puisque soumis à la seule loi de l'offre et de la demande, ce prix pourra être utilisé comme base de négociation dans les contrats commerciaux. Cela est d'autant plus vrai que l'efficacité d'une stratégie de *hedging* repose sur l'adossement entre ce qu'il est convenu d'appeler la position physique (dite longue pour le producteur, *short* pour l'acheteur) et la position financière constituée par l'achat (vente) et la revente (rachat) des *futures*. Pour l'agent engagé dans cette stratégie, cet adossement doit permettre que les pertes (ou gains) réalisé(e)s sur la position physique soient compensées par les gains (ou pertes) sur la position financière, ce qui revient à s'assurer d'une corrélation élevée et stable entre les prix commerciaux et les prix *futures*. Utiliser ces prix *futures* comme prix de référence au sein des contrats commerciaux est, naturellement, la meilleure façon de faire. Cela fait de la financiarisation un processus autoréférentiel, l'ambition fondamentale d'une bourse étant, comme pour toute entreprise, d'accroître ses parts de marché. Toutes les filières ne disposent cependant pas de contrats à terme, un certain nombre de conditions devant être vérifiées pour qu'une bourse décide de les proposer (voir le Tableau 2 ci-après). Par ailleurs, un contrat à terme peut exister sans que celui-ci ne soit fondamentalement utilisé comme une référence de prix et un instrument de *hedging* par les opérateurs, tel est notamment le cas, jusqu'à présent, pour le *future* sur le cobalt échangé sur le LME.

Conditions de lancement	Conditions de succès
Un produit homogène et faisant l'objet d'importants flux d'échanges.	Un contrat correctement défini au regard des critères de référence.
Un marché fonctionnant en continu.	Un risque de base faible.
Une prévalence des opérations commerciales au comptant.	Une spéculation active et un marché équilibré.
Un besoin de transparence de la part des opérateurs de la filière.	Une connaissance par les opérateurs de la filière des techniques de <i>hedging</i> .
Une volatilité des prix synonyme de risque de prix à court terme pour les opérateurs de la filière.	Une stratégie de promotion de la part du <i>commodity exchange</i> .
Une absence de « substitut » au <i>hedging</i> .	Un <i>commodity exchange</i> disposant d'un pouvoir de marché à l'international.
Une demande solvable et des perspectives de rentabilité pour le <i>commodity exchange</i> .	
Un intérêt des spéculateurs permettant de garantir, sur le long terme, l'équilibre des positions <i>shorts</i> et longues.	

Tableau 2 : Critères de lancement et de succès d'un marché de *futures* (source : Jégourel, 2020a).

(11) Bien que disponibles pour gérer le risque de prix sur matières premières, les options sont en effet particulièrement coûteuses, la prime payée étant fonction de la volatilité du cours du sous-jacent (qui est elle-même forte sur les marchés de commodités). Il s'agit d'ailleurs bien souvent d'options sur *futures* de matières premières. Pour une présentation exhaustive de ces différents produits, voir notamment JÉGOUREL Y. (2017), *Les produits dérivés financiers*, coll. « Repères », Éd. La Découverte.

(12) Cette notion devant être appréhendée avec prudence, les marchés de matières premières « étroits » ayant souvent fait l'objet de tentatives de manipulation de leurs cours au travers de stratégies dites de « *squeeze* ».

L'analyse précédente ne saurait laisser à penser que la financiarisation est par nature souhaitable, l'ambition développée dans cette section n'étant pas normative. Si financiarisation et spéculation ne peuvent en rien être assimilées, force est néanmoins de rappeler qu'un marché de *futures* ne peut durablement fonctionner s'il ne suscite pas l'intérêt des spéculateurs, ceux-ci permettant d'accroître la liquidité du marché et de corriger ce qu'il est convenu d'appeler l'asymétrie du *hedging* (Gray, 1961, 1966). La spéculation financière⁽¹³⁾ peut néanmoins avoir pour conséquence d'accroître l'instabilité des cours en renforçant le poids des anticipations, celles-ci pouvant être irrationnelles.

Alors que la quasi-totalité des grands métaux industriels ont été financiarisés, cela n'a pas été le cas des minerais ou des produits intermédiaires. En effet, seul le minerai de fer fait l'objet de contrats à terme, l'essentiel des autres minerais étant échangés *via* des contrats à long terme ou au sein d'un même groupe. À l'image des contrats sur l'alumine lancés depuis 2018 par le CME, le LME et le SHFE, cette situation pourrait cependant être amenée à évoluer au cours de la prochaine décennie, les bourses s'employant à étendre leurs activités. Si cette financiarisation « en amont » venait à se diffuser, les conséquences pourraient être considérables pour les pays en développement exportateurs de produits miniers, africains notamment. Alors que la transformation sur le sol national des ressources extractives est devenue une priorité nationale pour nombre d'entre eux, la volatilité accrue qui pourrait découler du lancement d'un contrat *future* serait de nature à rendre instable la marge de transformation des industriels impliqués dans cette stratégie. Cela limiterait alors sa capacité à financer les politiques de développement du pays considéré.

Conclusion

Le modèle économique décrit dans cet article à travers les chaînes de la valeur et les mécanismes de marché spécifiques aux matières premières, y compris les matières premières minérales, a joué un rôle clef dans le développement, d'une intensité sans précédent dans l'histoire de l'humanité, de la production mondiale de matières premières minérales non énergétiques au cours des soixante-dix dernières années. Conjugué, d'une part, à l'accélération des innovations technologiques dans les domaines miniers, métallurgiques, de la science des matériaux et dans les technologies industrielles et, d'autre part, à la normalisation⁽¹⁴⁾ des produits minéraux commercialisés, ce modèle a permis à beaucoup d'êtres humains de bénéficier d'un niveau de services et d'un confort matériel inconnus jusqu'ici. Ils ont amélioré les conditions de vie de milliards de personnes, sans que le rôle joué par les matières premières minérales en appui à l'atteinte des Objectifs de développement durable des Nations Unies (Columbia Center on Sustainable Development,

(13) La spéculation physique étant également possible, notamment dans le domaine des matières premières.

(14) Cette norme peut être publique, comme dans le cas du cuivre (voir : <https://www.lme.com/en-GB/Metals/Non-ferrous/Copper/Physical>) ou contractuelle, entre un fournisseur et son client, ce dernier imposant des spécifications décrivant les propriétés physiques et chimiques des produits minéraux ou des métaux objets du contrat.

2016 ; ICMM, 2016 ; GIER, 2020) soit connu et reconnu par le grand public.

La transition vers des pratiques industrielles et des modes de consommation conformes au principe d'économie circulaire, telles que l'écoconception des produits, la lutte contre l'obsolescence programmée des produits, le développement de la maintenabilité des produits, la réutilisation de composants contenus dans les produits en fin de vie, le recyclage ou la substitution de l'usage de ressources rares par celui de ressources plus courantes offrent de nombreuses possibilités de réduire la demande en ressources minérales primaires, c'est-à-dire extraites d'une mine. Mais malgré ces progrès nécessaires, la demande mondiale en matières premières minérales primaires demeurera élevée au cours des décennies à venir, notamment du fait de la croissance démographique, de l'élévation du niveau de vie d'une portion de plus en plus importante de la population mondiale et de l'urbanisation croissante de cette même population (Christmann, 2018 ; OCDE, 2019 ; GIER, 2020). Le développement de l'électromobilité et la transition de la production énergétique vers l'usage de sources d'énergie renouvelables contribueront également à stimuler la demande en matières premières minérales primaires.

Cependant, dans un marché de commodités, seuls le prix de vente et le coût complet de production déterminent la compétitivité de la production des matières premières minérales. Un producteur de matières premières minérales peut chercher à concilier des Objectifs de développement durable (réduction de la consommation d'intrants, meilleure intégration des intérêts des populations riveraines et prévention des conflits...) avec les objectifs de rentabilité de sa production. Mais la pleine intégration des Objectifs de développement durable dans la conception et la gestion des projets miniers se heurte aux limites imposées par les prix de marché.

Cette limite introduit des compromis, voire des compromissions en matière de développement durable. Plusieurs problématiques illustrent cela : les contributions de l'industrie de production des matières premières minérales aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (16 % des émissions en 2018, selon l'OCDE), la sécurité du stockage à long terme de déchets miniers (ruptures à répétition de digues de retenue de résidus miniers – dont la catastrophe de Brumadinho, qui, survenue au Brésil en janvier 2019, a fait 270 morts⁽¹⁵⁾ –, risques de pollutions

(15) Cette catastrophe est symptomatique des dérives d'une industrie mondiale du minerai de fer dont l'ambition fondamentale a été de rationaliser les coûts de production dans le cadre d'une concurrence par les prix extrêmement forte – prenant la forme d'une guerre des prix entre 2014 et 2016 – entre les quatre plus grands producteurs, que sont Vale, Rio Tinto, BHP Billiton et Fortescue Metals Group (FMG). À titre d'illustration, Vale ambitionnait d'abaisser les coûts de production de sa mine emblématique S11D à moins de 11 US\$/t. Cela l'a amenée à la non-prise en compte de dépenses fondamentales au regard du *monitoring* des barrages de déchets miniers, ce qui a entraîné, suite à la catastrophe de Brumadinho, l'engagement de la responsabilité pénale de Vale et de ses dirigeants, ainsi que de celle de l'entreprise en charge de la certification. Outre son coût humain et environnemental considérable, la rupture de ce barrage a, dans un absurde paradoxe, favorisé les concurrents australiens du géant minier qui ont pu tirer profit de la hausse des cours consécutive à la diminution des exportations de minerai de fer brésilien.

Matière première minérale	Part de la Chine dans la production métallurgique mondiale 2017	Matière première minérale	Part de la Chine dans la production métallurgique mondiale 2017
Gallium métal	94%	Aluminium métal	54%
Germanium métal	89%	Phosphate	54%
Magnésium métal	82%	Alumine	53%
Bismuth métal	82%	Plomb métal	53%
Tungstène MI	82%	Acier brut	50%
Terres rares MI	80%	Charbon à vapeur	48%
Mercurure (minerai)	73%	Zinc Métal ME	45%
Antimoine (minerai)	72%	Indium métal	45%
Graphite	70%	Molybdène (minerai)	42%
Arsenic métal	69%	Perlite	42%
Wollastonite MI	65%	Fer (minerai)	39%
Magnésite	65%	Cuivre métal	38%
Fluorine	62%	Barytine	37%
Silicon ME	61%	Zéolites MI	37%
Cobalt métal	60%	Titane ME	36%
Chaux	60%	Zinc MI	35%
Ciment	57%	Selenium ME	34%
Vanadium ME	56%	Cadmium métal	32%
Coke	55%	Etain (minerai)	30%

Tableau 3 : Part de la Chine dans la production mondiale 2017 de matières premières minérales (ne sont représentées ici que les matières premières minérales dont la Chine assure au moins 30 % de la production mondiale (sources des données : USGS, World Mining Data, Groupes internationaux pour l'étude des métaux (cuivre, plomb et zinc)).

sur des siècles) sont des problèmes majeurs de l'industrie minérale.

Ils contribuent à la menace que représente le changement climatique et peuvent localement menacer les populations et les écosystèmes impactés par l'industrie minérale, les impacts environnementaux négatifs pouvant dans certains cas se faire ressentir pendant des siècles après l'arrêt des exploitations, à charge pour des populations qui n'auront pas bénéficié des retombées économiques de l'activité minière d'en assumer les conséquences.

En outre, certains États, au premier rang desquels figure la Chine, utilisent de manière délibérée leur position dominante acquise dans la production de certaines matières premières minérales pour réduire la concurrence des autres pays producteurs, par exemple au travers de pratiques de *dumping* plusieurs fois condamnées par l'Organe de règlement des différends (ORD) de l'Organisation mondiale du commerce (OMC). La Chine est le premier producteur mondial de plus de 40 métaux ou minéraux, le Tableau 3 ci-dessus comporte 38 minéraux ou métaux dont la Chine est le premier producteur mondial, assurant au moins 30 % de la production mondiale, alors que sa population représente environ 20 % de la population mondiale. Cette domination est aussi un puissant outil géopolitique en appui à son agenda politique, riche de conflits territoriaux non résolus (Pitron, 2018). Elle pèse sur l'Union européenne, dont l'industrie manufacturière est invitée à s'installer en Chine, ce qui garantit à l'UE notamment l'accès aux matières premières dont elle a besoin, mais au prix d'une perte de ses avantages technologiques. Faute d'un accord entre les États membres pour

déléguer à l'Union européenne la compétence de développer une politique européenne des matières premières, ses efforts demeurent concentrés sur le développement de la recherche et de l'innovation liées aux matières premières : ainsi, près d'un milliard d'euros ont été investis entre 2014 et 2020 dans le cadre du programme européen Horizon 2020.

Ces diverses raisons, ainsi que les impératifs du développement durable, rendent nécessaire le développement d'une gouvernance mondiale des matières premières minérales basée sur la notion de permis d'exploiter intégrant les quatre dimensions du développement durable : économique, environnementale, gouvernance et sociale (GIER, 2020). S'il existe aujourd'hui près de 90 initiatives visant à améliorer la transparence et les pratiques de l'industrie mondiale, l'étude citée *supra* montre qu'aucune d'elles n'intègre ces quatre dimensions et, par ailleurs, ces initiatives relèvent le plus souvent du volontariat et/ou sont géographiquement limitées.

L'abandon de la notion de commodité est important dans ce contexte. Des processus d'écologisation des produits de l'industrie minérale, basés sur la technologie *blockchain* et la notation des produits en fonction de leurs performances environnementales, de gouvernance et sociales en sus de leurs spécifications chimiques et/ou physiques usuelles, constituent un cadre incitatif devant permettre de renforcer de manière significative la contribution de l'industrie minérale à l'atteinte des Objectifs de développement durable, dans le cadre d'un champ concurrentiel redéfini, équitable et durable, et où s'impose la transparence des projets et des activités de production.

Bibliographie

- CHRISTMANN P. (2016), « Développement économique et croissance des usages des métaux », *Annales des Mines, Série Responsabilité et Environnement*, n°82, pp. 8-15.
- CHRISTMANN P. (2018), « Vers une utilisation durable des ressources minérales », in JACQUET H. (2018), *Savoir & Faire : le métal*, Paris, Actes Sud/Fondation d'entreprise Hermès.
- COMMISSION EUROPÉENNE (2008), « Initiative Matières premières – Répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe », Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions, 4 novembre 2008, COM(2008)699.
- COMMISSION EUROPÉENNE (2017), *Study on the review of the list of Critical Raw Materials: Critical Raw Materials Factsheets*, Bruxelles, European Commission – DG Growth.
- COLUMBIA CENTER ON SUSTAINABLE INVESTMENT (2016), *Mapping Mining to the Sustainable Development Goals: An Atlas*, United Nations Development Programme, United Nations Sustainable Development Solutions Network, World Economic Forum, rapport, 77 pages.
- DILLI H. (2009), “The chessboard classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium”, *Earth Science Reviews* 100(1), pp. 1-420.
- GALIÈGUE X. (2012), « L'approche de la firme par les coûts de transaction », *Idées économiques et sociales*, n°170, pp. 16-24.
- GHERTMAN M. (2006), « Oliver Williamson et la théorie des coûts de transaction », *Revue française de gestion*, n°16, pp. 191-213.
- GRAY R. (1961), “The Relationship among Three Futures Markets: An Example of the Importance of Speculation”, *Food Research Institute Studies*, pp. 21-32.
- GRAY R. (1966), “Why does futures trading succeed or fail: an analysis of selected commodities”, *Food Research Institute Studies*, pp. 115-136.
- GROUPEMENT INTERNATIONAL POUR L'ÉTUDE DES RESSOURCES NATURELLES (2010), “Metal stocks in society”, GRAEDEL T. E., Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi (Kenya), rapport, 52 pages.
- GROUPEMENT INTERNATIONAL POUR L'ÉTUDE DES RESSOURCES NATURELLES (2020), *Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing extractive industries towards sustainable development*, rapport, 374 pages.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (2016), *Making a positive contribution to the SDGs – Online interactive guidance document on how mining and metals connect with the SDGs*.
- JEBRAK M., MARCOUX E. & LAITHIER M. (2008), *Géologie des ressources minérales*, ministère des Ressources naturelles et de la faune, Québec.
- JÉGOUREL Y. (2020a), « La financiarisation du marché des minerais et des métaux : origine, enjeux et perspectives », in FIZAINÉ F. & GALIÈGUE X. (eds), *Économie des ressources minérales : le défi de la soutenabilité*, Éditions ISTE (à paraître).
- JÉGOUREL Y. (2020b), « Du rôle du trader physique dans la chaîne de valeur des minerais et des métaux : le cas du cobalt », *Géologues* (à paraître).
- KORINEK J. & KIM J. (2013), “Export Restrictions on Strategic Raw Materials and Their Impact on Trade”, *OECD Trade Policy Working Papers*, n°95.
- MARQUET Y. (1993), *Négoce international de matières premières*, Paris, Eyrolles.
- OCDE (2019), *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*, Paris, OECD Publishing, 214 pages.
- RUESTER S. (2009), “Changing Contract Structures in the International Liquefied Natural Gas Market: A First Empirical Analysis”, *Revue d'économie industrielle*, n°127, pp. 89-112.
- PIRRONG C. (2014), *The Economics of Commodity Trading Firms*, Éditions Trafigura.
- STEDMAN A., YUNIS J. & ALIAKBARI E. (2020), *Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies*, rapport, 76 pages.
- PITRON G. (2018), *La guerre des métaux rares : la face cachée de la transition énergétique et numérique*, Paris, Les Liens qui Libèrent.
- TERCERO ESPINOZA L., SOULIER M. & HAAG S. (2016), “Visualizing global trade flows of copper, An examination of copper contained in international trade flows in 2014”, *Working Paper Sustainability and Innovation*, n°S 03/2016.
- WILLIAMSON O. E. (1979), “Transaction Cost Economics: the Governance of contractual relations”, *Journal of Law and Economics* 22, pp. 233-261.

Impact de différents scénarios énergétiques sur les matières premières et leur disponibilité future

Par Olivier VIDAL

Institut des sciences de la terre (ISTerre), Université Grenoble Alpes, CNRS

La population mondiale, le PIB moyen/hab, ainsi que la consommation d'énergie et de matières premières affichent les mêmes croissances quasi exponentielles depuis plus d'un siècle. L'humanité utilise désormais des ressources minérales à un niveau sans précédent, avec 70 milliards de tonnes de matières extraites du sous-sol par an et un niveau de consommation desdites ressources par habitant jamais observé jusque-là (Graedel et Cao, 2010 ; Graedel, 2011 ; Wiedmann *et al.*, 2015 ; Elshkaki *et al.*, 2016, 2018). Les prévisions de consommation future sont dans la tendance des évolutions passées, et les quantités annuelles de métaux devant être produites d'ici à 2050 pourraient atteindre 3 à 10 fois les niveaux actuels (Graedel, 2011 ; Graedel et Cao, 2010). La quantité cumulée de métaux à produire au cours des trente-cinq prochaines années dépasserait alors la quantité cumulée produite depuis l'antiquité jusqu'à aujourd'hui. Les enjeux liés aux ressources minérales sont donc énormes, avec des implications de premier ordre dans tous les secteurs économiques et technologiques, dont, en particulier, celui de l'énergie. La présente contribution représente un survol de la question, en insistant sur le caractère multi-facteurs et dynamique des évolutions constatées.

Les tendances de la consommation de ressources minérales

L'émergence économique d'un pays se caractérise par la construction d'infrastructures industrielles et de production, de transformation et d'utilisation de l'énergie, de transport et de communication, de bâtiments... Cette phase de développement consomme principalement des matières premières de base produites en des quantités mondiales supérieures à un million de tonnes par an, telles que le sable et les granulats (50 000 millions de tonnes par an (Mt/an)), le béton (4 600 Mt/an), l'acier et le fer (1 600 Mt/an, dont la moitié est consommée par la Chine), l'aluminium (60 Mt/an), le cuivre (20 Mt/an), le manganèse, le zinc, le chrome, le plomb, le titane et le nickel. Après une période de forte croissance, la consommation annuelle se stabilise (Bleischwitz et Nechifor, 2016), lorsque le produit intérieur brut (PIB) par habitant avoisine 15 000 à 20 000 US\$ par habitant. De nombreux pays fortement peuplés comme la Chine, l'Indonésie, l'Inde, le Pakistan et de nombreux pays africains affichent actuellement un PIB/hab inférieur à ces valeurs. Leur industrialisation sera inévitablement associée à une forte augmentation de la consommation de matières premières, comme cela a été le cas depuis la fin des années 1990 avec l'émergence économique rapide de la Chine.

La demande future en ressources minérales peut être estimée de manière agrégée ou par technologies. L'approche technologique (champs de couleur des Figures 1 et 2 de la page suivante) est basée sur le rythme de construction et de remplacement des technologies avec une intensité matière connue (en t/machine, ou t/puissance électrique installée, etc.). Cette approche nécessite de prendre en compte la durée de vie de chaque type de machines installées, ainsi que le taux de recyclage de chaque métal présent dans chacune de celles-ci, quand elles arrivent en fin de vie. Ce taux de recyclage est d'importance cruciale, car tout métal non recyclé est perdu, et doit donc être compensé par une même quantité de métal primaire. C'est pour cette raison que toutes les estimations ne considérant que l'infrastructure en place sous-estiment largement (dans le cas des métaux faiblement recyclés) les besoins en métaux primaires. Dans le cas de l'énergie, la vitesse de déploiement des technologies est donnée par des scénarios à horizon 2050, qui peuvent être nationaux ou mondiaux.

L'approche agrégée (lignes de la Figure 1) est, quant à elle, basée sur des relations consommation/hab vs PIB/hab, qui sont contraintes par les évolutions historiques des pays riches depuis les années 1950. Elle est beaucoup plus simple, mais ne permet pas de prendre en compte les nouvelles technologies qui n'existaient pas

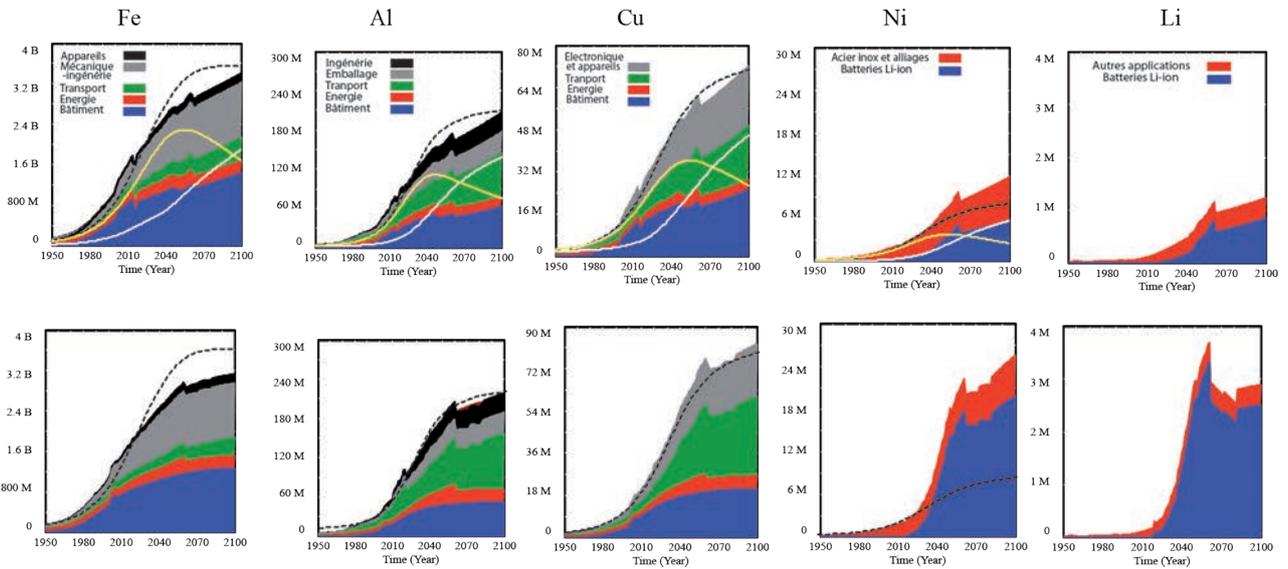


Figure 1 : Besoins annuels au niveau mondial estimés par secteurs (champs de couleur) ou à partir d'évolutions supposées du PIB et de la population (courbe en pointillé : total ; courbe jaune : production primaire ; et courbe blanche : recyclage). Les figures de la première ligne correspondent à un scénario tendanciel (RTS de l'Agence internationale de l'énergie), la deuxième ligne à un scénario visant à réduire les émissions de CO₂ pour rester sous les 2°C de réchauffement global (B2DS de l'AIE) (source : auteur à partir de son modèle DyMEMDS).

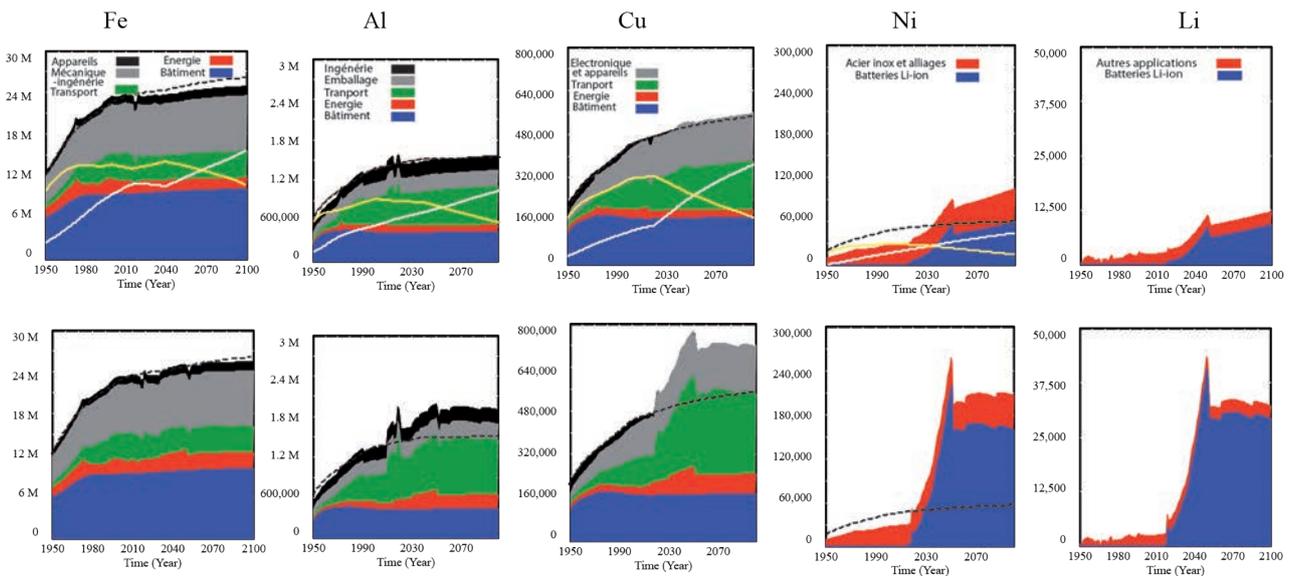


Figure 2 : Besoins annuels estimés pour la France. Même légende que pour la Figure 1. La première ligne correspond au scénario français de référence, la deuxième au scénario Vision90 de l'ADEME (90 % d'énergie renouvelable en 2050) (source : auteur à partir de son modèle DyMEMDS).

ou étaient peu développées il y a trente ans. Cette approche ne s'adresse donc qu'aux matières premières de base utilisées pour des applications classiques, mais en aucun cas aux petits métaux présents dans les nouvelles technologies.

Le modèle dynamique DyMEMDS (*Dynamic Modelling of Energy and Matter Demand and Supply*), développé dans le cadre du projet SURFER⁽¹⁾, permet d'estimer les futurs

(1) Le projet SURFER, financé par l'ADEME, évalue les matières premières nécessaires pour mener à bien la transition énergétique en France et au niveau mondial pour des scénarios d'une transition forte vers les renouvelables ou de *statu quo*.

besoins en matières grâce aux deux approches précitées et pour des scénarios énergétiques mondiaux ou nationaux. L'évolution mondiale de la demande par rapport à une progression médiane de la population (11 milliards d'habitants en 2100 selon les Nations Unies) et du PIB (données de la Banque mondiale), et l'évolution résultant de scénarios conservateurs ou permettant de limiter le réchauffement en dessous des 2°C (ETP-RTS et -B2DS de l'IEA) sont illustrées dans la Figure 1 ci-dessus. Les résultats indiquent une poursuite des évolutions historiques : ainsi, les consommations annuelles mondiales de Fe, Al, Cu, Ni et Li devraient au minimum doubler, voire tripler d'ici à 2050. Après cette date, la croissance annuelle de

cette consommation diminue avec l'augmentation du PIB/hab moyen, et le métal recyclé devient la première source de « production » de Fer, Al et Cu. La production primaire devrait alors décliner.

Les deux types d'estimations soit 1) basées sur les évolutions anticipées de la population et l'évolution logistique de la consommation/hab en fonction de PIB/hab, soit 2) établies par grands secteurs technologiques pour des scénarios de consommation d'énergie donnés, donnent des résultats similaires pour l'acier, le cuivre et l'aluminium. Les utilisations futures de ces matières ne seront en effet pas très différentes de celles passées, même si le développement des technologies électriques, dont le numérique inclus dans les technologies « électroniques et appareils », et celles remplaçant les carburants fossiles (énergies renouvelables et véhicules électriques), s'accompagne d'un accroissement de la consommation de cuivre pour les scénarios présentant une forte incorporation d'énergie renouvelable (B2DS). Les besoins en cuivre et, dans une moindre mesure, en aluminium sont clairement plus élevés dans le scénario B2DS que dans le scénario RTS, alors que la consommation d'énergie totale (360 PJ, en 2060) est plus faible que dans le scénario de référence RTS (450 PJ). Cela dit, les valeurs estimées restent pour les deux scénarios précités raisonnablement en accord avec les estimations agrégées basées sur les évolutions de PIB et de population. La situation est clairement différente pour le nickel et le lithium, dont les utilisations futures seront différentes de celles observées dans le passé. Ces deux éléments sont utilisés dans les batteries Li-ion qui n'existaient pas il y a trente ans. La pénétration de ces technologies est naturellement plus forte dans les scénarios à prédominance électrique. Pour le Scénario B2DS, les consommations futures de Li et Ni sont largement supérieures à celles estimées sur la base des relations consommation-PIB-population. Il convient cependant d'être prudent, car les technologies des batteries actuelles ne sont probablement pas celles qui seront utilisées dans vingt ou trente ans. Pour ces raisons, il reste extrêmement difficile d'avoir une estimation fiable des besoins futurs. Ces besoins apparaissent astronomiques au regard des capacités de production actuelles, mais ils ne résultent que de projections à technologie constante. À l'inverse, les besoins estimés pour le cuivre, l'acier et l'aluminium sont beaucoup plus robustes.

Des tendances similaires sont observées au niveau français (voir la Figure 2 de la page précédente), à la différence près que nous avons déjà atteint le niveau de saturation pour l'acier, le cuivre et l'aluminium. Les consommations annuelles de ces matières sont donc relativement stables dans le scénario de référence (première ligne de la Figure 2). Elles sont significativement supérieures dans le cas du cuivre et de l'aluminium pour les scénarios à forte incorporation d'énergies renouvelables (par exemple, Vision90 de l'ADEME, deuxième ligne de la Figure 2). Cela s'explique, d'une part, par la pénétration plus importante des technologies de production d'électricité solaire et d'origine éolienne, qui présentent une intensité matière (t/MW) plus importante que les centrales nucléaires, et, d'autre

part, par la pénétration plus importante des véhicules électriques et hybrides rechargeables, qui ont également des intensités cuivre plus importantes que celles des véhicules thermiques.

Les Figures 1 et 2 indiquent qu'en addition des besoins accompagnant l'émergence économique, la transition vers un monde bas-carbone et l'explosion des technologies numériques constituent des sources importantes de surconsommation par rapport aux tendances historiques. Alors que la croissance de la consommation depuis 1990 a progressé globalement de 1,9 %/an, celle des technologies de l'information et de la communication (TIC) a été de 13 %/an. Ce secteur est grand consommateur de substances rares et de grande pureté (Cu, In, Ga, Ge, Ta, Nb, Au, Sb, Be, Ag, terres rares, etc.) avec des usages dispersifs résultant de la grande dilution dans de nombreux appareils à durée de vie très courte, ce qui limite le potentiel de recyclage et engendre des impacts environnementaux importants. Le cuivre est un métal préoccupant, sa consommation étant dopée par les secteurs de l'énergie et du transport électrique. La Commission européenne vise un objectif, atteindre une part d'énergie renouvelable correspondant au moins à 27 % de la consommation d'énergie de l'UE d'ici à 2030 et les Accords de Paris résultant de la COP21 visent la « neutralité carbone » au niveau mondial au cours de la seconde moitié de ce siècle. Pour atteindre ces objectifs, de grandes infrastructures de production, de transport et de stockage de l'énergie doivent être construites ; or, celles-ci affichent des intensités matières nettement supérieures à celles des technologies conventionnelles utilisant des combustibles fossiles (Vidal *et al.*, 2013, 2017, 2018 ; Hertwich *et al.*, 2014). Actuellement, 1,2 milliard de véhicules légers sont en circulation au niveau mondial ; il est prévu un doublement de ce parc automobile d'ici à 2050. Un véhicule thermique standard contient environ 10 à 20 kg de cuivre, une voiture électrique en contient trois à quatre fois plus. Il faudra donc selon les scénarios entre 200 et 400 Mt de cuivre au niveau mondial, soit l'équivalent de 10 à 20 années de production actuelle pour satisfaire les besoins uniquement de la production et du transport/distribution de l'électricité, ainsi que du transport de marchandises et passagers ; les scénarios intégrant une forte part de renouvelables s'avèrent les plus consommateurs.

Le niveau futur de production permettra-t-il de satisfaire la demande ?

Plusieurs études suggèrent que l'offre future de matières premières ne pourra pas suivre la demande et que la production de plusieurs métaux a déjà atteint son maximum ou atteindra son maximum dans un avenir proche (Hubbert, 1956 ; Meadows *et al.*, 1972 ; Bardi et Lavacci, 2009 ; Laherrère, 2010 ; Kerr, 2014 ; Sverdrup et Ragnasdottir, 2014 ; Northey *et al.*, 2014). Ces travaux font l'hypothèse que la demande et la production augmenteront à un rythme exponentiel, puis s'effondreront lorsque le stock de ressources récupérables sera épuisé. En fait, dans la réalité, la demande se stabilise quand les pays atteignent

un niveau de PIB/hab > 20 000 US\$/hab (voir les Figures 1 et 2). La théorie du pic de Hubbert (Hubbert, 1956) suppose, en outre, que les ressources soient finies et quantifiables, alors que les métaux et minéraux ne sont exploités aujourd'hui que sur une profondeur correspondant à une petite fraction enrichie de la croûte continentale. Si l'amélioration technologique permettait d'exploiter des fractions moins riches ou moins accessibles (plus profondes, en mer), le stock de métaux disponible serait largement supérieur à celui estimé aujourd'hui⁽²⁾. Enfin, les méthodes empiriques de type Hubbert omettent le recyclage et les couplages économiques. Elles ne peuvent donc se prévaloir d'aucune valeur prédictive sérieuse.

Outre le caractère dynamique de la demande et des réserves, deux autres points doivent être pris en considération pour appréhender l'évolution future de la production de métaux : le coût énergétique de la production et le recyclage. L'énergie ainsi que le coût d'extraction et le prix à long terme des métaux varient en fonction d'une loi de puissance de la dilution qui est inversement proportionnelle à la concentration du métal exploité dans les minerais (Phillips et Edwards, 1976 ; Johnson *et al.*, 2007 ; Gutowski *et al.*, 2013 ; Vidal *et al.*, 2018, 2019, 2020). Une dépendance du prix à la loi de puissance de la dilution signifie qu'à *technologie constante*, la baisse observée au cours du temps de la teneur des gisements implique une croissance exponentielle de l'énergie nécessaire à la production (Mudd, 2010 ; Norgate et Jahanshahi, 2010). Pourtant, les données historiques ne soutiennent pas ce point (Mariscal et Powell, 2014), car, jusqu'à présent, l'augmentation de l'énergie de production due à la chute de la teneur des minerais a été compensée par l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la productivité, qui elles-mêmes sont les fruits de l'amélioration technologique (Yellishetty *et al.*, 2010 ; Gutowski *et al.*, 2013). L'amélioration technologique explique pourquoi les quantités produites de métaux et le volume de leurs réserves ont tous deux suivi une croissance quasi exponentielle et enregistré une décroissance de leur prix (en monnaie constante) entre 1900 et 2000. Mais là encore, il convient d'être prudent, car cette tendance n'est pas pérenne. En effet, le gain en énergie devient de plus en plus faible avec le temps, alors que la quantité d'énergie supplémentaire nécessaire pour extraire des métaux de moins en moins concentrés dans les gisements augmente. Il existe ainsi un point critique au-delà duquel le gain technologique ne compense plus la perte résultant de la dégradation de la qualité des ressources, la production demandant en effet de plus en plus d'énergie. Pour beaucoup de métaux, ce point est déjà atteint ou il le sera avant 2050. L'augmentation de prix entraîne mécaniquement une baisse de la demande et de la production primaire, qui est renforcée par le recyclage massif quand le niveau de saturation est atteint (voir la Figure 1). Cette analyse rapide nous amène à la conclusion que les grandes tendances passées, à savoir une augmentation des réserves et une diminution des coûts de production et

du prix sous l'effet de l'amélioration technologique, ne sauraient se poursuivre indéfiniment si nous dépendons d'un stock fini d'énergie, à savoir celui des hydrocarbures. Si nous pouvions utiliser à l'avenir des sources d'énergies renouvelables « illimitées » à un prix raisonnable, la question se poserait différemment.

Le recyclage est également un paramètre à prendre en compte. Contrairement aux combustibles fossiles, les métaux primaires ne sont pas perdus après utilisation, les produits métalliques fabriqués aujourd'hui constituant les réserves du recyclage de demain. L'augmentation de la part du recyclage ne suffit pas pour répondre à la demande en période de croissance, car nous ne pouvons recycler qu'une partie des biens de consommation et des équipements créés il y a plusieurs décennies, à une période où la production de matières premières était inférieure aux besoins actuels. Cependant, lorsque la plupart des pays auront atteint un PIB/habitant correspondant au niveau de saturation, le recyclage des stocks de métaux présents dans les équipements de notre société actuelle pourraient en théorie devenir la principale source de matières premières (voir la Figure 1, pour le cuivre). En pratique, le potentiel de recyclage est limité par des facteurs économiques, tels que la différence entre le prix des métaux primaires et le coût de leur recyclage. Seuls les métaux présents à des concentrations suffisamment élevées dans les produits en fin de vie pourront être recyclés, car le coût de leur recyclage et le prix des énergies nécessaires à la production des métaux les plus dilués restent non compétitifs par rapport aux coûts de leur production primaire (Johnson *et al.*, 2007 ; Vidal *et al.*, 2017). Cela explique pourquoi la plupart des métaux rares utilisés dans les hautes technologies ne sont pas recyclés aujourd'hui. Une augmentation future des prix de ces métaux favorisera leur recyclage, ce qui est une bonne nouvelle. Pour autant, le recyclage reste actuellement basé sur une disponibilité de flux (production annuelle de déchets) plutôt que de stock. C'est là une des différences majeures par rapport à la production primaire qui, elle, utilise des réserves (un stock). S'il existe un risque que le flux de déchets s'épuise, la filière de recyclage deviendra rapidement non viable. C'est une des raisons pour lesquelles il est vital de concevoir les produits de manière à faciliter leur recyclage après utilisation, même si cela se fait aux dépens de la performance ou du prix.

Références

- BARDI U. & LAVACCHI A. (2009), "A Simple interpretation of Hubbert's model of resource depletion", *Énergies*, 2(3), pp. 646-661, doi:10.3390/en20300646
- BARDI U. & PAGANI M. (2008), "Peak Minerals", *The Oil Drum*, <http://www.theoil drum.com/node/3086>
- BLEISCHWITZ R. & NECHIFOR V. (2016), "Saturation and Growth Over Time: When Demand for Minerals Peaks", *Prisme* 34, doi:10.13140/RG.2.2.24146.15049, [https://www.centre-cournot.org/img/pdf/prisme_fr/Prisme%20N°34%20Novembre%202016%20\(english\).pdf](https://www.centre-cournot.org/img/pdf/prisme_fr/Prisme%20N°34%20Novembre%202016%20(english).pdf)
- ELSHKAKI A., GRAEDEL T. E., CIACCI L. & RECK B. K. (2018), "Resource Demand Scenarios for the Major Metals", *Environmental Science & Technology* 52 (5), pp. 2491-2497.

(2) Cette hypothèse néglige naturellement des impacts environnementaux pourtant décuplés par l'extraction de ressources diluées et difficilement accessibles.

- ELSHKAKI A., GRAEDEL T. E., CIACCI L. & RECK B. K. (2016), "Copper demand, supply, and associated energy use to 2050", *Global environmental change* 39, pp. 305-315.
- GRAEDEL T. E. (2011), "On the Future Availability of the Energy Metals", *Annual Review of Materials Science* 41, pp. 323-335.
- GRAEDEL T. E. & CAO J. (2010), "Metal spectra as indicators of development", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, pp. 20905-20910.
- GUTOWSKI T. G., SAHNI S., ALLWOOD J. M., ASHBY M. F. & WORRELL E. (2013), *The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand*, Philosophical Transactions of the Royal Society, A 371: 20120003
- HERTWICH E. G., GIBON T., BOUMAN E. A., ARVESEN A., SUH S., HEATH G. A., BERGESEN J. D., RAMIREZ A., VEGA M. I. & SHI L. (2015), "Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, pp. 6277-6282.
- HUBBERT M. K. (1956), "Nuclear Energy and Fossil Fuels", *Drilling and production practice* 23, pp. 7-25.
- JOHNSON J., HARPER E. M., LIFSET R. & GRAEDEL T. E. (2007), "Dining at the periodic table: metal concentrations as they relate to recycling", *Environmental Science & Technology* 41, pp. 1759-1765.
- KERR R. A. (2014), "The coming copper peak", *Science* 343, pp. 722-724.
- LAHERRERE J. (2010), posted by de SOUSA L., *Copper peak. The oil drum Europe*, April, 1.2010;6307, pp. 1-27, <http://europe.theoil drum.com/node/6307>
- MARISCAL R. & POWELL A. (2014), "Commodity Price Booms and Breaks: Detection, Magnitude and Implications for Developing Countries", Inter-American Development Bank, *Working Paper* n°444, January.
- MUDD G. (2010), "The environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints", *Resources Policy* 35, pp. 98-115.
- NORGATE T. & JAHANSHAH S. (2010), "Low grade ores. Smelt, leach or concentrate?", *Minerals Engineering* 23, pp. 65-73.
- NORTHEY S., MOHR S., MUDD G. M., WENG Z. & GIURCO D. (2014), "Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining", *Resources, Conservation and Recycling* 83, pp. 190-211.
- SVERDRUP H. U. & RAGNASDOTTIR K. A. (2014), "Natural resources in a planetary perspective", *Geochemical perspectives* 3, pp. 129-341.
- VIDAL O. (2018), *Matières premières et énergie, les enjeux de demain*, ISTE Editions Ltd, 245 p.
- VIDAL O., GOFFÉ B. & ARNDT N. (2013), "Metals for a low-carbon society", *Nature Geoscience* 6, pp. 894-896.
- VIDAL O., ROSTOM F., FRANCOIS C. & GIRAUD G. (2017), "Global trends in metal consumption and supply: the raw material-energy nexus", *Elements* 13(5), pp. 319-324.
- VIDAL O., ROSTOM F., FRANÇOIS C. & GIRAUD G. (2019), "Prey-predator long-term modeling of copper reserves, production, recycling, price, and cost of production", *Environmental Science & Technology* 53(19), pp. 11323-11336.
- VIDAL O., LE BOULZEC H. & FRANÇOIS C. (2018), "Modelling the material and energy cost of the transition to low-carbon energy", *EPJ Web of Conferences* 189, 00018, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900018>
- WIEDMANN T. O., SCHANDL H., LENZEN M., MORAN D., SUH S., WEST J. & KANEMOTO K. (2015), "The material footprint of nations", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, pp. 6271-6276.
- YELLISHETY M., RANJITH P. G. & THARUMARAJAH A. (2010), *Ressources, Conservation and Recycling* 54, pp. 1084-1094.

L'importance des métaux rares pour le secteur des technologies de l'information et de la communication, le cas d'Orange

Par Samuli VAIJA

Analyse cycle de vie et économie circulaire, Orange

Et Éric PHILIPOT

Conseiller environnement

Depuis 2016, avec l'intégration de l'économie circulaire dans ses processus, Orange a lancé plusieurs projets pour améliorer ses connaissances dans le domaine des matériaux. Ainsi, la réalisation par le Groupe d'analyses de cycle de vie à visée d'identification des matériaux ayant le plus fort impact environnemental a été étendue aux équipements réseaux afin de renforcer en interne les connaissances sur ce sujet. Une mise à jour de la cartographie d'exposition du Groupe aux matériaux critiques a été lancée en 2018 pour couvrir les nouvelles technologies qui nécessitent potentiellement des matériaux spécifiques. Enfin, Orange s'est engagé dans les travaux de standardisation, dans le domaine de l'efficacité matière, qui se déroulent, par exemple, à l'ADEME ou à l'ITU-T, afin de pouvoir travailler sur la rédaction de l'état de l'art des exigences d'efficacité matière et ainsi les intégrer dans ses processus d'achat.

Introduction

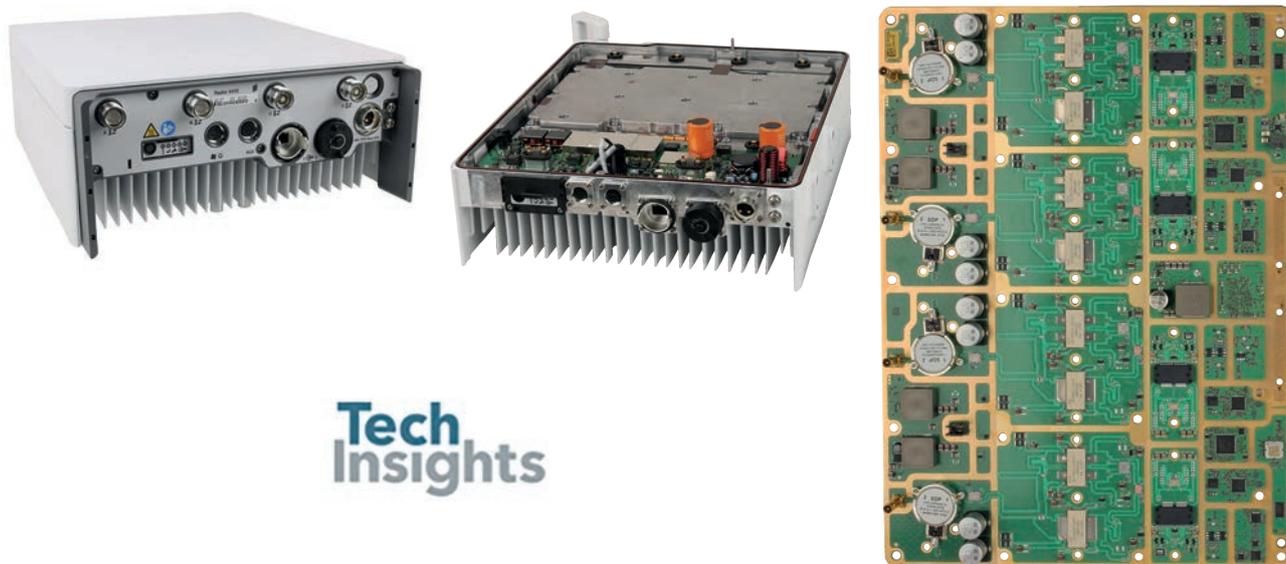
La prise en compte de la problématique matériaux a été intégrée par Orange dès le lancement de l'affichage environnemental pour les téléphones mobiles en 2007 et s'est poursuivie grâce à la montée en compétence des acteurs du Groupe sur les thématiques d'analyse de cycle de vie. Aujourd'hui, Orange est un acteur qui est présent dans les différentes instances travaillant sur les axes de l'efficacité matière, comme l'ADEME avec l'indicateur de réparabilité ou l'ITU-T avec l'indicateur de circularité. Ces efforts ont ainsi permis de développer de nouvelles méthodes et d'étendre le périmètre aux équipements du réseau.

Équipements réseaux et évaluation de l'impact matière

À ce niveau, l'évaluation de l'utilisation des matières premières est réalisée selon la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) afin d'identifier les matériaux les plus critiques en termes d'épuisement des ressources naturelles, selon l'indicateur Abiotic Resources Depletion (ARD – Oers, Koning, Guinée et Huppés, 2002). Cet indicateur mesure la consommation de ressources minérales (or, argent, étain...) et de ressources énergétiques fossiles (charbon, gaz naturel...) sur l'intégralité du cycle de vie de

l'équipement (extraction des ressources, production de l'équipement, transport, utilisation et fin de vie).

Afin de réaliser une ACV et ainsi obtenir des résultats pertinents pour l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles, il est souvent nécessaire de démonter totalement un équipement, jusqu'au niveau composant (par exemple, en désolidarisant les circuits intégrés du circuit imprimé pour pouvoir les peser). Ces opérations de démontage rendent l'équipement totalement inopérant. Ainsi, afin d'éviter de détruire un équipement et pour faciliter le partage et la réutilisation d'informations, il a été décidé d'utiliser les données fournies par le cabinet TechInsights pour réaliser l'analyse d'une unité radio distante (également appelée RRU ou *Remote Radio Unit*) de quatrième génération (réseau mobile 4G ou LTE). TechInsights réalise des analyses technico-économiques, par exemple pour évaluer le coût de fabrication de différents composants et matériaux. Ces données sont un très bon point de départ pour réaliser une ACV. En effet, TechInsights identifie les différents composants en présence, comme le nombre de circuits intégrés, les fabricants de ces composants ou encore le type de boîtier (par exemple, la matrice de billes ou BGA – *Ball Grid Array*). La Figure 1 de la page suivante présente plusieurs vues du démontage d'une unité radio distante 4G.



Tech
Insights

Figure 1 : Vue de face de l'unité radio distante (photo de gauche), vue de l'unité radio partiellement démontée avec la partie alimentation visible (photo centrale) et vue de la carte de transmission démontée (photo de droite) (source : Teardown TechInsights).

La modélisation d'un type d'équipement est un exercice complexe, notamment en présence d'un modèle final comportant environ 1 500 entrées différentes pour les matériaux (comme l'aluminium, le cuivre, l'étain...), les processus industriels (par exemple, l'injection de thermoplastique, extrusion d'aluminium) ou les composants électroniques (les circuits intégrés, les condensateurs céramiques montés en surface...). Toutes ces données sont renseignées dans un logiciel dédié d'ACV – EIME® –, fourni par LCIE Bureau Veritas.

Nous nous concentrons ici sur l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles, ce qui nécessite de porter une attention particulière à la modélisation des composants électroniques. L'unité radio comporte 8 transistors de puissance de type LDMOS (transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semi-conducteur à double diffusion latérale ou *laterally diffused metal oxide semiconductor*), nécessaires pour transformer un signal radio de faible puissance en un signal de forte puissance. Un exemple de ce type de composant est présenté dans la Figure 2 ci-dessus.



Figure 2 : Transistor LDMOS (source : Ampleon).

Il n'existe pas à ce jour de modèle générique permettant de représenter un transistor de puissance LDMOS dans la base de données du logiciel d'ACV. Cependant, le fournisseur du composant (Ampleon) met à disposition des

fiches de déclaration matières (*Full Materials Declarations*). Celles-ci décrivent en détail l'intégralité du contenu en matériaux (voir la Figure 3 de la page suivante, pour un aperçu de 5 matériaux présents dans le transistor, sur un total de 19).

Pour tous les composants non présents dans la base de données du logiciel d'ACV, un procédé similaire de collecte des déclarations matières est mis en place. Cela permet d'affiner autant que faire se peut la connaissance sur le contenu en matériaux. Une fois l'intégralité des matériaux, procédés industriels et composants identifiés, la saisie est réalisée dans l'outil d'ACV. Les résultats d'impacts environnementaux sont ensuite calculés selon le set d'indicateurs ILCD – *Level I & II recommended indicator*. En ce qui concerne l'épuisement des ressources naturelles, la méthode de calcul utilisée est nommée Abiotic Resources Depletion (ARD), elle est développée par l'Institute of Environmental Sciences (CML, 2016) de l'Université de Leiden. Cette méthode, dans sa version « Réserves de base » retenue pour notre analyse, considère les stocks de ressources disponibles comme une « concentration ou occurrence d'un matériel solide d'intérêt économique dans ou sur la croûte terrestre dans une forme telle – en qualité et quantité – qu'il existe des prospections raisonnables pour une éventuelle extraction économique » (Pradel, Garcia et Vajja, 2019).

La Figure 4 de la page suivante présente la contribution d'une sélection de matériaux à l'obtention de l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles (ARD). Il est à noter que les 5 matériaux suivants représentent plus de 95 % de l'impact :

- l'or (Au), utilisé notamment en tant que finition de surface sur la carte de transmission (voir la Figure 1, photo de droite) ou pour le câblage par fil à l'intérieur des circuits intégrés,
- l'étain (Sn) et l'argent (Ag), notamment présents dans l'alliage utilisé pour réaliser les brasures (permettant l'as-

Header	Pure metal layer					
		Palladium (Pd)	7440-05-3	2.352	0.050	0.040
		Gold (Au)	7440-57-5	0.000	0.000	0.000
		Silver (Ag)	7440-22-4	16.931	0.360	0.286
	Copper alloy	Phosphorous (P)	7723-14-0	1.411	0.030	0.024
		Iron (Fe)	7439-89-6	4.703	0.100	0.079
		Copper (Cu)	7440-50-8	4677.134	99.450	78.993
		<i>Subtotal</i>		<i>4702.531</i>	<i>99.990</i>	<i>79.422</i>

Figure 3 : Transistor de puissance LDMOS – Extrait de la déclaration matières (source : Ampleon).

semblage des composants électroniques sur le circuit imprimé),

- le cuivre (Cu), présent en quantité significative dans les pistes conductrices des circuits imprimés. Pour les cartes de transmission, de réception et de contrôle, les circuits imprimés comportent tous 14 couches de cuivre,
- le molybdène (Mo), utilisé en alliage avec du cuivre (Cu) dans les LDMOS transistors afin d'assurer le refroidissement de ces composants.

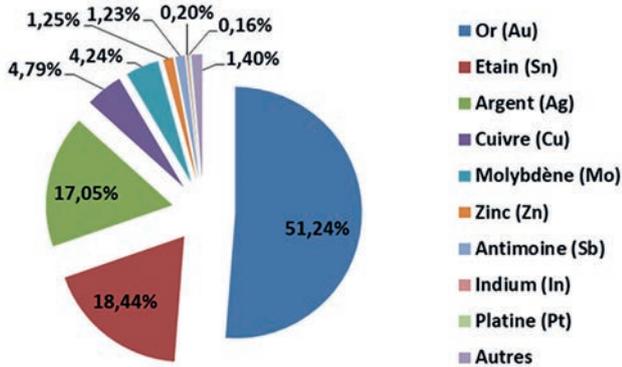


Figure 4 : Contribution des différents matériaux à l'élaboration de l'indicateur ARD (source : Orange Travaux OLN/GDM).

Concernant les équipements 5G, l'analyse est en cours. En termes d'épuisement des ressources naturelles, des matériaux comme l'or, l'argent, l'étain ou le cuivre seront sans aucun doute présents en quantités significatives pour représenter une part conséquente de l'impact. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux, comme le gallium sous forme de nitrure de gallium pour remplacer le silicium dans les transistors LDMOS afin d'améliorer l'efficacité de l'amplification de puissance, pourrait modifier la répartition des impacts entre les différents matériaux. Dans le cas du gallium, qui est majoritairement un coproduit du raffinage de la bauxite pour en extraire l'alumine (Mineralinfo, 2016), la disponibilité dépend plus des capacités d'extraction de la bauxite et de la quantité récupérée en tant que coproduit (toutes les installations de raffinage de bauxite ne permettent pas d'extraire du gallium). Dans la méthode d'évaluation de l'épuisement des ressources naturelles ARD en version « Réserves de base », cela se traduit par un facteur de caractérisation relativement faible ($6,30 \cdot 10^{-3}$ kg équivalent antimoine par kg de gallium, contre, par exemple, $3,60 \cdot 10^1$ kg équivalent antimoine par kg pour l'or).

Mise à jour de la cartographie d'Orange sur les matériaux critiques

En 2012, Orange a initié une première série de travaux sur l'exposition de l'entreprise à la problématique des matériaux critiques. L'analyse a été réalisée par le cabinet Carbone4 sur la base d'inventaires d'ACV menées par Orange Labs. 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.

Au cours de travaux ultérieurs, il a cependant été démontré que les inventaires issus de ces ACV n'étaient ni suffisamment exhaustifs pour prendre en compte l'intégralité des matériaux présents dans les produits électroniques, ni suffisamment à jour pour représenter les technologies de produits actuellement sur le marché (Vaija, 2016).

En 2018, des études complémentaires ont été lancées sur la criticité des ressources au sein de l'entité GDM (Green transformation, Data knowledge, traffic & resources Modelling, entité d'Orange Labs Networks), notamment pour couvrir l'aspect Matériaux présents dans les infrastructures réseaux. Un premier volet consacré à la recherche bibliographique a permis de recenser les critères utilisés pour identifier les matériaux critiques présents dans les équipements du secteur des télécommunications.

Il est par exemple intéressant de souligner que de nombreux travaux de recherche sont actuellement menés afin d'intégrer le concept de criticité dans les ACV. Une approche fait consensus dans l'évaluation de cette criticité du fait qu'elle prend en compte des sous-indicateurs géologiques et géopolitiques pour caractériser le risque d'approvisionnement. Sont notamment retenus des sous-indicateurs comme l'importance économique et la substituabilité pour définir la vulnérabilité d'un pays ou d'un secteur d'activité vis-à-vis d'une ressource (Pradel, Garcia et Vaija, 2019). Un matériau est considéré comme critique au regard de son importance économique et du risque qui pèse sur son approvisionnement. La mesure

du risque économique provenant des utilisations du matériau concerné – cela inclut les différentes étapes de production, d'utilisation et de fin de vie –, pour un utilisateur spécifique sur une certaine période de temps, définit sa criticité.

La majorité de ces matériaux sont très faiblement substituables ou alors au détriment de leurs performances. La substitution nécessite parfois de recourir à un matériau tout aussi, si ce n'est plus, critique. Cela va également de pair avec un taux de recyclage faible, souvent dû à un coût plus élevé que celui de l'extraction primaire du matériau ou aux faibles quantités disponibles pour le recyclage (Deloitte, BGS, BRGM & TNO, 2017).

Un indice de criticité a été développé reposant sur cinq métriques pour chacun des matériaux précités :

- les années de réserves, noté YR dans l'équation ci-dessous,
- le risque d'approvisionnement, noté GSR dans l'équation ci-dessous,
- la substitution en termes de risque d'approvisionnement, noté SEI dans l'équation ci-dessous,
- la substitution en termes d'importance économique, noté SSR dans l'équation ci-dessous,
- la difficulté à recycler la matière, noté EoLRR dans l'équation ci-dessous.

$$\text{Indice de Criticité} = \sqrt[5]{YR * GSR * SEI * SSR * EoLRR}$$

Le calcul de la première métrique est basé sur les données publiées par l'USGS dans ces *Mineral Commodity Summaries* (USGC, 2020). Les quatre autres métriques sont elles calculées en fonction des données publiées par la Commission européenne (EU). L'équation ci-dessus permet de convertir ces 5 métriques en un indicateur synthétique, avec un score minimum de 0 pour une matière jugée comme non critique et un score maximal de 1 pour la matière jugée la plus critique (Vaija et Philipot, 2018).

Les résultats pour un panel de 4 matériaux sont présentés dans la Figure 5 ci-dessous

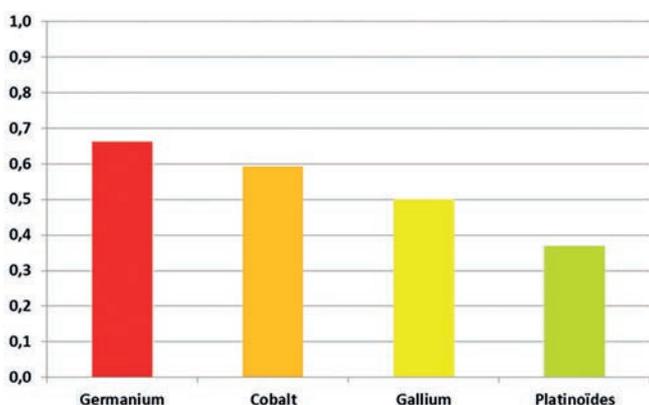


Figure 5 : Exemple d'indices de criticité calculés pour 4 matériaux (source : Orange – Travaux OLN/GDM).

Sur la base de la liste publiée en 2012 par le groupe Orange, l'étude de 2018 a ainsi permis une mise à jour

en identifiant 18 matériaux critiques. Des développements additionnels ont également été apportés pour mettre en relief les facteurs de criticité en fonction des équipements dans lesquels sont présents les matériaux critiques (en fonction soit de la masse contenue, soit de la valeur du contenu en matériau).

Ainsi, il a été identifié que les composants radiofréquences utilisés pour la 5G sont à base de silicium (SOI ou *Silicon on Insulator*), d'arséniure de gallium (GaAs), d'alliage silicium-germanium (SiGe), de nitrure de Gallium (GaN) ou de phosphore d'indium (InP). Les composants à base de silicium bénéficient actuellement d'une préférence pour leurs propriétés et leur faible coût (90 % des commutateurs et récepteurs utilisés pour les composants RF sont fabriqués à partir de silicium).

Application aux récents processus d'achat d'équipements réseaux

En complément des analyses réalisées à l'aide de la méthode d'ACV, Orange met en concurrence ses différents fournisseurs lors des phases d'achat (il est à noter que le Groupe travaille également en amont de la phase de conception, *via* des projets de recherche & développement ou de standardisation avec les industriels). Ainsi, depuis 2018, l'acquisition d'équipements réseaux s'accompagne de l'introduction dans les cahiers des charges d'exigences liées à l'évaluation de l'économie circulaire. Celles-ci ont été déclinées des travaux en cours dans le groupe de travail CEN/CENELEC (CEN/CLC/JTC 10 – *Energy-related products – Material Efficiency Aspects for Ecodesign*). Ces deux organismes de standardisation (le CEN et le CENELEC) ont en effet été désignés par la Commission européenne, à travers le mandat M/543, pour mettre en place des méthodes d'évaluation couvrant les différentes thématiques de l'économie circulaire (capacité à réparer, à recycler, à reconditionner, etc.), et ce pour tout type d'équipement nécessitant de l'énergie (noté ERP ou *Energy Related Product*). Ces travaux couvrent également la mise en place d'une méthode d'évaluation du contenu en matériaux critiques de ce type d'équipements. Les exigences imposées par Orange lui étant spécifiques, cela a nécessité un dialogue extensif avec chacun des industriels pour s'assurer de leur bonne compréhension des exigences de l'opérateur.

Suite à ce constat fait en mai 2019, Orange a rejoint les travaux lancés par l'ITU-T (entité de standardisation pour le secteur des télécommunications). Les experts d'Orange Labs peuvent ainsi collaborer avec les fournisseurs participant à ce groupe de travail (par exemple, Apple, Cisco, Ericsson, Huawei ou Nokia) pour améliorer les méthodes développées en interne. Ce développement se met en place sous la forme d'un document, le *Design Guidelines to achieve the Circular Economy Principles* (ITU-T, 2019), dont les principes sont notamment décrits dans Andrae, Vaija et Halgand (2020).

La Figure 6 de la page suivante présente un aperçu de la quantité de matériaux critiques utilisés, sur la base des données fournies par les industriels dans le cadre du processus

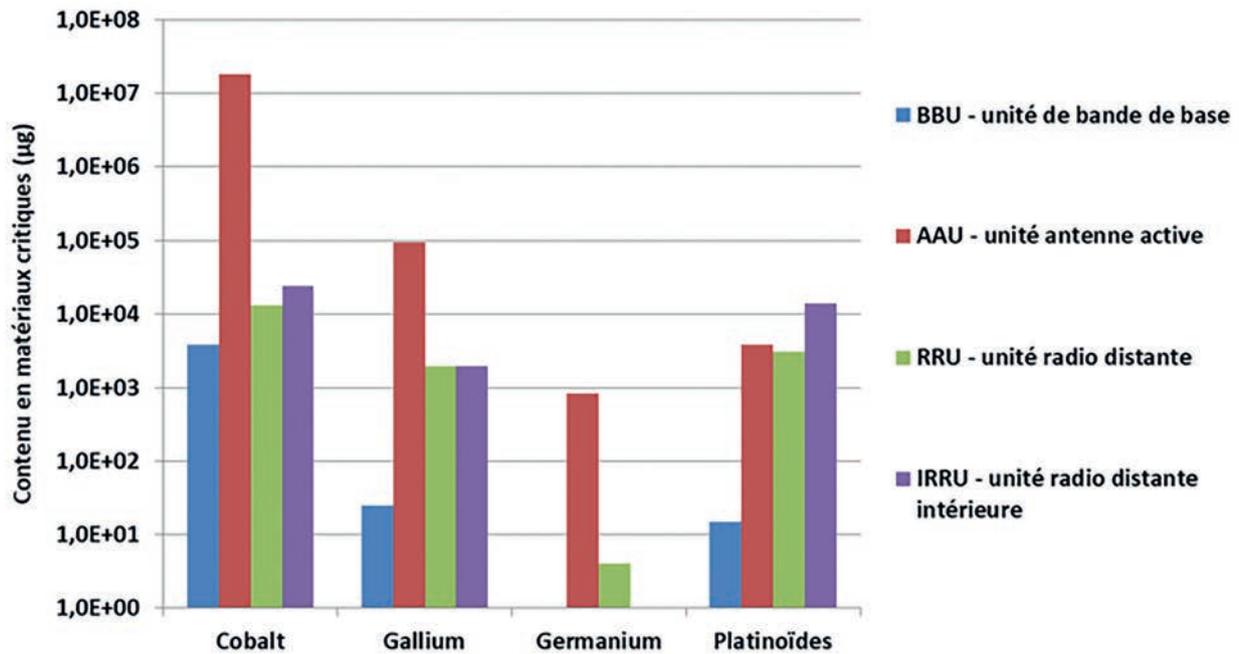


Figure 6 : Sélection de 4 matériaux critiques contenus dans 4 équipements réseaux différents (source : Orange –Travaux OLN/GDM).

d'achat. Cette figure détaille le contenu d'une sélection de 4 matériaux critiques pour 4 équipements réseaux : *Baseband Unit* (BBU – unité de bande de base), *Active Antenna Unit* (AAU – unité antenne active), *Remote Radio Unit* (RRU – unité radio distante) et *Indoor Remote Radio Unit* (IRRU – unité radio distante intérieure).

Ces retours permettent ainsi à Orange d'améliorer sa connaissance du contenu en matériaux critiques de chaque nouvel équipement et également d'inciter les industriels à travailler sur cette question (tout d'abord en réalisant une analyse portant sur le contenu en matériaux critiques de leurs équipements pour répondre à la demande client, puis en se positionnant sur la question de la substitution).

Bibliographie

VAN OERS L., DE KONING A., GUINÉE J. B. & HUPPES G. (2002), *Abiotic resource depletion in LCA Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook*, Road and Hydraulic Engineering Institute.

CML (2016), *CML-IA Characterisation Factors*, consultable sur : <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

PRADEL M., GARCIA J. & VAIJA M. S. (2019), « Guide de bonnes pratiques pour la prise en compte des ressources minérales et de leur criticité en Analyse du Cycle de Vie », projet de recherche collaboratif 17.6 Réseau EcoSD.

MINERALINFO (2016), « Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le gallium », août, consultable à : http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches_criticite/fichecriticitegallium-publique160912.pdf

VAIJA M. S. (2016), « L'analyse du cycle de vie au service d'une politique responsable de consommation des métaux stratégiques chez Orange », *Annales des Mines, Responsabilité & Environnement*, avril, n°82, pp. 99-104.

DELOITTE, BGS, BRGM & TNO (2017), "Study on the review of the list of Critical Raw Materials Criticality Assessments", European Commission, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 93 pages.

USGS (2020), "Mineral Commodity Summaries", consultable à : <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information>

VAIJA M. S. & PHILIPOT E. (2018), "Multiple facets of circular economy applied to telecommunications operator's activities", conférence Going Green – CARE INNOVATION 2018, Schoenbrunn Palace Conference Centre, Vienna, November 26-29.

ITU-T (2019), "Design Guidelines to achieve the Circular Economy Principles", consultable à : https://www.itu.int/ITU-T/workprog/wp_item.aspx?isn=15129

ANDRAE A. S. G., VAIJA M. S. & HALGAND S. (2020), "Method for determining the Circularity Score of ICT goods", *International Journal of Advanced Research in Engineering & Management (IJAREM)*, pp. 1-15.

Illustration, à travers la légende classique des grains de blé placés sur un jeu d'échec, des limites incontournables de la croissance de la consommation des métaux et de la contribution du recyclage à leur approvisionnement

Par Jean-François LABBÉ

Ancien géologue économiste, ancien analyste de la criticité des matières premières minérales au BRGM

Le calcul du nombre de grains de blé nécessaires pour remplir les 64 cases d'un échiquier en partant de 1, puis en doublant à chaque case suivante, selon la légende, corrobore de manière imagée l'impossibilité de poursuivre de manière durable la croissance de la demande en métaux – une croissance observée pourtant de manière quasi continue, au niveau mondial, pour la grande majorité des métaux depuis le début de l'ère industrielle. Une déclinaison de cette légende prenant en compte le recyclage corrobore et illustre le fait qu'il est tout autant illusoire de penser qu'un recyclage, même optimal, même à 100 %, serait une solution pour rendre la croissance durable et pouvoir se passer de ressources naturelles primaires.

Introduction

L'opinion publique française est devenue largement opposée à toute extraction minière. Cette condamnation est reprise en écho par nombre de responsables politiques et de médias. C'est oublier un peu vite d'où vient la matière avec laquelle la France, et plus généralement l'humanité, a construit tous ses biens matériels, à commencer par ses bâtiments, individuels et collectifs, et leurs équipements, mais aussi toutes ses infrastructures et équipements de transport, de communication, de production et de distribution d'énergie, de santé, de culture et de loisirs, etc.

Cette même opinion publique réclame pourtant une augmentation de son pouvoir d'achat, donc un accroissement de sa capacité à consommer, entre autres des biens matériels ou des services appuyés sur des infrastructures matérielles. Et les responsables politiques continuent plus généralement à appeler la croissance économique de leurs vœux, laquelle inclut une croissance matérielle

(plus de logements, *a fortiori* mieux équipés, plus de bâtiments publics, plus d'infrastructures de communication et de production d'énergies renouvelables, etc.), ce qui demande toujours plus de matières premières, en particulier de métaux, qu'il aura bien fallu extraire du sous-sol.

La croissance de la demande en matières premières est encore plus forte dans les pays émergents et dans les pays en développement, puisque chacun y rêve d'avoir des niveaux d'équipements matériels approchant ceux dont disposent les pays les plus avancés, et qu'un rattrapage se fait progressivement : le projet de mieux électrifier l'Afrique ne se fera pas sans cuivre, par exemple. Même la France continue à accroître la quantité de biens matériels sur son territoire, ne serait-ce que par l'accroissement de la taille de ses villes et de l'emprise urbaine, et donc la quantité de matière qu'elle utilise au final. Du fait de la délocalisation de ses industries, la France consomme moins directement de matières premières qu'il y a quelques décennies, mais elle continue à en consommer toujours davantage au travers des biens qui sont manufacturés hors

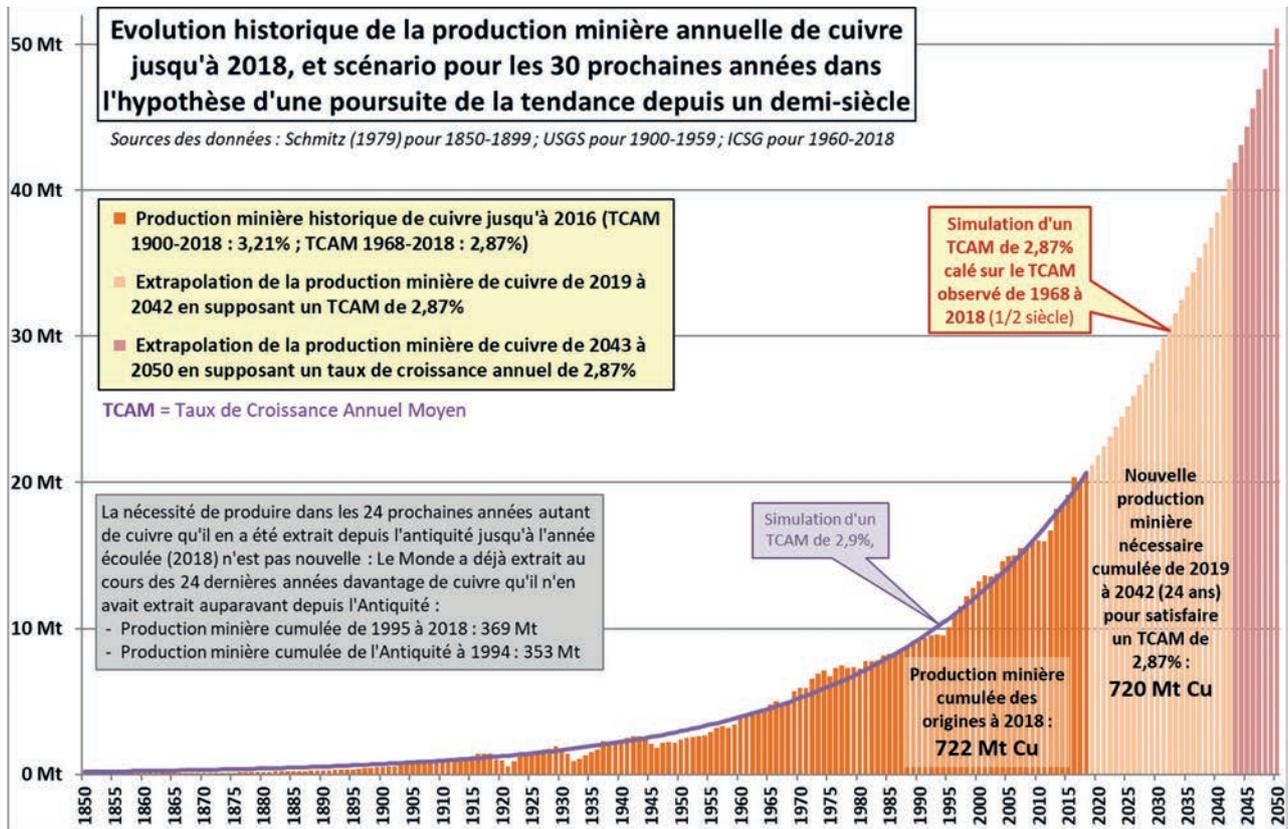


Figure 1 : Évolution historique de la production minière annuelle de cuivre jusqu'en 2018, et scénario pour les trente prochaines années dans l'hypothèse d'une poursuite de la tendance observée depuis un demi-siècle.

de son territoire avant d'être importés, matières premières qu'il aura bien fallu extraire quelque part.

Un exemple typique de la croissance factuelle persistante de la demande en métaux est celui du cuivre, un métal emblématique et omniprésent, puisqu'il est utilisé dans tous les équipements utilisant de l'électricité, que ce soit nos maisons, nos hôpitaux, nos trains, nos voitures (électriques ou pas), nos réfrigérateurs, nos ordinateurs, nos téléphones portables, etc. La consommation mondiale primaire⁽¹⁾ annuelle de cuivre a augmenté en moyenne de 2,87 % par an depuis un demi-siècle⁽²⁾ (voir la Figure 1 ci-dessus), ce qui correspond à un doublement tous les 24 à 25 ans⁽³⁾.

Parmi ceux qui gardent conscience du fait qu'il faut toujours des métaux pour fabriquer les biens matériels que nous utilisons tous, nombre continuent néanmoins à affirmer que l'extraction minière est anachronique, et qu'il n'y a qu'à mieux recycler.

(1) Les données historiques sur la consommation primaire sont moins disponibles que celles relatives à la production minière. Toutefois, les stocks de cuivre (différence entre la production et la consommation) ne représentent guère que quelques semaines de consommation. La production minière annuelle est donc une bonne approximation de la consommation primaire annuelle, c'est-à-dire de ce qui doit s'ajouter au cuivre issu du recyclage pour satisfaire la demande.

(2) Et même un peu plus depuis un siècle et demi : 3,21 % entre 1850 et 2018.

(3) Plus exactement, une croissance constante de 2,87 % par an conduit à un doublement en 24,5 ans. Un doublement tous les 25 ans correspondrait à un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 2,82 %.

Nous avons rappelé (Labbé, 2016), en en détaillant le raisonnement, qu'à l'échelle du monde, tant qu'il y aura croissance de la consommation d'un métal donné, il sera nécessaire que la production primaire (donc minière) suive la même croissance, et ce quel que soit le taux de recyclage de ce métal. L'approvisionnement secondaire restera inférieur aux besoins. La production minière restera donc cruciale et indispensable au niveau mondial.

Cependant, la croissance de la production minière ne pourra pas se poursuivre éternellement, déjà en raison du fait incontournable qu'est la finitude des ressources, mais aussi des oppositions sociétales et des exigences environnementales qui sont de plus en plus prégnantes. L'humanité n'aura donc d'autre choix, un jour, que de se préparer à une fin de la croissance de ses biens matériels, donc, entre autres, de ses villes, construites avec de la matière.

Mais ces raisonnements peinent à être acceptés en raison de la difficulté du cerveau humain à s'approprier vraiment les conséquences incontournables d'une croissance continue sur la durée. Pour aider à la prise de conscience de ce qu'implique une telle croissance, nous proposons de rappeler la légende du jeu d'échec et des grains de blé.

La légende du jeu d'échec et des grains de blé

Une légende dit que le jeu d'échec aurait été inventé en Orient (en Inde ou en Perse) pour distraire et occuper un roi qui s'ennuyait. Enthousiasmé par ce jeu, ce roi aurait

promis à son inventeur de lui offrir ce qu'il voudrait en récompense. L'inventeur aurait demandé à son roi de lui donner cette récompense en grains de blé⁽⁴⁾, en comptant ces grains avec les 64 cases de l'échiquier : 1 grain de blé sur la première case, puis 2 grains sur la deuxième, puis 4 sur la 3^{ème}, puis 8 sur la case suivante, et ainsi de suite, en doublant le nombre de grains de blé à chaque case, jusqu'à la 64^{ème} case.

Le roi sourit de cette bien modeste demande et l'accepta volontiers.

Oui, mais ... prenez le temps de faire le calcul !

Même si vous n'avez pas l'esprit matheux, mais que vous savez quand même faire des multiplications par deux et des additions, vous pouvez faire les calculs à la main⁽⁵⁾, ou au moins vérifier que le tableau de la page suivante (voir le Tableau 1), qui les fait pour vous et en présente les résultats case par case, est bien exact.

On arrive à un total de **18 446 744 073 709 551 615 grains de blé**, soit plus de 18 milliards de milliards de grains de blé.

Les plus matheux d'entre vous arriveront évidemment au même résultat.

Si n est le numéro de la case (n va de 1 à 64), le nombre de grains dans la case n est égal à $2^{(n-1)}$ (en effet, le nombre de grains de chaque case est le double de celui de la case précédente, on augmente donc d'une puissance de 2 à chaque case – sauf pour la première case, puisqu'aucune case ne la précède).

Le cumul du nombre de grains sur l'échiquier jusqu'à la case n est égal au cumul du nombre de grains jusqu'à la case $n-1$ plus le nombre de grains sur la case n . Il est égal à $2^n - 1$.

Le nombre total de grains de blé nécessaires pour tenir la promesse du roi est égal à $2^{64} - 1$, soit là encore **18 446 744 073 709 551 615 grains de blé**.

Alternative : On peut calculer ce nombre avec moins de chiffres significatifs par la formule suivante :

$$2^{64} - 1 = 10^{\log_{10}(2)^{64}} - 1 = 10^{19,26591972} - 1 = 0,26591972 \times 10^{19} - 1 = 1,844674407 \times 10^{19} - 1 \approx 1,844674407 \times 10^{19}$$

(En effet, le « - 1 » est négligeable face à $1,844674407 \times 10^{19}$, qui est déjà à 3 milliards d'unités près si on le compare avec le résultat final du Tableau 1).

Que représentent 18 446 744 073 709 551 615 grains de blé ?

Sachant qu'un grain de blé pèse en moyenne environ 42,5 mg (1 000 grains de blé pèsent en moyenne 42,5 grammes), 18 446 744 073 709 551 615 grains de blé représentent environ 784 milliards de tonnes de blé. **La réalisa-**

tion de la promesse du roi aurait donc nécessité 784 milliards de tonnes de blé.

Sachant que la production mondiale de blé de l'année 2017⁽⁶⁾ a été de 771,7 millions de tonnes (un record historique), **la concrétisation de la promesse du roi aurait nécessité 1 016 années de production mondiale de blé au rythme record de 2017 !** C'est-à-dire qu'elle aurait nécessité davantage que la totalité du blé produit depuis l'invention de l'agriculture jusqu'à nos jours⁽⁷⁾.

Cette histoire illustre surtout à quel point l'esprit humain a du mal à avoir une vision intuitive de ce que donne une croissance exponentielle. Car ne nous moquons pas trop vite de ce roi : spontanément, quelle proportion d'humains d'aujourd'hui (à qui on n'aurait pas raconté cette histoire) n'auraient pas eu la même réaction que ce roi, considérant la demande de l'inventeur comme bien anodine ? Probablement, une bonne proportion.

Et si l'on recyclait ?

Imaginons que, dans un souci d'« économie des ressources », l'inventeur aménage sa demande, en demandant toujours le doublement du nombre de grains de blé dans chaque case, mais en autorisant, pour remplir chaque case, le recyclage de tout le blé des cases précédentes.

Ainsi, dans la case n°1, on place 1 grain de blé. Dans la case n°2, on doit mettre 2 grains de blé, en utilisant (en recyclant) le grain de blé de la case n°1 : on aura donc besoin de n'ajouter qu'un seul nouveau grain de blé (« primaire »). Dans la case n°3, on doit mettre 4 grains de blé, en utilisant les deux grains de blé précédents. On aura donc besoin de 2 nouveaux grains de blé (primaires). Etc.

Attention : on n'a bien que 2 grains de blé antérieurs disponibles, à recycler, pour remplir la case n°3. En effet, le grain de blé de la case n°1 avait déjà été recyclé dans la case n°2 et la case n°1 est donc vide. Ce grain de blé de la case n°1 est recyclé une deuxième fois, mais ce n'est pas pour autant que l'on a 3 grains de blé à recycler pour remplir la case n°3 !

Modifions le tableau précédent en introduisant l'hypothèse d'un recyclage intégral de ce qui avait été utilisé auparavant (voir le Tableau 2 de la page 33). On voit qu'au final, grâce à ce recyclage intégral, on aura eu besoin, arrivé à la 64^{ème} case, de « seulement » 9 223 372 036 854 775 808 grains de blé (= 2^{63}), soit moitié moins (à 1 près⁽⁸⁾) que la quantité dont on aurait eu besoin sans recyclage. Soit « seulement » **508 années de production mondiale de blé au rythme record de 2017...**

(6) Source : FAO, <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>

(7) Sachant que plus on remonte dans le temps, plus la production de blé était faible, ne serait-ce que parce que l'humanité était bien moins nombreuse. On pourrait essayer de chercher ou d'estimer des données historiques pour approcher de manière plus fiable le cumul du blé produit depuis les origines.

(8) On pourra se demander ce que fait ce « - 1 » dans la colonne de droite du premier tableau, alors qu'il disparaît dans la colonne de droite du second tableau. En fait, on pourrait faire disparaître ce « - 1 » en considérant qu'il y avait des cases avant la case n°1 : une case « 0 » avec $\frac{1}{2}$ grain de blé, une case « -1 » avec $\frac{1}{4}$ de grain de blé..., jusqu'à $-\infty$.

(4) D'autres disent « grains de riz », mais cela ne change rien au raisonnement.

(5) Aucune calculatrice ni aucun tableur grand public n'est capable de faire cela, avec autant de chiffres significatifs !

Numéro de la case (n)	Nombre de grains sur la case		Total (cumul) du nombre de grains jusqu'à la case considérée	
1	1	= 2 ⁰	1	= 2 ¹ -1
2	2	= 2 ¹	3	= 2 ² -1
3	4	= 2 ²	7	= 2 ³ -1
4	8	= 2 ³	15	= 2 ⁴ -1
5	16	= 2 ⁴	31	= 2 ⁵ -1
6	32	= 2 ⁵	63	= 2 ⁶ -1
7	64	= 2 ⁶	127	= 2 ⁷ -1
8	128	= 2 ⁷	255	= 2 ⁸ -1
9	256	= 2 ⁸	511	= 2 ⁹ -1
10	512	= 2 ⁹	1 023	= 2 ¹⁰ -1
11	1 024	= 2 ¹⁰	2 047	= 2 ¹¹ -1
12	2 048	= 2 ¹¹	4 095	= 2 ¹² -1
13	4 096	= 2 ¹²	8 191	= 2 ¹³ -1
14	8 192	= 2 ¹³	16 383	= 2 ¹⁴ -1
15	16 384	= 2 ¹⁴	32 767	= 2 ¹⁵ -1
16	32 768	= 2 ¹⁵	65 535	= 2 ¹⁶ -1
17	65 536	= 2 ¹⁶	131 071	= 2 ¹⁷ -1
18	131 072	= 2 ¹⁷	262 143	= 2 ¹⁸ -1
19	262 144	= 2 ¹⁸	524 287	= 2 ¹⁹ -1
20	524 288	= 2 ¹⁹	1 048 575	= 2 ²⁰ -1
21	1 048 576	= 2 ²⁰	2 097 151	= 2 ²¹ -1
22	2 097 152	= 2 ²¹	4 194 303	= 2 ²² -1
23	4 194 304	= 2 ²²	8 388 607	= 2 ²³ -1
24	8 388 608	= 2 ²³	16 777 215	= 2 ²⁴ -1
25	16 777 216	= 2 ²⁴	33 554 431	= 2 ²⁵ -1
26	33 554 432	= 2 ²⁵	67 108 863	= 2 ²⁶ -1
27	67 108 864	= 2 ²⁶	134 217 727	= 2 ²⁷ -1
28	134 217 728	= 2 ²⁷	268 435 455	= 2 ²⁸ -1
29	268 435 456	= 2 ²⁸	536 870 911	= 2 ²⁹ -1
30	536 870 912	= 2 ²⁹	1 073 741 823	= 2 ³⁰ -1
31	1 073 741 824	= 2 ³⁰	2 147 483 647	= 2 ³¹ -1
32	2 147 483 648	= 2 ³¹	4 294 967 295	= 2 ³² -1
33	4 294 967 296	= 2 ³²	8 589 934 591	= 2 ³³ -1
34	8 589 934 592	= 2 ³³	17 179 869 183	= 2 ³⁴ -1
35	17 179 869 184	= 2 ³⁴	34 359 738 367	= 2 ³⁵ -1
36	34 359 738 368	= 2 ³⁵	68 719 476 735	= 2 ³⁶ -1
37	68 719 476 736	= 2 ³⁶	137 438 953 471	= 2 ³⁷ -1
38	137 438 953 472	= 2 ³⁷	274 877 906 943	= 2 ³⁸ -1
39	274 877 906 944	= 2 ³⁸	549 755 813 887	= 2 ³⁹ -1
40	549 755 813 888	= 2 ³⁹	1 099 511 627 775	= 2 ⁴⁰ -1
41	1 099 511 627 776	= 2 ⁴⁰	2 199 023 255 551	= 2 ⁴¹ -1
42	2 199 023 255 552	= 2 ⁴¹	4 398 046 511 103	= 2 ⁴² -1
43	4 398 046 511 104	= 2 ⁴²	8 796 093 022 207	= 2 ⁴³ -1
44	8 796 093 022 208	= 2 ⁴³	17 592 186 044 415	= 2 ⁴⁴ -1
45	17 592 186 044 416	= 2 ⁴⁴	35 184 372 088 831	= 2 ⁴⁵ -1
46	35 184 372 088 832	= 2 ⁴⁵	70 368 744 177 663	= 2 ⁴⁶ -1
47	70 368 744 177 664	= 2 ⁴⁶	140 737 488 355 327	= 2 ⁴⁷ -1
48	140 737 488 355 328	= 2 ⁴⁷	281 474 976 710 655	= 2 ⁴⁸ -1
49	281 474 976 710 656	= 2 ⁴⁸	562 949 953 421 311	= 2 ⁴⁹ -1
50	562 949 953 421 312	= 2 ⁴⁹	1 125 899 906 842 623	= 2 ⁵⁰ -1
51	1 125 899 906 842 624	= 2 ⁵⁰	2 251 799 813 685 247	= 2 ⁵¹ -1
52	2 251 799 813 685 248	= 2 ⁵¹	4 503 599 627 370 495	= 2 ⁵² -1
53	4 503 599 627 370 496	= 2 ⁵²	9 007 199 254 740 991	= 2 ⁵³ -1
54	9 007 199 254 740 992	= 2 ⁵³	18 014 398 509 481 983	= 2 ⁵⁴ -1
55	18 014 398 509 481 984	= 2 ⁵⁴	36 028 797 018 963 967	= 2 ⁵⁵ -1
56	36 028 797 018 963 968	= 2 ⁵⁵	72 057 594 037 927 935	= 2 ⁵⁶ -1
57	72 057 594 037 927 936	= 2 ⁵⁶	144 115 188 075 855 871	= 2 ⁵⁷ -1
58	144 115 188 075 855 872	= 2 ⁵⁷	288 230 376 151 711 743	= 2 ⁵⁸ -1
59	288 230 376 151 711 744	= 2 ⁵⁸	576 460 752 303 423 487	= 2 ⁵⁹ -1
60	576 460 752 303 423 488	= 2 ⁵⁹	1 152 921 504 606 846 975	= 2 ⁶⁰ -1
61	1 152 921 504 606 846 976	= 2 ⁶⁰	2 305 843 009 213 693 951	= 2 ⁶¹ -1
62	2 305 843 009 213 693 952	= 2 ⁶¹	4 611 686 018 427 387 903	= 2 ⁶² -1
63	4 611 686 018 427 387 904	= 2 ⁶²	9 223 372 036 854 775 807	= 2 ⁶³ -1
64	9 223 372 036 854 775 808	= 2⁶³	18 446 744 073 709 551 615	= 2⁶⁴ -1

Tableau 1 : Calcul du nombre de grains de blé nécessaires sur chaque case, et en cumulé arrivé à chaque case.

Numéro de la case (n)	Nombre de grains à ajouter dans la case considérée si on recycle dans cette case tous les grains déjà déposés dans les cases précédentes	Total (cumul) du nombre de grains utilisés en arrivant à la case considérée dans l'hypothèse d'un recyclage intégral des grains de blés utilisés dans les cases précédentes.
1	1	1 = 2 ⁰
2	1	2 = 2 ¹
3	2	4 = 2 ²
4	4	8 = 2 ³
5	8	16 = 2 ⁴
6	16	32 = 2 ⁵
7	32	64 = 2 ⁶
8	64	128 = 2 ⁷
9	128	256 = 2 ⁸
10	256	512 = 2 ⁹
11	512	1 024 = 2 ¹⁰
12	1 024	2 048 = 2 ¹¹
13	2 048	4 096 = 2 ¹²
14	4 096	8 192 = 2 ¹³
15	8 192	16 384 = 2 ¹⁴
16	16 384	32 768 = 2 ¹⁵
17	32 768	65 536 = 2 ¹⁶
18	65 536	131 072 = 2 ¹⁷
19	131 072	262 144 = 2 ¹⁸
20	262 144	524 288 = 2 ¹⁹
21	524 288	1 048 576 = 2 ²⁰
22	1 048 576	2 097 152 = 2 ²¹
23	2 097 152	4 194 304 = 2 ²²
24	4 194 304	8 388 608 = 2 ²³
25	8 388 608	16 777 216 = 2 ²⁴
26	16 777 216	33 554 432 = 2 ²⁵
27	33 554 432	67 108 864 = 2 ²⁶
28	67 108 864	134 217 728 = 2 ²⁷
29	134 217 728	268 435 456 = 2 ²⁸
30	268 435 456	536 870 912 = 2 ²⁹
31	536 870 912	1 073 741 824 = 2 ³⁰
32	1 073 741 824	2 147 483 648 = 2 ³¹
33	2 147 483 648	4 294 967 296 = 2 ³²
34	4 294 967 296	8 589 934 592 = 2 ³³
35	8 589 934 592	17 179 869 184 = 2 ³⁴
36	17 179 869 184	34 359 738 368 = 2 ³⁵
37	34 359 738 368	68 719 476 736 = 2 ³⁶
38	68 719 476 736	137 438 953 472 = 2 ³⁷
39	137 438 953 472	274 877 906 944 = 2 ³⁸
40	274 877 906 944	549 755 813 888 = 2 ³⁹
41	549 755 813 888	1 099 511 627 776 = 2 ⁴⁰
42	1 099 511 627 776	2 199 023 255 552 = 2 ⁴¹
43	2 199 023 255 552	4 398 046 511 104 = 2 ⁴²
44	4 398 046 511 104	8 796 093 022 208 = 2 ⁴³
45	8 796 093 022 208	17 592 186 044 416 = 2 ⁴⁴
46	17 592 186 044 416	35 184 372 088 832 = 2 ⁴⁵
47	35 184 372 088 832	70 368 744 177 664 = 2 ⁴⁶
48	70 368 744 177 664	140 737 488 355 328 = 2 ⁴⁷
49	140 737 488 355 328	281 474 976 710 656 = 2 ⁴⁸
50	281 474 976 710 656	562 949 953 421 312 = 2 ⁴⁹
51	562 949 953 421 312	1 125 899 906 842 624 = 2 ⁵⁰
52	1 125 899 906 842 624	2 251 799 813 685 248 = 2 ⁵¹
53	2 251 799 813 685 248	4 503 599 627 370 496 = 2 ⁵²
54	4 503 599 627 370 496	9 007 199 254 740 992 = 2 ⁵³
55	9 007 199 254 740 992	18 014 398 509 481 984 = 2 ⁵⁴
56	18 014 398 509 481 984	36 028 797 018 963 968 = 2 ⁵⁵
57	36 028 797 018 963 968	72 057 594 037 927 936 = 2 ⁵⁶
58	72 057 594 037 927 936	144 115 188 075 855 872 = 2 ⁵⁷
59	144 115 188 075 855 872	288 230 376 151 711 744 = 2 ⁵⁸
60	288 230 376 151 711 744	576 460 752 303 423 488 = 2 ⁵⁹
61	576 460 752 303 423 488	1 152 921 504 606 846 976 = 2 ⁶⁰
62	1 152 921 504 606 846 976	2 305 843 009 213 693 952 = 2 ⁶¹
63	2 305 843 009 213 693 952	4 611 686 018 427 387 904 = 2 ⁶²
64	4 611 686 018 427 387 904	9 223 372 036 854 775 808 = 2 ⁶³
65	9 223 372 036 854 775 808	18 446 744 073 709 551 616 = 2⁶⁴

Tableau 2 : Calcul du nombre de grains de blé nécessaires sur chaque case en recyclant les grains des cases précédentes, et en nombre cumulé total.

Mais imaginons que l'échiquier ait une 65^{ème} case, et que l'on continue comme précédemment pour remplir cette 65^{ème} case (voir le bas du Tableau 2 de la page suivante) : on doublerait le nombre des grains de la 64^{ème} case en y recyclant tous les grains de cette 64^{ème} case, laquelle inclut déjà le recyclage de toutes les cases précédentes. On voit alors que l'on aura eu besoin, pour remplir la case 65, de 18 446 744 073 709 551 616 grains de blé en cumulé, avec un recyclage intégral, soit autant (à un grain près) que le nombre cumulé de grains de blé de la case 64, sans recyclage.

Quel est le rapport avec les matières premières métalliques ?

Comme nous l'avons vu plus haut, la consommation mondiale de cuivre augmente d'au moins 2,87 % par an depuis plus d'un siècle et demi, ce qui correspond à un doublement tous les 24,5 ans. C'est-à-dire que, pour le cuivre, on avance d'une case sur l'échiquier tous les 24 ou 25 ans⁽⁹⁾.

Le nombre d'atomes de cuivre présents sur Terre étant fini, on voit bien que si l'on continuait sur cette lancée, il y aurait bien un temps, pas si lointain, où l'on aurait épuisé la totalité du cuivre présent dans la croûte terrestre (avec la consommation d'aujourd'hui et une poursuite de la croissance de la consommation de 2,87 % par an, on arriverait à un épuisement de la totalité des atomes de cuivre contenu dans le premier kilomètre d'épaisseur de la croûte continentale terrestre en l'an 2387⁽¹⁰⁾). On voit aussi que si l'on recyclait la totalité du cuivre consommé précédemment au bout de 24 ou 25 ans⁽¹¹⁾, cela ne ferait que reporter de 24 ou 25 ans l'épuisement final, qui serait alors reporté à l'an 2412.

Sauf à imaginer la fin du monde à la case 64, il y aura une case 65, et il faudra bien produire, avec recyclage intégral, autant de cuivre que l'on aurait eu à en produire sans recyclage, mais 24 ou 25 ans plus tard.

Des exercices similaires sont faisables sur la grande majorité des autres métaux, et sur bien d'autres domaines que celui des matières premières métalliques.

(9) Pour bien comprendre le passage d'une croissance quasi continue de la consommation de cuivre à un doublement discontinu de case en case, il suffit de considérer le cumul de la consommation par périodes de 25 ans. On met dans une case la consommation cumulée pendant un intervalle de 25 ans, et sur la case suivante la consommation cumulée pendant les 25 années suivantes. Alors, on observe facilement que la quantité de cuivre double (approximativement) à chaque case.

(10) Sur la base d'une surface totale des terres émergées de la planète de 149,4 millions de km² et d'un Clarke (teneur moyenne globale) en cuivre de l'écorce continentale terrestre de 60 ppm, on peut calculer que la quantité ultime de cuivre contenue dans le premier kilomètre d'épaisseur de l'écorce terrestre des terres émergées serait de 24 200 Gt (milliards de tonnes). Si l'on devait poursuivre sans discontinuer avec une croissance de la consommation en cuivre de 2,87 % par an, c'est cette quantité de cuivre qu'il faudra extraire de terre en l'an 2387 ! Plus raisonnablement, l'USGS estime la quantité totale de ressources en cuivre qu'il serait techniquement réaliste d'espérer récupérer à 6,2 Gt (dont 2 Gt de ressources continentales et 0,7 Gt de ressources sous-marines identifiées, et 3,5 Gt de ressources hypothétiques qu'il resterait à découvrir). Une poursuite de la croissance de 2,87 % épuiserait la totalité de ces ressources en 2094.

(11) Ce n'est qu'un exemple théorique. En réalité, la « durée de vie » des objets utilisant du cuivre est assez variable (Graedel l'estimait, en moyenne, à 35 ans).

Un peu de recul devrait faire prendre conscience du fait que ce ne sera pas possible, et qu'il ne sera pas possible de maintenir une croissance de la consommation des matières premières de manière durable.

Le recyclage même optimal, même total, ne peut pas rendre la croissance durable.

La prise en compte des déchets accumulés antérieurement changerait-elle la donne ?

Le raisonnement détaillé dans le Tableau 2 de la page précédente faisait l'hypothèse que dès le début, on recyclait au fur et à mesure ce qui avait été récolté antérieurement pour les cases précédentes. Il ne tenait pas compte du fait que des grains de blé (ou des déchets en fin de vie en ce qui concerne les métaux) avaient pu s'accumuler avant que l'on songe à les recycler.

Imaginons alors un troisième scénario. Le roi commence par le scénario 1, en doublant le nombre de grains de blé de chaque case, tout en laissant dans toutes les cases précédentes le blé qui y avait déjà été accumulé. Arrivé à la 40^{ème} case, par exemple, le roi commence quand même à s'inquiéter de la quantité de blé à rassembler. Pour respecter la promesse, il faut mettre dans cette 40^{ème} case 549 755 813 888 grains, soit environ 23 364 tonnes de blé, ce qui, avec le blé déjà déposé dans les cases antérieures, représenterait un total de 1 099 511 627 775 grains (voir la ligne 40 du Tableau 1), soit environ 46 728 tonnes de blé.

Le roi relit alors plus attentivement sa promesse, et prend conscience qu'il a juste promis de mettre dans chaque case le double de ce qu'il avait déjà mis dans la case précédente, mais qu'il ne s'était jamais engagé à laisser dans les cases précédentes le blé qu'il y avait déjà déposé. Il se dit alors qu'il n'a qu'à récupérer tout le blé accumulé dans les cases 1 à 39 – ce cumul étant de 549 755 813 887 grains –, et le déposer sur la case 40. Il lui suffira alors d'y ajouter un seul nouveau grain de blé. Ainsi, il aura pu se passer presque intégralement de tout approvisionnement primaire. Ouf ! Sauvé, pense-t-il : le recyclage m'a permis de m'abstraire pratiquement de tout nouvel approvisionnement primaire.

Oui, mais... pour la case 41, où il faut 1 099 511 627 776 grains, on aura de disponible à recycler que les 549 755 813 888 grains présents dans la case 40, puisque toutes les cases antérieures auront été vidées, leur blé ayant été rassemblé dans la case 40. Il faudra donc bien récolter, trouver un nouvel approvisionnement primaire, de 549 755 813 888 nouveaux grains de blé. C'est-à-dire que l'on bascule alors dans le scénario du Tableau 2. Il faudra continuer à ajouter à chaque case le double de ce que l'on aura ajouté sur la case précédente, tout en recyclant désormais en continu de case en case.

Pour mieux illustrer ce raisonnement, un Tableau 3 est proposé en page suivante, avec l'hypothèse d'un recyclage qui, inexistant jusqu'à la case 39, est mis en œuvre à partir de la case 40. On voit que le cumul est identique au cumul du Tableau 1 jusqu'à la case 39, puis au cumul

Numéro de la case (n)	Nombre de grains à ajouter dans la case considérée, sans recycler les grains déposés les cases précédentes jusqu'à la case 39, puis en les recyclant à partir de la case 40	
1	1	= 2 ⁰
2	2	= 2 ¹
3	4	= 2 ²
4	8	= 2 ³
5	16	= 2 ⁴
6	32	= 2 ⁵
7	64	= 2 ⁶
8	128	= 2 ⁷
9	256	= 2 ⁸
⋮	⋮	⋮
33	4 294 967 296	= 2 ³²
34	8 589 934 592	= 2 ³³
35	17 179 869 184	= 2 ³⁴
36	34 359 738 368	= 2 ³⁵
37	68 719 476 736	= 2 ³⁶
38	137 438 953 472	= 2 ³⁷
39	274 877 906 944	= 2 ³⁸
40	1	
41	549 755 813 888	= 2 ³⁹
42	1 099 511 627 776	= 2 ⁴⁰
43	2 199 023 255 552	= 2 ⁴¹
44	4 398 046 511 104	= 2 ⁴²
45	8 796 093 022 208	= 2 ⁴³
46	17 592 186 044 416	= 2 ⁴⁴
⋮	⋮	⋮
58	72 057 594 037 927 936	= 2 ⁵⁶
59	144 115 188 075 855 872	= 2 ⁵⁷
60	288 230 376 151 711 744	= 2 ⁵⁸
61	576 460 752 303 423 488	= 2 ⁵⁹
62	1 152 921 504 606 846 976	= 2 ⁶⁰
63	2 305 843 009 213 693 952	= 2 ⁶¹
64	4 611 686 018 427 387 904	= 2 ⁶²
65	9 223 372 036 854 775 808	= 2 ⁶³

Total (cumul) du nombre de grains utilisés en arrivant à la case considérée dans l'hypothèse d'un recyclage intégral des grains de blés utilisés dans les cases précédentes uniquement à partir de la case 40.		
1	= 2 ¹	-1
3	= 2 ²	-1
7	= 2 ³	-1
15	= 2 ⁴	-1
31	= 2 ⁵	-1
63	= 2 ⁶	-1
127	= 2 ⁷	-1
255	= 2 ⁸	-1
511	= 2 ⁹	-1
⋮	⋮	⋮
1ère partie du tableau, identique au tableau 1		
8 589 934 591	= 2 ³³	-1
17 179 869 183	= 2 ³⁴	-1
34 359 738 367	= 2 ³⁵	-1
68 719 476 735	= 2 ³⁶	-1
137 438 953 471	= 2 ³⁷	-1
274 877 906 943	= 2 ³⁸	-1
549 755 813 887	= 2 ³⁹	-1
549 755 813 888	= 2 ³⁹	
1 099 511 627 776	= 2 ⁴⁰	
2 199 023 255 552	= 2 ⁴¹	
4 398 046 511 104	= 2 ⁴²	
8 796 093 022 208	= 2 ⁴³	
17 592 186 044 416	= 2 ⁴⁴	
35 184 372 088 832	= 2 ⁴⁵	
⋮	⋮	⋮
2ème partie du tableau, identique au tableau 2		
144 115 188 075 855 872	= 2 ⁵⁷	
288 230 376 151 711 744	= 2 ⁵⁸	
576 460 752 303 423 488	= 2 ⁵⁹	
1 152 921 504 606 846 976	= 2 ⁶⁰	
2 305 843 009 213 693 952	= 2 ⁶¹	
4 611 686 018 427 387 904	= 2 ⁶²	
9 223 372 036 854 775 808	= 2 ⁶³	
18 446 744 073 709 551 616	= 2 ⁶⁴	

Tableau 3 : Calcul du nombre de grains de blé nécessaires sur chaque case, et en cumulé total, sans recycler jusqu'à la case 39, puis en recyclant intégralement le contenu des cases précédentes à partir de la case 40.

du Tableau 2 à partir de la case 40. Ce raisonnement serait exactement le même si l'on n'avait commencé à recycler qu'à partir de la case 48 ou de la case 55.

Ainsi, décider un jour de recycler tout ce qui avait été accumulé antérieurement ne permet que de passer, ce jour-là (c'est-à-dire à partir de cette case-là), du Tableau 1 au Tableau 2. Cela change momentanément le problème, le temps d'une case, mais ne change rien pour les cases suivantes par rapport au Tableau 2.

Pour respecter la promesse de mettre 2⁶³ (= 9 223 372 036 854 775 808) grains de blé dans la 64^{ème} case, il faut bien avoir récolté en cumulé 9 223 372 036 854 775 808 grains de blé au minimum (à condition que le blé des cases précédentes ait été recyclé, que ce soit au fur et à mesure (voir le Tableau 2), ou juste à un moment donné (voir le Tableau 3). Les lignes 64 et 65 du Tableau 3 sont strictement identiques à celles du Tableau 2.

Ainsi, le fait que l'on ait accumulé un stock de déchets et que l'on décide un jour de mettre tout ce stock dans un circuit de recyclage ne change absolument rien au problème d'approvisionnement des générations futures, par rapport à un recyclage en continu, au fur et à mesure.

Le recyclage intégral permet de diviser par deux le nombre de grains à récolter en cumulé par rapport au nombre de grains nécessaires en l'absence de recyclage (2⁶³ grains à récolter en primaire en ayant recyclé, par rapport à 2⁶⁴-1 grains à récolter au total sans recyclage), que ce recyclage ait été fait en continu pour chaque case ou en une seule fois pour une case donnée (ou même étalé en plusieurs fois sur plusieurs cases). Et dans tous ces scénarios de recyclage, une case 65 imposerait une récolte d'une quantité de blé identique à celle de la case 64 sans recyclage.

Conclusion

Le calcul tiré de la légende des grains de blé sur un jeu d'échec devrait aider à faire prendre conscience de l'impossibilité d'une croissance continue dans la durée de la consommation d'un métal donné, par exemple le cuivre : ce n'est pas parce qu'il n'y a pas eu de problème jusqu'à présent pour assurer le doublement de l'approvisionnement en cuivre tous les 25 ans, qu'il sera toujours aussi aisé de soutenir une croissance de 2,87 % par an de cet approvisionnement dans un futur pas si éloigné.

En effet, on a vu que sur la 40^{ème} case, par exemple, il faut mettre 23 364 tonnes de blé. Au vu des productions actuelles de blé, ce sont des brouilles : cela ne représente, par exemple, que 0,5 % de la production de blé de la seule région Centre-Val-de-Loire en 2018 (de l'ordre de 4,77 Mt).

On en est pourtant déjà à la 40^{ème} case. Certains en déduiront que, puisque remplir les 40 premières cases en doublant à chaque fois a été facile, il n'y a pas de raisons que cela pose plus de difficultés dans le futur.

Mais le calcul fait précédemment montre que la poursuite du processus conduira à un besoin à la 64^{ème} case variant de 392 Gt de blé (avec recyclage intégral) à 784 Gt de blé (sans recyclage), soit entre 508 et 1 016 années de production mondiale de blé au rythme record de 2017 !

Si 2,87 % par an se traduit par un doublement tous les 24 ou 25 ans, rappelons qu'une croissance de 1 % par an se traduit par un doublement tous les 70 ans. Même une réduction de la croissance à 1 % ne sera pas une assurance de durabilité.

Une déclinaison de cette légende incluant le recyclage illustre aussi que, tant qu'il y aura croissance de la demande d'un métal donné, le recyclage, même optimal, même total, ne pourra satisfaire la demande. Le recyclage total ne permettra que de gagner une case (25 ans dans le cas du cuivre, 70 ans dans le cas d'une croissance à 1 %) par rapport à l'absence de recyclage.

Ainsi, tant qu'il y a croissance, il faut admettre que la production minière reste indispensable et il convient de ne pas se l'interdire en pensant, à tort, qu'il suffirait, à la place, de recycler. À terme, il faudra s'adapter à une fin inéluctable de la croissance matérielle.

Bibliographie

McKINSEY & Co./Ellen MACARTHUR Foundation (2012), *Towards the circular economy (Vers une économie circulaire)*, 92 pages, www.thecirculareconomy.org

GRAEDEL T. E. *et al.* (2010), *Metal stocks in society, scientific synthesis*, Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE/UNEP), 44 pages, 7 figures, 8 app., www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metalstocksinsociety.pdf

GRAEDEL T. E. *et al.* (2011), *Recycling rates of metals, a status report*, Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE/UNEP), 48 pages, 4 figures, 2 app., www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf

GROSSE F. (2010), « De l'économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité : vertus et limites du recyclage », *Futuribles*, n°365, juillet-août.

GROSSE F. (2010), "Is recycling part of the solution? The role of recycling in an expanding society and a world of finite resources", *S.A.P.I.E.N.S.*, vol. 3, n°1, <http://sapiens.revues.org>

LABBÉ J. F. (2016), « Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux », *Annales des Mines, Responsabilité & Environnement*, n°82.

LABBÉ J. F. (2017), « Grains de blé sur jeu d'échec », *Géochronique*, n°143, Coédition SGF-BRGM.

MEADOWS D. *et al.* (2004), *The limits to growth, the 30 years update* (traduction en français de 2012, Éditions Rue de l'Échiquier).

SCHMITZ C. J. (1979), *World non-ferrous metal production and prices, 1700-1976*, Frank Cass and Company Ltd, Gainsborouh Rd, London, E11 1 RS, UK, 430 p.

TERCERO ESPINOZA L. A. (2012), "The contribution of recycling to the supply of metals and minerals", *Polinares Working Paper*, n°20, European Commission, March, 9 p., www.polinares.eu/docs/d2-1/polinares_wp2_chapter8.pdf

Sites Internet

International Copper Study Group : www.icsg.org

USGS mineral commodities : minerals.usgs.gov

Mineralinfo/AS3M : www.mineralinfo.fr

Le recyclage des cartes électroniques en France

Par Christian THOMAS

Fondateur et directeur scientifique de TND, président du pôle de compétitivité TEAM²

Les cartes électroniques en fin de vie des équipements les contenant constituent, après récupération, une matière riche en métaux précieux et critiques. Leur recyclage est donc non seulement pertinent, mais également rentable.

La mise en place de dispositifs réglementaires relatifs au traitement des DEEE et des VHU a permis d'améliorer leur collecte et leur traitement de premier niveau.

La France a entrepris un important effort de R&D pour extraire et purifier les métaux contenus dans ces déchets particulièrement difficiles à traiter. Cependant, elle ne dispose pas encore d'une industrie métallurgique suffisamment forte ; de fait, l'essentiel des métaux contenus dans nos déchets partent à l'étranger, notamment en direction de l'Asie du Sud-Est.

Nous dressons dans cet article un tableau de la situation actuelle, des acteurs du marché français et des projets émergents.

Introduction

Avant de détailler l'activité de recyclage des cartes électroniques en France, il est indispensable d'en retracer l'itinéraire.

80 % des cartes sont produites en Asie du Sud-Est. Le volume total de cartes produites dans le monde est de l'ordre de 2,5 millions de tonnes par an. L'Europe consomme environ 25 % de ces cartes, qui sont intégrées dans toutes sortes d'appareils électriques, électroniques, dans les automobiles...

On récupère et commercialise dans le monde 540 000 tonnes de déchets de cartes électroniques, qui sont traitées dans neuf fonderies de cuivre.

À cela s'ajoute une économie informelle en Afrique, en Inde ou au Pakistan, des pays dans lesquels des traitements sommaires permettent de récupérer un peu d'or et de cuivre dans des conditions environnementales désastreuses.

Itinéraire d'une carte électronique

Comprendre les étapes techniques de la vie d'une carte est essentiel pour apprécier la complexité et la variabilité du déchet final.

Fabrication du substrat

Le substrat se présente comme un sandwich constitué de couches de fibre de verre tissée et imprégnée de résine époxy et de feuilles de cuivre. La fabrication se fait couche par couche. À chaque étape, la feuille de cuivre est gra-

vée chimiquement par lixiviation afin de créer un réseau électrique. Lorsque toutes les couches sont en place, des trous sont percés à des endroits précis afin de mettre en contact les réseaux électriques créant ainsi un réseau tri-dimensionnel.

Mise en place des composants

Les composants (résistances, condensateurs, microprocesseurs, etc.) sont alors installés sur la carte, puis fixés par des points de soudure à base d'étain. La masse des composants est en moyenne égale à celle du substrat. La composition chimique des composants est très variée. Certains composants sont fixés par des vis, ou simplement encastrés dans des fentes.

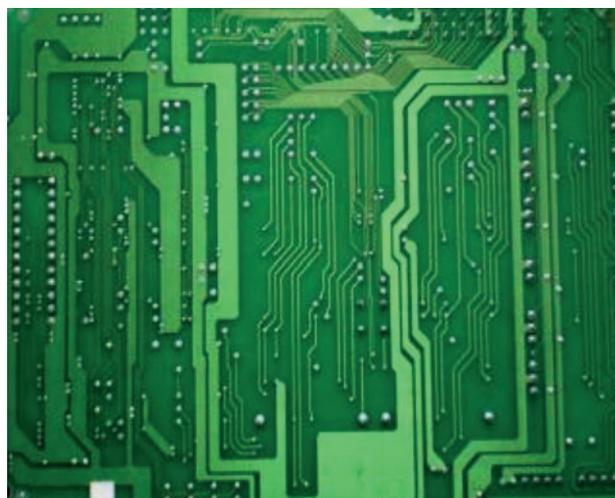


Figure 1 : Exemple d'une carte mère d'ordinateur (Les petits points blancs sont des soudures).

Intégration

La carte est ensuite intégrée dans l'appareil électrique ou électronique. Elle est soit insérée, soit vissée, puis raccordée par des fils électriques. À titre d'exemple, une carte de télévision LCD est fixée par plus d'une centaine de vis.

S'ajoutent donc à la carte, des châssis métalliques, des transformateurs, des batteries, des écrans, des boîtiers thermoplastiques (ABS, polypropylène, etc.)...

Le poids des cartes électroniques proportionnellement aux équipements dans lesquels elles sont intégrées varie considérablement d'un appareil à l'autre : 10 % pour un écran LCD, 30 % pour une tablette, et moins de 0,1 % dans le cas d'un réfrigérateur.

Une part non négligeable des cartes est utilisée dans des applications qui ne relèvent pas des équipements électriques et électroniques (EEE). L'électronique a acquis une position forte, notamment dans les véhicules automobiles. Aujourd'hui, les cartes électroniques issues des VHU représentent en potentiel le deuxième gisement tant par sa richesse que par les quantités qu'elles représentent. La croissance des quantités de cartes électroniques destinées aux véhicules automobiles est de l'ordre de 9 % par an, et la tendance devrait s'accroître.

Démantèlement

Comme les appareils électroniques ne sont pas conçus pour être réparés, leur démantèlement est difficile. Même triés par familles, les appareils arrivent en vrac chez le démanteleur.

Le démantèlement comprend des opérations manuelles, à la fois du broyage et des opérations de séparation physique. Les fractions suivantes sont ainsi extraites :

- la ferraille,
- l'aluminium et le cuivre,
- les plastiques,
- le verre et les céramiques,
- et les cartes électroniques.

Une partie de ces cartes est perdue, et les cartes récupérées sont polluées par des matières provenant de l'appareil démantelé.

Le cas des VHU

La filière de traitement des VHU est plus ancienne que la filière D3E. Aujourd'hui, la directive européenne 2000/53/CE a fixé un objectif visant à porter à un minimum de 95 % le taux de réutilisation et de valorisation de ces déchets. Cela a poussé les démanteleurs à développer de nouvelles méthodes de traitement. La séparation densimétrique permet de collecter une fraction importante et croissante des cartes électroniques présentes dans les véhicules. Le produit collecté est naturellement très contaminé par d'autres fractions.

L'extraction des métaux

Le cuivre étant le métal dominant dans ces déchets, les fonderies de cuivre ont été tout naturellement les premières à traiter cette matière. On ne dénombre cependant que neuf usines dans le monde capables de traiter ces

cartes. En effet, adapter une usine de cuivre pour qu'elle assure un tel traitement, demande un grand savoir-faire et coûte cher (CAPEX de l'ordre de 4 000 €/t.an de capacité de traitement des cartes). La capacité de traitement de ces cartes avoisine les 540 kt par an. Les acteurs principaux sont les fonderies de cuivre primaire de Saganoseki et Naoshima au Japon, de Horne au Canada, de Rönnskär en Suède et de Onsan en Corée du Sud, auxquelles il faut ajouter de gigantesques fonderies de cuivre secondaire qui se sont développées autour des années 2000 : il s'agit notamment d'Hoboken en Belgique en 1997, de Lünen en Allemagne en 2002 et d'Akita/Kosaka au Japon en 2007.

Elles extraient de façon performante (récupération à hauteur de 98 %) le cuivre et les métaux précieux. En revanche, certains métaux ne sont pas récupérables, comme l'étain ou le tantale. Elles présentent également certaines limites en termes de capacité de traitement de ces matières complexes que sont les déchets électroniques.

Les procédés de séparation physique (broyage et séparation gravimétrique) progressent sous l'impulsion des équipementiers chinois et turcs dans les pays en voie de développement. Les pertes en métaux sont toutefois importantes (de l'ordre de 15 %). Ils génèrent également un déchet ultime contenant des plastiques pollués en métaux lourds et en halogènes. Les métaux obtenus doivent être traités au sein des fonderies de cuivre.

Enfin, les secteurs informels occupent une place importante dans le traitement des DEEE en Afrique, en Inde et en Chine. L'« acid process » est un procédé très polluant et peu efficace ; il est souvent associé à la fabrication d'objets en or.

Un déchet riche en métaux critiques, mais difficile à traiter

Une mine urbaine riche

Les cartes électroniques constituent un déchet particulièrement riche en métaux critiques. Les teneurs en or, en palladium, en tantale, en étain ou en antimoine sont généralement très supérieures à celles que l'on trouve dans les mines.

Ces déchets contiennent des métaux classés critiques en raison de leur utilité pour notre industrie et des menaces pesant sur leur approvisionnement. C'est le cas du palladium, de l'étain, du tantale et du cobalt.

La teneur en or des cartes électroniques est comprise entre 10g/t et 1 000 g/t, ce qui est à comparer à la teneur des mines d'or qui atteint 10g/t dans les mines souterraines les plus riches et seulement 1g/t dans les mines à ciel ouvert.

Le même commentaire s'applique au palladium, dont la teneur varie entre 5 et 100 g/t dans les cartes électroniques et culmine à 7g/t dans les mines souterraines.

Les mines d'étain sont exploitées à des teneurs de l'ordre de 1 %, alors que les cartes électroniques contiennent couramment 2 % d'étain.

Dans les cartes d'appareils nomades (tablettes, télé-

phones...), le tantale est présent à hauteur de 1 000 à 3 000 g/t, alors que les mines de tantale sont exploitées à des teneurs de 300 g/t.

	substrat	composants	carte
Cu	30%	10%	20%
Fe+Ni+Mo+Cr	0%	30%	15%
Al	0%	20%	10%
Zn	0%	5%	3%
Sn+Pb+Sb	1%	5%	3%
C	21%	10%	16%
H	5%	2%	4%
N	0%	1%	1%
O	2%	1%	2%
Br+Cl	1%	1%	1%
SiO ₂	23%	6%	15%
Al ₂ O ₃	7%	2%	5%
CaO	8%	2%	5%
B ₂ O ₃	2%		1%
Autres		5%	3%
	100%	100%	100%
Précieux ppm	10	1000 à 10000	500 à 5000

Outre sa richesse en termes de diversité, c'est une mine abondante. En effet, les équipements électriques et électroniques utilisent :

- 50 % du tantale produit dans le monde,
- 50 % du cobalt,
- et 40 % de l'étain.

Une matière complexe

Le déchet « carte électronique » présente à ce stade une très grande variabilité. Il est composé de trois grandes familles de matériaux :

- Les métaux, dans une proportion de 25 % à 40 % (les principaux sont le cuivre, le fer et l'aluminium). La « dimension » de ces métaux varie de quelques microns (plaquage d'or, par exemple) à quelques centimètres, rendant l'échantillonnage particulièrement difficile à traiter.
- Des verres et céramiques, pour 20 % à 40 %.
- Des organiques, pour 40 % à 60 %.

Une cinquantaine d'éléments chimiques composent ce déchet. La présence de métaux lourds (comme le plomb), d'halogènes (comme le brome) et de substances organiques dangereuses rendent ces matières difficiles à traiter.

Une source de métaux stratégiques

L'évolution récente de l'électronique nomade (tablettes, GPS, portables...) s'accompagne d'un effet pervers, l'impossibilité de séparer la batterie lithium de l'appareil. On retrouve donc dans ces DEEE les composants de ces batteries : cobalt, nickel, lithium...

Dans le souci d'obtenir fiabilité et légèreté, les composants électroniques contiennent du palladium et du tantale.

Sécuriser l'approvisionnement en ces métaux est essentiel pour notre industrie aéronautique, de production d'énergie, d'équipements chimiques et médicaux.

Le cadre réglementaire français

La directive européenne sur le traitement des DEEE (initialement 2002/95/CE du 27 janvier 2003, puis 2012/19/UE du 4 juillet 2012) est fondée sur la responsabilité élargie du producteur et définit le cadre réglementaire de la collecte de ces déchets et les objectifs à atteindre en la matière.

La filière de collecte et de recyclage des DEEE est opérationnelle en France, depuis le 22 juillet 2005, pour les DEEE professionnels, et depuis le 15 novembre 2006, pour les DEEE ménagers.

En pratique, les metteurs en marché délèguent cette responsabilité aux éco-organismes qui interviennent en tant que délégataires des pouvoirs publics. L'instruction par les pouvoirs publics des candidatures déposées a abouti à l'agrément des éco-organismes suivants pour les différentes catégories d'équipements :

- Ecologic (pour les catégories 1 à 4, 6, 7, 10 et 14),
- Ecosystem (pour les catégories 1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 12 et 13),
- et Screlec (pour la catégorie 14).

Les éco-organismes deviennent propriétaires du déchet ; ils en organisent la collecte et le démantèlement. Des appels d'offres sont régulièrement lancés auprès d'acteurs industriels pour réaliser ces tâches. Les coûts sont ensuite facturés aux metteurs en marché qui les facturent à leur tour à leurs clients par le biais de l'écotaxe associée à chaque vente.

Les taux de collecte progressent année après année ainsi que la qualité des traitements associés, qui permettent de traiter près de 700 000 t de DEEE chaque année.

Cependant, du point de vue de la collecte des cartes électroniques et du suivi du recyclage des métaux qu'elles contiennent, le système n'est pas parfait.

En effet, les statistiques de collecte additionnent des produits blancs embarquant très peu de cartes à des produits IT en contenant jusqu'à 30 % de leur poids.

Enfin, une partie des cartes n'entrent pas dans ce schéma, par exemple les équipements électroniques embarqués dans les véhicules.

La collecte et le démantèlement

La typologie des acteurs français

Cette typologie peut se résumer à deux grandes familles :

- Les acteurs de l'économie sociale et solidaire, tels qu'Envie 2E ou Emmaüs. Ces acteurs mettent l'accent sur la réutilisation des appareils lorsque ceux-ci peuvent être réparés.
- Les professionnels du déchet : Veolia, Suez, Derichebourg... Des acteurs locaux indépendants assurent le traitement pour des marchés de niches, tels que la réparation et le recyclage des téléphones portables.

L'évolution de la matière et des technologies

La matière évolue au cours du temps. Ainsi, nous avons assisté à la fin des écrans TV cathodiques. La présence de batteries dans les appareils nomades introduit des problèmes de sécurité (départ de feux), mais aussi le recours à des métaux nouveaux comme le cobalt.

Les technologies de démantèlement progressent considérablement avec le développement du tri optique, l'introduction de la robotisation, de la flottaison...

Des équipementiers français de classe internationale se sont développés. Citons, entre autres, MTB, Pellenc, Vauché, Decoval... Une vingtaine d'acteurs se sont regroupés pour promouvoir le label « *French Fab* » sous l'impulsion du pôle de compétitivité TEAM².

La présence croissante d'électronique embarquée dans les véhicules et les objectifs contraignants en termes de taux de recyclage des VHU (95 %) ont engendré l'extraction de nouvelles fractions, autrefois perdues, contenant des fragments de cartes électroniques suffisamment riches en métaux pour justifier leur traitement (même si celui-ci est encore plus complexe).

Au total, la production de déchets de cartes électroniques en France est évaluée à 10 000 tonnes par an par les éco-organismes et à 20 000 tonnes par an par la société VELMA, un acteur majeur sur le marché.

Le commerce illicite

Nous donnons ici l'exemple d'une enquête menée au Nigéria.

Les exportations depuis l'UE se font principalement au travers des véhicules d'occasion destinés à la vente sur place (système *Roll-on/Roll-off*). Les exportations américaines et chinoises se font par containers.

Lors de cette enquête, les autorités ont contrôlé 201 containers et 2 188 véhicules, 55 % de ces derniers étaient remplis de D3E.

260 tonnes d'écrans CRT ont été interceptés, malgré une loi nigérienne qui interdit l'importation de ces équipements : 23 % provenaient de Chine, 15 % des États-Unis, 14 % du Royaume-Uni, 14 % d'Espagne, 8 % d'Italie, 4 % de Hong Kong et 4 % de Hollande. Un peu moins du quart de ces équipements avaient donc pour origine la Chine, pays où la réglementation interdit pourtant l'importation et l'exportation de D3E (source : BCCC & UNU).

L'évaluation de l'importance du commerce illicite est un exercice difficile à réaliser.

L'extraction des métaux

La France se caractérise par une R&D très active en la matière, mais elle ne compte aucun acteur industriel de taille significative. De ce fait, elle ne peut récupérer qu'une part infime des métaux contenus dans ses propres déchets, mais aucun d'eux ne sont des métaux stratégiques.

En France, Bigarren Bizi, WEEE metallica et Morphosis sont les trois sociétés actives dans ce domaine. À ces trois acteurs, il convient d'ajouter le projet Sanou Koura en cours de montage financier.

L'entreprise Bigarren Bizi est installée à Bidart (ESTIA II) dans le département des Pyrénées-Atlantiques. Elle a développé une unité de traitement mécanique utilisant un broyage fin et des techniques de séparation mécanique. Le projet est entré dans une phase pilote.

Morphosis est, quant à elle, localisée à Tourville-les-Ifs (en Seine-Maritime). Elle traite diverses sources de matières contenant des métaux précieux, notamment des cartes électroniques riches. La société utilise une combinaison de procédés mécaniques, thermiques et hydro-métallurgiques axés principalement sur la récupération des métaux précieux.

WEEE Metallica est située à Isbergues dans le Pas-de-Calais et traite, par pyrolyse, 15 000 tonnes de cartes par an. La matière concentrée est ensuite vendue au Japon et à la Corée du Sud.

Dans la situation actuelle, comme précisé *supra*, la France ne garde donc qu'une très faible part des métaux contenus et ne récupère aucuns métaux stratégiques.

Le projet Sanou Koura est installé à Donchery près de Sedan. Il est l'aboutissement d'un long travail de R&D mené sous l'impulsion de la société TND (Terra Nova Développement) et accompli en partenariat avec plusieurs EPIC : le BRGM, le CNRS d'Orléans, l'Institut Jean Lamour, l'ICSM, l'Université de Chambéry, l'École nationale supérieure de chimie de Paris et Polytec Lille.

Les briques technologiques développées au cours de ces années de recherche ont atteint un TRL 7 (*technology readiness level*) permettant de construire une usine de traitement de cartes électroniques, d'appareils nomades et de batteries de la petite mobilité, et d'en extraire, outre les métaux classiques (cuivre, or, argent et palladium), des métaux aujourd'hui non récupérés, comme l'étain, le tantale, le cobalt et le nickel. La capacité espérée serait de 20 000 t/an.

Le CSF Mines et métallurgie et l'approvisionnement en métaux et matériaux stratégiques de l'industrie française

Par Christel BORIES

Présidente du CSF Mines et métallurgie et PDG du Groupe ERAMET

L'approvisionnement en métaux stratégiques constitue un enjeu essentiel pour la souveraineté nationale, que porte le CSF Mines et métallurgie, organe multipartite devenu incontournable dans la relation entre les pouvoirs publics et les acteurs de la filière considérée. La crise du Covid-19 a renforcé l'urgence de sécuriser nos approvisionnements, notamment en métaux et matériaux stratégiques, et de développer en la matière une politique publique ambitieuse.

Les métaux sont des matières premières indispensables aux besoins du quotidien. Ils se retrouvent dans les couverts, les canettes de boisson, les voitures, les téléphones portables... Ils sont également utilisés par des industries stratégiques, telles que la Défense, le nucléaire ou encore l'aéronautique. La filière Mines et métallurgie rassemble les acteurs de l'extraction minière, de l'élaboration, de la première transformation et du recyclage des métaux ferreux et non ferreux, ainsi que les forges et fonderies ⁽¹⁾.

Fournisseur de matières premières stratégiques, le Comité stratégique de filière (CSF) Mines et métallurgie est une composante essentielle de la mise en œuvre des priorités définies par le Conseil national de l'industrie. Labellisé en mai 2018, le CSF Mines et métallurgie a pour mission d'instaurer un dialogue concret, performant et régulier entre les différents acteurs de la filière, qu'ils se situent en amont ou en aval de la chaîne de valeur, qu'il s'agisse de grands groupes ou de PME. Ce dialogue régulier s'articule autour d'une gouvernance tripartite qui intègre l'État, les entreprises et les représentants des salariés sur tous les sujets clés qui permettront à la France de mener à bien sa stratégie de reconquête industrielle.

Assurer un approvisionnement durable et compétitif de la filière en matières premières primaires et secondaires a rapidement été identifié comme l'un des enjeux et des projets structurants du CSF Mines et métallurgie. L'actuelle

(1) Le chiffre d'affaires de la filière était de 38 Mds€ en 2017, soit 12,6 % du PIB industriel de la France. La filière comptait 2 464 entreprises, représentant 113 145 emplois directs pour une valeur ajoutée de 8,5 Mds€.

crise sanitaire du Covid-19 a singulièrement renforcé l'urgence de sécuriser nos approvisionnements, notamment en métaux stratégiques, faisant de cette question un enjeu essentiel pour notre souveraineté nationale.

L'approvisionnement en métaux, un enjeu essentiel pour la souveraineté de l'État

La sécurité des approvisionnements n'est pourtant pas un sujet nouveau ⁽²⁾. Cependant, la crise de l'aluminium en 2018 et les menaces de la Chine sur les approvisionnements en terres rares lui ont donné un regain d'intérêt. En 2019, plusieurs études ⁽³⁾ sur la sécurité des approvisionnements en matières premières ont montré la vulnérabilité des chaînes de valeur industrielles françaises, notamment du fait qu'elles ne prenaient pas suffisamment en compte cette problématique.

Une dépendance confirmée de la France en matière d'approvisionnement en métaux stratégiques

À l'issue de ces travaux, il est apparu nécessaire que l'approche globale adoptée dans ces études fasse place à

(2) Rapport du Commissariat général à la stratégie et à la prospective, « Approvisionnements en métaux critiques, un enjeu pour la compétitivité des industriels français et européens », juillet 2013, 53 pages ; *Annales des Mines – Série Responsabilité & Environnement*, « Les métaux stratégiques, un enjeu mondial ? », avril 2016.

(3) Les avis du CESE, *La dépendance aux métaux stratégiques, quelles solutions pour l'économie ?*, rapporteur Philippe Saint-Aubin, janvier 2019, 106 pages ; rapport du Conseil général de l'Économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies, « Analyse de la vulnérabilité de l'approvisionnement en matières premières des entreprises françaises », Nathalie Homobono et Denis Vignolles, mars 2019, 66 pages.

Métal	Usage sensible	Nature de la criticité
Nickel	Batteries – Véhicules électriques	Monopole de certains États dans la production de produits intermédiaires (Indonésie, Philippines...) – À l'échelle mondiale, les projets d'usines hydrométallurgiques affichent des capacités productives unitaires estimées actuellement entre 30 kt et 60 kt. Il faudrait 10 à 20 projets miniers pour couvrir les besoins à horizon 2030. Or, 5 à 6 projets pourraient, au mieux, voir le jour à horizon 2025.
Cobalt	Batteries – Véhicules électriques	Près de 50 % de la production du cobalt sont issus de RDC. La production de cobalt raffiné est majoritairement concentrée en Chine (63 % de la production mondiale en 2018).
Lithium	Batteries – Véhicules électriques	Fortes augmentations de la demande – L'adoption des technologies lithium-ion dans les batteries des voitures hybrides et électriques porte le marché du lithium. La demande va passer de 230 kt d'équivalent carbonate de lithium (LCE) en 2017 à 1 160 kt en 2030. Pour satisfaire la demande du secteur automobile, il faudra donc quadrupler la production au cours des dix années à venir.
Graphite	Batteries – Véhicules électriques	Fortes augmentations de la demande – Monopole de la Chine – L'évolution du marché des batteries, initialement tourné vers les équipements de communication (téléphones, ordinateurs) et dominé demain en termes de poids par la mobilité électrique, implique une évolution du choix d'un graphite naturel vers plus de graphite synthétique, principalement pour répondre à une exigence, celle de l'augmentation de la durée de vie de ces équipements. La demande en Europe est évaluée en 2025 à 143 GW de batterie, ce qui représente un besoin par anode de 140 kt de graphite, contre 9 kt aujourd'hui.
Terres rares (néodyme, praséodyme, dysprosium, terbium)	Éoliennes – Panneaux solaires photovoltaïques – Aéronautique	Ces quatre métaux sont utilisés dans l'éolien pour la production des aimants permanents. Actuellement, un tiers de la production mondiale, laquelle est d'environ 120 kt d'aimants, est utilisée dans les génératrices d'éoliennes et dans les différents moteurs d'automobiles. À échéance de 2030, la filière automobile mondiale devrait consommer à elle seule près de la totalité de la production actuelle, soit 120 kt. Métaux non substituables pour la fabrication des aimants permanents – Situation monopolistique de la Chine.
Titane	Aéronautique – Défense	Il entre dans la fabrication des moteurs d'avions civils et militaires. Le titane de qualité aéronautique civile et militaire est largement dominé par d'importants acteurs russes et américains – 75 % des achats destinés aux applications aéronautiques civiles et militaires sont réalisés hors de l'Union européenne.
Superalloys	Aéronautique – Défense	Ils entrent dans la fabrication des moteurs d'avions civils et militaires. Marché dominé pour l'élaboration et la transformation par des acteurs américains. Plus de 95 % des achats destinés aux applications militaires et civiles sont réalisés aux États-Unis.

Tableau 1 : Extrait des travaux des GT Approvisionnements.

une approche plus fine, axée sur les chaînes de valeur les plus exposées. À la demande du gouvernement, trois premiers groupes de travail, placés sous la coordination du CSF Mines et métallurgie, ont été mis en place fin 2019, pour œuvrer en lien avec les comités stratégiques de filières concernés sur les matériaux utilisés pour les batteries, pour les énergies renouvelables et dans l'aéronautique.

Les conclusions de ces travaux, remises en avril 2020, ont permis notamment de mettre en valeur la criticité de certains métaux. Une analyse métal par métal a été faite par chacun des groupes de travail : pilotés par un industriel, ils regroupaient l'ensemble des opérateurs d'une même chaîne de valeur. À l'issue de ces travaux, une liste des métaux critiques a été élaborée. La criticité a été établie en tenant compte de la demande future pour ces métaux ou de la provenance géographique de la ressource. L'analyse au cas par cas a confirmé la vulnérabilité des chaînes de valeur et le risque de perte de souveraineté de certains secteurs, comme ceux de l'aéronautique, de la Défense et de la transition énergétique.

Face à cette vulnérabilité des chaînes d'approvisionnement des industries françaises, l'intérêt, voire la nécessité, de relancer l'exploitation minière en métropole sont souvent soulignés, l'activité minière en France étant assez limitée.

Les freins à l'exploitation du sous-sol minier français

Parmi les substances des mines non énergétiques (métaux, métaux précieux, sel, terres rares...), six sont actuellement exploitées en France métropolitaine : le sel, les schistes bitumineux, la bauxite, le niobium, le tantale et la fluorine. L'or est exploité en Guyane ainsi que le nickel, et le cobalt en Nouvelle-Calédonie. Compte tenu des ressources minérales présentes dans le sous-sol français, son potentiel minier pourrait être davantage exploité. Cependant, le développement de l'exploitation minière en France se heurte à plusieurs obstacles.

L'activité minière souffre en France d'un déficit d'image, en dépit de la nette amélioration des conditions sociales et environnementales de l'exploitation minière depuis plusieurs décennies. En 2018, un important travail de valorisation de ces améliorations a été engagé, notamment avec un fort soutien de la DGALN. La collection « La mine en France ⁽⁴⁾ » dresse ainsi un état de l'art des activités d'exploration et d'exploitation des mines non énergétiques : cette collection a pour objectif de nourrir avec objectivité et fiabilité les débats autour des projets miniers en métropole et en Guyane. Elle pose clairement le concept de « mine responsable », lequel vise à ériger la mine en projet de territoire réduisant autant que possible ses impacts environnementaux et sanitaires, et plus largement l'ensemble de ses nuisances, contribuant ainsi à une meilleure acceptabilité sociale de ses activités.

Cependant, cela n'est pas suffisant pour faire évoluer favorablement l'opinion du grand public sur l'activité mi-

nière, lequel reste méfiant, voire opposé aux réouvertures de mines en France, notamment en métropole. L'impossible réforme du Code minier, avec la remise en cause récurrente du droit de suite, en est l'illustration. Entamée en 2011 et discutée par des commissions successives, la réforme tarde à voir le jour et semble à nouveau repoussée, en dépit des annonces faites en 2019.

Le CSF Mines et métallurgie, conscient du déficit d'image du secteur minier, souhaite restaurer la confiance des populations en proposant aux opérateurs miniers de la filière d'adhérer à un référentiel Mine responsable fondé sur les standards internationaux ⁽⁵⁾ du domaine. L'ensemble de la filière, à travers le groupe de travail Mine responsable, travaille actuellement à la rédaction de ce référentiel. Son objectif est double : d'une part, affirmer que l'exploitation de la mine se doit d'être responsable et durable – il s'agit notamment de la diffusion des bonnes pratiques du secteur. Et d'autre part, permettre aux opérateurs miniers qui le souhaiteraient de s'en prévaloir tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

Parallèlement, si la France souhaite sécuriser une partie de ses approvisionnements au travers d'une exploitation domestique, encore faut-il que les exploitations minières soient compétitives et puissent ainsi faire face à la concurrence internationale. Cette difficulté a été mise en lumière à l'occasion des travaux menés par le CSF sur le nickel et le cobalt dans le cadre du groupe de travail Batteries. En effet, si la France dispose en Nouvelle-Calédonie de gisements de bonne qualité – avec des teneurs en nickel importantes –, il n'est pas envisagé de développer de nouvelles usines de transformation de ce minerai sur le territoire avant 10 ou 15 ans. Cela est notamment lié au déficit de compétitivité du territoire calédonien. Le coût de l'énergie et de la main-d'œuvre, la faible capacité d'export du minerai brut et les blocages réguliers des activités minières sur le territoire pénalisent la compétitivité des mines calédoniennes, lesquelles de fait peinent à faire face à la concurrence, notamment indonésienne.

Compte tenu de sa dépendance et de ses difficultés à la réduire, à court terme, par l'exploitation de son sous-sol, l'État français doit nécessairement mettre en place à son échelle une politique ambitieuse de sécurisation de ses approvisionnements, à l'instar de celle portée par l'Europe, tournée vers le renforcement de son industrie, le recyclage et des chaînes de valeur dépendantes des importations.

Les recommandations du CSF : développer une politique française ambitieuse de sécurisation de ses approvisionnements

Comme le soulignait le rapport du CGIET cité en note de bas de page 3, plusieurs outils peuvent être mobilisés afin de renforcer la sécurisation des approvisionnements :

- la diversification des sources d'approvisionnement ;

(4) *La Mine en France* – Collection de 10 tomes, publiés en 2018, disponible sur le site : mineralinfo.fr, le portail français des ressources minérales non énergétiques.

(5) Issus de l'ICMM, de IRMA ou de VDMD.

- la constitution de stocks pour certaines de ces matières ;
- la réduction des besoins, la substitution ou le recyclage des matières ;
- la valorisation des ressources primaires ou secondaires nationales ;
- la contractualisation de moyen terme ou la prise de participation dans des activités minières ou métallurgiques à l'étranger.

Cependant, ces outils deviennent réellement performants que lorsqu'ils s'articulent avec une politique étatique forte, comme le montre l'observation des grands pays consommateurs de ressources minérales. C'est le cas de la Chine qui investit massivement dans des mines à l'étranger, tout en développant l'exploitation minière sur son propre sol. Les États-Unis, le Japon ou encore la Corée du Sud développent la même stratégie, mettant en place des politiques publiques visant à sécuriser leurs approvisionnements en métaux, parfois en mobilisant des moyens budgétaires conséquents ⁽⁶⁾.

Consciente des enjeux, la France commence à mettre en place des partenariats avec des pays étrangers. Mais l'affichage politique et les moyens alloués restent limités. L'annonce de l'adoption d'une politique publique de sécurisation des approvisionnements était pourtant largement attendue par la filière dans le cadre des travaux du Pacte productif 2025 qui devaient être engagés au cours du second semestre 2020 avant que la crise du Covid ne vienne rebattre les cartes pour les dossiers prioritaires.

Cependant, les travaux réalisés entre le CSF, la DGE et la DGALN, cette année, n'ont pas été vains. Plusieurs axes d'action sont proposés. La crise sanitaire du Covid 19 ayant fait prendre conscience, notamment au grand public, de la dépendance de l'industrie française vis-à-vis de ses fournisseurs étrangers, les prises de décision dans ce domaine devraient s'accélérer.

La concurrence notamment chinoise montre que nos exigences sociétales et environnementales doivent être utilisées comme un avantage compétitif. Si l'on veut que notre industrie, et plus largement l'industrie européenne résistent, il est alors urgent d'investir dans les ressources minérales en soutien à une relance économique.

Promouvoir au niveau européen la mise en place de standards sociaux et environnementaux en matière de production et d'approvisionnement – Le cas des batteries

Le développement de la mobilité électrique est un des leviers majeurs de la politique européenne en faveur du climat. Cependant, l'ambition climatique ne peut pas être concrétisée, si la production de batteries intègre des composants fabriqués dans des conditions de non maîtrise des émissions de CO₂ ou si elle fait appel à des matières premières extraites et transformées sans respect pour l'environnement et les populations autochtones.

La filière de production européenne de batteries, initiée par la France et l'Allemagne, a l'ambition de maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur et de s'assurer que l'impact environnemental et social de ses différents maillons est en cohérence avec les valeurs et les enjeux de l'Union. La filière Batteries, de l'extraction minière jusqu'aux producteurs de véhicules électriques, adhère dans son ensemble à cette analyse. La mise en place de règles claires et partagées doit permettre de concrétiser cette ambition et garantir une concurrence équilibrée avec les producteurs non européens.

C'est en ce sens que les industriels de la filière estiment que la France doit ardemment soutenir les travaux de la Commission européenne visant à imposer la déclaration du contenu en CO₂ des batteries mises sur le marché européen. Ils proposent ainsi que les personnes qui veulent commercialiser sur le marché européen une batterie, en tant que produit fini, soient obligées de fournir aux autorités européennes un bilan carbone de la production de ladite batterie (de la mine à la livraison par le fabricant de l'équipement). Sous réserve que ces déclarations s'appuient sur une méthodologie solide d'audit et de calcul, la France pourrait demander que ce travail soit réalisé par des prestataires certifiés.

Cependant, les émissions carbone ne sont pas le seul sujet environnemental. D'autres impacts doivent être appréhendés, comme la gestion des résidus miniers ou le respect de la nature et de la biodiversité. Le renforcement des standards d'approvisionnement sera de nature à favoriser les entreprises extractives françaises et européennes, déjà soumises aux obligations de *reporting* RSE liées aux devoirs de vigilance. Concernant la question cruciale des résidus miniers, notamment dans le cadre de la protection des océans, la France doit défendre une interdiction de la pratique du *Deep Sea Tailings*, qui consiste à rejeter dans des failles sous-marines profondes les résidus miniers ⁽⁷⁾.

Dans le domaine sociétal, la France doit considérer comme des sujets majeurs, la question du respect des droits des communautés autochtones, notamment en cas de déplacement des populations, comme celle du respect du droit des travailleurs, dans ses aspects les plus essentiels (l'interdiction du travail forcé, du travail des enfants), mais également, par exemple, des libertés comme la liberté syndicale, garantie par la Déclaration universelle de 1948 et les conventions de l'OIT. À ce titre, la référence aux normes de l'OIT présente, sur le plan sociétal, un caractère fondamental.

Les acteurs de la chaîne de valeur Batteries s'accordent ainsi à considérer que limiter la question de la *supply chain* responsable aux seuls opérateurs miniers n'adresserait qu'une partie du risque. Ils considèrent au contraire que la vigilance doit porter sur l'ensemble de la chaîne de valeur, incluant les différentes étapes de transformation. Dans cette perspective, la France doit soutenir l'extension

(6) Les États-Unis ont annoncé, en 2019, la création d'un département chargé de la sécurisation des approvisionnements stratégiques du pays. Il a été doté d'un budget de 60 milliards USD.

(7) Collectif, "Scientific Considerations for the Assessment and Management of Mine Tailings Disposal in the Deep Sea", revue *Marine Science*, article 17, février 2018.

au niveau européen du devoir de vigilance aux fabricants de batterie, et ce sur l'ensemble de la chaîne de valeur, en exigeant le respect des droits fondamentaux par l'ensemble des opérateurs. Cette position pourra s'appuyer sur le devoir de vigilance qui s'applique déjà en France.

Conscient que ces obligations doivent être imposées au niveau européen, cette proposition a depuis été portée par l'État français auprès de la Commission européenne, qui a inscrit à son agenda 2020, dans le cadre du Green Deal, la révision de la directive européenne 2006/66/CE relative aux piles et accumulateurs et à leurs déchets.

Investir dans les ressources minérales en soutien à une relance économique

La crise du Covid-19 et le choc économique qui s'ensuit et dont nous ne connaissons pas encore l'ampleur montrent la nécessité de préserver les chaînes d'approvisionnement de nos industries. L'État a sollicité les CSF pour émettre des propositions de relance économique et de relocalisation de certaines productions en France. Ces actions de relance doivent toutefois s'accompagner d'opérations de renforcement de l'industrie existante :

- Relocaliser des productions stratégiques sur le sol français : dans cette perspective de relance et de survie de la filière, le CSF a proposé plusieurs pistes visant à la relocalisation de certaines productions actuellement assurées à l'étranger. Ces propositions de relocalisation concernent principalement le renforcement des outils industriels mobilisés dans l'élaboration et la transformation des superalliages et du titane pour les secteurs de l'aéronautique et de la Défense ; l'augmentation des capacités de production d'aluminium primaire bas-carbone et de recyclage ainsi que des capacités d'extrusion/filage pour rétablir la balance commerciale ; et l'augmentation de la disponibilité des ferrailles en quantité et en qualité suffisantes en France et en Europe en limitant la sortie de ces matières secondaires hors d'Europe. Cependant, ces propositions de relocalisation, compte tenu de la situation économique de la filière, ne pourront voir le jour sans un soutien actif de l'État.
- Investir dans des chaînes de valeur d'importation de métaux stratégiques. Les ressources minérales nécessaires pour assurer la pleine sécurisation de nos approvisionnements ne se trouvant ni France ni en Europe, les opérateurs miniers français doivent développer des projets miniers à l'étranger. Cependant, ces projets sont généralement très capitalistiques et nécessitent donc des soutiens financiers extérieurs. Il est ainsi essentiel que la France investisse dans des chaînes de valeur d'importation de métaux stratégiques hors Europe : en Amérique latine, en Afrique ou encore en Asie. À l'instar de l'Alle-

magne, de la Corée du Sud ou du Japon, ces investissements ne pourront être portés exclusivement par la filière industrielle. Ils doivent donc être accompagnés d'un soutien financier public important soit au niveau français, soit au niveau européen. Les formes de ce soutien peuvent être diverses : prise de participations de l'État en *equity* dans certaines sociétés minières, création de fonds dédiés à la sécurisation, programme d'aides publiques ou de subventions...

- Investir dans la production de matières premières secondaires. Le recyclage des métaux constitue, avec la substitution ou la réduction des quantités, une voie complémentaire pour sécuriser les approvisionnements. Le Japon mais aussi la Suède sont particulièrement performants dans ce domaine. En France, les gisements sont mal connus, les taux de collecte des déchets sont faibles, alors que leur taux d'exportation est très élevé (atteignant 90 % pour les DEEE⁽⁸⁾). Cette réalité ne doit pas conduire à négliger les perspectives offertes par le recyclage des métaux, qui représente déjà plusieurs milliers d'emplois. Un rapport issu des travaux du CSF sur le développement d'une filière française intégrée de recyclage des batteries Lithium a été élaboré avec l'ensemble de la filière⁽⁹⁾. Il met en évidence le fait que la France dispose de véritables atouts pour lui permettre de devenir le leader européen du recyclage des batteries. Mais elle doit veiller à ne pas se laisser distancer, notamment par les acteurs asiatiques déjà présents en Europe sur la fabrication des cellules. La poursuite des travaux a été jugée prioritaire pour les trois filières suivantes : stockage d'énergie, aéronautique-Défense et énergies renouvelables.

La crise du Covid-19 et les suites qui en découleront vont affecter significativement la filière Mines et métallurgie, un maillon indispensable pour de nombreuses industries de l'aval. L'urgence de la sécurisation, si l'on en doutait encore, prend aujourd'hui tout son sens. Cependant, si, sur tous ces sujets, le CSF Mines et métallurgie est devenu un organe indispensable dans les relations entre la filière et les pouvoirs publics, il ne pourra à lui seul régler la question de la sécurité des approvisionnements. Sur cette question, la filière doit pouvoir s'appuyer sur une politique étatique affirmée reposant sur des outils législatifs, réglementaires et financiers ambitieux.

(8) DEEE : Déchets d'équipements électriques et électroniques.

(9) Rapport du CSF Mines et métallurgie, « Pour le développement d'une filière française intégrée de recyclage des batteries Lithium », janvier 2020.

Les métaux critiques pour l'économie française

Par Gaétan LEFEBVRE

BRGM, direction des Géoréources

La qualification de critique donnée à un métal découle d'une évaluation, et donc d'un niveau de perception donné. Un métal critique combine de forts risques de déficit en matière d'approvisionnement avec de forts impacts en cas de non disponibilité. Pour les industriels français, les sources de risques sont nombreuses. Ils peuvent provenir de goulots d'étranglement dans la chaîne d'approvisionnement, d'une compétition exacerbée entre secteurs ou encore d'une impossibilité de substitution de la substance en question pour un usage précis, ou d'une indisponibilité géologique ou technique. Les études de criticité, dont celles réalisées par le BRGM, ont pour objectif de fournir une meilleure connaissance de ces risques, permettant d'orienter les acteurs vers des solutions adaptées pour s'en prémunir, par des actions concrètes.

Criticité des métaux, l'approche française

La notion de métal critique renvoie à quelques définitions, dont les notions peuvent se recouper. Tout d'abord, un métal est dit **rare**, du point de vue géologique, si son abondance moyenne et/ou sa capacité à se concentrer sous la forme de gisements dans la croûte terrestre est faible. Une première nuance est qu'un métal est dit rare du point de vue industriel, s'il est peu employé ou en très faibles quantités dans ses principaux usages. La définition d'un métal dit **stratégique** est plus large, indiquant le caractère indispensable de cette substance à la politique économique d'un État, à sa défense, à sa politique énergétique ou à celle d'une industrie spécifique. Enfin, un métal **critique** combine de forts risques de déficit en matière d'approvisionnement avec de forts impacts en cas de non disponibilité. Cette qualification découle d'une évaluation, et donc d'un niveau de perception donné. C'est à partir de 2007 que plusieurs méthodologies ont été développées par divers acteurs afin de mesurer les impacts économiques en cas de rupture d'approvisionnement en certaines substances minérales et de les classer par « degré de criticité »⁽¹⁾.

La plupart des méthodologies s'accordent ainsi sur deux axes qui découlent de la perception mathématique d'un risque :

- le premier axe pour évaluer le risque d'une rupture d'approvisionnement, renvoie à la probabilité d'occurrence d'un événement perturbateur dans la chaîne d'approvisionnement ;

- le second porte sur l'importance économique, c'est-à-dire l'ampleur des conséquences en cas d'occurrence de la perturbation.

Ces évaluations sont restituées sous forme de nuages de points qui évoluent bien évidemment avec le temps en fonction d'un grand nombre de paramètres. Les principaux paramètres jouant sur la vulnérabilité d'approvisionnement d'une substance sont les suivants (la Figure 1 de la page suivante en donne une représentation schématique) :

- la disponibilité géologique, traduite par la connaissance/découverte de réserves économiquement exploitables pour une durée donnée à une date donnée ;
- l'exposition politique des principaux pays producteurs et leur potentielle influence sur l'offre disponible (restrictions au libre commerce) ;
- l'existence de maillons sensibles dans la chaîne d'approvisionnement entraînant des incertitudes sur l'offre mondiale ;
- l'incertitude de la demande, laquelle est gouvernée par la croissance de nouvelles technologies et les bouleversements industriels correspondants ;
- la vulnérabilité liée à l'impossibilité de la substitution d'une substance dans un circuit de production donné ;
- les difficultés potentielles de recyclage.

À l'échelle de la France, dans le cadre des travaux menés pour le Comité aux métaux stratégiques (COMES) et de l'exercice de ses missions de service public, le BRGM a été chargé, dès 2010, de réaliser des études sur la criticité d'un certain nombre de substances afin de fournir des éléments pour déterminer l'exposition de la France aux risques pesant sur les approvisionnements en chacune de ces substances et leur importance pour l'économie française.

(1) Pour plus d'informations sur les différentes méthodologies, consulter la page : www.mineralinfo.fr/page/matieres-premieres-critiques

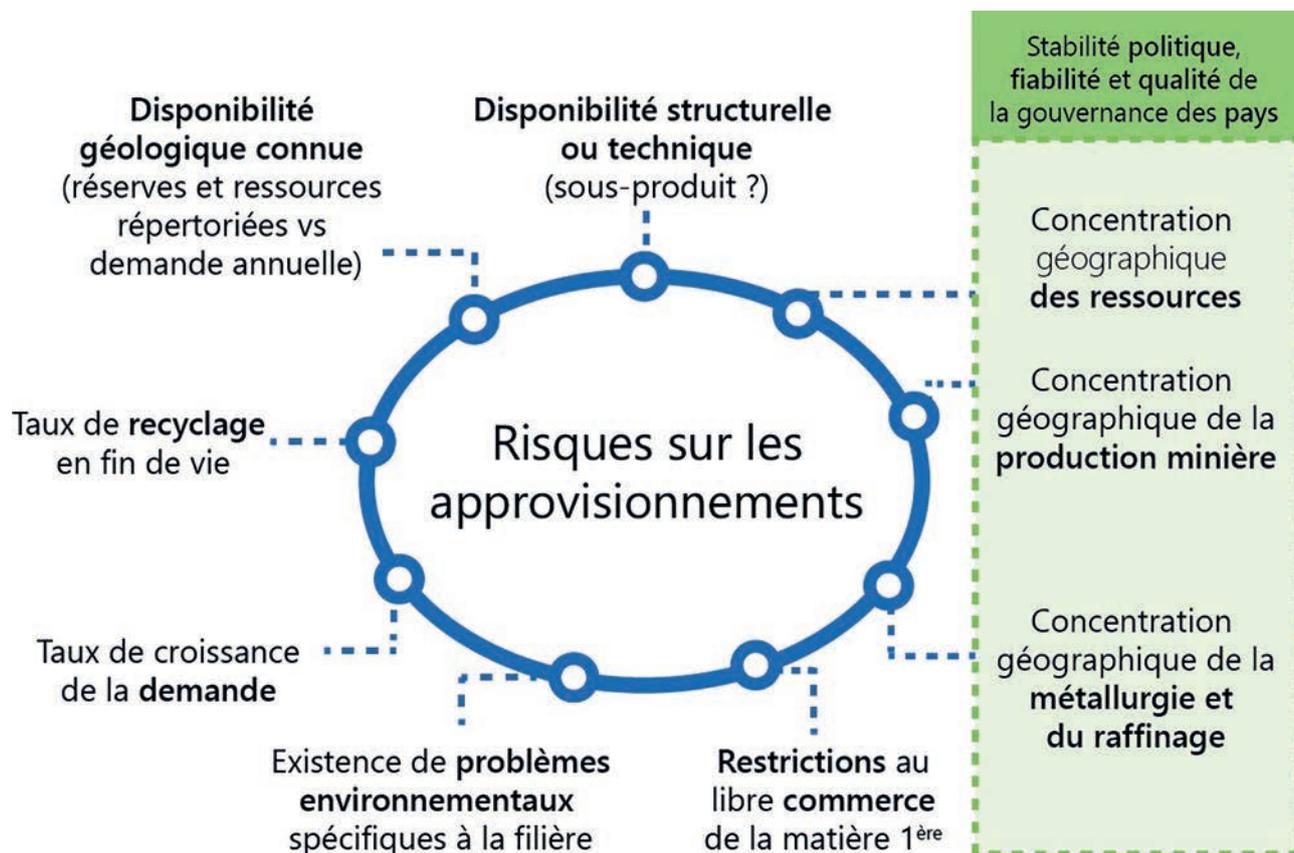


Figure 1 : Principaux facteurs jouant sur la vulnérabilité aux risques d'approvisionnement d'une substance minérale.

Le résultat de ces travaux se présente sous deux formats. Le premier est appelé « Monographie ou panorama de marché » : il consiste en une analyse détaillée de toute la chaîne de valeur. Le second, plus récent, est appelé « Fiche de criticité ». D'abord imaginé comme une retranscription synthétique du premier, mise à jour dans le temps, ce format s'est élargi pour couvrir un nombre plus large de substances. De 2015 à début 2020, 31 fiches de criticité ont été réalisées par l'équipe d'Intelligence minérale du BRGM, venant compléter et actualiser les 16 monographies écrites entre 2010 et 2015. Ces travaux ont été effectués dans le cadre d'une convention conclue avec le bureau des Ressources minérales, chargé d'animer la politique française des matières premières au sein du ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES). Les résultats de ces travaux sont mis en ligne régulièrement sur le site Mineralinfo⁽²⁾. Pour toutes les substances couvertes, une analyse de la criticité est fournie.

La synthèse de celle-ci est représentée par le positionnement de la substance sur un diagramme selon les deux dimensions citées précédemment :

- **les risques pesant sur les approvisionnements** : estimation de ces risques sur une échelle allant de 1 (très faible) à 5 (très forte), en prenant en compte la pérennité et la suffisance des approvisionnements, sachant que la France dépend, aujourd'hui, très majoritairement des im-

portations pour satisfaire sa consommation de métaux ; la production minière issue du territoire national étant très minoritaire et concentrée en Nouvelle-Calédonie et en Guyane ; de même que la part de métaux résultant du recyclage ;

- **l'importance économique** : évaluation là encore sur une échelle de 1 à 5 de l'impact qu'aurait une pénurie d'approvisionnement pour l'économie française (rupture d'approvisionnement, ou une augmentation significative des prix due à une insuffisance de l'offre), en termes de capacité à produire des biens matériels.

L'ensemble de ces analyses sont compilées dans une matrice qui traduit la sensibilité du tissu industriel français aux métaux critiques analysés (voir la Figure 2 de la page suivante). Dans cette approche, les scores traduits sur une échelle de 1 à 5 sont des estimations. Elles résultent d'enquêtes réalisées auprès des entreprises majeures concernées par cette problématique, ainsi qu'auprès, autant que faire se peut, des nombreuses PME potentiellement affectées en raison de l'utilisation de la substance considérée dans leur chaîne de production. Rappelons ici que l'importance stratégique de chacune des substances peut être perçue différemment par telle ou telle entreprise ou industrie selon sa spécialisation. Les positionnements sur cette échelle sont donc des résultats de moyennes et de compromis ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme des positionnements absolus. Ils sont aussi fortement susceptibles d'évoluer dans le temps (répartition mondiale de la production minière, apparition de nouveaux usages, produits substituables, crises en tout genre, etc.).

(2) www.mineralinfo.fr/page/monographie

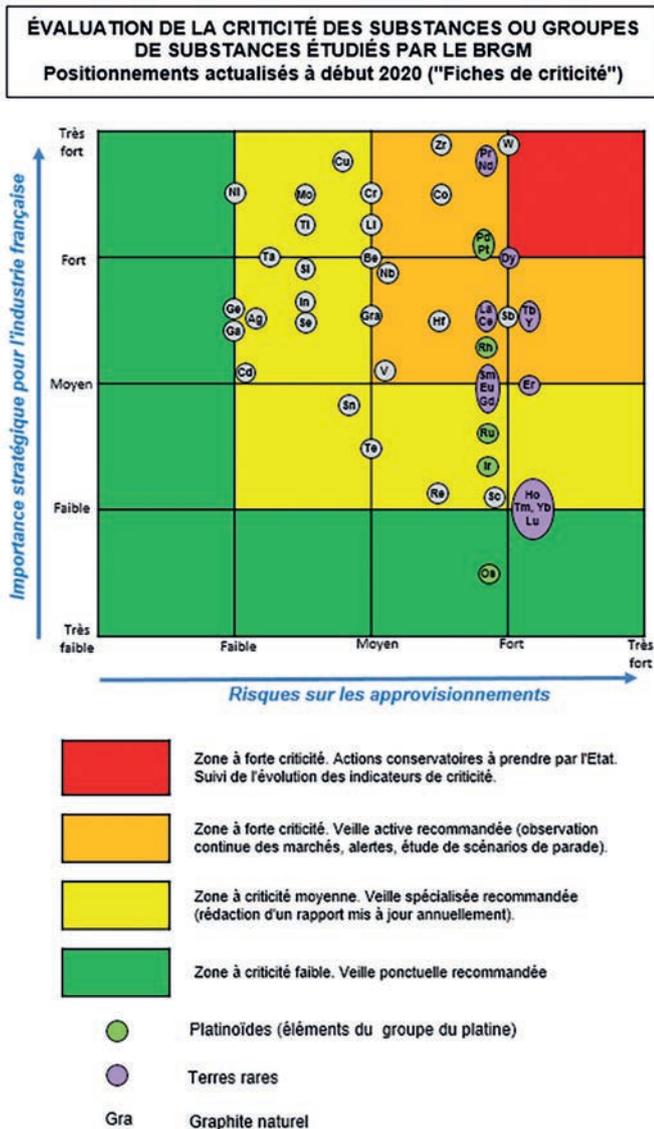


Figure 2 : Matrice de criticité BRGM (mise à jour : début 2020).

La France face aux risques d'approvisionnement

Le premier constat fait de la situation française sur l'ensemble des métaux concernés est celui de sa forte dépendance aux importations. Sur la base de l'analyse du commerce extérieur français, les fiches de criticité illustrent un déficit commercial sur la quasi-totalité des métaux étudiés pour la catégorie « métaux bruts ». Ce déficit est compris entre 1,5 M€ pour le germanium (en 2014) et 1 067 M€ pour le cuivre (en 2016). Si cette situation est peu différente à l'échelle européenne, puisque 14 des 27 matériaux identifiés dans la liste des matières premières critiques pour l'UE en 2017 (Commission européenne, 2017) affichaient un taux de dépendance aux importations supérieurs à 95 %, elle n'est qu'un reflet des difficultés éprouvées à l'échelle des acteurs industriels.

En effet, l'analyse des risques par filière ou par acteur est plus complexe. Ces derniers sont souvent situés en aval d'une chaîne qui commence avec la découverte géologique d'une ressource exploitable, puis se poursuit avec

sa mise en exploitation pour aboutir, *via* des produits intermédiaires aux degrés de pureté et de transformation variables, à la production et à la commercialisation d'un produit final. Ainsi, du point de vue des industriels, la logique dominante de flux tendus (« zéro stock ») ainsi que la complexité des chaînes de valeur mondiales entraînent souvent une connaissance, voire une visibilité limitées des modes de production des matières premières minérales entrant dans la composition de leurs produits.

Cependant, ces dernières années, une tendance inverse s'observe. Un nombre croissant d'entreprises françaises accentuent en effet leurs efforts pour remonter les chaînes de valeur, identifier leurs propres « risques matières » et réaliser des études de criticité adaptées à leur position sur le marché. Cette tendance touche tous les secteurs, depuis les technologies de l'information et de la communication jusqu'aux industries de Défense, en passant par les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique. Elle s'illustre notamment lors de certains événements tels que le World Materials Forum, qui se tient désormais chaque année à Nancy⁽³⁾. Néanmoins, un certain nombre de risques continuent de peser sur les filières industrielles françaises. Ces risques relèvent de deux grandes typologies que mettent en exergue les exemples suivants.

Risques associés à l'existence de goulots d'étranglement dans les chaînes d'approvisionnement

L'exemple choisi ici est celui ayant touché le marché de l'alumine en 2018, dont l'analyse complète a été réalisée par Maïté Le Gleuher (2019). L'alumine (Al_2O_3), qui est une substance intermédiaire produite à partir de la bauxite et utilisée pour fabriquer l'aluminium métal, est pourtant loin d'être considérée traditionnellement comme un « métal critique ».

Tout commence le 6 avril 2018, lorsque les États-Unis menacent d'imposer des sanctions commerciales contre Rusal, le leader mondial de l'aluminium alors contrôlé par l'homme d'affaires russe, Oleg Deripaska. La date de mise en place de ces sanctions, repoussée à plusieurs reprises, plonge une multitude d'entreprises de la filière Aluminium européenne et française dans un climat de forte incertitude. L'une des principales raisons de cette panique est l'identification d'un manque de diversification à une étape clé dans la chaîne d'approvisionnement. En effet, l'approvisionnement d'alumine de la quasi-totalité de ces entreprises dépend alors d'une unique raffinerie, celle d'Aughinish en Irlande, laquelle appartient à Rusal. Comme l'illustre le cas français (voir la Figure 3 de la page suivante), cette raffinerie est devenue en dix ans un maillon essentiel de la chaîne française de production de l'aluminium : en 2017, 85 % des importations françaises d'alumine provenaient de cette raffinerie, contre 22 % en 2008.

Cette raffinerie se retrouve directement exposée aux menaces de sanctions (qui visent à empêcher tout commerce entre les filiales de Rusal et les États-Unis), dont la concrétisation risque alors de pénaliser toutes les filières

(3) Pour plus d'informations, consulter le site : <https://worldmaterialsforum.com/home.html>

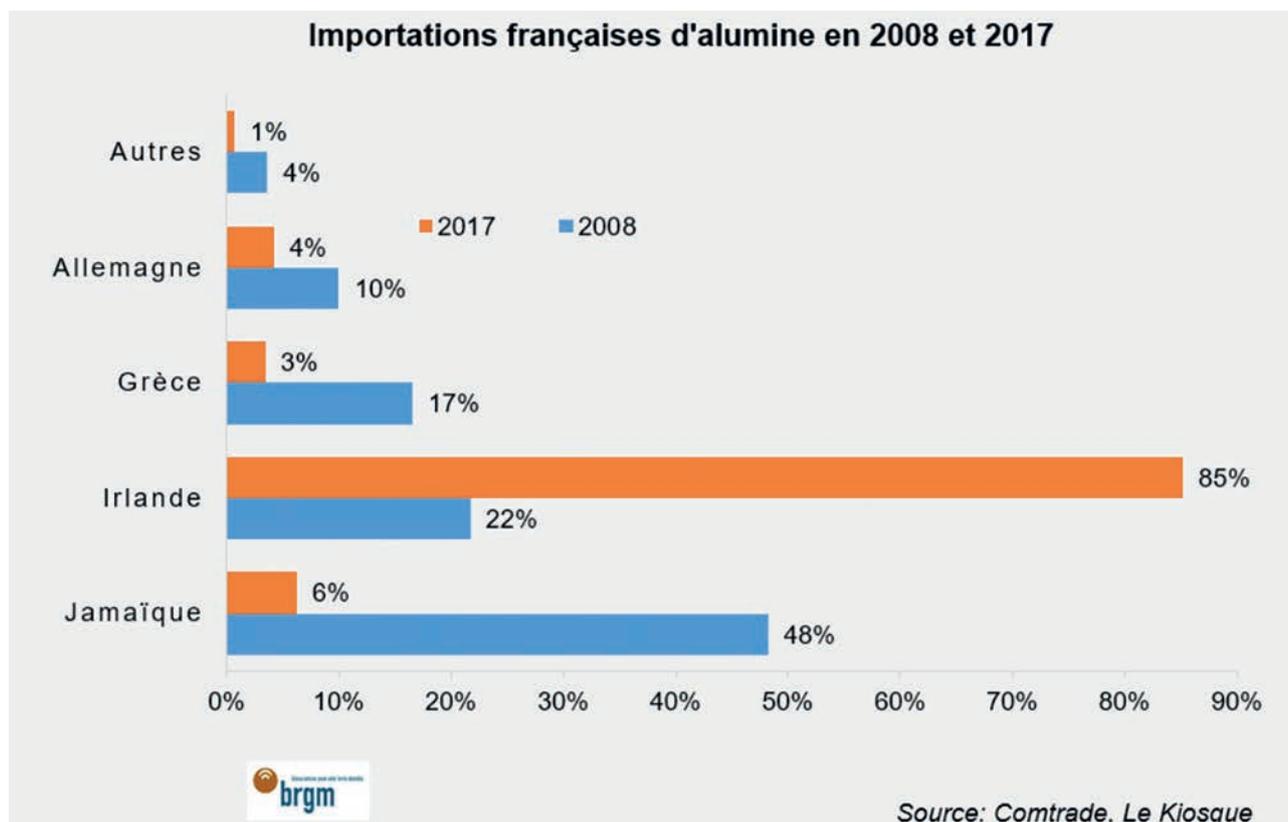


Figure 3 : Dépendance des importations françaises d'alumine par rapport à la raffinerie d'Aughinish (en Irlande) en 2017.

se situant en aval. En outre, les alternatives en matière d'approvisionnement sont alors peu nombreuses du fait d'un marché de l'alumine déjà déficitaire, en dehors des sources chinoises.

Si les menaces de sanctions ont finalement définitivement été levées le 27 janvier 2019 – celles-ci n'ayant de fait pas été mises en application –, cet épisode a mis en évidence la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement des secteurs européen et français, notamment ceux de l'automobile et de l'aéronautique, au regard de la production d'aluminium. Or, une telle situation n'est pas un cas isolé, et ne s'applique pas qu'aux métaux « critiques ». Si le fait de privilégier des sources d'approvisionnement européennes n'a pas été remis en cause dans le cas considéré, cet exemple soulève avec force la question de la diversification pour l'Europe de ces sources d'approvisionnement, qui demeure un enjeu majeur pour les États et les industriels.

À cet égard, l'industrie de la Défense, qui est particulièrement sensible à cette problématique, s'organise progressivement. La plupart des systèmes de défense intègre des produits finis ou semi-finis fabriqués essentiellement aux États-Unis, au Japon ou en Europe. L'un des objectifs de ce secteur serait de réussir à développer des chaînes de valeur « 100 % made in Europe » pour ces produits. Des exemples de réussite sont observés, notamment en France, à travers l'entreprise EXXELIA, qui, située à Saint-Nazaire, est le premier fabricant européen de condensateurs au tantale destinés à certains domaines stratégiques, en particulier à des applications en matière de Défense, d'aérospatiale et d'aéronautique ; une

entreprise dont la stratégie repose sur une diversification de ses sources d'approvisionnement et le pari de leur localisation en Europe prioritairement.

Risques associés à la concurrence entre des filières utilisatrices de métaux critiques

On l'a vu, la criticité consiste à mettre en regard de potentielles vulnérabilités d'approvisionnement concernant un métal avec l'intensité d'utilisation de ce dernier dans un domaine à forte valeur économique ou stratégique. Ces problématiques sont d'autant plus exacerbées lorsqu'elles s'inscrivent dans le cadre du développement de nouvelles filières d'usage. En effet, plus la consommation d'un métal ou d'une substance minérale va croître, et plus les risques déjà préexistants dans les circuits d'approvisionnement mondiaux peuvent s'accroître, rendant ainsi le métal ou la substance considérés encore plus critiques pour certains acteurs.

Fin 2018, une étude réalisée par l'équipe d'Intelligence minérale du BRGM, pour le compte du MTES, conjointement avec P. Christmann, s'intitulait « Compétition interfilière »⁽⁴⁾. L'objectif de cette étude était de caractériser les risques liés à l'apparition potentielle d'une compétition dans l'accès aux matières premières entre secteurs industriels. Les résultats sont présentés dans les Figures 4 de la page suivante et 5 de la page 51. Sur les 14 substances étudiées, c'est pour le cobalt et le lithium que les risques sont apparus les plus forts.

(4) L'étude complète est disponible sous le lien suivant : http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/1_presentation_competition_interfiliere_v12_finale_0.pdf

ELEMENT	PRINCIPAUX SECTEURS IMPACTES				COMPETITION INTERFILIERE	ALEAS	TCAM 2018-2025
Antimoine	 Industrie de l'aéronautique et spatiale	 Industrie des équipements électriques, électroniques, et de communication	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie de la plasturgie et des composites	Faible	- Baisse des réserves mais baisse de la demande pour les batteries au plomb - REACH (retardateurs du feu)	0,6%
Cobalt	 Industrie des équipements électriques, électroniques, et de communication	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie de l'aéronautique et spatiale	 Industries mécaniques	Fort	- Aléa géopolitique : RDC et Chine - Tension sur les approvisionnements	8,8%
Chrome	 Industrie de l'aéronautique et spatiale	 Industrie du bâtiment, travaux publics	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie de la chimie	Faible	- Risque de dumping FeCr chinois - Aléa géopolitique : situation politique et énergétique en Afrique du Sud	4%
Cuivre	Très nombreux usages				Faible à Moyen	- Demande > offre ces prochaines années - Exploration insuffisante et stagnation de la production du Chili	2,5%
Indium	 Industrie des équipements électriques, électroniques, et de communication	 Industrie de la production et transport d'énergie			Faible	- Surcapacités liées au stock de la bourse chinoise faillie de Fanya	5%
Lithium	 Industrie des équipements électriques, électroniques, et de communication	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie de l'aéronautique et spatiale	 Verre, céramiques, vitrocéramiques	Fort	- Très forte croissance de la demande - Réserves très abondantes, mais risques de tensions en cas de retards dans les nouvelles productions - Aléa géopolitique : contrôle chinois croissant	18%
Niobium	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie du bâtiment, travaux publics	 Industrie de la production et transport d'énergie		Faible	- Forte croissance liée au rattrapage de l'économie chinoise - Ressources abondantes	7%

ELEMENT	PRINCIPAUX SECTEURS IMPACTES				COMPETITION INTERFILIERE	ALEAS	TCAM 2018-2025
Palladium	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie des équipements électriques, électroniques, et de communication	 Industrie de la chimie		Moyen	- Aléa géopolitique : production concentrée en Russie et Afrique du Sud - Augmentation de la demande liée à la catalyse "essence"	3%
Platine	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie du luxe	 Industrie de la chimie	 Verre, céramiques, vitrocéramiques	Faible	- Aléa géopolitique : production concentrée en Afrique du Sud - Demande en baisse pour la catalyse des motorisations "diesel"	1%
Tantale	 Industrie de l'aéronautique et spatiale	 Industrie de la production et transport d'énergie	 Industrie des équipements électriques, électroniques, et de communication		Faible	- Croissance de la production (Australie et Canada) à partir de 2022 - Contrôle chinois de la métallurgie	3,4%
Terres rares (Dy, Nd, Pr)	 Industrie des équipements électriques, électroniques, et de communication	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie de la production et transport d'énergie		Moyen	- Contrôle chinois de l'amont minier et métallurgique - Applications stratégiques (automobile, énergie, défense) - Faiblesse de l'industrie européenne	8%
Titane	 Industrie de l'aéronautique et spatiale	 Industrie de la production et transport d'énergie	 Industrie des peintures, encres, colorants, adhésifs, et préservation du bois		Faible	- Aléas limités au titane "aéronautique" - Aléa géopolitique : forte dépendance aéronautique européenne par rapport à un producteur russe	2%
Tungstène	 Industries mécaniques	 Industrie de l'aéronautique et spatiale	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	 Industrie de la production et transport d'énergie	Faible	- Aléa géopolitique : forte dépendance vis-à-vis de la Chine. - Applications stratégiques (nombreux secteurs industriels, défense)	3,5%
Vanadium	 Industrie du bâtiment, travaux publics	 Industries mécaniques	 Industrie de l'aéronautique et spatiale	 Industrie de l'automobile (constructeurs)	Faible	- Aléa géopolitique : 90% de la production vient de l'ensemble Chine (dominante), Afrique du Sud et Russie	3%

Figures 4 a et b : Synthèse des principaux résultats de l'étude « Compétition interfilière », 2018.

Le stockage d'énergie est devenu en une dizaine d'années le principal secteur utilisateur des marchés du lithium et du cobalt du fait du développement rapide des technologies de batteries Lithium-ion. Cette évolution a radicalement transformé les chaînes de production traditionnelles, ainsi que les modèles d'exploitation, d'échange et de cotation utilisés auparavant pour ces métaux. En conséquence, ce secteur a accaparé l'essentiel des flux financiers et physiques, non sans impacts importants sur les prix, sur les chaînes d'approvisionnement concentrées en quelques points du globe, ainsi que sur les autres secteurs utilisateurs, en particulier l'aéronautique dans le cas du cobalt.

On constate ainsi que l'émergence de nouveaux marchés est propre à faire surgir des tensions sur une ressource donnée, et ce quelle qu'elle soit. Dans le cadre du développement des énergies renouvelables (EnR), les mêmes questions se posent ainsi pour des métaux usuels, comme le cuivre et l'aluminium qui ont de fortes chances de connaître une demande accrue dans le secteur de la distribution d'électricité, car, à grande échelle, ce sont les substances conductrices présentant à ce jour les meilleures performances. Pour le cuivre, c'est environ 5 Mt/an qui devront être ajoutées à la production mondiale actuelle, ce qui équivaut à la production annuelle du Chili.

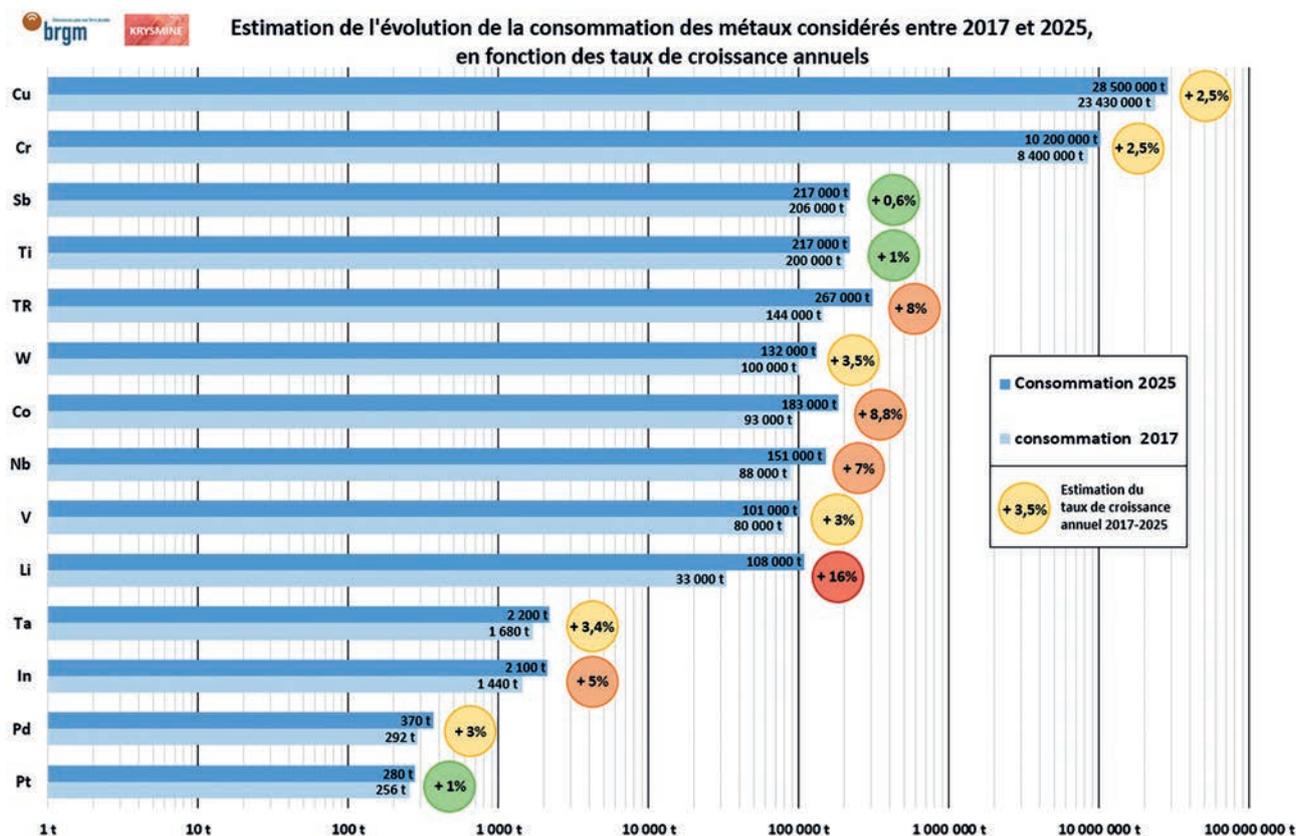


Figure 5 : Synthèse des principaux résultats de l'étude « Compétition interfilrière », 2018.

Enjeux et perspectives

À l'échelle mondiale, un métal jugé critique entraîne de nombreuses réactions économiques et politiques. De manière générale, plus un métal est jugé critique, et plus il concentre d'investissements soit sur la découverte de nouveaux gisements, soit sur la recherche à des fins de substitution, soit enfin sur les procédés de recyclage. Si le propre des métaux dit critiques est également de provoquer des tensions sur les marchés, ces dernières ne se matérialisent que rarement en des crises étendues et durables. L'une des principales leçons à tirer des crises passées est que chaque marché, à l'instar de celui de l'alumine ou des terres rares, possède sa propre dynamique, avec des acteurs et un contexte géopolitique qui lui sont également propres. Des points faibles peuvent émerger au niveau d'un maillon important, compromettant ainsi l'aval de la filière. Chaque situation est particulière et nécessite une évaluation précise de la vulnérabilité au regard des évolutions de chacun des facteurs : état de la demande (usages, consommation mondiale), état de l'offre (inventaire des ressources connues, des productions, des sources d'approvisionnement primaires et secondaires), identification des utilisateurs et de leurs besoins...

La situation provoquée par la propagation de l'épidémie du Covid-19 à l'échelle mondiale est d'ores et déjà bien différente, en ce sens que son premier impact a été d'affecter de manière généralisée et durable les chaînes logistiques mondiales. Les conséquences en termes d'accès ou de tensions sur les ressources minérales critiques

ont été variables. Toutefois, l'un des principaux constats faits est celui des effets « dominos » observables dans de nombreux secteurs industriels. Ce constat pousse à repenser les chaînes de production, ainsi que la localisation de leurs impacts. Certains analystes évoquent déjà la probabilité d'une transformation après cette crise des dynamiques actuellement en place, des dynamiques qui voyaient, « depuis 20 ans, toute chaîne de valeur se construire autour d'un seul dénominateur commun, celui du plus bas coût de production »⁽⁵⁾.

À l'échelle française, si les effets précis de cette crise épidémique restent à évaluer, une nouvelle approche des chaînes industrielles de métaux stratégiques pourrait également être envisagée en sortie de crise. L'une d'elles pourrait reposer sur une approche novatrice de la constitution des stocks stratégiques. Les principaux enjeux d'une telle démarche seraient d'éviter les risques observés traditionnellement (immobilisation dangereuse de capitaux, dilution au sein d'un fonds d'investissement, etc.), tout en parvenant à concilier les intérêts souvent distincts de différents secteurs industriels. Une forme hybride reste ainsi à trouver, combinant une exposition physique, sans le risque de stockage, avec une gestion active, au plus près des attentes des marchés mondiaux.

(5) Citation empruntée à R. Stall, chef du service Mines et métaux chez Ernst&Young (États-Unis), lors d'un entretien accordé, le 2 avril 2020, au service S&P Global Market Intelligence (accès soumis à abonnement payant).

Références bibliographiques

MINERALINFO (2020), page « Matière premières critiques », consultable sous le lien suivant : www.mineralinfo.fr/page/matieres-premier-critiques

COMMISSION EUROPÉENNE (2017), "Study on the review of the list of critical raw materials", consultable sous le lien suivant : https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en

LE GLEUHER M. (2019), « Retour à la normale du marché de l'alumine, après une année 2018 turbulente », *Bull. Ecomine*, consultable sous le lien suivant : www.mineralinfo.fr/ecomine/retour-normale-marche-lalumine-apres-annee-2018-turbulente

LEGUÉRINEL M., LEFEBVRE G. & CHRISTMANN P. (2018), *Compétitions entre secteurs industriels pour l'accès aux matières premières*, consultable sous le lien suivant : http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/1_presentation_competition_interfilie_v12_finale_0.pdf

Les enjeux pour l'industrie française de son approvisionnement en titane : situation actuelle et analyses prospectives

Par Pierre-François LOUVIGNÉ
Consultant

Le titane est un matériau irremplaçable pour de nombreuses applications industriels de haute technologie, telles que l'aéronautique, l'espace, le nucléaire, l'armement, la pétrochimie, le médical, etc. La France, et plus globalement l'Europe, sont dépendantes pour leurs importations de titane en provenance de grandes puissances comme les États-Unis, la Russie ou la Chine, alors que ces mêmes pays sont des concurrents sur les secteurs d'application précités. Dès lors, bâtir une stratégie d'approvisionnement nécessite une bonne connaissance du marché et une analyse dynamique des facteurs de risque liés à la dépendance, en particulier en situation de crise. Pour ces raisons, le titane fait l'objet d'une veille économique et géostratégique, laquelle est soutenue par les grands groupes industriels français et les services de l'État concernés par les problématiques d'accès aux matières premières.

De la découverte à l'emploi du titane

Découvert en 1791 par Sir William Gregor, pasteur britannique et géologue amateur, le titane est le 9^{ème} élément le plus abondant sur Terre et le 4^{ème} métal après le fer, l'aluminium et le magnésium. Il est extrait de minerais, principalement d'ilménite (FeTiO_3) et de rutil (TiO_2), que l'on trouve en grandes quantités en Chine, en Australie, en Inde et en Afrique du Sud. Seulement 5 % du TiO_2 produit est destiné à la production du titane sous sa forme métallique, le reste est transformé dans l'industrie chimique en particulier pour donner le pigment blanc utilisé dans les peintures, l'alimentaire, etc.

Le titane n'a été isolé sous sa forme métallique pure qu'en 1910 par Mathew H. Hunter aux États-Unis pour le compte de la General Electric Company. Son procédé de réduction du TiCl_4 par le sodium fut supplanté par celui au magnésium développé dans les années 1930 par William J. Kroll. Depuis la première démonstration d'une capacité de production commerciale en 1946, la méthode d'extraction de Kroll s'est rapidement imposée comme le procédé de référence. Le titane ainsi produit se présente sous une forme poreuse appelée « éponge ». Des lingots de titane pur ou d'alliages sont fabriqués à partir de cette matière première avec la possibilité, pour certains procédés de fusion, de recycler les déchets. Les lingots sont ensuite transformés en pièces forgées, laminées, extrudées, frit-

tées, etc. Le titane peut également être mis en forme par impression 3D à partir de poudres ou de fils métalliques.

Employé pur dans de nombreuses applications industrielles, le titane est aussi décliné en alliages et composés intermétalliques à propriétés optimisées. Le plus courant est l'alliage biphasé TA6V (Ti-6Al-4V en anglais) mis au point initialement pour les avions militaires. Au total, une trentaine de familles d'alliages sont disponibles.

Avec des propriétés mécaniques comparables à celles de l'acier et une faible densité, le titane est un métal irremplaçable pour alléger les structures à haute performance dans l'aéronautique, l'espace et la Défense. Il présente également une excellente résistance à la corrosion dans la plupart des milieux agressifs, c'est pourquoi on l'utilise dans de nombreuses applications en chimie, en pétrochimie, et pour la fabrication d'échangeurs thermiques et de systèmes de traitement des eaux : nucléaire, dessalement, circuits d'eau de mer... En raison de sa biocompatibilité, le titane est employé dans le domaine médical pour réaliser des prothèses, des implants et des instruments chirurgicaux. Dans le domaine militaire, sa sensibilité à la vitesse de déformation en fait un excellent matériau pour fabriquer des blindages balistiques, et ses propriétés amagnétiques sont exploitées dans le domaine de la discrétion des bâtiments de guerre. Enfin, le titane bénéficie d'une excellente image de matériau haut de gamme auprès du grand public avec une acceptation prix proche

de celle des métaux précieux. Il trouve ainsi des débouchés à forte valeur ajoutée dans le domaine des biens de consommation, notamment la joaillerie, la lunetterie, l'horlogerie, les articles de sport, le *design*, l'architecture...

L'offre en titane

Le titane a été répertorié dans la liste des métaux identifiés comme stratégiques pour l'industrie française ⁽¹⁾. Il est perçu avec raison comme un matériau de haute technologie, cher et dont l'approvisionnement est difficile. La métallurgie du titane nécessite un savoir-faire particulier à chaque étape de sa transformation chimique et thermomécanique, depuis la sélection du minerai jusqu'aux dernières étapes de parachèvement de la pièce. La performance du produit final est à ce prix. Il en résulte une catégorisation de l'offre mondiale en fonction du niveau de maîtrise des procédés de fabrication.

La production de titane à l'échelle industrielle a démarré aux États-Unis. En 1950, le ministère de la Défense américain découvre l'intérêt de ce métal pour l'aéronautique militaire et soutient l'émergence d'une capacité de production pour répondre aux besoins du programme Blackbird, un avion espion dont le fuselage contient 93 % de titane. Deux ans plus tard, le Japon suit l'exemple de l'Amérique et cible l'emploi du titane dans le secteur de la chimie, de l'architecture et des biens de consommation. En 1956, c'est le démarrage des grands programmes de sous-marins nucléaires qui incite le conseil des ministres soviétique à lancer la production du titane à grande échelle.

De cet historique sont issues toutes les capacités industrielles de production d'éponges de titane de haute pureté : le Japon (deux acteurs industriels, 65 200 t/an), la Russie (un acteur, 46 500 t/an), le Kazakhstan (un acteur, 26 000 t/an) et les États-Unis (un acteur, 12 600 t/an). On parle d'éponges de « qualité aéronautique ».

Le reste des capacités de production ne répond pas à ce niveau d'exigence : on parle d'une éponge de « qualité métallurgique ». Les pays producteurs sont : la Chine (11 acteurs, 107 000 t/an), l'Ukraine (un acteur, 12 000 t/an) et, depuis 2019, l'Arabie Saoudite (un acteur, 15 600 t/an).

Alors que la Chine est devenue le plus grand producteur mondial d'éponges de titane à partir de 2007, ce pays n'est pas encore parvenu à maîtriser une production de qualité aéronautique. À défaut de pouvoir servir les ambitions nationales dans le militaire, le nucléaire et l'aérospatiale, la rapide montée en puissance des capacités chinoises a néanmoins permis de satisfaire la forte demande émanant du secteur de la chimie. Cinquante ans après, la Chine s'est ainsi inscrite dans la même démarche capacitaire souveraine que les grandes puissances américaine, russe et japonaise sans toutefois parvenir à faire jeu égal pour les applications de haute technologie.

En Arabie Saoudite, cette industrie, même si elle est émergente, possède en revanche tous les atouts pour enrichir à moyen terme l'offre mondiale en qualité aéronautique, car elle a su mettre en place un partenariat avec l'industrie nipponne qui maîtrise parfaitement ce savoir-faire.

Outre le nombre limité des producteurs d'éponges, en particulier de celles de qualité aéronautique, la plupart d'entre eux destinent leur production à la satisfaction de leurs besoins propres dans une logique d'intégration verticale. Dans les faits, seuls les producteurs japonais et kazakhs vendent des éponges de qualité aéronautique aux transformateurs de titane non intégrés.

Aux États-Unis, les trois producteurs historiques ont été absorbés par de grands groupes industriels, ce qui a eu pour effet de capter une partie de leurs capacités pour répondre aux besoins internes de leurs maisons mères. Ils profitent par ailleurs d'une politique protectionniste qui leur garanti une préférence nationale pour l'approvisionnement en titane destiné aux programmes gouvernementaux ⁽²⁾. Grâce à cette forte demande sur le marché intérieur, l'offre américaine joue le rôle de référence au plan international en termes de qualité, de technicité et de prix. Seule ombre au tableau, la capacité américaine de production d'éponges ne couvre qu'un tiers des besoins nationaux. Le reste est importé massivement du Japon et du Kazakhstan.

En Europe de l'Est, l'éclatement de l'URSS a fait émerger un conglomérat industriel russe totalement intégré verticalement, dont l'activité s'est rapidement développée à l'export vers l'Europe et les États-Unis, avec un niveau d'exigence équivalent à celui de la filière américaine. Ce producteur assure également l'approvisionnement en titane de la filière militaro-industrielle russe et alimente les marchés intérieurs de la Communauté des États indépendants.

L'approvisionnement en titane, un enjeu pour l'industrie française et européenne

La consommation européenne de titane représente environ 20 % de la consommation mondiale. L'industrie française est particulièrement concernée par la problématique que représente son approvisionnement en titane en raison de son économie fortement orientée vers les marchés captifs de ce matériau : l'aéronautique, la Défense, le nucléaire, la pétrochimie, le médical...

En ce qui concerne les plus grands acteurs industriels, leur stratégie d'approvisionnement est basée en général sur une approche de *multi-sourcing* répondant à un faisceau de besoins et de contraintes : mise en concurrence, sécurisation des volumes, risque géopolitique, diversification du panel fournisseurs, récurrence des besoins, op-

(1) Voir le classement du Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM) : http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches_criticite/fichecriticitetitane171017.pdf

(2) L'Amendement Berry oblige le ministère de la Défense américain à donner la préférence à l'industrie nationale pour l'approvisionnement en titane, et le « Buy American Act » est une loi fédérale américaine qui impose l'achat de biens produits sur le territoire américain pour les achats directs effectués par le gouvernement américain.

timisation des coûts et des délais, réduction de l'impact environnemental... Des accords-cadres pluriannuels sont en général négociés entre clients et fournisseurs pour fixer des volumes minimaux annuels, avec une révision périodique des prix. Lorsque c'est possible, une clause prévoit le rachat des déchets de titane dans le but de leur recyclage dans la filière de transformation.

Les acteurs industriels plus modestes en termes de besoin annuel en titane peuvent s'approvisionner auprès d'un réseau de distributeurs, de stockistes et de « services centers » pour leurs achats spot.

Le secteur de la Défense est un marché captif pour le titane, car il est indispensable aux systèmes d'armes les plus performants : avions, hélicoptères, missiles, véhicules blindés, bateaux, sous-marins... Les volumes de consommation représentent une faible portion de la demande mondiale (environ 7 %), mais l'approvisionnement revêt un caractère stratégique pour les pays dotés d'une industrie militaire. En raison de ces enjeux liés à la souveraineté nationale, la question de l'accès à la matière première a motivé et motive encore l'investissement dans une capacité de production sur le territoire national. Toute situation de dépendance fait l'objet d'une politique spécifique visant à sécuriser l'accès à la matière première.

En France, et plus généralement en Europe, l'industrie de la Défense ne peut se satisfaire des sources d'approvisionnement locales, car elles ne couvrent pas l'ensemble de ses besoins (Pavel, 2016 ; Bolton, 2016). Il en résulte une approche de *sourcing* qui s'apparente à celle de l'industrie civile (qualification de plusieurs sources, mise en concurrence...), s'accompagnant en outre de restrictions liées à la finalité militaire de l'acte d'achat. Ainsi, des politiques de contrôle limitent ou interdisent l'exportation de titane en fonction de la destination finale du produit. Ces politiques s'appuient sur un ensemble de règles, comme la réglementation américaine sur le trafic d'armes au niveau international (ITAR), ou font l'objet d'interdictions temporaires en lien avec la situation géopolitique de l'instant.

Développer les capacités de production en Europe

L'industrie européenne de production de titane n'est pas intégrée verticalement. Outre l'absence de producteur d'éponges, elle affiche en France, au Royaume-Uni et en Italie des capacités limitées de fusion répondant au standard aéronautique.

Au niveau de la transformation, les moyens les plus significatifs sont regroupés autour de la forge du titane dans le cadre d'un partenariat industriel entre le leader français du domaine et le producteur kazakh d'éponges et de lingots. Ces mêmes acteurs ont été à l'origine de la création, en 2017, de la filière française de recyclage qui possède, sur le territoire national, ses propres moyens de fusion.

Compte tenu du contexte particulier de l'offre et des enjeux industriels que revêt l'emploi du titane, la France œuvre à la consolidation d'une filière européenne capable

d'offrir une source alternative locale, compétitive et apte à rivaliser avec les États-Unis, la Russie et la Chine.

Les coûts d'investissement et d'exploitation d'un site de production d'éponges de titane sont trop élevés pour envisager qu'une capacité industrielle européenne puisse émerger, et ce d'autant plus que l'offre mondiale d'éponges est déjà surcapacitaire. La consolidation de partenariats avec des producteurs d'éponges non intégrés, tel que celui conclu autour de la forge et du recyclage, est certainement la voie à suivre pour sécuriser l'accès à la matière première.

Après des investissements majeurs réalisés ces dernières années dans l'industrie du titane, la France est en situation de fédérer les ambitions européennes autour de ce matériau stratégique. Les industries consommatrices plébiscitent l'émergence de capacités de transformation de proximité dans les domaines suivants :

- tôles, plaques ;
- barres et bobines ;
- pièces moulées de grande dimension ;
- impression 3D de pièces de grande dimension.

Ces nouvelles capacités devront impérativement être qualifiées « aéronautiques » afin d'accéder à des volumes de production suffisants pour assurer leur pérennité et répondre au même niveau d'exigence en termes de prix, de qualité et de délai que celui des sources existantes. La proximité entre les sites de production et les industries clientes est un atout supplémentaire pour répondre aux objectifs de réduction de l'impact carbone.

En France, un accompagnement des pouvoirs publics

Conscient des enjeux économiques et géostratégiques de l'approvisionnement en titane, le ministère français en charge de la politique des matières premières a mis en place, depuis 2001, une veille portant sur le marché de ce métal. Les buts de cette veille sont :

- d'assurer un suivi régulier des faits saillants de l'offre et de la demande,
- de capitaliser les informations et les analyses relatives à ce marché dans un rapport mis à jour tous les trois ans⁽³⁾,
- et de proposer aux industriels utilisateurs du titane l'accès à un forum d'échanges utile pour l'approfondissement de leur réflexion sur leur stratégie d'approvisionnement, un forum également accessible aux organismes publics chargés de coordonner la politique gouvernementale.

En janvier 2011, une structure de concertation entre les pouvoirs publics et les acteurs économiques a été créée dans le but d'élaborer et de mettre en œuvre la politique nationale de gestion des métaux stratégiques, en vue de renforcer la sécurité d'approvisionnement nécessaire à la compétitivité durable de l'économie française.

(3) http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/louvigne_titane_rapport_2015-2017_edition_publicque.pdf

Cette structure appelée Comité pour les métaux stratégiques⁽⁴⁾ (COMES), décline son action autour de trois axes principaux :

- la sensibilisation sur les risques (géopolitiques, environnementaux et économiques) associés aux matières premières et le partage des connaissances acquises sur les marchés des matières premières avec les acteurs industriels ;
- la valorisation des ressources primaires et secondaires du territoire national ;
- la diplomatie des matières premières.

La communauté française s'est ainsi particulièrement bien organisée au sein de l'Europe pour prendre le *leadership* du développement d'une filière d'approvisionnement en titane à la fois compétitive et durable.

Bibliographie

HOUSLEY K. L. (2007), *Black sand, the history of Titanium*, Metal Management Inc., ISBN 0-935297-43-X.

PAVEL C. C. & TZIMAS E. (2016), *Raw materials in the European defence industry*, JRC science for policy report, EUR 27542 EN, doi:10.2790/0444.

BOLTON J. & BOYLAN-KOLCHIN D. (2016), *U.S. Strategic Material Supply Chain Assessment: Titanium*, U. S. Department of Commerce – Bureau of Industry and Security Office of Technology Evaluation.

(4) <http://www.mineralinfo.fr/page/comite-metaux-strategiques>

Ambition 2025 : la stratégie du Groupe Orange pour le développement d'un numérique plus sobre énergétiquement et plus économe en ressources et matériaux critiques

Par Philippe TUZZOLINO

Directeur Environnement du Groupe Orange

Les acteurs du numérique doivent réduire leur empreinte environnementale dans un contexte de croissance des usages de leurs clients et d'urgence climatique. Orange souhaite s'engager sur une trajectoire de réduction des émissions de CO₂ liées à ses activités, conformément à l'objectif de limiter le réchauffement à 1,5°C et en alignement avec les recommandations du GIEC et les Accords de Paris.

Cette ambition se traduit par un objectif de réduction de ses émissions absolues de CO₂ en 2025 d'au moins 30 % par rapport à 2015. Cette réduction des émissions se fera principalement pour Orange au travers d'un développement additionnel de l'électricité d'origine renouvelable, avec plus de 50 % visé en 2025.

Ces nouveaux objectifs vont s'accompagner d'un plan renforcé sur l'étude des ressources associées à cette politique. Orange ne fabrique rien directement, achetant l'ensemble de ses équipements à des fournisseurs. L'action du Comité stratégique sur l'économie circulaire, qui a été mis en place en 2017 et dont l'un des volets d'intervention porte sur les risques inhérents aux matières premières et aux ressources rares, a été renforcée par l'engagement d'une nouvelle étude de recherche sur les matières critiques pour le Groupe, en lien avec son processus achat et ses relations avec ses fournisseurs.

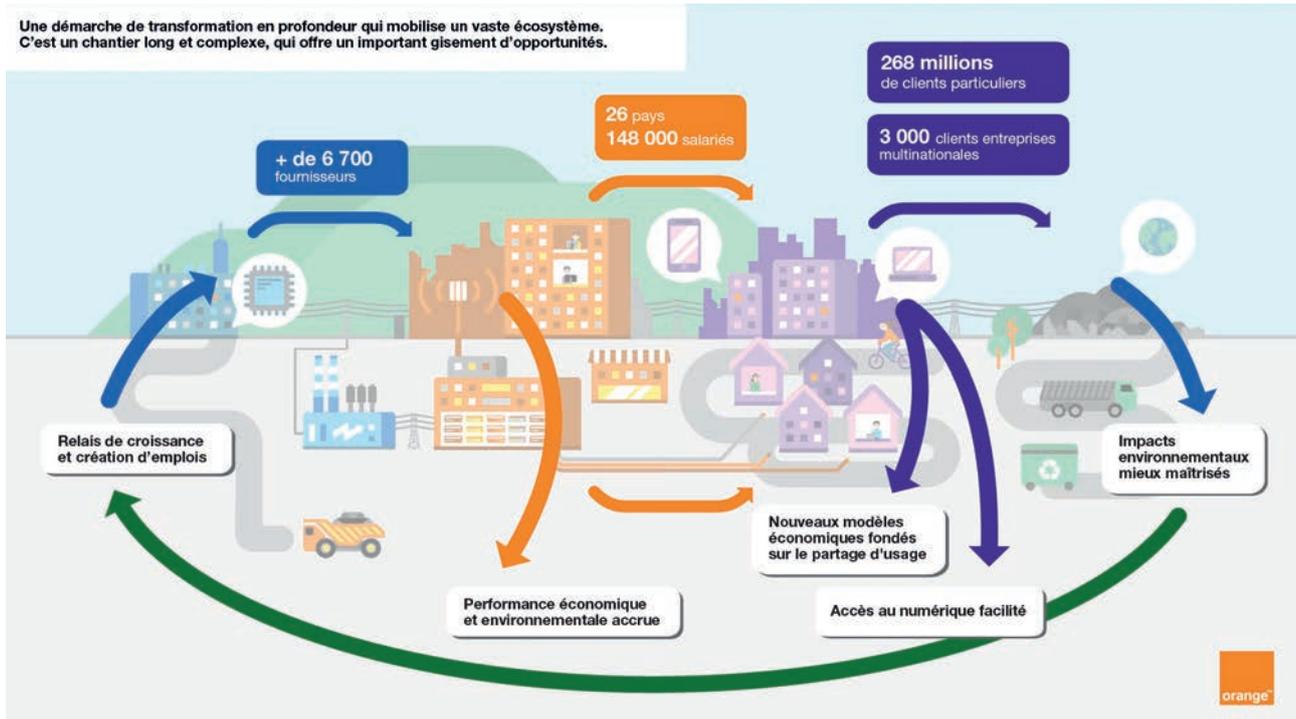
Les acteurs du numérique doivent réduire leur empreinte environnementale dans un contexte de croissance des usages de leurs clients et d'urgence climatique. Orange souhaite s'engager sur une trajectoire de réduction des émissions de CO₂ liées à ses activités, conformément à l'objectif de limiter le réchauffement à 1,5°C et en alignement avec les recommandations du GIEC et les Accords de Paris. Cette ambition se traduit par un objectif de réduction de ses émissions absolues de CO₂ en 2025 d'au moins 30 % par rapport à 2015 (scopes 1 et 2, effort amplifié au premier semestre 2020 d'un objectif SBTi sur le scope 3). Cette réduction des émissions se fera principalement pour Orange au travers d'un développement additionnel de l'électricité renouvelable (plus de 50 % en 2025) et de la poursuite de son

programme d'efficacité énergétique de ses réseaux et de l'IT. Ces objectifs ambitieux qu'Orange s'est fixés pour 2025, doivent lui permettre de réduire ses émissions de CO₂ pour s'aligner avec le net-zéro carbone en 2040.

Pour réduire son impact sur les matières premières le Groupe a déployé une politique de mise en œuvre de l'économie circulaire dans l'ensemble de ses processus métiers, avec la création d'un comité stratégique de suivi

Les nouveaux objectifs que s'est fixés Orange vont s'accompagner de la mise en œuvre d'un plan renforcé sur l'étude des ressources associées à cette nouvelle poli-

Une démarche de transformation en profondeur qui mobilise un vaste écosystème. C'est un chantier long et complexe, qui offre un important gisement d'opportunités.



tique. Orange ne fabrique rien directement, achetant l'ensemble de ses équipements à des fournisseurs. L'action du Comité stratégique sur l'économie circulaire, qui a été mis en place en 2017 et dont l'un des volets de son intervention porte sur les risques inhérents aux matières premières et aux ressources rares, a été renforcée par l'engagement d'une nouvelle étude de recherche sur les matières critiques pour le Groupe, en lien avec son processus achat et ses relations avec ses fournisseurs. Une étude qu'il faudra étendre pour prendre en compte la nécessité d'un fort déploiement des énergies renouvelables sur le périmètre des pays où Orange est présent, notamment au travers de la construction d'unités additionnelles de production d'énergie renouvelable : solaire, éolien... (PPA : *Power Purchase Agreement*, ESCO : *Energy Services Company*, fermes solaires).

Renforcer nos positions en matière d'économie circulaire en relation avec nos fournisseurs

S'inscrire dans l'économie circulaire permet de réduire le risque lié à la dépendance aux matières grâce à une diminution de la consommation de ces matières : cela en augmentant la réparation des équipements, leur collecte et leur réutilisation, et en systématisant en amont l'éco-conception.

Dans le domaine de l'économie circulaire, on peut citer quelques exemples de la politique mise en place sur nos produits et services :

- Livebox : 87 % de taux de collecte. Nos box peuvent être réutilisées jusqu'à 5 fois, économisant la fabrication de plusieurs millions d'équipements.
- Développer systématiquement l'éco-conception : décodeurs TV et Livebox éco-conçus (Livebox 5 = 29 % de CO₂ en moins).

- Mobiles : 15 millions de terminaux collectés en douze ans.
- Utiliser et mettre en place des équipements de seconde main dans nos réseaux avec l'aide de nos fournisseurs (programme Oscar). Nous avons également mis en place un programme de réemploi en interne (entre filiales) d'équipements *via* une plateforme, Stockmarket place, permettant ainsi de réutiliser plusieurs fois des équipements réseaux et IT.
- Par ailleurs, Orange s'est fixé l'objectif pour 2025 que les terminaux reconditionnés représentent au minimum 10 % du volume de ses ventes de mobiles.
- Orange a également mis en place avec d'autres opérateurs un processus d'audit et de contrôle : la Joint Audit Corporation, qui regroupe 17 opérateurs mondiaux, vise à mettre en place des spécifications et des processus en lien avec la Fondation Ellen Mac Arthur, la GSMA et l'UIT (l'Union internationale des télécommunications) pour spécifier à nos fournisseurs dans le cadre de nos achats d'équipements, notamment nos exigences en termes d'éléments reconditionnés ou réutilisés. Ce processus met en œuvre les exigences de l'économie circulaire dans nos relations avec nos fournisseurs, s'accompagnant d'une méthode normalisée de l'évaluation de la circularité : Circularity Score pour nos équipements réseaux et clients.

Prendre en compte la problématique des énergies renouvelables

Il nous faudra également surveiller les chaînes d'approvisionnement liées à l'emploi des énergies renouvelables, car Orange veut déployer fortement le recours à ces énergies d'ici à 2025 dans l'optique de décarboner son activité. Orange va dès lors devoir surveiller l'évolution des ressources liées à l'essor de ces sources d'énergie pour éviter une pénurie et l'augmentation des coûts.

En 2018, Orange a amélioré son étude sur les matériaux critiques au travers du recours à une matrice de calcul d'un indice de criticité.

La liste des métaux critiques résultant de l'étude 2012 a ainsi été complétée : antimoine, argent, bismuth, cobalt, cuivre, étain, gallium, germanium, graphite naturel, indium, lithium, nickel, or, platinoïdes, silice métal, tantale, terres rares et tungstène.

Une étude permettant à Orange de mieux appréhender ses risques d'approvisionnement, l'importance économique des matériaux critiques, et ses capacités de substitution et de recyclage

Pour l'appréciation du risque d'approvisionnement, le calcul est basé sur des facteurs qui mesurent le risque de perturbation ou d'interruption dans la fourniture de certains métaux. En ce qui concerne l'importance économique, le calcul est basé sur l'importance du matériau pour ses applications au sein de l'Union européenne et sur les performances de ses substituants au regard de ces mêmes applications.

Le risque économique lié à l'approvisionnement en composants électroniques est encore accru par le renforcement des législations sur la traçabilité des matières premières. Dans le sillage des dispositions sur les matériaux conflictuels adoptées aux États-Unis dans le cadre du Dodd-Frank Act, les réglementations internationales tendent à engager de plus en plus fortement la responsabilité juridique des multinationales.

Pour rappel, le Dodd-Frank Act est la grande loi de régulation financière adoptée par le Congrès américain en 2010 en vue de corriger certaines des failles juridiques qui avaient rendu possible la crise financière de 2008. L'arrivée de la future réglementation européenne va renforcer les contrôles en la matière.

Parmi ses très nombreuses dispositions, la section 1502 du Dodd-Frank Act relative aux « minéraux conflictuels »

invite les équipementiers à faire preuve de transparence sur leurs chaînes d'approvisionnement en matières premières. Il s'agissait à l'origine de priver les trafiquants de diamants, d'or et d'autres métaux de débouchés sur les marchés internationaux, leurs profits servant à alimenter les conflits sanglants que connaît l'Afrique. Les principes du Dodd Frank Act tendent aujourd'hui à se généraliser, et conduisent les entreprises responsables à auditer en profondeur leurs supply chain pour repérer et éliminer tout risque d'approvisionnement suspect.

Des filières complexes difficiles à contrôler

Cependant, cette louable démarche de contrôle et de transparence est d'autant plus complexe à mettre en œuvre que les chaînes d'approvisionnement sont longues et éclatées tout autour du globe – avec une cascade de centaines de sous-traitants qui gravitent entre les exploitants des mines d'où sont extraits les métaux et minéraux, et l'intégrateur final de l'équipement télécom. En outre, la hausse de la demande en matières rares attise plus encore l'appétit de trafiquants et d'intermédiaires sans éthique...

Par ailleurs, la même problématique de responsabilité prévaut pour la dimension environnementale et sociale de l'exploitation de ces matières. La quête du profit poursuivie par des acteurs sans scrupules dans des régions peu développées favorise l'implantation de mines sauvages, exploitées en dehors des standards environnementaux et sociaux internationaux. Avec, à la clé, des risques juridiques, financiers et d'image majeurs pour les entreprises qui, en bout de chaîne, seraient convaincues d'avoir bénéficié de ces matières premières.

Orange peut-il agir seul sur un tel sujet ?

Non, bien sûr, c'est un enjeu qui dépasse largement le Groupe : les États et l'Union européenne commencent à s'emparer du sujet au plus haut niveau, et des discussions ont même eu lieu à l'ONU. Les ressources rares posent la question de la dépendance des économies nationales et régionales vis-à-vis de l'importation des matières stratégiques. À une époque où le marché est devenu global et multipolaire, à l'instar des préoccupations environnementales et sociales, on assiste au début d'une véritable transition dans les modèles industriels hérités du XIX^e siècle.

Face à la concurrence des grands pays émergents, la bataille des ressources primaires est sans doute déjà perdue par les économies avancées, notamment européennes. La vraie bataille, désormais, c'est la construction du modèle économique du XXI^e siècle, fondé sur le recyclage et l'économie circulaire, représentant un véritable levier de ré-industrialisation, d'innovation et de création d'emplois sur le long terme. Une bataille dans laquelle les entreprises ont un rôle primordial à jouer.



Matières premières, criticités et axes stratégiques dans les industries de l'automobile

Par Gildas BUREAU

Pilote du groupe de travail PFA Filière « Automobile et Mobilité » sur les matériaux stratégiques pour l'automobile

Forte de 400 000 emplois en France, la filière Automobile fait partie des industries stratégiques nationales. Cette industrie utilise de nombreux équipements technologiques de plus en plus complexes qu'elle a su rendre fiables et abordables. L'intégration de ces fonctions technologiques sont nécessaires pour la sécurité, le confort, le respect des normes environnementales ou pour la connectivité des véhicules.

Ces performances techniques et économiques, à la fois durables et sûres, sont le fruit d'évolutions et de ruptures technologiques qui ont été rendues possibles grâce à l'utilisation industrielle de matières premières présentant des propriétés exceptionnelles, qu'elles soient électroniques, électriques, magnétiques, optiques...

Si nous remontons la chaîne logistique de ces différents composants automobiles, nous y trouvons des matériaux et des matières premières. Même à l'heure de la digitalisation, une automobile reste un ensemble constitué de plus d'une tonne de matériaux.

Comme nous le verrons ces matières premières sont au cœur d'un écosystème complexe, international et interdépendant, à forts enjeux. Dans ce contexte, différents leviers sont actionnables pour établir une, ou plutôt, devrais-je dire, des stratégies pour encadrer la gestion des matières premières stratégiques.

Introduction

Afin de réaliser des biens d'équipements électriques, électroniques ou de communication, les matériaux sont de fait essentiels à toutes activités manufacturières. L'industrie automobile embarque de nombreuses révolutions technologiques, et se trouve à la croisée des chemins technologiques, économiques, sociaux, sociétaux, voire géopolitiques.

L'année dernière, l'industrie automobile mondiale a produit plus de 90 millions de véhicules (particuliers et utilitaires), dont plus de 15 millions en Europe. Elle emploie plus de 13 millions de travailleurs européens et son chiffre d'affaires représente 7 % de l'économie européenne. La filière française représente plus de 4 000 entreprises et investi plus de 6 milliards d'euros par an en R&D.

Cette innovation constante s'attache à établir les futurs modes de conception, les futures technologies, et les *process* de fabrication et de commercialisation différenciants et performants de demain.

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

Ces mutations se traduisent par un mouvement durable vers des véhicules à faible empreinte environnementale, connectés, électriques, et où l'impérieux besoin de mobilité individuelle (et collective) a souvent été remis en cause. Tout cela dans un contexte industriel et politique de sortie du Royaume-Uni de l'Union européenne (Brexit).

Puis est survenu le corona virus (SARS-CoV-2) à Wuhan, berceau de l'industrie automobile chinoise⁽¹⁾, une épidémie qui s'est transformée en pandémie au cours du 1^{er} trimestre 2020.

Avec plus de 3 milliards de dollars de produits automobiles exportés par la Chine vers la France, l'Allemagne et l'Angleterre, cette pandémie a soulevé de façon violente et profonde les flux mondiaux et l'interdépendance des industries aux approvisionnements stratégiques, et ce bien au-delà du seul secteur automobile.

(1) L'industrie automobile représente plus de 48 % des industries implantées à Wuhan (source: Statistica), notamment Dongfeng Passenger Car, Dongfeng Motors Co, Dongfeng-Renault Motor Co, Dongfeng-Peugeot Citroen Automobile Co, Dongfeng-Nissan Passenger Vehicle Co, Zhejiang Geely Automobile, SAIC General Motors Co, Nanjing Golden Dragon Bus...

Global Supply of EU Critical Minerals and Metals

The pie charts show the percent distribution of the production of critical metals and minerals. In total, it is 100% for each raw material. The area of the pies are proportional. SGU 2017.

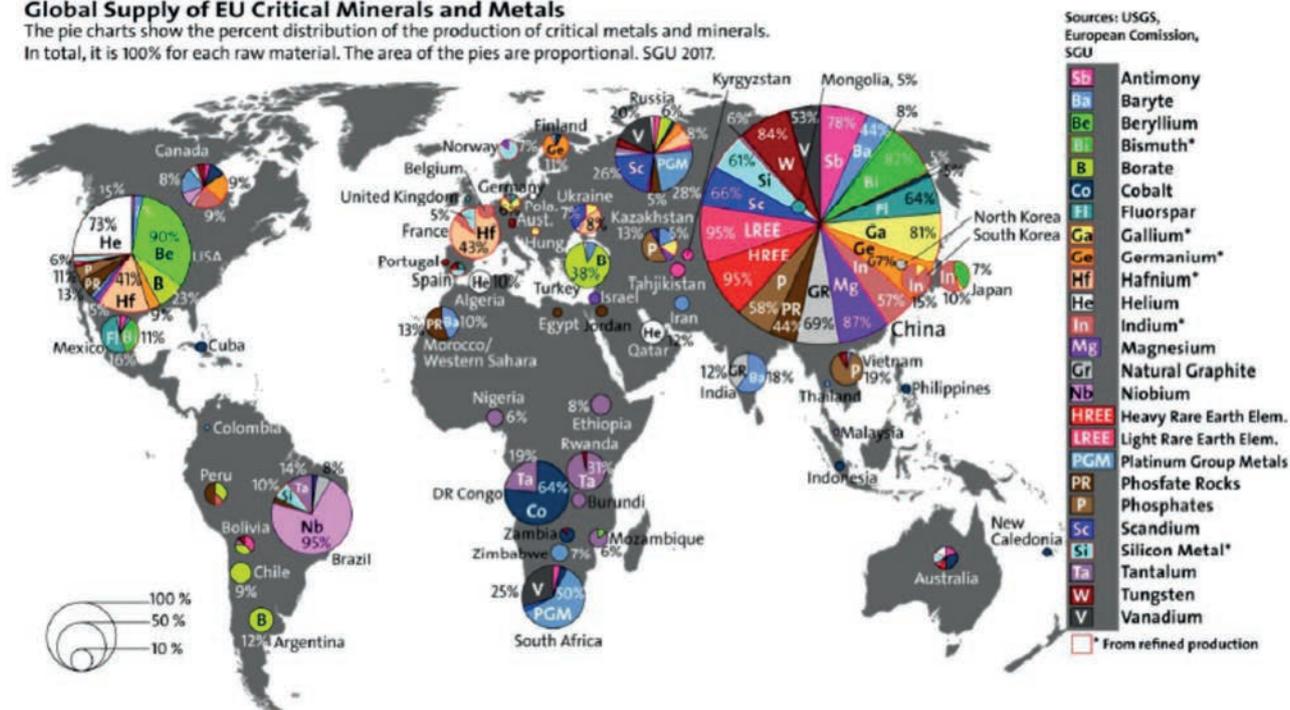


Figure 1 : Carte des approvisionnements de l'UE en matériaux critiques⁽²⁾.

Le contexte international

Comme souligné et largement documenté dans nombre des publications des *Annales des Mines*, la mondialisation et la montée en puissance de la Chine et de l'Inde ont engendré différentes tensions sur les marchés des matières premières, concrétisant un positionnement durable, profond et systématique de la Chine dans la maîtrise de certaines ressources critiques. La Chine est ainsi devenue le principal fournisseur mondial de certains matériaux considérés comme critiques, assurant plus de 70 % des exportations correspondantes⁽³⁾. L'approvisionnement en matières critiques de l'Union européenne dépend à plus de 80 % des pays situés hors de l'Union, notamment l'Asie, les États-Unis, la Russie, l'Afrique du Sud et l'Amérique du Sud.

Dans un contexte de hausse mondiale de la demande de certaines substances stratégiques pour une production automobile en pleine transition, certaines tensions progressent ou de nouvelles apparaissent. À cela s'ajoute la nécessité pour l'industrie automobile de répondre aux enjeux liés aux conditions d'extraction, de transformation et de traçabilité des matières premières.

Ainsi, au travers des récentes crises ayant affecté les marchés des matières premières – celles de 2008 (crise économique mondiale) et de 2011 (crise des quotas sur les TR chinoises) –, les grands acteurs des mondes politique et économique, mais aussi la société civile avec la crise liée au Covid-19, ont (re)pris conscience du carac-

rière stratégique des flux de matières premières pour leur économie et leurs industries stratégiques.

Différentes initiatives ont depuis été prises soit à titre privé (Allemagne,...), soit par des États (France, États-Unis, Corée, Japon⁽⁴⁾...).

Les réponses apportées par ces différents États et la Commission européenne à ces enjeux sont décrites dans la dernière partie du présent numéro de *Responsabilité & Environnement*.

Ces questions de dépendance et de souveraineté nationales s'inscrivent dans des débats d'actualité connexes à l'industrie automobile, comme l'hébergement des serveurs informatiques, la maîtrise des futures générations de réseaux téléphoniques ou, plus récemment, avec la crise du Covid-19, de la production de certains médicaments, de dispositifs médicaux nécessaires à la mise en œuvre des plans de crise et de reprise d'activité.

Il est évident que la capacité d'action de la France et de l'Europe sur l'ensemble de ces sujets stratégiques reste limitée. Mais la souveraineté nationale fait débat, constituant l'occasion de reconsidérer certaines opportunités qui s'offrent à l'Europe, laquelle s'est saisie, dès 2008, de cette question, conduisant à la mise en place de différents dispositifs, dont certains dédiés aux gisements et aux ressources⁽⁵⁾, alimentés par des outils nationaux⁽⁶⁾.

Ces questions font régulièrement débat. Mais la crise mondiale que nous vivons actuellement permettra

(2) <http://screen.eu/>

(3) <http://www.anales.org/>

(4) <http://www.anales.org/re/2016/resumes/avril/05-re-resum-FR-AN-AL-ES-avril-2016.html>

(5) <http://screen.eu/results/>

(6) <http://www.mineralinfo.fr/>

peut-être de cristalliser des orientations durables et pérennes pour l'industrie automobile.

Contexte de l'industrie automobile

Périmètre et définition techniques

Nous pouvons estimer qu'au niveau du coût des composants, la part matière représente entre 45 et 55 % du prix d'un véhicule à moteur à combustion interne.

Figure 4-5: Automotive cost components of a conventional vehicle

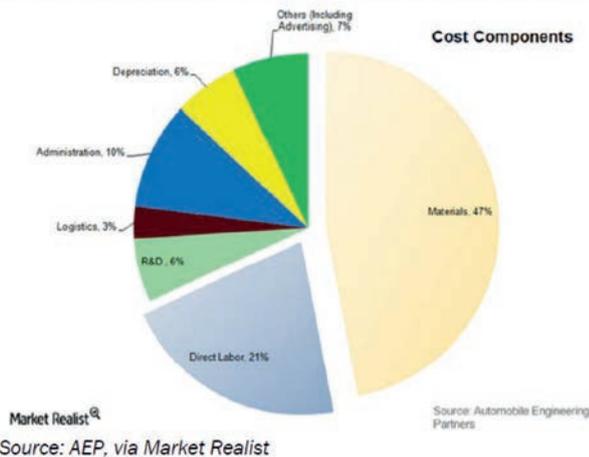


Figure 2 : Décomposition des coûts des composants d'un véhicule thermique.

Parmi ces composants, nombreux sont ceux qui font appel à des matériaux critiques. Je parlerai ici de matériaux critiques plutôt que de minerais critiques, car, pour l'industrie automobile, certains matériaux qualifiés de stratégiques peuvent être aussi bien des substances, des minerais, des métaux que des matières naturelles.

Conventionnellement, un matériau est dit stratégique quand son usage est essentiel au développement ou au maintien compétitif de la filière considérée. La criticité s'apprécie selon deux axes principaux : les risques liés à sa disponibilité (ressource, production, approvisionnement, marché...) et l'importance économique que revêt ce matériau.

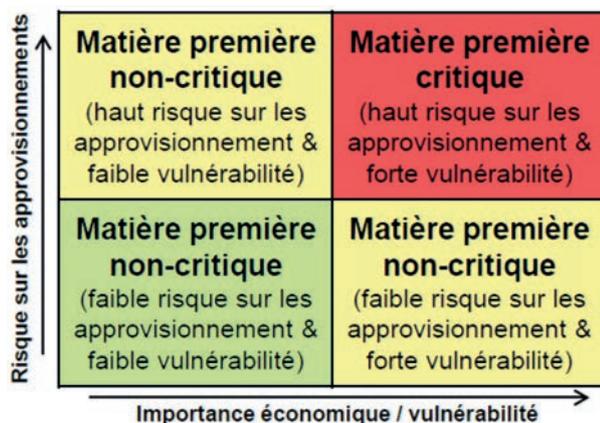


Figure 3 : Cartographie des matières premières⁽⁷⁾ (source : BRGM).

La filière Automobile et mobilité dispose d'un Conseil de recherche automobile (CRA) dédié, qui, aidé par des communautés d'experts de l'automobile, va élaborer dans le cadre des matériaux des recommandations et des points d'alerte sur les approvisionnements en matériaux stratégiques pour l'industrie automobile.

Les risques pour la filière peuvent être, selon les matériaux, politiques (insécurité, gouvernance, quotas...), économiques (concentration des acteurs, stratégies et types d'investissements...), géographiques (concentration des ressources, des productions...), géologiques (localisation des ressources minérales, réserves limitées...) et sociétaux (conditions d'extraction, impacts environnementaux, risques de corruption, prise en compte du bien-être animal...).

En complément de la description des critères stratégiques définis par le Groupe Renault⁽⁸⁾, l'attribution du qualificatif de stratégique aux matériaux de la filière est liée aux évolutions des nouvelles architectures véhicules qui accompagnent la transition énergétique, notamment les véhicules à faible empreinte environnementale.

En appréhendant les besoins à l'échelle de la filière automobile et en tenant compte de l'évolution de l'importance à venir de certains matériaux, les principaux matériaux stratégiques sont :

- les métaux utilisés dans l'électronique, l'information et la communication, et la connectivité : Ga, In, La, Ce, Be, In, Sb ;
- les matériaux nécessaires à l'électrification : Li, Co, Ni, Cu, Nd, Pr, Sm, Tb, Dy ;
- les métaux issus de zones de conflit : Sn, Ta, W, Au ;
- les matériaux servant à la dépollution des moteurs à combustion interne : Pd, Pt, Rh ;
- les matériaux d'origine naturelle : caoutchouc, mica, graphite ;
- les matériaux d'origine animale : le cuir.

L'évolution de leur consommation a été estimée comme précisé dans la Figure 4 de la page suivante.

Architectures automobiles et chaînes de traction

Le cœur d'un véhicule se structure autour de trois architectures principales : électrique/électronique, structurelle (« la caisse ») et la chaîne cinématique adaptée (« du moteur à l'échappement »). Elles font appel à de nombreux organes et composants techniques représentant entre 20 000 à 30 000 pièces selon les véhicules. Ces composants complexes doivent satisfaire les fonctions répondant aux évolutions techniques et sociétales et embarquent les technologies permettant à chaque modèle d'être différenciant sur son marché. Ces technologies doivent être performantes, fiables, abordables et durables.

Cette notion de durabilité dépasse la seule notion de durabilité liée à l'usage du véhicule. En effet, cette notion englobe également la gestion des ressources amont, des matières premières et des activités humaines associées.

(7) <http://www.mineralinfo.fr/page/matieres-premieres-critiques>

(8) <http://www.annales.org/re/2016/re82/RE-82-Article-SCHULZ.pdf>

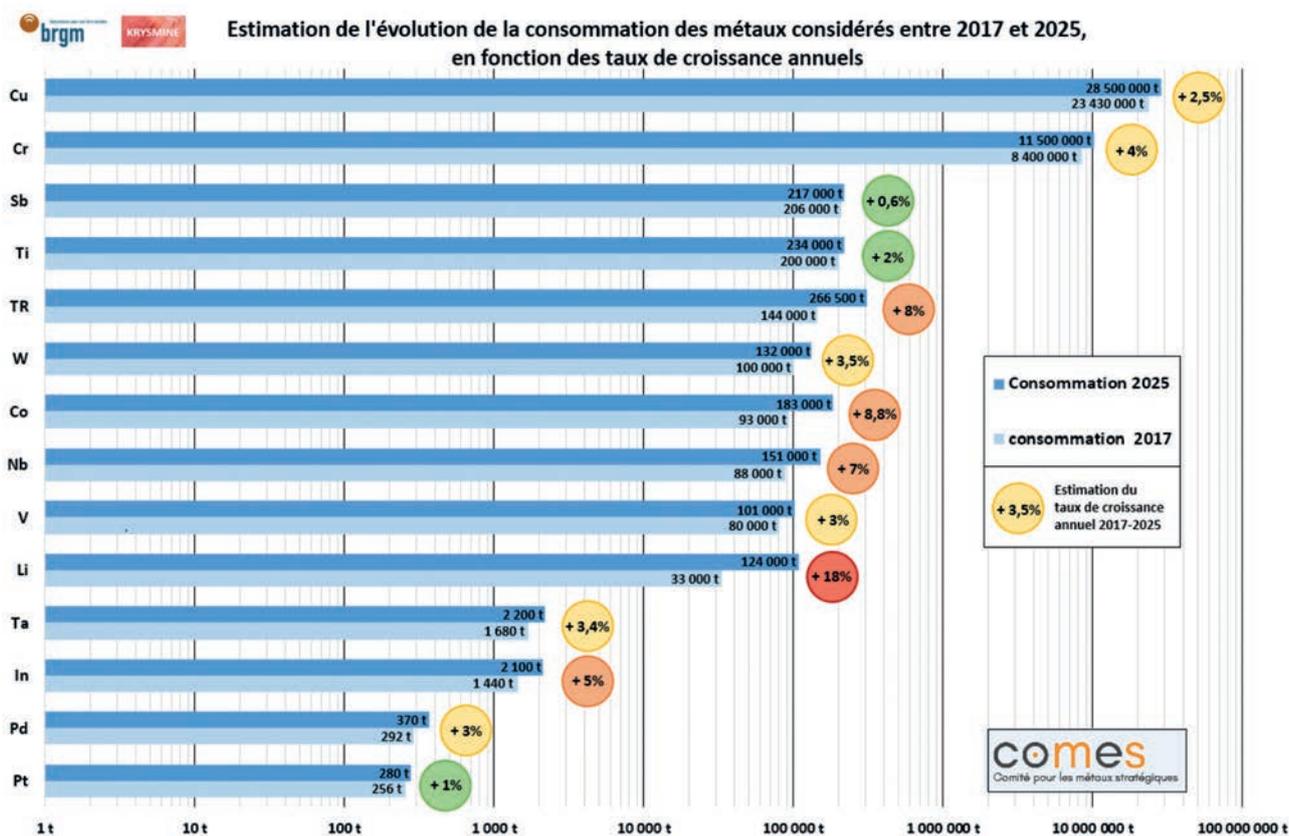


Figure 4 : Estimation de l'évolution de la consommation en matériaux critiques⁽⁹⁾ (source : BRGM).

Par exemple, la loi française⁽¹⁰⁾ sur le devoir de vigilance, qui s'exprime au travers de la responsabilité sociétale des entreprises (RSE), impose aux entreprises, notamment à celles de plus de 5 000 salariés, l'obligation de l'élaboration d'un plan de vigilance afin de prévenir les risques sociaux (atteinte aux droits humains...), environnementaux ou légaux (anti-corruption...), liés à leurs activités ou

à celles de leurs filiales et partenaires (sous-traitants et fournisseurs).

Les innovations technologiques développées pour accompagner la transition énergétique, qu'elles soient de nature sociale ou sociétale, font appel à des matériaux stratégiques servant à satisfaire les normes en vigueur en matière d'émissions de CO₂, de sécurité ou de connectivité : leur importance stratégique diffère selon l'architecture de plateforme considérée.

Contexte des véhicules électriques

Les véhicules électriques à batterie (BEV : *battery electric vehicle*) se caractérisent par une chaîne de traction

(9) <http://www.mineralinfo.fr/page/comite-metaux-strategiques>

(10) Loi n°2017-399 du 27 mars 2017 relative au devoir de vigilance des sociétés mères et des entreprises donneuses d'ordre.

(11) <https://www.groupe-psa.com/fr/actualites/corporate/cmp-la-plateforme-modulaire/>



Figure 5 : Architecture électrique de la plateforme e-CMP du Groupe PSA⁽¹¹⁾.

complètement électrifiée se composant d'une (voire 2, ou même 3) machines de traction, d'une électronique de puissance, d'un système de recharge embarqué et d'une batterie qui se recharge par branchement sur le réseau électrique.

Les architectures de ce type vont recourir à plusieurs éléments stratégiques, que sont le lithium, le cobalt, le nickel, le graphite, le cuivre, le gallium, le niobium, le silicium...

Les nouveaux matériaux stratégiques sont ceux qui sont principalement liés à la fabrication des batteries lithium-ion : Li, Co, Ni et Cu. Ces batteries connaissent une évolution technologique constante (Nickel Metal hybride, Lithium-Ion, haut-nickel, sans cobalt,...) et varient selon les autonomies souhaitées, les usages et les marchés visés (forte autonomie, véhicule urbain, véhicule orienté puissance...).

Ainsi, pour le lithium, les prévisions actuelles et les évolutions futures des chimies alternatives des cathodes (magnésium, métal-air, tout solide...), ainsi que les programmes d'approvisionnement européens tendent à préserver une certaine retenue en matière de spéculation. Cependant, une inquiétude demeure en ce qui concerne les produits transformés : hydroxydes, carbonates.

S'agissant du cobalt, les perspectives de marché font apparaître un déficit à moyen terme (à horizon 2025) lié aux évolutions du marché spécifique des cathodes des batteries lithium-ion. Un autre point justifiant une surveillance est la criticité associée à la gouvernance et à l'extraction de ce minerai, principalement issue de la République démocratique du Congo (RDC). En effet, l'inscription de ce minerai à moyen/court terme sur la liste des quatre autres minerais (tungstène, étain, tantale et or) alimentant financièrement les conflits actuels, est probable.

Le secteur du nickel souffre, quant à lui, d'un déficit des investissements lié aux prix bas actuels, ce qui laisse craindre un fort risque de décalage entre l'offre et une demande grandissante. Une demande qui sera accélérée par les futures évolutions chimiques que représentent les cathodes à haut nickel. De plus, la fabrication des cathodes actuelles des batteries lithium-ion nécessitent le recours à des sulfates de nickel issus de minerai de nickel de haute pureté, dont la filière de transformation est principalement localisée en Asie.

Enfin, le cuivre reste incontournable pour les architectures électriques (400V, 800V) et hybrides (48V), ainsi que pour les composants électriques/électroniques embarqués. Sa masse totale dans un véhicule électrique peut être supérieure de 30 % à celle de son équivalent thermique. Ce marché en croissance constante dans l'automobile est également stratégique pour les infrastructures et réseaux connectés, auxquels le secteur de l'automobile fait appel, d'où une certaine concurrence industrielle. Actuellement, la demande sur le marché est supérieure à l'offre, avec des tensions fortes en cas de retard dans la concrétisation des investissements dans de nouvelles exploitations minières.

Contexte des architectures hybrides

Ces véhicules disposent d'une chaîne de traction se composant d'un moteur à combustion interne (très majoritairement à essence), d'une batterie et d'un système de recharge embarqués et d'une ou plusieurs machines électriques implantées en différents endroits : train arrière, boîte de vitesse, transmission, dans les roues ou sur l'adaptation moteur (pour les hybridations légères dite MHEV/*mild-hybride*). La batterie est rechargeable par branchement au réseau (technologie PHEV : *plug-in hybrid electric vehicle*) ou uniquement *via* le moteur thermique qui sert alors de génératrice dans le cas de la technologie HEV : *hybride electric vehicle*. Dans les deux cas, la récupération lors des phases de freinage/décélération alimente la batterie.



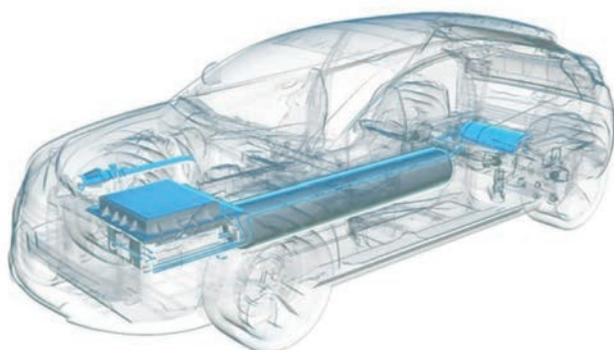
Figure 6 : Groupe moto propulseur hybride du Renault Captur E-TECH Plug-in⁽¹²⁾ (source : ©Groupe Renault, direction de la communication).

Les composants clés sont ceux liés à 1) la chaîne de traction thermique et à son système de dépollution (nécessitant l'usage de platinoïdes et de terres rares légères), et 2) aux couplages électriques associés aux organes mécaniques.

Du fait des faibles espaces disponibles pour insérer les composants électriques/électroniques, la majeure partie des systèmes embarquent des machines électriques compactes, à aimants permanents, et des batteries à forte densité volumique, mais de moindre capacité par rapport à celle des batteries des véhicules électriques (BEV).

Les matériaux stratégiques pour ces motorisations seront principalement liés à la fabrication des aimants permanents de la machine électrique (Nd, Pr, Dy, Tb), au stockage d'énergie (Li, Ni, Co, Graphite), à l'électronique de puissance (transistors GaN ou SiC), et aux besoins en certains platinoïdes (Pt, Pd, Rh) et terres rares légères (La, Ce, Y, Nd) pour la catalyse embarquée.

(12) <https://group.renault.com/news-onair/actualites/nouveau-captur-e-tech-plug-in-est-le-premier-hybride-rechargeable-du-groupe-renault/>



a) Chaîne de traction d'un véhicule léger ⁽¹³⁾.



b) Kangoo ZE avec prolongateur d'autonomie ⁽¹⁴⁾.

Figure 7 : Exemples d'implantation de piles à combustible dans des véhicules légers (sources : 7a©Faurecia ; 7b©Symbio).

Contexte des piles à combustible

Certains véhicules électriques embarquent soit des piles à hydrogène en tant que chaîne de traction (selon différentes technologies : *full-power*, *mid-power* ⁽¹⁵⁾), soit des prolongateurs d'autonomie (*range-extender*), là encore, à hydrogène qui permettent la recharge de la batterie (voir la Figure 7 ci-dessus). Cette technologie de pile à combustible (ou pile à hydrogène) utilise des électrodes revêtues de platinoïdes, dont le platine. Selon les technologies, une pile à combustible nécessite entre 0,2-0,4 gramme de platine au kW. L'impact de ces technologies sur le marché du platine n'est pas attendu avant 2025, sachant que des efforts de R&D sont réalisés pour arriver à une substitution partielle ⁽¹⁶⁾, voire totale de ce platinoïde.

Contexte des véhicules thermiques

Ces architectures restent le cœur du marché automobile mondial, lequel est composé de motorisations à combustion interne (essence, Diesel, agro-carburants...), où la connectivité, le confort, l'économie de carburant et l'agrément de conduite n'ont cessé de progresser.

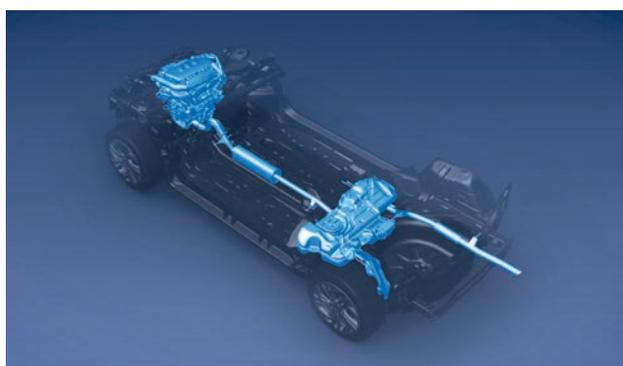


Figure 8 : Architecture type d'un véhicule thermique (source : ©Groupe PSA, direction de la communication).

(13) <https://www.faurecia.com/newsroom/la-technologie-de-la-pile-combustible-est-elle-le-nouveau-graal>

(14) <https://www.symbio.one/la-technologie-benefices/>

(15) <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2020/02/CRA1-PTF-HYDROGENE-ET-PILES-A-COMBUSTIBLE-VF2.pdf>

(16) <https://www.afhyac.org/documents/Fiche%20Platine%20V2.pdf>

Les enjeux stratégiques pour les motorisations thermiques sont toujours ceux liés aux systèmes de catalyse, principalement le platine pour les motorisations Diesel, et le palladium rhodium pour les motorisations essence. Avec l'essor des différents mixtes énergétiques, les demandes en platinoïdes seront de plus en plus importantes pour répondre aux normes d'émission qui deviennent de plus en plus sévères au niveau mondial. De plus, les véhicules autonomes et communicants embarqueront de très nombreux capteurs (caméras, radar, lidar...) et l'électronique associée, ainsi que de nombreux composants communiquant avec les infrastructures. Tous ces éléments contribueront à une augmentation des matières critiques pour le secteur de l'électronique : Ta, Sn, Sb, In, Ga, Au, Si, Be...

Les leviers stratégiques

Face à ces enjeux, quels sont les leviers disponibles pour établir une stratégie au sein des filières, des grandes entreprises, voire même des PME ?

Une orientation réaliste n'est pas de disposer d'une indépendance sur l'ensemble des matériaux stratégiques, mais plutôt de diminuer systématiquement cette dépendance au regard des différents critères menant à la criticité. De plus, dans un marché mondialisé, il est essentiel de ne pas rechercher à tout prix notre indépendance, mais plutôt de sécuriser nos approvisionnements en matières les plus critiques en combinant différents axes stratégiques.

Il appartiendra à chaque entreprise d'établir un plan de mise en œuvre des différents leviers possibles, afin d'établir la stratégie la mieux adaptée à ses propres enjeux. Ainsi, cette stratégie doit permettre de concrétiser les avantages concurrentiels liés à la gestion des matériaux critiques.

Par exemple, le plan d'implémentation stratégique de l'Union européenne (SIP) liste 24 actions, définit 7 grandes priorités et cible au moins 3 applications de matériaux critiques à substituer ⁽¹⁷⁾.

(17) https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/eip/strategic-implementation-plan_en

La synthèse des différentes études et observatoires des secteurs industriels permet de dégager six grands leviers actionnables, notamment dans l'industrie automobile :

- la substitution ;
- la diversification des approvisionnements ;
- la sécurisation des approvisionnements ;
- l'économie circulaire, le recyclage et l'écoconception ;
- l'intelligence économique ;
- et la R&D.

La substitution

Dans le cadre d'une analyse détaillée du caractère stratégique d'une substance, ce levier est le premier à utiliser, car il permet rapidement de diminuer la dépendance à cette matière ou à son approvisionnement.

La notion même de substitution entre dans le critère de la qualification stratégique ou non d'une substance. Pour cela une analyse fonctionnelle précise doit être réalisée pour connaître l'influence de la substitution sur la performance technique et économique, et les coûts associés à un tel changement. Cela relève d'un choix d'entreprise, si techniquement cela est possible, mais peut aussi s'avérer plus onéreux. Malheureusement, cela n'est pas toujours possible et certains matériaux critiques sont peu substituables par d'autres matériaux.

Ainsi, par exemple, dans l'électronique, les quelques milligrammes de terres rares légères sont difficilement substituables, car elles sont essentielles aux propriétés électroniques.

Un exemple d'indice de non-substitution des terres rares est présenté dans le tableau 1 ci-après :

La substitution matériaux/matériaux est souvent liée à une perte d'efficacité ou de performance d'ordre technique, technologique, financier ou industriel. Celle-ci peut cependant se faire sous la contrainte, à l'exemple des aimants permanents largement utilisés dans l'automobile au travers des nombreux capteurs, actuateurs, actionneurs...

Suite à la crise des terres rares survenue en 2010, liée aux tensions sino-japonaises sur l'archipel des îles Senkaku-Diaoyu, de nombreux aimants permanents à base de terres rares (lourdes et légères) ont fait l'objet d'une substitution forcée par des aimants alternatives de type ferrite. Ainsi, une substitution du type même de la fonction aimant a eu lieu, souvent sous forme de *task-force*, face à l'envolée des prix des terres rares.

Bien sûr, ce genre de substitution ne peut se faire à iso-performances techniques et économiques ; des adaptations d'encombrement, de calibration ou de conception ont donc été nécessaires. Il s'agit bien d'une décision d'entreprise à prendre en urgence, mais surtout à prendre en considération pour adopter une approche de long terme.

Dans les moteurs électriques des véhicules hybrides, est observée une autre tendance de substitution : la substitution des terres rares lourdes des aimants néodyme-fer-bore (NdFeB).

Cet axe est tellement stratégique qu'il fait partie du plan de l'UE⁽¹⁹⁾, pour les technologies des énergies vertes.

(18) Union européenne, "Report on CRM for the EU", 2014.

(19) <https://ec.europa.eu/growth/sites/growth/files/eip-sip-part-2.pdf#page=16>

Usage	Commentaires	Indice de non-substituabilité
Aimants	Il existe des options pour remplacer les métaux rares des aimants, parmi lesquelles des matériaux magnétiques alternatifs et des technologies alternatives de moteurs	0.7
Piles	Transition de plus en plus fortes vers les piles à l'ion Lithium	0.3
Autres usages métallurgiques	L'utilisation des métaux rares dans ces autres usages n'est pas essentielle	0.3
Catalyse de cracking	Substitution difficile	1.0
Catalyse automobile	Substitution possible dans une certaine mesure	0.7
Autre catalyse	Substitution difficile	1.0
Poudres abrasives	Substitution possible dans une certaine mesure	0.7
Additifs verriers	Substitution difficile	1.0
Lampes fluorescentes	Les diodes électroluminescentes sont de plus en plus compétitives face aux lampes fluorescentes	0.7
Céramiques	Substitution difficile	1.0
Autres usages chimiques	Substitution difficile	1.0
Autres	On trouve des substituts sur certains marchés mineurs	0.5

Figure 5 : Substitutions aux métaux rares dans leurs différents usages (l'indice de non-substituabilité est compris entre 0 (valeur où la substitution est très aisée) et 1 (valeur où elle est très difficile)).

Source : Union européenne, Report on critical raw materials for the EU, 2014.

Tableau 1 : Exemples d'indices de non-substituabilité des terres rares par usage⁽¹⁸⁾.

Certaines technologies comme les nano-poudres permettent de disposer d'aimants permanents industriels sans terres rares lourdes (Dy, Tb) ; d'autres technologies seront prochainement disponibles.

Toyota a récemment présenté sa *road map* ⁽²⁰⁾ pour permettre la substitution 1) à court terme des terres rares lourdes Dy et Tb, et 2) à moyen terme d'une partie du néodyme et praséodyme par des terres rares légères moins critiques, comme le lanthane et le cérium.

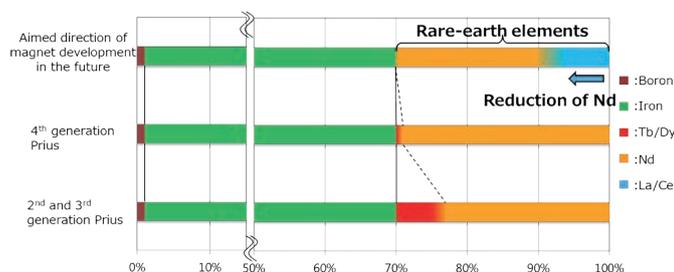


Figure 9 : Roadmap Toyota pour la substitution totale du Tb/Dy et partielle du Nd.

En Europe, les dernières retombées de projets scientifiques liés à différents projets européens portant sur cette même orientation technologique de substitution du néodyme ont été récemment publiées ⁽²¹⁾.

L'autre possibilité de substitution est celle d'une technologie à une autre technologie.

Toujours dans le domaine de l'électrification des chaînes de traction, les rotors bobinés des machines électriques sont un très bon exemple. Si pour répondre aux contraintes liées à la double motorisation thermique et hybride, les machines synchrones à aimants permanents sont majoritairement utilisées, les véhicules purement électriques offrent, quant à eux, plus d'alternatives technologiques, selon les architectures présentées précédemment. Ainsi, de nombreux modèles de BEV proposent des

(20) <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/21139684.html>

(21) <https://etn-demeter.eu/substituting-nd-in-nd2fe14b-based-hard-magnetic-alloys/>



Figure 10 : Moteur électrique à rotor bobiné de la Renault ZOE (source : ©Groupe Renault, direction de la communication – Photo10a©-Pagecran ; photo10b©LA ROCCA Antoine).

machines électriques sans aimants permanents : à rotors bobinés (Renault-Zoe et Kangoo Z.E.), ou à cage d'écu-reuil (Tesla-roadster ou modèle S).

La diversification des approvisionnements

À l'heure où l'Inde et la Chine se sont transformées, d'exportateurs en importateurs nets de certaines substances critiques, l'initiative Matières premières de l'Union européenne engagée en 2008 est source d'une réflexion d'envergure sur l'approvisionnement en matières premières critiques. La France, au travers de la direction générale des Entreprises (DGE) et des Comités stratégiques de filières (CSF), a mis en place une vraie « diplomatie des matières premières » en proposant des règles de gouvernance et en aidant les industriels français, au travers des filières stratégiques, à renforcer leur potentiel de diversification en matière d'approvisionnement en matières critiques.

Ainsi, bien que de plus faible capacité et bien moins intégrée sur toute la chaîne de valeur, les exploitations minières australiennes, africaines, canadiennes, thaïlandaises, vietnamiennes ou malaisiennes peuvent parfois se positionner en sources d'approvisionnement venant en complément des principaux pays asiatiques.

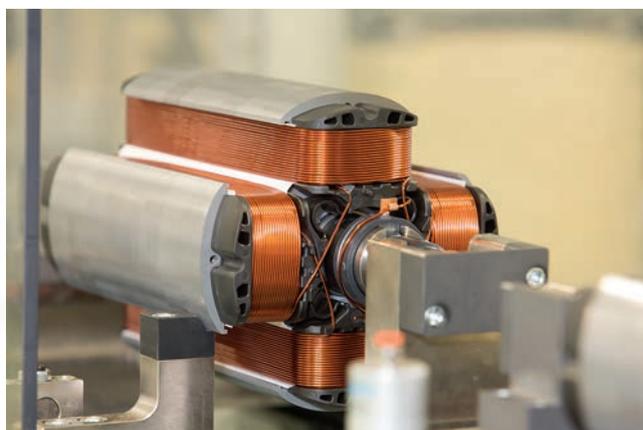
Par exemple, la Figure 11 ci-dessous restitue une présentation faite en 2019 aux acteurs industriels miniers aus-

Battery value chain : French innovation leaders

comes
Comité Supérieur des Industries Françaises



Figure 11 : Illustration d'un écosystème français des matériaux stratégiques liés à la batterie (source : direction générale des Entreprises).



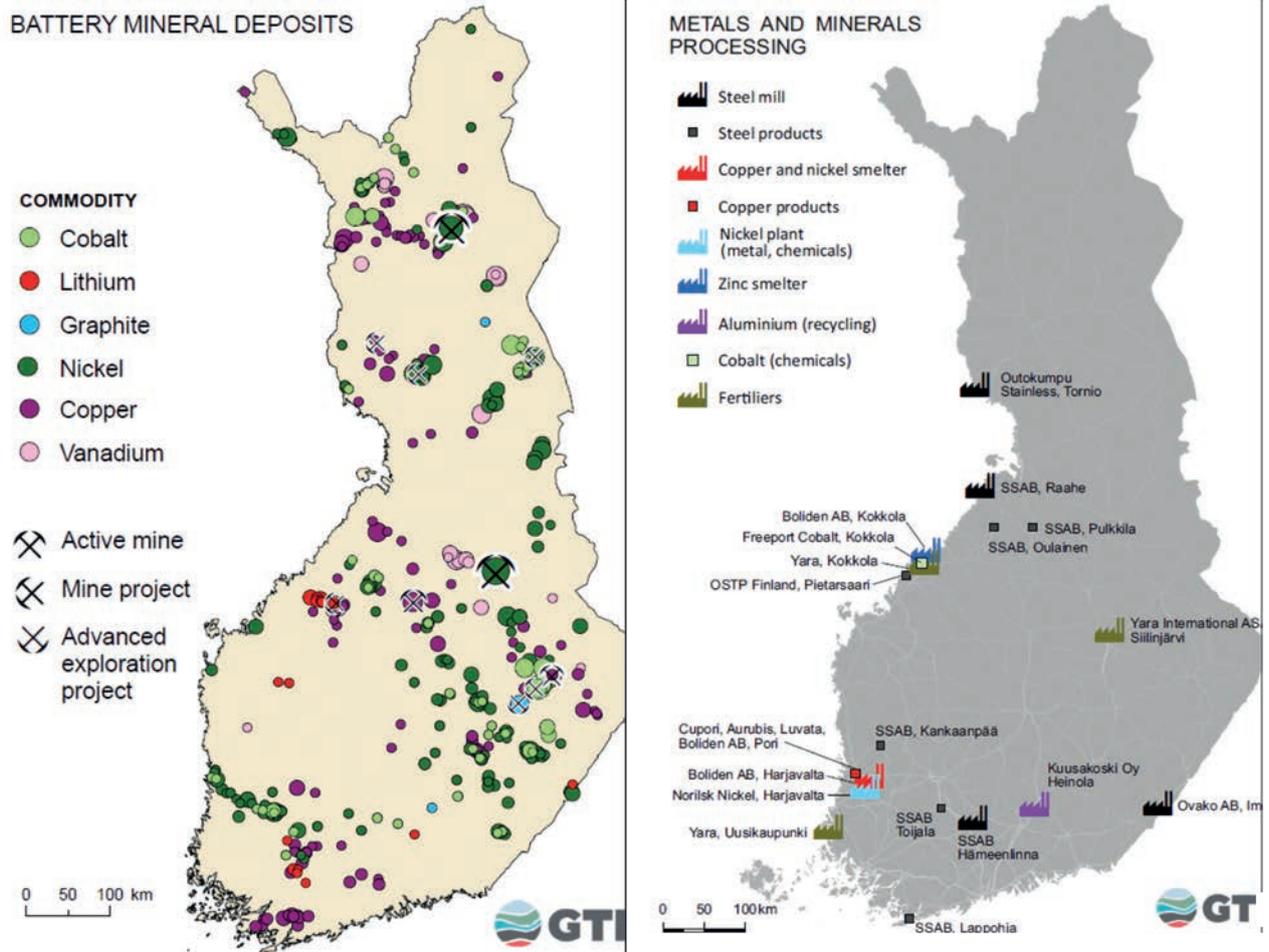


Figure 12 : Exemple de la filière minière finlandaise de minerais utilisés pour les batteries ⁽²²⁾.

traliens d'un écosystème français des matériaux stratégiques liés à la batterie.

Une autre source de diversification réside dans le travail coordonné par l'Union européenne pour développer la connaissance des gisements de matériaux critiques au sein des États membres, cela pour favoriser, développer et soutenir des approvisionnements de proximité, de tailles raisonnables et satisfaisant aux meilleurs standards environnementaux et sociaux.

Toute opportunité sera considérée comme stratégique dans le cadre du Projet important d'intérêt européen commun (PIIEC) instauré entre l'Allemagne, la Belgique, la Finlande, la France, l'Italie, la Pologne et la Suède, et visant à soutenir la recherche et l'innovation dans le secteur prioritaire européen commun des batteries ⁽²³⁾.

Ce suivi des nouvelles ressources fait également partie des pistes pouvant aboutir, ou non, à une autonomie/souveraineté minière, ou seulement à une « moindre dépendance » pour certains minerais, sous réserve que les volontés politiques techniques, économiques et légis-

latives identifient les critères différenciants pour chacune des filières concernées.

La diversification des approvisionnements permet de pondérer certains risques, notamment géopolitiques ou de gouvernance, tout en faisant jouer la concurrence. Cette stratégie est d'autant plus pertinente qu'elle peut s'accompagner d'une stratégie de substitution permettant de limiter la dépendance à une seule filière d'approvisionnement. Par exemple, la substitution des terres rares lourdes (dont l'approvisionnement est assuré à plus de 95 % par la Chine) par les nano-poudres, et/ou la substitution à venir d'une part grandissante du Nd/Pr par du Ce/La permettront de diversifier et de sécuriser les approvisionnements en ces terres rares légères, en se fournissant hors de Chine.

La sécurisation des approvisionnements

Cette sécurisation peut se faire à différents niveaux, selon le positionnement recherché dans la chaîne de valeur. Dans le cas des matériaux stratégiques, certains acteurs se positionnent soit très en amont, dès l'extraction du minerai, en investissant directement dans les mines, soit tout au long de la chaîne aval. Comme nous l'avons précisé *supra*, la majeure partie des approvisionnements étant étrangers, la sécurisation en amont de la chaîne de

(22) <https://www.gtk.fi/en/services/mineral-economics/mining-maps/>

(23) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_6705

RAW MATERIALS: AGREEMENTS

MULTIPLICATION OF CONTRACTS MAINLY ON LI (LONG TERM NEED, "EASY"), WITH SOME OEM INVOLVED

Legend: OEM Implication acteur européen

LITHIUM	COBALT / NICKEL	Other
<ul style="list-style-type: none"> Posco invested 62M\$ in Pilbara, securing 5% of the company, and plans to invest in a JV in South Korea for a LiOH plant Posco concluded a deal to acquire lithium mining rights in Argentina from Australia's Galaxy Resources, for 280 M\$ CATL invested 47M\$ in North American Lithium (>90% shares of the company) Northvolt secured an offtake agreement with Nemaska Johnson Matthey signed long-term supply agreement with Nemaska for 60 ktons LiOH LG Chem concluded a 5-year agreement to buy 7 ktons/year LiOH from Nemaska LG Chem concluded offtake agreements with Ganfeng Lithium to the end of 2025 for a total of 90 ktons LCE and/or LiOH VW has signed a letter of intent with Ganfeng for 10 years supply of Li for battery cells Toyota (through Toyota Tsusho) took a 15% stake in Orocobre for 224M\$ Tesla signed a 3-year lithium supply deal with Australian miner Kidman Resources Tesla signed a deal with Pure Energy Minerals for the supply of LiOH Tesla signed an offtake deal with Ganfeng for about 20% of its LiOH production BMW signed a 5-year supply agreement with Ganfeng to get as much LiOH as it needs, at market prices Great Wall Motor secured lithium supply with Pilbara deal Tianqi Lithium bought a 24% stake in SQM for 4,1 Bn\$ Ganfeng bought SQM's 50% stake in the Cauchari-Olaroz project Ganfeng signed a long-term agreement with Pilbara Minerals SoftBank Group acquired a stake of up to 9.9% in Nemaska for 78 M\$ Hanwa signed off-take deals with Bacanora Minerals 	<ul style="list-style-type: none"> Posco set up 2 JVs to produce lithium-ion battery materials with Huayou Cobalt, one of China's top cobalt producers LG Chem agreed to build 2 precursor and cathode JVs with Huayou Cobalt to lock in supplies of cobalt for its batteries Glencore agreed to sell about 1/3 of its global cobalt production to GEM from 2018 to 2020. (GEM is a major supplier to CATL) LG Chem decided to provide capital and technical assistance for Cobalt Blue's cobalt project in Australia SK Innovation signed off-take contract for cobalt and nickel sulphates with Australian Mines BASF and Nor Nickel have signed a long-term, market-based supply agreement for nickel and cobalt feedstocks GEM, CATL (through its recycling arm Brump) invest 700 M\$ in a JV with Tsingshan to produce nickel chemicals Tsingshan teamed up with Huayou to build a nickel plant that could convert ore to matte, afterwards to sulphate Trafigura signed an offtake agreement for cobalt hydroxide running to end 2020 with Shalina Resources/Chemaf Trafigura has bought a 15% stake in nickel miner Terrafame Cobalt 27 agreed to buy the equivalent of 33% of the cobalt production from a unit of Vale (the world's first pure cobalt stream) 	<ul style="list-style-type: none"> BMW gained the right to take an equity stake in CATL, after BMW announced it would purchase 4.7Bn\$ worth of battery cells

Tableau 2 : Panorama global des partenariats conclus dans le domaine des matières stratégiques associées aux batteries.

valeur peut se concrétiser soit par des participations aux démarches initiées à l'échelon de la diplomatie internationale, telles que présentées précédemment, soit par des accords entre industriels, le plus souvent entre des acteurs internationaux issus de grandes capitalisations.

Rares sont les constructeurs automobiles qui agissent en tant qu'acteurs intervenant directement sur les matières stratégiques ; le plus souvent, ils s'associent à des acteurs majeurs qui apportent la garantie attendue sur les approvisionnements, d'où l'importance d'avoir une bonne connaissance de cette chaîne d'approvisionnement.

Le Tableau 2 ci-dessus dresse un panorama global des partenariats conclus dans le domaine des matières stratégiques associées aux batteries des véhicules électrifiés, lequel montre la diversité des parties prenantes et des stratégies possibles⁽²⁴⁾.

Une autre voie de sécurisation est la mise en place de sources alternatives d'approvisionnement, même si elles sont de faible capacité. Cela permet en effet de disposer d'une source sûre, validée et disponible, nécessitant néanmoins d'alimenter son approvisionnement à un niveau permettant de garantir un minimum d'activité sur les composants stratégiques. Cette stratégie est notamment utilisée pour les approvisionnements en matériaux non métalliques, où certains acteurs sont totalement intégrés dans la production de monomères ou de matières premières naturelles.

Dans ce cas, il s'agit de la volonté propre de chaque entreprise de définir le rapport gain/bénéfice qu'elle souhaite pour son activité, dans une approche probabiliste des tensions/ruptures du matériau stratégique considéré. Pour

cela, le levier de l'intelligence économique permettra de renforcer les scénarii.

Enfin, une autre possibilité est de réserver auprès du fournisseur un certain volume de production, sécurisant ainsi l'approvisionnement, surtout si celui-ci est externe. Cela passe par la conclusion de contrats, d'accords d'achat... Ce levier est le plus complexe à actionner, car il est dépendant du nombre des acteurs présents sur le marché, de la volatilité ou non, de la période couverte, de l'existence d'accords réciproques entre les acheteurs et le vendeur sur un marché qui, par définition, est tendu. De plus, en cas d'accord financier, la question de l'indice de référence, de la variation des prix et des limites et de la période de renégociation des accords est clé.

Le dernier levier, lié aux stocks de sécurité, est de plus en plus abandonné dans l'industrie automobile. Face aux stratégies agressives développées par certains acteurs dominants pour soutenir des prix permettant de limiter l'entrée de nouveaux acteurs ou, au contraire, susciter de fortes baisses des prix faisant ainsi le marché, les prix fluctuants de certaines matières premières (comme les terres rares) ont montré majoritairement l'inefficacité de ces stocks. Des stocks qui mobilisent et immobilisent des capitaux importants et qui ne préservent que peu efficacement contre les retournements de tendance ou des effondrements volontaires des cours.

La sécurisation des approvisionnements passe également par une meilleure connaissance de la chaîne d'approvisionnement et une bonne répartition des responsabilités tout au long de cette chaîne, avec l'implication de chacun des acteurs de celle-ci afin de sécuriser outre les approvisionnements, la provenance de ceux-ci. Dans le cas des minerais, notamment de conflit⁽²⁵⁾, la traçabilité des impor-

(24) Source : Renault, sur la base de rapports d'études communiqués à la presse, à la mi-2019.

(25) Règlement 2017/821 du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2017.

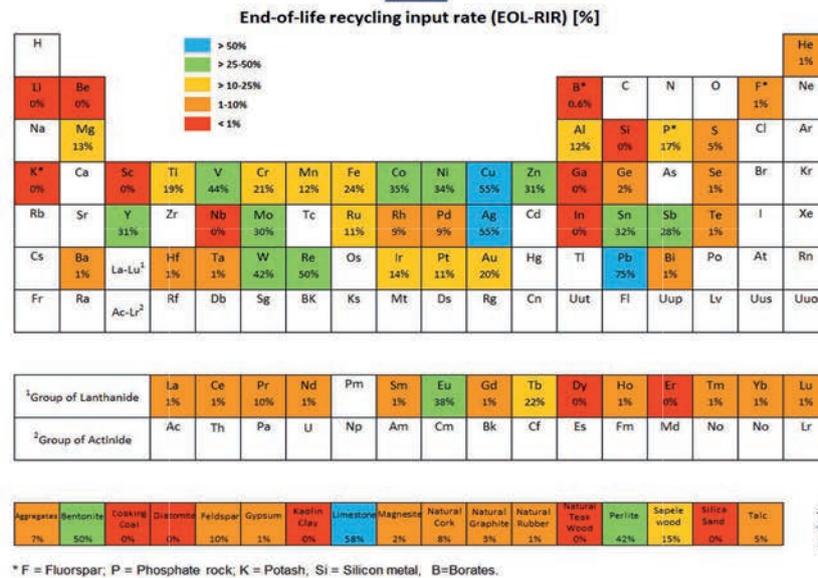


Tableau 3 : Taux de recyclage des éléments présents dans les équipements en fin de vie, au sein de l'UE.

tations est essentielle : elle doit être garantie aux utilisateurs aval de la filière, pour leur permettre de se conformer aux procédures liées au devoir de diligence. Pour cela, certains groupes de travail de la PFA ont été mis en place pour évaluer les différents moyens disponibles : vérification des informations par une tierce partie indépendante, audits des approvisionnements réalisés par une tierce partie, cryptage et traçabilité des données par le biais de la *blockchain*...

L'économie circulaire

Avec un *business* estimé au niveau européen à plus de 600 Mds d'euros, tous les leviers de l'économie circulaire doivent être actionnés pour apporter un complément de réponse aux enjeux liés aux matières stratégiques au travers de leur identification, leur réutilisation et leur recyclage. En effet, l'économie circulaire permet de réduire la consommation de matières primaires, de contribuer partiellement à la sécurité de l'approvisionnement, de diminuer les quantités de déchets automobile mis en décharge et de diminuer la consommation d'énergie : gain estimé à 2-3 % en termes de réduction des émissions de CO₂ au niveau européen⁽²⁶⁾.

Le positionnement central de l'économie circulaire, en général, et du recyclage, en particulier, a été réaffirmé ces derniers mois au travers des engagements européens et français (package Économie circulaire de la CE et feuille de route Économie circulaire de la France).

En complément de l'article de Jean-François Labbé publié dans le présent numéro des *Annales des Mines*, dans

lequel il précise que le « recyclage ne suffira pas », cette stratégie de recyclage doit être complémentaire d'autres axes d'approvisionnement, car, à lui seul, le recyclage ne pourra se substituer à aucune des filières d'approvisionnement en matériaux critiques. Nous devons en effet partir du constat que les matériaux critiques sont peu recyclés, et ce aussi bien en France (bien que les compétences et certaines filières existent), qu'au niveau européen, comme le souligne le tableau ci-dessus⁽²⁷⁾.

Dans l'industrie automobile, la directive de 2000 sur les véhicules hors d'usage (VHU) permet d'organiser un flux majeur des VHU vers des centres homologués, en réduisant les mises en décharge et en identifiant les composants dangereux pour l'environnement (comme ceux contenant du plomb). Elle permet également d'augmenter l'accès à certains composants stratégiques, comme les platinoïdes présents dans les lignes d'échappement, les composants électriques/électroniques et, bien sûr, l'aluminium, l'acier et les composants non métalliques.

De plus, le suivi des composants automobiles (par exemple, composition chimique, origine, étiquetage de composants contenant du plomb) améliore le tri et l'alimentation des filières aval existantes. Ainsi, la filière de recyclage des catalyseurs automobiles est particulièrement mature en Europe avec un taux de recyclage supérieur à 80 %. Selon Johnson Matthey⁽²⁸⁾, le marché des PGM est alimenté à hauteur de 25 % par du platine et du palladium secondaires.

(27) Source : JRC.

(28) <https://matthey.com/en/news/2020/pgm-market-report-february-2020>

(26) Source : Era-mines.

Source Comp.	Key CRM Equipment	Waste Type	CRMs	Required/Viable Input for End-processing	Current Economic Feasibility	
Fluorescent powders	Fluorescent lamps	WEEE	Eu, Tb, Y, Ce, La	Fluorescent powder	No*	
	CRT monitors and TVs		Y, Tb, Eu, Gd, La, Ce	Fluorescent powder		
Nd-magnets	Temperature exchange equipment (engine, compressor)	WEEE	Nd (+ Dy, Gd, Pr, Tb)	Magnets	No	
	Household appliances other than temperature exchange equipment (motors/drives)					
	Laptops (HDD)					
	Desktop Computers, prof. IT (HDD)					
	BEV, (P)HEV (electro engine)					
Printed Circuit Board	Desktop computers, prof. IT	WEEE	Au, Ag, Bi, Pd, Sb	Entire devices w/o battery (mobile phones), PCBs (shredded, unshredded), CuPM granulate	Yes	
	Laptops					
	Mobile phones					
	Tablets					
	External CDDs, ODDs, devices with internal CDDs/ODDs					
Li-ion batteries	Laptops	WEEE	Co	Batteries	Yes	
	Mobile phones					
	Tablets					
	Li-ion batteries in other WEEE					
	BEV, (P)HEV					
NIMH battery	NIMH batteries in WEEE	WEEE	Co, Ce, La, Nd, Pr	Batteries	Yes (Co)	No (REEs)
	HEV	ELV				
Lead acid batteries	Lead-acid batteries	WEEE	Sb	Batteries	Yes	
		ELV				

*Recent developments in countries outside the EU have been reported but detailed information about the economic feasibility is not yet available.

Tableau 4 : Exemple de matériaux stratégiques exploitables dans les véhicules hors d'usage (ELV, en anglais) ⁽²⁹⁾.

Dans un marché en forte croissance comme celui de l'électrification, et compte tenu des transitions technologiques observées dans les chimies des cathodes (moins riches en cobalt) et de la disponibilité sur un temps long des déchets (batterie, machines électriques...), certaines filières de métaux critiques seront essentielles, même si :

- selon une étude du cabinet Circularenergystorage ⁽³⁰⁾, le lithium recyclé ne pourra couvrir que 9 % des besoins en 2025 et le cobalt recyclé couvrira 20 % de la demande.
- l'ADEME ⁽³¹⁾ observe « qu'en raison de l'importance des tonnages de cuivre nécessaires à la transition énergétique, le cuivre recyclé en fin de vie ne représentera qu'un pourcentage très faible du cuivre produit »,
- selon les projections du projet SCRREEN ⁽³²⁾, le néodyme recyclé ne représentera que 6-8 % des besoins en 2030 et seulement 2-4 % pour le dysprosium, et ce même en maintenant les efforts de R&D au-delà de 2025.

(29) <https://cewaste.eu>

(30) <https://circularenergystorage.com/news/2017/11/30/press-release-recycled-lithium-to-reach-9-percent-of-total-lithium-battery-supply-in-2025>

(31) ADEME, fiche technique de juin 2017, Alain Geldron.

(32) <http://screen.eu/results/>

Ainsi, l'approvisionnement en matières premières secondaires doit prendre en compte les considérations fondamentales suivantes :

- L'accès aux gisements et les flux de déchets contenant des matières stratégiques. Malheureusement, une bonne partie des déchets à valeur économique positive quitte le marché communautaire (~50 % des VHU) ; ce flux de déchets n'est donc plus exploitable pour la filière européenne. Ce taux de fuite est estimé à 25 % pour les véhicules PHEV ⁽³³⁾.
- La capacité technologique pour extraire et purifier la matière présente dans des assemblages à la complexité croissante, avec des teneurs en matières critiques de plus en plus faibles, ces dernières, en définitive, pouvant se trouver mélangées à de nombreuses impuretés.
- Des déchets automobiles riches ou, au contraire, dispersés. Un exemple de matériaux dispersés est celui des terres rares légères, présentes en quelques milligrammes dans de nombreux composants électriques ou électroniques : diodes, capteurs, écrans, cartes électroniques...

(33) <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2019/06/PTF-Recyclage-batterie-lithium.pdf>

- Le temps d'immobilisation du matériau. Dans le cas de l'automobile, la majeure partie des composants de première monte, à forte valeur ajoutée, sont réutilisés (rechange, réparation, seconde vie...). Puis, dans certains cas, un troisième marché peut exister hors du domaine automobile (par exemple, des batteries de traction converties en stockage stationnaire). Considérant que l'âge moyen des véhicules en Europe est de 12 ans, mais que l'âge des véhicules en fin de vie est de plus de 15 ans, de nombreux déchets automobiles ne seront donc pas disponibles avant un délai de plus de 15 ans.
- Mais le principal frein au recyclage est bien le bilan technico-économique sur le long terme. Pour répondre à l'objectif d'optimisation des usages, il faut traiter des concentrations souvent faibles qui nécessitent des installations et procédés pour réaliser des opérations de tri souvent complexes, dans le respect des meilleures pratiques. Comme nous l'avons vu, les temps d'immobilisation peuvent être longs, et certaines ruptures technologiques peuvent rendre inexploitable certaines ressources sur le long terme (batteries NiMeH remplacées par des batteries lithium-ion, substitution progressive des terres rares lourdes dans les aimants permanents...).

Afin de disposer d'un écosystème couvrant le démontage, les technologies de recyclage et les débouchés des produits, la filière automobile, en partenariat avec les pouvoirs publics et différentes autres filières industrielles, s'est engagée dans un travail de réflexion concrétisé au travers :

- des recommandations du COMES préconisant le développement de compétences industrielles françaises dans le recyclage des métaux critiques⁽³⁴⁾,
- du groupe de travail sur l'économie circulaire réfléchissant au développement d'une filière intégrée de recyclage des batteries lithium – que concrétise le projet structurant développé par la Plateforme Automobile⁽³⁵⁾ – et le recyclage des véhicules hors d'usage de demain, correspondant respectivement aux actions 5 et 6 issues du contrat de filière du CSF Mines et métallurgie de 2019⁽³⁶⁾,
- d'études sur la création d'une filière de recyclage des aimants dans les secteurs clés des transports, de l'énergie, de l'électronique, des biens de consommation... Ainsi, plusieurs scénarii sont à l'étude pour permettre l'extraction de certains métaux stratégiques, comme le nickel ou le cobalt, ou proposer des poudres de terres rares pour l'industrie des matériaux magnétiques.

La R&D

Cette stratégie sur le moyen-long terme pourra mener à la substitution ou à la rupture technologique permettant de diminuer ou annuler une dépendance. Elle sera donc un axe fort d'agilité, dès lors qu'elle sera associée à une politique de long terme (politique d'innovation). Ce soutien

à la R&D est largement acquis dans l'industrie automobile à travers tout son écosystème :

- Au niveau international, au travers du projet ERAMIN2⁽³⁷⁾.
- À l'échelle européenne, grâce au Projet Important d'Intérêt Européen Commun visant à soutenir la recherche et l'innovation dans le secteur prioritaire des batteries⁽³⁸⁾.
- Au plan national, au travers des différents soutiens à la recherche et à l'innovation industrielle, de la politique des pôles de compétitivité ou du programme Investissements d'avenir (PIA).
- Au niveau régional, grâce notamment aux pôles de compétitivité ayant pour mission d'accompagner les projets de R&D, notamment ceux des PME, ou aux plateformes de transferts de technologie des Instituts de recherche technologique (IRT) ou des Instituts pour la transition énergétique (ITE). Ainsi, pour l'expression des besoins stratégiques de la filière Automobile et mobilité, la PFA dispose d'une plateforme d'*open Innovation*⁽³⁹⁾.

Cette dynamique forte de R&D s'est traduite en ce qui concerne le recyclage des matériaux critiques par le lancement de plus de 180 projets en France ces dix dernières années⁽⁴⁰⁾.

Project	Full name	Links	CRM relevance
MICA	Mineral Intelligence Capacity Analysis	http://www.micaproject.eu	Mica
METGrow+	Metal Recovery from Low Grade Ores and wastes	http://metgrowplus.eu	Ni, Cu, Zn, Co, In, Ga, Ge
ADIR	Next generation urban mining - Automated disassembly, separation and recovery of valuable materials from electronic equipment	http://www.adir.eu/	REEs, Ta, Ge, Co, Pd, Ga, W
AVAR	Added Value Alumina Refining	https://eitrawmaterials.eu/project	Gallium, Vanadium
CloseWEEE	Integrated solutions for pre-processing electronic equipment, closing the loop of post-consumer high-grade plastics, and advanced recovery of critical raw materials antimony and graphite	http://closeweee.eu/	Critical Minerals and Metals
CYCLED	Cycling resources embedded in systems containing Light Emitting Diodes	http://www.cyc-led.eu/	Ga, In, REEs, Au, Ag, Sn
PLATIRUS	PLATInum group metals Recovery Using Secondary raw materials	http://www.platirus.eu/	PGMs
PARTIAL-PGMs	Development of novel, high-performance hybrid TWV/GPF automotive after-treatment systems by rational design: substitution of PGMs and Rare Earth materials	https://www.partial-pgms.eu/	PGMs, REEs
REE4EU	Integrated high temperature electrolysis (HTE) and Ion Liquid Extraction (ILE) for a strong and independent European	http://www.ree4eu.eu/	REEs

Tableau 5 : Exemples de projets relatifs à l'approvisionnement ou au recyclage des matériaux critiques⁽⁴¹⁾.

Dans le tableau ci-dessus, sont mentionnés les projets suscitant les plus fortes attentes sur les platinoïdes, les terres rares et certains composants critiques pour le véhicule électrique et connecté.

Les filières industrielles cherchant toutes à faire un usage efficace des matériaux stratégiques, seule la R&D est à même de couvrir l'ensemble des besoins de-

(34) <http://www.mineralinfo.fr/actualites/recommandations-comite-metiaux-strategiques-comes-developpement-competences-industrielles>

(35) <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2019/06/PTF-Recyclage-batterie-lithium.pdf>

(36) https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/conseil-national-industrie/Contrats_de_filiere/dossier-presse-CSF-mines-et-metallurgie-18012019.pdf

(37) <https://www.era-min.eu/>

(38) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_6705

(39) <http://www.inovev.com/index.php/fr/pfa-auto>

(40) <https://www.industrie-techno.com/article/metaux-rares-a-consommer-avec-moderation.52708>

(41) Sources : CORDIS, H2020, JRC, ERA-NET, EIT Raw Materials websites and databases.



Figure 13 : Écosystème de la PFA mobilisé pour assurer une veille en matière d'intelligence économique.

puis les briques scientifiques et technologiques, jusqu'à la conception et l'économie circulaire. Les publications associées à ces activités de R&D sont également des leviers d'attractivité forts.

L'intelligence économique (IE)

Ce levier, selon les enjeux, peut se construire au niveau des sociétés, des groupes ou des filières. Il ne sera pas fait référence ici aux possibilités existant au niveau des entreprises, chacun des acteurs de la filière restant maître de sa stratégie. La priorité est bien de disposer d'outils afin de proposer les meilleures orientations et briques de décision afin de consolider les stratégies de sécurisation, et ainsi mieux anticiper les évolutions majeures. Cette intelligence économique est indispensable pour consolider les hypothèses des outils de prospective relatives aux évolutions pouvant impacter la chaîne de valeur, depuis l'extraction minière jusqu'aux technologies de commercialisation.

L'IE va s'appuyer sur différents réseaux présents dans l'écosystème automobile et connexe. Dans le cadre de la PFA, un exemple d'écosystème activé pour assurer une veille mobilisant l'IE est celui restitué dans la Figure 13 ci-dessus.

Conclusion

Comme nous l'avons vu, une grande partie des éléments de la classification périodique des éléments sont utilisés dans l'industrie automobile, laquelle se caractérise par une chaîne logistique parfois complexe et une chaîne de valeur très spécifique. Certaines matières premières sont stratégiques et indispensables à l'activité de la filière et

de son écosystème. L'approvisionnement en ces matières est critique au regard des nombreux enjeux économiques (importance financière, concentration des acteurs), financiers (montant des investissements et retour sur investissement, stratégie de long terme...), géopolitiques (gestion des ressources, politique de gouvernance, d'exportation...), technologiques (difficulté de la substitution, défis de l'extraction, défis des filières de recyclage..) ou encore géologiques, environnementaux et sociétaux.

Face à ces nombreux enjeux et à leur importance dans l'industrie automobile, il est essentiel pour les industriels de diminuer leur vulnérabilité en accroissant leur indépendance vis-à-vis des différentes matières critiques. Pour cela différentes stratégies peuvent être mises en œuvre en prenant en compte l'importance du coût de ces matières par rapport aux revenus de l'entreprise, en acquérant une meilleure connaissance de la boucle d'approvisionnement, en développant la capacité à piloter un plan de substitution et d'innovation de long terme, en facilitant l'intégration de l'économie circulaire (en amont et en aval), et ce tout en anticipant les futures contraintes réglementaires environnementales et sociétales, sans oublier les concurrences éventuelles entre les différentes filières industrielles.

Ainsi, la mobilisation de ces différents leviers stratégiques permettra de mieux accompagner une transition énergétique plus responsable et respectueuse de l'environnement, avec pour objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050, tel que préconisé dans le Pacte vert européen, lequel prône une utilisation efficace des ressources, et donc des matériaux critiques, notamment grâce à l'essor de l'économie circulaire.

La guerre des métaux rares ou la face cachée de la transition énergétique et numérique

Interview de Guillaume PITRON

Journaliste et réalisateur

Comment vous est venue l'idée de rédiger un livre sur « La guerre des métaux rares (la face cachée de la transition énergétique et numérique) » ?

Tout est parti de la lecture, fin 2009, d'un article publié dans une revue scientifique grand public. Il y était question, déjà, de métaux stratégiques, aux propriétés chimiques exceptionnelles, mais compliqués à extraire et à raffiner. Les noms imprononçables qui se succédaient dans l'article – indium, gallium, samarium... – faisaient rêver. Rétrospectivement, j'ai conscience que c'est l'une des lectures les plus fécondes qu'il m'ait été donné de réaliser... J'ai très rapidement proposé le sujet sous forme documentaire à la télévision française. « Par chance », si je puis dire, l'embargo chinois de septembre 2010 sur les terres rares est intervenu quelques semaines plus tard, ce qui a accéléré une décision favorable de France 5. J'ai passé les 18 mois qui ont suivi à sillonner le globe à la recherche de morceaux de terres rares. Je n'ai jamais abandonné la thématique par la suite, tant elle me semblait majeure dans le monde post-pétrole en voie d'éclosion.

C'est quoi les métaux rares ? À quoi servent-ils et pourquoi sont-ils si importants pour l'économie des pays développés ?

Un métal rare est un métal plus rare qu'un métal abondant. On peut certes en trouver au fin fond des abysses du Pacifique et jusque dans certains astéroïdes, mais leur concentration dans l'écorce terrestre est si infime par rapport à des métaux de base tels que le fer, le cuivre ou le zinc, qu'ils sont qualifiés de rares. Leurs propriétés chimiques et physiques sont telles que les industriels des technologies vertes ou du numérique (pour ne citer qu'eux) ne peuvent s'en passer. Ils sont même qualifiés de « stratégiques » en France, car ils sont indispensables pour des secteurs clés comme l'automobile, l'aérospatiale, la Défense ou la médecine. C'est la raison pour laquelle nous avons, en France, installé un Comité des métaux stratégiques chargé, sous l'égide de Bercy, de lister ces métaux et de formuler des recommandations de politique industrielle.

Quelle a été l'évolution de la politique chinoise des métaux rares sur les dernières décennies ?

Les Chinois ont poursuivi une stratégie duale : la première, du début des années 1980 au début des années 2000,

a consisté à inonder le reste du monde de terres rares et autres métaux rares à bas prix. Cette politique commerciale a tué la concurrence (notamment australienne et américaine), incapable de faire face au double-dumping social et environnemental chinois. Pékin s'est alors érigé en producteur incontournable, voire monopolistique, de métaux tels que les terres rares, le gallium, l'indium, l'antimoine...

La seconde stratégie, développée depuis les années 2000, est l'exact inverse : elle consiste, pour Pékin, à freiner les exportations de ces matières premières. Pékin ne veut pas nous vendre une ressource à vil prix, extraite et raffinée au prix de prodigieux désordres environnementaux et sociaux, mais plutôt un produit fini tel qu'un panneau solaire, une éolienne ou, bien sûr, une voiture électrique avec le métal à l'intérieur. Cela dit nous, les Français, faisons de même, ainsi nous ne vendons pas du raisin, mais du vin...

Comment la Chine organise-t-elle sa domination sur le marché des métaux rares ?

En tuant la concurrence grâce à une politique tarifaire agressive, les Chinois s'offrent le luxe de ne pas gagner, voire de perdre de l'argent durant les phases d'exploitation et de raffinage. Notre logique occidentale, purement capitaliste, ne peut rivaliser face à un concurrent qui vend en-dessous des prix de revient, et c'est ainsi que la Chine maintient sa domination sur les marchés mondiaux. Peut-être nous, les Occidentaux, admettrons-nous un jour que les profits perdus en amont du processus industriel pourraient représenter pour nos propres économies une valeur ajoutée en aval du processus. Mais pour cela, il faut penser le long terme.

Force est de constater que l'Union européenne agit peu pour lutter contre cette domination. Quels sont donc les pays à avoir développé les stratégies les plus efficaces pour la contrer : le Japon, les États-Unis, ou un autre pays ?

J'ai suffisamment côtoyé l'Unité en charge des matières premières critiques, au sein de la Commission européenne, pour savoir que leur connaissance du sujet est remarquablement précise et vaste. On ne compte plus les rapports, les listes de métaux critiques et autres recommandations de politique industrielle publiés par cette

Unité dépendant de la DG Growth, l'équivalent de notre ministère de l'Économie. Le problème vient du politique, qui n'a pas souhaité se pencher sur la question de la transformation de cette connaissance en actions.

L'un des rares pays à avoir conservé un embryon de stratégie industrielle en la matière est le Japon. Ainsi, Tokyo soutient financièrement, *via* le Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEG), l'exploitation par Lynas de la mine de terres rares de Mount Weld, en Australie. Les Japonais ont parfaitement conscience du fait que ce partenariat leur coûte cher financièrement, car il est difficile de réaliser des profits sur l'amont minier. Mais ils ont également intégré cette conviction que leur indépendance minérale, elle, n'a pas de prix.

Les Américains se réveillent depuis environ deux ans. Donald Trump ne souhaite pas rester dépendant de Pékin pour la fourniture de terres rares stratégiques pour certaines catégories d'armements américains. Cela me coûte de le dire, mais, en la matière, Trump prend d'excellentes initiatives.

Quel peut être le rôle de la France dans ce contexte mondialisé ? Quelles mesures préconisez-vous aux pouvoirs publics français d'adopter ?

La France a, un temps, tenté de développer un embryon de diplomatie minérale, en direction de l'Australie et du Kazakhstan notamment. Mais ces initiatives n'ont pas vraiment, à ma connaissance, été suivies d'effets. À l'heure où nous découvrons notre dépendance aux molécules et aux masques chinois, il nous faudrait également reconstituer une filière d'approvisionnement souveraine de métaux rares afin de ne pas dépendre de Pékin pour produire nos batteries. Une politique volontariste consisterait, en particulier, à conclure des partenariats commerciaux avec des pays dont le sous-sol est riche en ces métaux, notamment en Amérique latine. Mais il faudra des années avant

que ces efforts ne soient couronnés de succès. Et puis, il faut savoir que les Boliviens, riches de leur lithium, ont appris la leçon chinoise et ont bien l'intention, à leur tour, de remonter la chaîne de valeur ! La tâche est si énorme que je ne pense pas que la France puisse agir indépendamment du cadre européen. En ce sens, s'unir aux 26 autres pays de l'Union en utilisant les ressources du COMES et de l'Unité Matières premières de la DG Growth me paraît indispensable.

Quelles sont les perspectives d'évolution du marché des métaux rares ?

En ces temps de coronavirus, tout exercice prospectif devient carrément un art divinatoire... Il est probable que les marchés des métaux rares continueront de connaître une forte hausse, de 5 à 25 % par an selon les métaux. Cette hausse de la consommation ne signifiera pas nécessairement que les prix progresseront pour autant : ils pourraient demeurer bas, non seulement parce que la Chine, très probablement, les manipule, mais aussi parce que Pékin pousse à la mise en exploitation, au Groenland, en Amérique latine, en Asie et en Afrique, de nouvelles mines permettant de satisfaire la demande. On essaiera bien, tant bien que faire se peut, de mieux recycler ces métaux, mais je doute que nous fassions des progrès notables au cours des prochaines années tant le modèle économique manque. Une chose est certaine : ces métaux sont et seront, à l'avenir, toujours plus stratégiques et convoités.

Avez-vous envie de nous dire autre chose ?

Oui. J'ai régulièrement pu, ces dernières années, compter sur l'aide et les ressources du COMES pour conduire mes recherches. François Bersani, son premier Secrétaire général, puis Alain Liger et Isabelle Wallard ont su me recevoir et me nourrir de leurs réflexions, bien avant que le sujet des métaux rares ne se retrouve propulsé dans les médias. En ce sens, je leur dois beaucoup.

La stratégie fédérale mise en place par les États-Unis pour sécuriser l'approvisionnement en minerais critiques de leurs industries ⁽¹⁾

Par Alexis SAHAGUIAN

Direction générale du Trésor

Matthieu FERNANDEZ

et David KREMBEL

Ambassade de France aux États-Unis – Service économique régional

L'enjeu des matières premières critiques aux États-Unis se structure autour d'un schéma nettement transversal, à la fois géopolitique (rivalité vis-à-vis de la Chine), industriel (rapatrier la production de biens relevant de secteurs stratégiques, sécuriser l'approvisionnement des chaînes logistiques), et idéologique (autonomie des États-Unis au regard d'autres nations, en vertu de la sécurité nationale). La stratégie fédérale se construit néanmoins méthodiquement, de façon pyramidale, chaque ministère apportant sa contribution et moyens d'action sur le fondement du décret présidentiel de décembre 2017, laissant cependant de côté nombre d'enjeux locaux environnementaux et commerciaux multilatéraux, sommés de s'effacer face aux objectifs de l'État fédéral.

L'enjeu des matières premières critiques aux États-Unis, notamment celui des métaux rares, se situe à la croisée de thématiques géopolitiques et industrielles^(2,3) d'une actualité brûlante, révélatrice de deux tendances de fond aux États-Unis : le discours de l'administration Trump sur la dépendance vis-à-vis de la Chine et le besoin de diversifier les sources d'approvisionnement, voire de rapatrier la production de biens relevant de secteurs stratégiques.

En ce sens, la stratégie d'approvisionnement en minerais critiques des États-Unis est un exemple du basculement géopolitique à l'œuvre sous l'administration Trump (la Chine comme « rival stratégique ») et de l'importance plus globale pour les États-Unis de sécuriser l'accès national à des ressources rares, allant jusqu'aux médicaments, masques et respirateurs, dont la crise du Covid-19 a souligné avec acuité la dimension stratégique. Mike Pompeo, le Secrétaire d'État, a établi pour sa part un lien direct⁽⁴⁾ : le

coronavirus révèle pourquoi les États-Unis doivent cesser de compter sur la Chine et les nations étrangères pour répondre à leurs besoins en minerais critiques, des terres rares jusqu'à l'uranium.

Un contexte de rivalité avec la Chine

L'orientation générale de la politique des États-Unis vis-à-vis de la Chine est clairement définie dans les documents stratégiques américains. La stratégie de sécurité nationale (*National Security Strategy*) de 2017 s'articule autour de la notion de « compétition stratégique » avec la Chine. Ce point de vue est largement partagé au Congrès et dans l'administration, chez les démocrates comme chez les républicains.

Cette nouvelle orientation entraîne une revue de fond en comble de la politique américaine, étrangère comme intérieure, dans tous les secteurs (économie, énergie, éducation, Défense). La compétition avec la Chine fait bouger les lignes au sein des camps démocrates et républicains, brise des tabous dans les doctrines des deux partis et transforme le débat public américain. Le législateur et l'exécutif ont amendé lois et règlements pour permettre aux États-Unis de rivaliser avec la Chine. Les moyens de l'administration ont été renforcés à cette fin et ses

(1) Cet article ne constitue pas une position officielle engageant la responsabilité de la direction générale du Trésor.

(2) <https://www.bloomberg.com/press-releases/2019-07-10/is-tesla-warning-of-a-battery-minerals-shortage-nearing-valid-or-not>

(3) <https://www.latimes.com/environment/story/2020-03-16/lithium-startup-lillac-solutions-bill-gates-salton-sea>

(4) E&E News, 26 mars 2020.

agences ont lancé des programmes censés assurer la prospérité économique et la sécurité nationale des États-Unis, toutes deux menacées, du point de vue américain, par la montée en puissance de la Chine.

En particulier, les États-Unis se concentrent sur des secteurs jugés stratégiques, dans lesquels ils cherchent à assurer leur souveraineté et leur indépendance vis-à-vis de la Chine. Cette stratégie, qualifiée de découplage, passe par la rupture de certaines chaînes de valeur jusqu'alors intimement imbriquées dans les économies américaine et chinoise. Les minerais critiques font partie des secteurs identifiés par l'administration américaine comme ceux dans lesquels les États-Unis devraient réduire leur dépendance vis-à-vis de la Chine, qui a fourni environ 80 % des terres rares importées par les États-Unis de 2014 à 2017 et détient 85 % de la capacité mondiale de transformation des minerais de terres rares. L'administration américaine revoit ainsi sa stratégie sur les ressources naturelles afin de diversifier ses sources d'approvisionnement en minéraux critiques.

Après l'interdiction faite en mai 2019 par les États-Unis aux fournisseurs américains du recours à la société Huawei, les médias d'État chinois ont soutenu l'idée d'un arrêt des importations de terres rares, poussant nombre d'acteurs de la *tech* à envisager le scénario du pire, celui d'un embargo chinois. À ce stade, si la Chine a imposé des droits de douane de 25 % sur ses importations de terres rares dans la guerre commerciale qui l'oppose actuellement aux États-Unis, impactant au passage la seule mine américaine produisant des terres rares en Californie, la mine Mountain Pass, le gouvernement américain a, jusqu'à présent, décidé d'exempter de droits de douane additionnels les terres rares en provenance de Chine. L'administration américaine a indiqué en mai 2019 que les « *rare earth materials* » et « *critical minerals* » étaient exclus de la liste des biens chinois qui pourraient être visés par l'application de droits additionnels sur les importations non encore ciblées au titre de la section 301 du Trade Act de 1974.

Une stratégie graduelle de l'administration américaine visant à sécuriser l'approvisionnement des États-Unis en minerais critiques

Le décret présidentiel (Presidential Executive Order 13817) du 20 décembre 2017⁽⁵⁾ fixe le cadre de la stratégie fédérale. Il repose sur des constats (*findings*) : la dépendance économique et militaire des États-Unis à certains minerais critiques importés et à tout événement qui pourrait entraver leur chaîne d'approvisionnement, renvoyant à la notion de sécurité nationale et à la publication ultérieure d'une liste de minerais critiques et d'un rapport stratégique à l'attention du Président.

(5) <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/presidential-executive-order-federal-strategy-ensure-secure-reliable-supplies-critical-minerals/>

En mai 2018, le Département de l'Intérieur a publié cette liste de minerais critiques⁽⁶⁾ confirmant un premier projet identifiant, le 16 février, 35 minerais de base. Après une enquête sur deux éléments critiques de la liste américaine, l'uranium et le titane, réalisée au regard des dispositions de la section 232 du Trade Expansion Act de 1962 qui autorise la mise en place de restrictions au commerce au titre de la sécurité nationale, le Département du Commerce (DoC) a publié, en juin 2019, un rapport⁽⁷⁾, découlant du décret de 2017, qui souligne une dépendance totale vis-à-vis de l'importation de 14 minéraux critiques et identifie six lignes d'effort pour sécuriser l'approvisionnement américain, parmi lesquelles : la R&D (alternatives technologiques aux minerais critiques, amélioration du processus d'extraction, de séparation et de purification, du recyclage...), la sécurisation de la chaîne logistique, l'investissement et le renforcement de la coopération commerciale avec les alliés des États-Unis, des dispositions robustes dans les accords internationaux contre les distorsions de marché liées aux minerais critiques, le soutien à l'exploration minérale nationale et à l'emploi dans ce secteur. Si cette stratégie fédérale ne ferme pas la porte à une coopération avec les alliés, elle répond d'abord à un intérêt national, celui de restructurer les chaînes logistiques. Pour autant, le rapport du DoC ne remet pas en cause l'exclusion tarifaire décrétée au profit des terres rares et autres minéraux essentiels.

En juin 2019, le bureau des Ressources énergétiques (ENR) du Département d'État (DoS) a lancé une Energy Resource Governance Initiative⁽⁸⁾ visant à améliorer la gouvernance des projets miniers et à diversifier les sources d'approvisionnement, prenant en compte les besoins sans précédent du secteur des batteries, des véhicules électriques et des énergies renouvelables, besoins susceptibles d'accroître la demande en minerais critiques de « 1 000 % d'ici à 2050 ». Parmi ces propositions, on peut identifier l'ouverture et la transparence des marchés (la Chine est implicitement visée), mais aussi des pratiques minières responsables et durables (ce qui dénote avec certaines positions de l'administration Trump).

Le président Trump a par ailleurs invoqué en juillet 2019 le Defense Production Act pour autoriser le Département de la Défense à administrer la production et la distribution d'aimants samarium-cobalt⁽⁹⁾, ce qui confirme les liens étroits entre les notions de Défense nationale, de commerce et d'approvisionnement, auxquels se réfère

(6) <https://www.federalregister.gov/documents/2018/05/18/2018-10667/final-list-of-critical-minerals-2018> : aluminium (bauxite), antimony, arsenic, barite, beryllium, bismuth, cesium, chromium, cobalt, fluorspar, gallium, germanium, graphite (natural), hafnium, helium, indium, lithium, magnesium, manganese, niobium, platinum group metals, potash, the rare earth elements group, rhenium, rubidium, scandium, strontium, tantalum, tellurium, tin, titanium, tungsten, uranium, vanadium and zirconium.

(7) <https://www.commerce.gov/news/reports/2019/06/federal-strategy-ensure-secure-and-reliable-supplies-critical-minerals>

(8) <https://www.state.gov/energy-resource-governance-initiative/>

(9) <https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/text-letter-president-senate-committee-banking-housing-urban-affairs-house-committee-financial-services-11/>

l'administration américaine en matière de minerais critiques.

Les laboratoires du Département de l'Énergie travaillent déjà sur des technologies devant permettre d'extraire le lithium et les terres rares du charbon ou de ses cendres⁽¹⁰⁾, des saumures et de l'eau de mer ; à ce titre, l'exploitation des océans, y compris les eaux qui font partie de la zone économique exclusive (ZEE) des États-Unis, pourrait être une autre source d'approvisionnement en minerais critiques, comme l'illustre une directive présidentielle de novembre 2019⁽¹¹⁾ visant à accélérer l'exploration des océans.

Au Congrès, plusieurs propositions de loi ont par ailleurs été déposées, sans avoir pour autant été adoptées à ce stade : en mai 2019, des sénateurs républicains ont déposé un projet de loi visant à encourager le développement de l'offre intérieure en accélérant notamment la délivrance des autorisations d'exploitation minière. En juillet 2019, le sénateur Marco Rubio (Floride) a déposé une proposition pour créer une coopérative exemptée des règles sur la concurrence, ouverte aux investissements du Pentagone, des industriels de la Défense et des entreprises des nouvelles technologies, ainsi qu'à certains investisseurs étrangers, afin de concurrencer la Chine.

L'unité n'est certes pas totale autour de cette stratégie, qu'il s'agisse de démocrates soulignant que les réformes réglementaires sur les minerais critiques sont un prétexte pour ignorer la protection environnementale, ou de l'Heritage Foundation considérant la Chine comme un « tigre de papier » en matière de terres rares⁽¹²⁾ ou refusant, plus largement, une politique de quota de type « *Buy American* » dans l'uranium. Les enjeux environnementaux liés aux minerais critiques ou à la meilleure façon de défendre la libre concurrence (lutte contre les pratiques distorsives dans le commerce, promotion d'actions multilatérales *versus* opportunité des mesures unilatérales américaines) affluent également dans le débat américain et mondial.

Une stratégie avec des moyens d'action

Afin de mettre en œuvre la stratégie américaine vis-à-vis de la Chine, y compris son volet énergétique, l'État fédéral et ses agences ont été dotés de nouveaux moyens qui sont pleinement mobilisés pour assurer, sur le plan intérieur comme à l'étranger, l'approvisionnement en minerais rares des États-Unis.

(10) <https://netl.doe.gov/coal/rare-earth-elements>

(11) <https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/president-donald-j-trump-accelerating-ocean-exploration/>

(12) Certains analystes considèrent que le blocage par la Chine des expéditions de terres rares vers les États-Unis n'aurait qu'une incidence mesurée. "Why China's rare earths threat is no game changer in the trade war", CNBC, 3 juin 2019, <https://www.cnbc.com/2019/06/03/why-chinas-rare-earths-threat-is-no-game-changer-in-the-trade-war.html>. De plus, pour perturber les relations commerciales avec les États-Unis, la Chine devrait interdire l'exportation de nombreux produits manufacturés contenant des terres rares (pas uniquement des terres rares elles-mêmes) ; une telle interruption d'approvisionnement servirait le discours de l'administration Trump, celui d'une relocalisation de la production aux États-Unis ou chez ses alliés, ainsi que des innovations et du recyclage.

À l'automne 2018, le Congrès a largement adopté la création de la US Development Finance Corporation – DFC (Build Act). Cette agence de financement du développement est issue de la fusion entre l'ancienne agence américaine, Overseas Private Investment Corporation (OPIC), et certains services de l'agence américaine de développement, United States Agency for International Development (USAID). En créant la DFC, le législateur américain a notamment souhaité doter les États-Unis des moyens nécessaires pour contrer l'initiative chinoise des Nouvelles routes de la soie.

La DFC est pleinement opérationnelle depuis décembre 2019. Comme l'a indiqué son nouveau CEO, Adam Boehler, réputé proche du gendre du président, Jared Kushner, les objectifs de la DFC seront alignés sur ceux de la politique étrangère des États-Unis. La DFC a commencé à présenter quelques-unes de ses priorités sectorielles : énergie, santé, infrastructure et technologie. La DFC est dotée de moyens renforcés :

- Le plafond d'investissement de la DFC sera relevé jusqu'en 2026 à 60 Mds USD, contre 29 Mds USD pour l'OPIC.
- En matière d'investissement de capitaux propres, l'OPIC ne pouvait qu'apporter de la dette, alors que la DFC pourra aussi investir des capitaux propres dans les projets (investissement limité à 30 % par projet et représentant moins de 35 % de l'exposition totale de la DFC).
- En ce qui concerne le financement de projets étrangers, si, jusqu'à présent, l'OPIC était soumise à la règle de l'« American nexus » et ne pouvait financer que des projets à 25 % de financements américains, la DFC sera elle soumise au critère plus souple de l'« American preference », afin de faciliter ses investissements dans des projets étrangers. En plus d'encourager l'investissement privé, la DFC pourrait donc directement investir dans des projets miniers à l'étranger.

Le 12 mars 2020, le conseil d'administration de la DFC a approuvé les premiers projets⁽¹³⁾ à être financés, représentant dans leur ensemble un montant de 900 M USD : installation d'équipements de télécommunication en Asie, initiative mondiale d'accès à l'eau potable, activité de conservation marine en Afrique, projet énergétique au Mexique...

Si le recul manque encore pour apprécier l'orientation et l'impact des investissements réalisés par cette nouvelle structure⁽¹⁴⁾, on peut néanmoins observer que son action associe des moyens financiers conséquents à un soutien au développement de secteurs stratégiques alignés avec les objectifs de politique étrangère américaine.

Enfin, il n'est pas à exclure le fait que soit également associée à cette stratégie l'agence de crédit aux exportations américaines (Export-Import Bank of the United States (EXIM)). Son nouveau mandat adopté par le Congrès en décembre 2019 prévoit que l'EXIM devra consacrer au

(13) <https://www.dfc.gov/media/press-releases/dfc-approves-nearly-900-million-global-development-projects>

(14) <https://www.dfc.gov/who-we-are>

moins 20 % (soit 27 Mds USD) de sa capacité d'intervention à un programme répondant à la concurrence que représente la Chine et soutenant les exportations américaines dans des secteurs clés (Program on China and Transformational Exports). La législation ne fait pas directement référence aux terres rares : en effet, le texte

mentionne l'IA, les biotechnologies, la 5G, le calcul quantique, les énergies renouvelables et les batteries, les semi-conducteurs, la *fintech* et le traitement des eaux. Mais il est possible d'envisager que des ressources soient également consacrées au secteur minier.

La consommation durable des ressources naturelles : un enjeu planétaire

Par Doris NICKLAUS

Ingénieur en chef des ponts, des eaux et des forêts

et Dominique VIEL

Contrôleur général économique et financier honoraire

Dans un contexte de forte croissance de l'extraction mondiale des ressources matières, la soutenabilité de leur utilisation est devenu un objet à part entière des politiques publiques, au niveau mondial comme aux niveaux européen et national.

Un premier plan Ressources a vu le jour en France en juillet 2018. Un second plan focalisé sur les ressources minérales de la transition bas-carbone et accompagné d'une politique industrielle de recyclage ambitieuse est en cours d'élaboration dans le cadre de la feuille de route pour l'économie circulaire.

Ces travaux montrent que la France et l'Europe sont dépendants pour leurs approvisionnements en minerais et composants métalliques, dont la demande ne cesse de croître, y compris pour répondre aux besoins de la transition bas-carbone et du développement du numérique. La crise économique liée à la pandémie du coronavirus révèle cette fragilité et nous interroge sur les enjeux de relocalisation des activités industrielles, y compris minières et de première transformation.

Entre 1970 et 2017, l'extraction mondiale de ressources matières, toutes catégories confondues (minerais métalliques, minéraux de construction et industriels, biomasse et ressources énergétiques fossiles), est passée de 27 à 92 milliards de tonnes⁽¹⁾, soit une multiplication par plus de trois, tandis que la part des ressources non renouvelables dans le total des matières extraites est passée de 66 % à 74 %. Depuis le début des années 2000, ce constat est à l'origine d'initiatives et de politiques publiques diversifiées, mais convergentes.

L'ONU se dote d'objectifs et d'outils

En 2007, le programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) crée l'International Resource Panel (IRP)⁽²⁾, groupe d'experts scientifiques indépendant, pour aider les pays à utiliser leurs ressources de manière durable. Dans son rapport « Resource Efficiency: Potential and Economic Implications », l'IRP estime, s'appuyant sur un scénario « *business as usual* » (voir le Tableau ci-contre), que l'extraction mondiale annuelle pourrait plus que doubler à l'horizon 2050, en raison d'un contexte de forte croissance démographique, d'augmentation des

niveaux de vie et de diffusion des modes de production et de consommation occidentaux, lesquels sont fortement consommateurs de ressources. Les minéraux de construction sont, avec les minerais métalliques, les ressources matières qui enregistreraient la plus grosse progression, avec une multiplication par 2,6 pour les premiers et par 2 pour les seconds. Ces conclusions convergent avec les conclusions de l'OCDE dans son ouvrage « Global Material Resources Outlook to 2060 »⁽³⁾.

	2015	2050
Population en milliards	7,3	9,3
PIB en trilliards de dollars US	76	165
Ressources matières en gigatonnes, dont :	84	184
Biomasse	22	41
Combustibles fossiles	14	22
Minerais métalliques	4	16
Minéraux non métalliques	40	105

Figure 1 : Extraction mondiale des ressources matières en 2015 et à l'horizon 2050, selon le scénario « *Business as usual* » (source : d'après « Resource Efficiency : Potential and Economic Implications », IRP, 2016).

(1) Source : PNUE.

(2) Site : www.resourcepanel.org

(3) « Global Material Resources – Outlook to 2060 : economic drivers and environmental consequences », OECD, 2019.

La gestion durable des ressources est aussi inscrite à l'Agenda 2030 des Nations Unies. En septembre 2015, 193 États membres de l'ONU adoptaient les 17 Objectifs du développement durable (ODD). Une des cibles de l'ODD 12 « Établir des modes de consommation et de production durables » porte sur la gestion durable des ressources naturelles : « d'ici à 2030, parvenir à une gestion durable et une utilisation rationnelle des ressources naturelles ».

L'Union européenne se mobilise pour une utilisation durable des ressources

Au niveau européen, dès le début des années 2000, la Commission européenne a engagé des travaux visant à réduire les impacts sur l'environnement de l'utilisation des ressources par une économie en forte croissance, à travers l'adoption, en 2005, d'une stratégie sur l'utilisation durable des ressources naturelles, l'une des sept stratégies thématiques du sixième programme d'action pour l'environnement 2002-2012.

Cette stratégie demande aux États membres d'agir pour découpler la croissance économique des impacts environnementaux associés à l'utilisation des ressources naturelles. Elle est fortement axée sur l'approfondissement des connaissances et l'élaboration d'outils de suivi des flux de matières, ce qui conduit l'Union européenne à participer à hauteur de 60 % au budget de l'IRP.

Au second semestre 2010, lors de sa présidence de l'Union européenne, la Belgique a inscrit sur son agenda prioritaire la gestion durable des matières. Cela s'est concrétisé par la tenue d'un forum mondial de l'environnement sur la gestion durable des matières⁽⁴⁾ et, en décembre 2010, par l'adoption de conclusions du Conseil de l'environnement sur ce thème. À l'initiative du Commissaire européen à l'Environnement, Janez Potocznik, aujourd'hui co-président de l'IRP, ces conclusions ont été intégrées dans la feuille de route sur l'utilisation efficace des ressources, publiée par la direction générale de l'Environnement de la Commission.

En parallèle, en 2008, la direction générale de la Croissance de la Commission européenne lance une initiative sur les matières premières⁽⁵⁾. Celle-ci s'inscrit dans le prolongement de la crise des terres rares de 2007 et marque le début de la prise de conscience de l'extrême dépendance de l'Union européenne vis-à-vis des matières premières primaires, en particulier des métaux. L'utilisation efficace des ressources, le recyclage et l'usage accru de ressources renouvelables font partie des solutions identifiées, et une liste de matières premières critiques pour l'Union européenne est publiée, et depuis régulièrement mise à jour.

La France élabore sa stratégie ressources

Dans ce cadre, la France a souhaité se doter d'une politique publique pour une meilleure gestion des ressources

(4) <https://www.oecd.org/fr/env/dechets/forummondialdelocdesur lenvironnementgestiondurableledesmatieres.htm>

(5) <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0699:FIN:FR:PDF>

naturelles, qu'elles soient localisées en France ou à l'étranger.

La Figure 2 ci-après montre que la consommation par habitant de minerais métalliques et de ressources énergétiques fossiles, dont la France est importatrice nette, est plus élevée lorsqu'elle est exprimée en RMC⁽⁶⁾ (*raw material consumption*) qu'en DMC⁽⁷⁾ (*domestic material consumption*). En effet, alors que le DMC ne comptabilise que les matières qui traversent physiquement la frontière, le RMC intègre les flux indirects, qui sont comptabilisés là où les matériaux ont été produits et/ou transformés – ils ne traversent pas la frontière avec eux : ce sont les combustibles et autres produits utilisés pour la fabrication et le transport. Ces flux indirects ont des impacts sur l'environnement d'autant plus importants que les matières sont extraites et transformées dans des pays dont les réglementations environnementales et sociales sont peu exigeantes.

En France, en 2017, si la consommation apparente de matières était de 11,6 tonnes par habitant, la consommation exprimée en intégrant les flux indirects était de 13,5 tonnes, soit un sixième de plus.

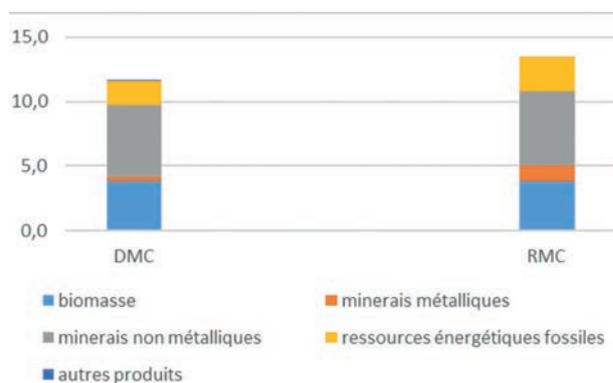


Figure 2 : Consommation apparente de matières en France en 2017, exprimée en tonnes par habitant, DMC (flux physiques) et RMC (flux physiques + flux indirects) (source : par les auteurs sur la base des données du Service de la donnée et des études statistiques (MTES)).

C'est lors de la conférence de mise en œuvre de Gardanne, tenue dans le prolongement de la conférence environnementale de septembre 2013, que le ministre en charge de l'Écologie a annoncé l'ouverture d'une réflexion sur la gestion des ressources stratégiques françaises. Un groupe de travail a été chargé de proposer des pistes pour structurer une stratégie française cohérente avec les travaux de la Commission européenne sur l'utilisation efficace des ressources. Les métaux stratégiques avaient déjà été l'objet, dès 2008, d'une attention particulière avec la création du Comité des métaux stratégiques (COMES) et, dans son sillage, la publication du portail français des ressources minérales non énergétiques, Minéralinfo⁽⁸⁾.

(6) Consommation de matières exprimée en équivalent matières premières (RMC) : comptabilise l'ensemble des matières mobilisées pour satisfaire la consommation finale d'un pays.

(7) Consommation intérieure apparente de matières (DMC) : comptabilise, en tonnes, l'extraction de matières sur le territoire national augmentée des importations et diminuée des exportations.

(8) www.mineralinfo.fr

Les résultats du groupe de travail « Stratégie ressources », mis en place en février 2014, ont fortement orienté le périmètre du plan de programmation des ressources prévu à l'article 69 de la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) publiée en août 2015 : « le gouvernement soumet au Parlement, tous les cinq ans, une stratégie nationale de transition vers l'économie circulaire, incluant notamment un plan de programmation des ressources nécessaires aux principaux secteurs d'activité économique qui permet d'identifier les potentiels de prévention de l'utilisation de matières premières, primaires et secondaires, afin d'utiliser plus efficacement les ressources, ainsi que les ressources stratégiques, en volume ou en valeur, et de dégager les actions nécessaires pour protéger l'économie française ».

En 2017, l'élaboration de ce plan était confiée à un groupe de travail interministériel. Le groupe s'appuya sur les travaux et réflexions déjà engagés dans un cadre sectoriel (plan de mobilisation de la biomasse, stratégie sur la bio-économie, Comité stratégique de filière...). Après une consultation publique, le plan de programmation des ressources fut publié en août 2018.

La finalité du premier plan de programmation des ressources

Le plan de programmation des ressources, appelé plan « Ressources⁽⁹⁾ pour la France », fait le point sur la dépendance de l'économie française aux ressources minérales non énergétiques, à la biomasse à usage non alimentaire et aux sols. Il montre la nécessité d'accélérer la transition vers une économie circulaire. Il s'agit en effet de maîtriser les coûts environnementaux et économiques liés à la consommation croissante des ressources et d'augmenter de 30 % la productivité matières entre 2010 et 2030, tel qu'énoncé à l'article 74 de la LTECV.

Si les ressources en eau et biodiversité ne sont pas abordées dans le plan (comme l'avait néanmoins souligné le groupe de travail « Stratégie ressources », elles font déjà l'objet de politiques publiques détaillées et structurées), les impacts sur l'eau et sur la biodiversité de l'utilisation des ressources minérales, de la biomasse et des sols sont mentionnés.

Le plan « Ressources » alerte également sur le besoin accru en biomasse et en ressources minérales généré par la transition énergétique. Ainsi, le développement des énergies renouvelables et le déploiement de la mobilité électrique se traduiront par une augmentation des besoins en ressources minérales, que l'offre de matières premières secondaires n'arrivera à couvrir qu'en partie. Le recours à des ressources primaires restera indispensable, qu'elles soient produites sur le territoire national ou importées. Or, pour son approvisionnement en minerais métalliques (fer, zinc, aluminium, tungstène...), la France est dépendante à 100 % de l'étranger.

(9) <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Feuille-de-route-Economie-circulaire-50-mesures-pour-economie-100-circulaire.pdf>

Si les métaux issus des filières de recyclage contribuent à l'approvisionnement de l'industrie française, seuls certains métaux sont concernés : acier, aluminium, cuivre, zinc et plomb. Pour les autres, les besoins de l'industrie sont satisfaits par l'importation de produits métallurgiques plus ou moins élaborés. La récupération des matières premières secondaires grâce au recyclage est une activité liée à l'exploitation des matières premières primaires extraites du sous-sol. Les compétences industrielles, voire parfois les outils industriels eux-mêmes, sont les mêmes pour les deux activités. Envisager le développement d'activités de recyclage au niveau national est ainsi étroitement dépendant du maintien, voire du renouveau d'activités liées à la valorisation des matières premières primaires.

Le plan « Ressources pour la France » met aussi en évidence le fait que l'évolution des besoins en ressources de l'économie française dans les décennies à venir est mal connue. Faute de données, les déséquilibres potentiels entre offre et demande de ressources sont mal anticipés.

Les pistes d'actions ouvertes par le plan « Ressources pour la France »

Dans ce contexte, le plan « Ressources pour la France » propose un ensemble de pistes d'actions visant à mieux adapter offre et demande de ressources naturelles :

- Du côté de l'offre : développement du recyclage ; développement de l'offre nationale pour les ressources disponibles sur le territoire ; réduction des fragilités liées à l'évolution des importations ; amélioration, à l'échelle nationale, de la connaissance des gisements de matières premières primaires et secondaires (flux et stocks) ; etc. L'offre nationale présente l'avantage de sécuriser l'approvisionnement et d'inscrire les activités extractives des matières que nous consommons dans le cadre de la réglementation environnementale française, connue pour son exigence.
- Du côté de la demande : optimisation des procédés industriels ; amélioration de la connaissance de l'impact des politiques publiques sur la demande en ressources minérales ; allongement de la durée de vie des équipements et des produits (écoconception, réparation, réemploi...) ; évolution des comportements individuels ; etc.

S'agissant des sols, le plan « Biodiversité », présenté début juillet 2018, comporte un objectif de zéro artificialisation nette (objectif 1-3) : « Limiter la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers pour atteindre l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN) ». Dans un rapport publié fin juillet 2019, France Stratégie a analysé des pistes pour freiner l'artificialisation des sols à partir de 2030. Sur la base de ce rapport et de ceux du Comité pour l'économie verte et du Conseil général de l'environnement et du développement durable, un groupe de travail associant les parties prenantes est chargé de définir une trajectoire pour atteindre cet objectif. L'objectif ZAN est repris dans la stratégie française sur les Objectifs du développement durable (ODD), qui a été présentée fin septembre 2019 à l'ONU.

En ce qui concerne la biomasse non alimentaire, la stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB), prévue par

la LTECV, est entrée en vigueur en mars 2018. S'appuyant sur des objectifs nationaux, à la fois qualitatifs et quantitatifs, de mobilisation de la biomasse, elle identifie et promeut les bioénergies, dans le respect des grands équilibres alimentaires, économiques et écologiques, tout en étant articulée avec d'autres cadres et dispositifs, tels que le plan national Forêt Bois (PNFB), le plan national de prévention et de gestion des déchets (PNPGD), la Stratégie nationale Économie circulaire et la Stratégie nationale pour la bio-économie.

Les ressources minérales sont au centre des travaux engagés dans le cadre du second plan de programmation des ressources.

Un nouveau plan de programmation des ressources actuellement en gestation

L'action 5 de la feuille de route sur l'économie circulaire, publiée en avril 2018, consiste « sur la base des travaux du COMES (Comité pour les métaux stratégiques) et du premier plan national des ressources qui sera publié en 2018, [à] s'engager dans un plan de programmation des ressources jugées les plus stratégiques, en l'accompagnant d'une politique industrielle ambitieuse de valorisation du stock de matières, en particulier les métaux critiques, contenues dans les déchets ».

Les travaux relatifs au plan de programmation II, engagés en février 2019, se focalisent sur les besoins en ressources minérales de la transition bas-carbone, des ressources stratégiques, car leur mobilisation est une condition de l'atteinte des objectifs que la France s'est donnée en matière de lutte contre le changement climatique.

Or, la transition bas-carbone s'inscrit dans un contexte de forte demande en ressources, demande liée à la transition énergétique elle-même, mais émanant également d'autres secteurs, dont le numérique. Au cours des dernières années, l'impact de cette transition sur la consommation de ressources minérales a fait l'objet de nombreux travaux. Le constat est sans appel : le développement des infrastructures de production d'énergie renouvelable, l'adaptation des réseaux à travers le développement des réseaux intelligents et du stockage de l'énergie, ainsi que le déploiement de la mobilité électrique et de l'efficacité énergétique vont nécessiter de mobiliser d'importantes quantités de minéraux, en particulier des métaux, dont certains figurent sur la liste des matières premières critiques.

En conséquence, la Secrétaire d'État à l'Écologie a mandaté un comité de pilotage, composé des administrations, organisations et experts compétents, ayant pour mission de préparer le plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone. L'objectif est de caractériser les technologies bas-carbone et leur contenu en ressources minérales, d'identifier les enjeux économiques, environnementaux et sociaux associés, de mettre en lumière les opportunités industrielles pour les entreprises françaises et européennes, et de développer les capacités de recyclage, et ce en faisant en sorte que la transition écologique soit créatrice d'emplois et de valeur. Les travaux du comité de pilotage donneront lieu à un rapport

pour quatre familles de technologies (photovoltaïque⁽¹⁰⁾, stockage stationnaire et réseaux y compris intelligents, mobilité bas-carbone et éolien), ainsi qu'à un rapport de synthèse. Ces rapports serviront à l'élaboration, dans le courant de l'année 2021, du plan de programmation des ressources stratégiques de la transition bas-carbone.

Des incertitudes apparaissent dans le sillage de la pandémie de Covid-19

Elles sont nombreuses : durée du confinement et de son impact sur le PIB ; date d'une reprise économique effective au niveau mondial⁽¹¹⁾, compte tenu du décalage entre les différentes dates de sortie du confinement retenues par chaque pays ; impact de la chute de la consommation mondiale de pétrole sur le cours de baril ; capacité des États à soutenir l'activité économique et les investissements après la crise ; poursuite de la transition vers des énergies propres⁽¹²⁾.

Le ralentissement de l'économie mondiale pourrait s'accompagner de la baisse du développement des énergies renouvelables. En particulier, les installations de panneaux photovoltaïques devraient reculer en 2020⁽¹³⁾, et ce pour la première fois depuis 1980. Des retards sont également attendus dans le développement de nouvelles fermes éoliennes. En ce qui concerne les panneaux photovoltaïques et les composants des éoliennes qui proviennent très majoritairement de Chine, les chaînes d'approvisionnement ont été interrompues, d'abord sous l'effet de l'arrêt des exportations chinoises, puis par la chute de la demande dans les pays progressivement atteints par le virus.

Cette situation a souligné la forte dépendance de l'Europe vis-à-vis de l'industrie chinoise, et a stimulé son désir d'une relocalisation sur son territoire, au moins partielle, des chaînes de valeur nécessaires au développement des ENR, des chaînes de valeur allant de l'extraction minière, quand cela est possible, jusqu'à la production des panneaux photovoltaïques ou des éoliennes. Cette relocalisation aurait pour effet de créer de la valeur et des emplois, de limiter les atteintes à l'environnement et de permettre le recyclage des métaux sur les lieux de production industrielle. Le prix de marché des énergies renouvelables connaîtrait certainement une augmentation, mais ce serait le prix à payer pour assurer la mise en œuvre d'une stratégie bas-carbone propre, venant en substitution à la délocalisation en Asie de nos industries polluantes. C'est l'une des conclusions du premier rapport d'étape du plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone, consacré au photovoltaïque.

(10) Le rapport sur le photovoltaïque a été remis à la Secrétaire d'État en novembre 2019, il devrait être mis en ligne prochainement.

(11) La crise de 1929-1932 avait vu le PIB mondial baisser de 33 %, et celui des États-Unis de 46 % ; la crise de 2008-2009 s'est traduite par une baisse du PIB mondial de 0,6 %, et de celui de la zone euro de 4,2 %. Le PIB mondial avait baissé de 4,8 % lors de la grippe espagnole en 1918-1919, de 2 % lors de la grippe asiatique en 1957 et de 0,7 % lors de la grippe de Hong-Kong en 1968.

(12) Tribune de Fatih Birol, directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie, sur la poursuite de cette transition, tribune publiée sur LinkedIn à la mi-mars 2020.

(13) Surtout en Australie, au Brésil, au Mexique et en Afrique du Sud : quatre pays qui affichaient en la matière des objectifs ambitieux.

La politique française des matières premières minérales non énergétiques

Par Rémi GALIN

et Jean-François GAILLAUD

Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DGALN/MTES)

Bureau de la Politique des ressources minérales non énergétiques

La dépendance de la France pour les métaux n'est pas nouvelle. Les objectifs d'approvisionnement doivent tenir compte d'une nouvelle donne. La vulnérabilité de nos filières industrielles d'excellence, la multiplication des substances, la pression sur la planète sont autant de nouveaux paramètres qui nécessitent d'inscrire l'approvisionnement en ressources minérales dans un modèle économique plus vertueux, celui de l'économie circulaire. La France s'est dotée d'un cadre stratégique dynamique avec le plan de programmation des ressources. De plus, elle peut s'appuyer sur l'expertise opérationnelle des Comités stratégiques de filières du CNI, notamment celui de la filière Mines et métallurgie. La mobilisation de l'échelon européen, de nos acteurs du domaine minier, et de ceux de la métallurgie et de l'innovation doit nous permettre de concrétiser des projets industriels à partir des ressources primaires ou secondaires de notre territoire ou en collaboration avec des opérateurs partageant les mêmes valeurs que nous.

Le 26 juin 1979, André Giraud, ministre de l'Industrie, s'exprimait devant les industriels de la fédération des minerais et des métaux non ferreux en ces termes : « la politique d'approvisionnement en matières premières non énergétiques a pour objectif d'assurer l'approvisionnement en ces matières premières en quantités suffisantes et dans les qualités requises, dans des conditions de coûts raisonnables et sans être placé vis-à-vis de quelque pays que ce soit en situation de dépendance insupportable ».

Les risques de rupture physique, d'évolution rapide des prix et de dépendance restent au cœur des enjeux de l'approvisionnement. Ces risques se sont amplifiés, et des enjeux nouveaux se révèlent

Vers la fin du XX^e siècle, l'abondance des matières premières, ainsi que des prix contenus et la confiance dans la régulation naturelle des marchés conduisent la France, à l'instar des autres grandes puissances industrielles, à abandonner outils et démarches s'inscrivant dans la volonté politique d'indépendance affichée en 1979. Les stocks stratégiques de métaux sont alors liquidés. L'arrêt de l'inventaire minier et la fermeture des mines de métaux métropolitaines sonnent le glas du plan Métaux des années 1970.

Les besoins en matières premières minérales progressent de manière exponentielle. Entre 2003 et 2008, les difficultés d'ajuster l'offre à la demande entretiennent une flambée des prix. Cette période a connu des évolutions majeures de la structure et du fonctionnement des marchés mondiaux, avec, d'une part, la multiplication d'OPA qui ont engendré une concentration de l'offre mondiale et, d'autre part, l'émergence rapide de la Chine comme acteur majeur des marchés mondiaux des matières premières minérales. Le basculement du barycentre industriel vers l'Asie accélère l'érosion des capacités françaises de première transformation des métaux non ferreux contraintes par des règles environnementales toujours plus exigeantes et des coûts supérieurs. La crise des terres rares de 2011 révèle la grande vulnérabilité des économies occidentales. La Chine occupe une position dominante pour 41 matières premières minérales, notamment les métaux nécessaires aux hautes technologies.

La COP21 de décembre 2015 constitue un nouveau tournant. Grande nouveauté : partout dans le monde, de manière synchrone, les politiques publiques viennent peser sur les marchés des matières premières au travers du développement des énergies renouvelables et la mobilité électrique. Pour réaliser les objectifs escomptés en termes de compétitivité et d'innovation, il sera important d'optimiser la chaîne de valeur des batteries électriques et de

EVALUATION DE LA CRITICITE DES SUBSTANCES OU GROUPES DE SUBSTANCES ETUDIEES PAR LE BRGM DEPUIS 2010

Positionnements révisés en 2018 ("Fiches de criticité")

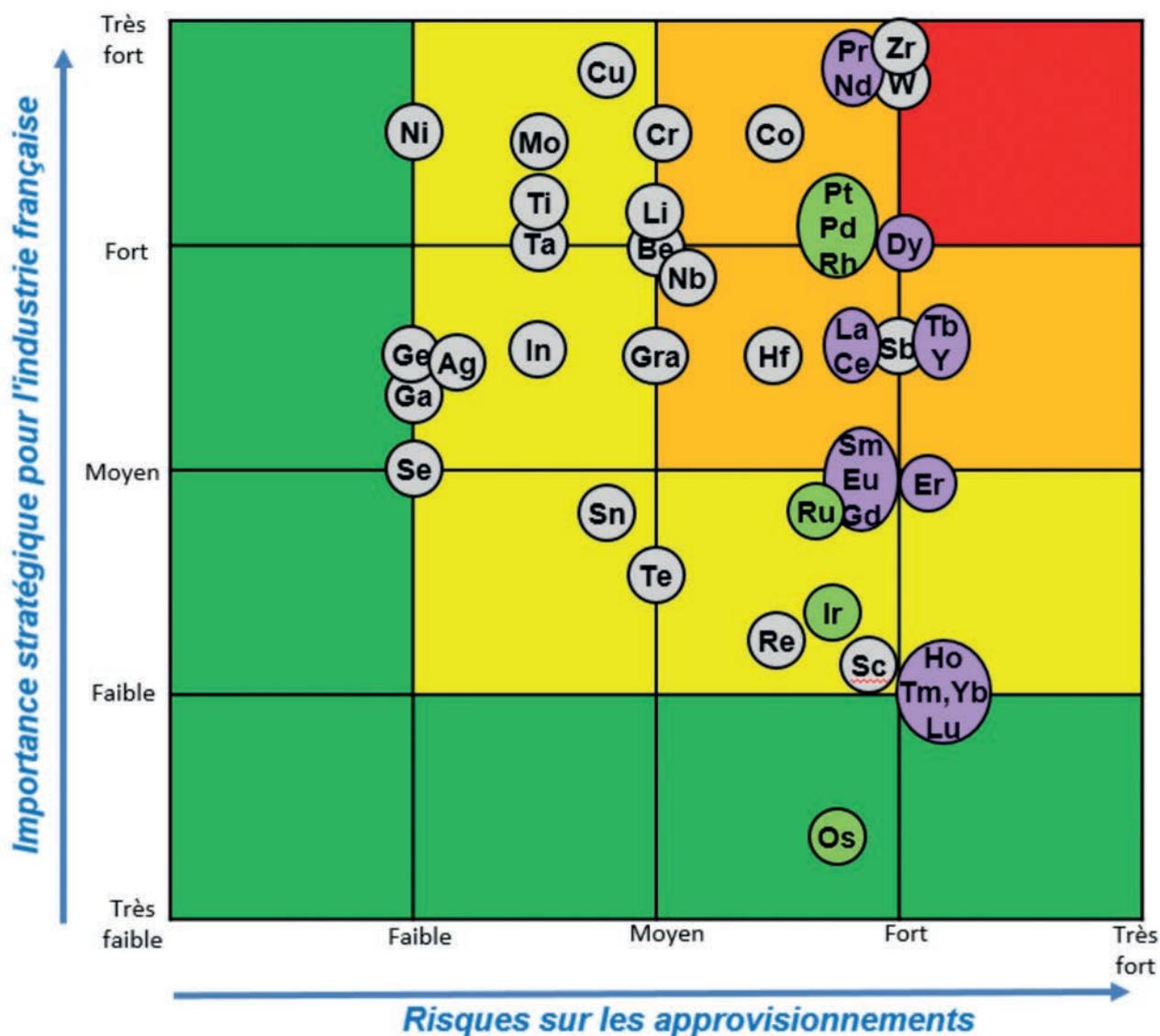


Figure 1 – Source : BRGM, pour le COMES.

sécuriser les segments clés, depuis l'étape de l'extraction des matières premières jusqu'aux différents aspects du recyclage. De fait, l'État s'attache à mettre en place des actions stratégiques afin de favoriser l'avantage concurrentiel que représentent ces chaînes de valeur stratégiques, au travers des actions conduites par le Conseil national de l'industrie et les Comités stratégiques de filières, qui lui sont rattachés.

L'économie circulaire est le cadre stratégique pour gérer la dépendance en matière de ressources minérales

L'Union européenne réagit en 2008 avec l'initiative Matières premières de la Communauté européenne, complé-

tée par la communication de février 2011, « Relever les défis posés par les marchés des produits de base et les matières premières ». Cette démarche s'articule autour de trois piliers : assurer un approvisionnement équitable et durable en matières premières sur les marchés mondiaux, favoriser l'approvisionnement durable en matières premières auprès de sources européennes et dynamiser l'efficacité des ressources et promouvoir le recyclage.

La France installe le Comité des métaux stratégiques (COMES). Une veille stratégique est mise en œuvre par le BRGM. Les acteurs économiques de la production, du recyclage et de l'utilisation se concertent avec l'appui des opérateurs publics (BRGM, ADEME, CEA). La compréhension des enjeux se développe, une matrice de sensi-

lité de l'économie française et des fiches de criticité sont mises à disposition sur le portail public, Mineralinfo⁽¹⁾. Des pistes de travail sont explorées, notamment dans le domaine du recyclage.

En 2015, le Parlement adopte la loi pour la transition écologique et la croissance verte (LTECV). Cette loi demande au gouvernement de produire, tous les cinq ans, « une stratégie nationale de transition vers l'économie circulaire, incluant notamment un plan de programmation des ressources nécessaires aux principaux secteurs d'activité économique, qui permet d'identifier les potentiels de prévention de l'utilisation de matières premières, primaires et secondaires, afin d'utiliser plus efficacement les ressources, ainsi que les ressources stratégiques en volume ou en valeur et de dégager les actions nécessaires pour protéger l'économie française. »

Après avoir introduit une définition de l'économie circulaire dans le Code de l'environnement (article L.110-1-1), la loi TECV établit une hiérarchie des matières (article L.110-1-2 du même Code) : « Les dispositions du présent Code ont pour objet, en priorité, de prévenir l'utilisation des ressources, puis de promouvoir une consommation sobre et responsable des ressources, puis d'assurer une hiérarchie dans l'utilisation des ressources, privilégiant les ressources issues du recyclage ou de sources renouvelables, puis les ressources recyclables, puis les autres ressources, en tenant compte du bilan global de leur cycle de vie. »

Dans le cadre de la feuille de route Économie circulaire, publiée le 23 avril 2018, un premier plan de programma-

tion des ressources est élaboré. Ce plan fait notamment le point, en s'appuyant sur les travaux du COMES, sur la dépendance et le degré de vulnérabilité de notre économie au regard des ressources minérales.

Le Plan délivre quatre messages clés :

- Il faut réduire les besoins en ressources naturelles de nos sociétés en accélérant la transition vers une économie circulaire. En effet, dans un contexte de forte croissance démographique, d'augmentation des niveaux de vie et de diffusion rapide des modes de production et de consommation occidentaux fortement consommateurs de ressources, **il est indispensable de produire en utilisant moins et plus longtemps les ressources naturelles**, si l'on veut maîtriser les coûts environnementaux et économiques de leur consommation ;
- Même en utilisant moins et plus longtemps les ressources naturelles, **le recours à des ressources primaires, qu'elles soient produites sur le territoire national ou importées, restera indispensable** du fait de la croissance inéluctable de la demande au niveau mondial ;
- En outre, **la transition énergétique se traduit par un besoin accru en ressources minérales**. Ainsi, le développement des énergies renouvelables comme le déploiement de la mobilité électrique vont se traduire par une augmentation des besoins en ressources minérales (déjà mobilisées par d'autres secteurs), que l'offre de matières secondaires n'arrivera à couvrir que partiellement ;
- Pour anticiper les risques associés aux évolutions de l'offre et de la demande en ressources naturelles (et donc mieux les maîtriser), des efforts importants d'amélioration de la connaissance sont nécessaires, en particulier pour les ressources minérales. Pour les ressources minérales, l'évolution des besoins de l'économie française

(1) www.mineralinfo.fr

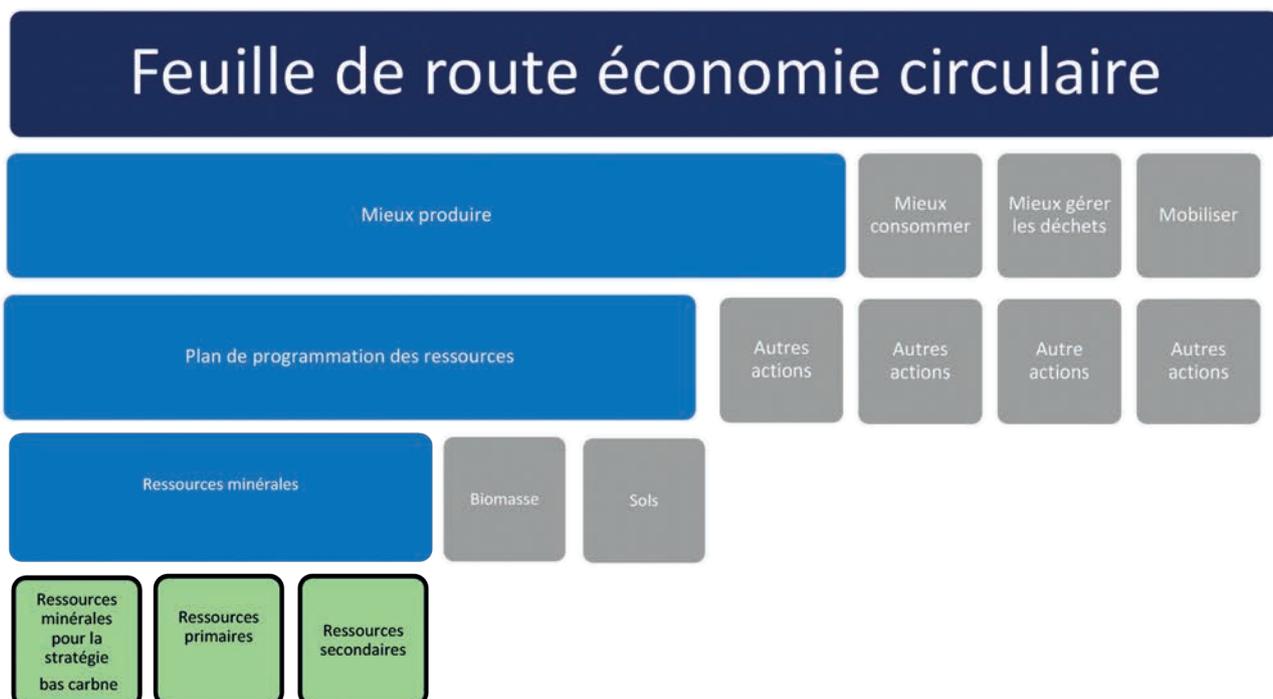


Figure 2 – Source : DGALN.

La chaîne de valeur des ressources minérales



Figure 3 – Source : EIT RawMaterials.

est encore mal connue. Les potentiels d'économie des ressources offerts par le développement de l'économie circulaire doivent également être identifiés et quantifiés.

La résilience de notre industrie passe par le soutien public au développement d'une offre nationale et de filières d'approvisionnement responsables

Le Plan national des ressources propose un ensemble de pistes d'actions visant à mieux adapter l'offre et la demande de ressources naturelles :

- du côté de l'offre : développement du recyclage, développement de l'offre nationale pour les ressources disponibles sur le territoire, réduction des fragilités liées à l'évolution des importations... L'offre nationale présente l'avantage de sécuriser l'approvisionnement et d'inscrire les activités extractives des matières que nous consommons dans le cadre de la réglementation environnementale française, connue pour son exigence ;
- du côté de la demande : optimisation des procédés industriels, allongement de la durée de vie des équipements et des produits, modification des comportements, etc.

Plusieurs leviers d'action sont mobilisés afin d'améliorer la résilience dans l'approvisionnement en ressources stratégiques de nos filières industrielles ; ceux-ci consistent à mieux valoriser les ressources nationales primaires (extraction) et secondaires (recyclage), mais aussi à créer des liens forts et stables avec des producteurs de métaux *via* des partenariats industriels ou financiers.

Sans être de premier ordre, le domaine minier français recèle des métaux d'intérêt stratégique qui méritent un

cadre de décision modernisé afin que l'État puisse considérer la possibilité de valoriser ses propres ressources selon les meilleurs standards environnementaux et sociaux. En effet, il est possible en l'état actuel des connaissances de considérer les principaux types de gisements français (substance, géométrie, taille, etc.) présentant un potentiel dans la sécurisation de nos approvisionnements pour une quinzaine de métaux stratégiques.

La réforme du Code minier est donc un prérequis essentiel à toute valorisation des ressources nationales primaires. Elle s'inscrit pleinement dans l'amélioration de notre résilience aux risques d'approvisionnement, renvoyant à une politique affirmée d'attractivité de notre territoire au travers de projets d'exploration et d'exploitation des ressources minières respectueux du développement durable. Il s'agit, en outre, de l'un des projets structurants de la feuille de route opérationnelle du Comité stratégique de filière Mines et métallurgie (CSF Mines et métallurgie).

Dans ce contexte, l'État travaille, en lien avec le CSF Mines et métallurgie et les Comités stratégiques de filières concernés, sur les matériaux les plus critiques pour les batteries, pour les énergies renouvelables et les alliages spéciaux pour l'aéronautique et la Défense, ainsi qu'à la structuration de la politique des matières premières minérales non énergétiques en mettant l'accent sur les chaînes de valeur les plus exposées.

Cette approche nécessite de :

- **documenter**, pour chaque filière concernée, les besoins en métaux critiques et leur degré de vulnérabilité au regard de leur approvisionnement,
- **mettre en œuvre un cadre d'approvisionnement responsable basé sur des relations plus étroites entre les utilisateurs des minéraux et des métaux et ceux qui les**

produisent. Ces standards pourraient être l'occasion de privilégier l'application des normes françaises/internationales à certaines opérations, telles que l'hydrométallurgie, actuellement réalisées par des acteurs asiatiques soumis à des contraintes environnementales et sociales moins exigeantes, à l'origine de distorsions de concurrence vis-à-vis des acteurs européens,

- **définir une stratégie d'investissement public dans le secteur amont,** s'appuyant notamment sur de grands industriels nationaux, ce qui permettrait, aux côtés d'entreprises françaises ou non, des investissements dans des projets internationaux en *equity*, ou en co-investissement direct ou *via*, par exemple, des fonds de fonds, des investissements réalisés au final au profit de la filière française. Un des enjeux est de construire une alternative aux importants fonds chinois fortement actifs, et ainsi investir sur tous les grands projets et aux côtés des Européens. Cette stratégie sera adossée à une politique industrielle européenne plus interventionniste, inspirée du modèle de l'Airbus des batteries,
- **identifier des couples pays-minéraux prioritaires et étudier la possibilité de financer des actions de coopération** en matière de gouvernance au sens large (exploration, développement...), afférentes aux ressources minérales stratégiques,
- **structurer des filières de recyclage robustes,** dont certaines sont en cours de déclinaison au sein des Comités stratégiques de filières, notamment celles se rattachant aux segments des cartes électroniques, des batteries et des aimants permanents. L'enjeu est de passer d'un ensemble de projets de R&D amont à la concrétisation de quelques projets industriels opérationnels impliquant les acteurs de la filière utilisatrice.

Ces travaux sont renforcés par l'approche plus fine adoptée en février 2019 par le gouvernement dans le cadre de l'élaboration du plan de programmation des ressources minérales spécifiques pour la transition bas-carbone. Celui-ci s'inscrit dans la continuité du plan « Ressources pour la France » publié en juillet 2018. Les travaux du plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone portent sur quatre grandes familles de technologies bas-carbone : photovoltaïque, stockage stationnaire et réseaux (y compris les réseaux intelligents), mobilité bas-carbone et éolien. Ces familles ont été retenues, car la transition bas-carbone va se traduire par une électrification massive de notre économie. Les familles de technologies relevant du domaine de la chaleur (solaire thermique, pompes à chaleur, biomasse et géothermie) ne seront ainsi pas étudiées dans ce plan, même si ces technologies concernent des domaines à fort potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ce plan a vocation à éclairer les pouvoirs publics et les décideurs sur les choix technologiques et industriels pertinents pour réussir la transition bas-carbone, en identifiant des leviers d'action permettant de réduire les risques associés aux ressources à mobiliser, d'une part, et de mieux exploiter les opportunités industrielles, d'autre part.

La politique française des matières premières minérales non énergétiques, qui se veut aujourd'hui plus proactive, est en constante évolution. La crise sanitaire due au Covid-19 aura sans nul doute des répercussions sur les stratégies et les moyens engagés par l'État pour sécuriser l'approvisionnement de ses activités industrielles stratégiques.

La stratégie européenne dans le domaine des matières premières

Par **Gwenole COZIGOU**

Directeur, direction Industrie durable et Mobilité, direction générale Marché intérieur, Industrie, Entrepreneuriat et PME – Commission européenne

Les matières premières sont essentielles à notre style de vie moderne. Elles sont utilisées dans un large éventail d'applications allant des matériaux de construction et des industries alimentaires, à l'énergie propre ou l'électronique. Les matières premières resteront à l'avenir un élément essentiel pour la compétitivité et la résilience des chaînes de valeur industrielles, à la fois dans l'Union européenne (UE) et dans l'économie mondiale.

Dans un cadre où la crise du Covid-19 a mis en évidence les vulnérabilités des chaînes de valeur, l'Europe doit poursuivre activement une approche plus stratégique de l'accès aux ressources comme facteur essentiel pour réduire sa dépendance aux matières premières critiques et réaliser sa transition verte.

Introduction

Le Pacte vert pour l'Europe (*European Green Deal*)⁽¹⁾ et la stratégie digitale⁽²⁾ visent à transformer l'UE, d'ici à 2050, en une société efficiente en ressources, climatiquement neutre et qui profite des opportunités de la transformation numérique.

Mais cette transition, s'accompagnant d'une « dématérialisation de notre économie », a pour conséquence d'augmenter la consommation de certaines matières premières critiques et risque de remplacer bientôt la dépendance aux combustibles fossiles par la dépendance aux matières premières critiques pour cette transition verte.

Dans un cadre où la crise du Covid-19 a mis en évidence les vulnérabilités des chaînes de valeur, l'Europe doit poursuivre activement une approche plus stratégique de l'accès aux ressources comme facteur essentiel pour réduire ces dépendances et réaliser la transition verte.

L'approvisionnement en matières premières – Une question stratégique pour l'Europe

La demande mondiale de matières premières devrait doubler d'ici à 2060⁽³⁾ en raison de l'augmentation de la population mondiale, l'industrialisation, la demande croissante des pays en développement et la transition vers la neutralité climatique.

Aujourd'hui, chaque citoyen européen consomme, au titre d'une année, 14 tonnes⁽⁴⁾ de matières premières et génère 5 tonnes de déchets. Et environ 40 % des dépenses des entreprises sont en matériaux⁽⁵⁾. On estime qu'en Europe, la réalisation des objectifs climatiques en 2050 nécessiterait près de 60 fois plus de lithium et 15 fois plus de cobalt par rapport à l'approvisionnement actuel⁽⁶⁾.

Depuis 2011, la Commission européenne publie tous les trois ans la liste des matières premières critiques (MPC) pour l'UE. Les MPC sont des matières d'une grande importance économique pour l'UE et présentent en même temps un risque élevé de rupture d'approvisionnement (même en tenant compte de la contribution du recyclage).

En conséquence, l'Europe doit mieux utiliser ses matières premières.

En ce qui concerne les ressources minières, et contrairement aux idées reçues, l'Europe dispose de nombreuses ressources. Elle est le troisième producteur mondial de minéraux industriels et produit la plus grande partie des minéraux de construction dont elle a besoin. Pourtant, l'UE, pour de nombreux minerais, surtout métalliques, est loin d'être autosuffisante, et sa dépendance aux importations de certains matériaux jugés critiques pour son économie est proche de 100 % (contribution du recyclage prise en compte).

(4) Statistics Explained (<https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/>), 23 octobre 2019.

(5) Commission européenne – Nouveau plan d'action pour l'économie circulaire.

(6) Commission européenne, "Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU", a foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020 (en attente de publication).

(1) COM(2019) 640 final – Le Pacte vert pour l'Europe.

(2) COM(2020) 102 final – Façonner l'avenir numérique de l'Europe.

(3) OECD(2016) – Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic Drivers and Environmental Consequences.

L'Europe doit donc aussi mobiliser le potentiel de l'économie circulaire. Les matières premières secondaires contribuent à la neutralité climatique et à la sécurité d'approvisionnement. La contribution du recyclage à la satisfaction de la demande en certaines matières premières, comme le fer ou l'aluminium, est relativement élevée : pourtant, la circularité des matières premières dans l'UE est, dans son ensemble, inférieure à 10 %, et seuls 40 % des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)⁽⁷⁾ sont recyclés.

L'offre de matières premières secondaires devrait ainsi continuer d'augmenter, mais l'extraction de matières premières primaires restera le principal moyen de satisfaire la demande, au niveau européen et mondial.

L'Initiative européenne des matières premières

La stratégie de l'UE sur les matières premières poursuit la politique de diversification de l'approvisionnement engagée depuis 2008⁽⁸⁾. L'objectif initial reste d'actualité, à savoir sécuriser l'accès aux matières premières pour les chaînes de valeur industrielles et assurer le bien-être de la société.

Des initiatives récentes, comme le Pacte vert (2019), le Plan directeur vers 2050 des industries à forte intensité énergétique (2019) ou la Nouvelle stratégie industrielle (2020)⁽⁹⁾ reconnaissent l'accès aux ressources comme « stratégique » pour atteindre la neutralité climatique en 2050. Ils proposent un nouveau mode de gouvernance basé sur la chaîne de valeur, une approche similaire à ceux de l'Alliance européenne des batteries (2018)⁽¹⁰⁾ qui vise la production massive de batteries en Europe.

La politique de l'UE sur les matières premières repose donc sur une approche équilibrée basée sur la diversification de son approvisionnement en dehors de son territoire, tout en privilégiant son approvisionnement à partir de sources européennes, et sur l'efficacité de son économie circulaire.

L'accès aux matières premières dans le contexte mondial

Dans le contexte mondial, la Commission européenne aborde l'accès aux matières premières à travers les accords de libre-échange de l'UE. Des restrictions à l'exportation de matières premières, la réduction des tarifs, ainsi que l'introduction de chapitres dédiés à l'énergie et aux matières premières sont proposés suivant une

approche plus systémique visant à éliminer les obstacles existants⁽¹¹⁾.

L'engagement actif avec les pays riches en ressources est aussi essentiel. Il s'agit ici de promouvoir une coopération « gagnant-gagnant » visant à garantir à l'UE des approvisionnements durables à long terme tout en permettant aux pays producteurs de valoriser leurs ressources et de stimuler leur croissance économique. La concrétisation de la coopération avec l'Amérique latine et le Canada⁽¹²⁾ est en cours, tandis que la coopération avec le voisinage de l'Europe, y compris l'Alliance UE-Afrique et les Balkans occidentaux, présente un grand potentiel.

La Commission européenne est également en train d'élaborer des principes portant sur les pratiques extractives durables en Europe et tente ainsi de susciter auprès des fabricants européens de batteries des engagements en matière d'approvisionnement durable. Le système de soutien aux petites et moyennes entreprises (PME) fournit des capacités pour les inciter à faire preuve d'une diligence raisonnable au regard de la présence de minerais de conflit dans leurs chaînes d'approvisionnement (novembre 2019).

L'approvisionnement en sources primaires européennes

Développer le potentiel des matières premières de l'UE et maintenir les capacités de transformation et de raffinage dans toutes les chaînes de valeur, en particulier dans les chaînes des technologies stratégiques, sont essentiels pour l'UE.

La gestion des ressources minérales ressort de la compétence nationale des États membres ; les initiatives correspondantes doivent donc être menées par les États membres et l'industrie. La bonne mise en œuvre des règles existantes dans l'UE, telles que les directives sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement⁽¹³⁾, la conservation des habitats naturels et des oiseaux⁽¹⁴⁾, la protection des eaux⁽¹⁵⁾ ou la gestion des déchets des industries extractives⁽¹⁶⁾, contribue à prévenir les risques et à en atténuer les effets en cas de concrétisation.

Les défis liés au développement de ressources minières en Europe sont nombreux. L'opposition à l'exploration, les alternatives concurrentes pour l'accès aux terrains et aux ressources et la perception négative de la société constituent autant de freins à l'approvisionnement interne de l'UE à moyen et long terme.

Dans ce contexte, la Commission européenne promeut le développement durable des ressources minérales et joue le rôle de facilitateur en soutenant l'échange de bonnes

(7) https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=t2020_rt130&plugin=1

(8) COM(2008) 699 final – Initiative « Matières premières » – Répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe ; COM(2011) 25 final – Relever les défis posés par les marchés des produits de base et les matières premières ; Le Partenariat européen pour l'innovation sur les matières premières (PEI-MP) – Plan de mise en œuvre stratégique (SIP).

(9) COM(2020) 102 final – Une nouvelle stratégie industrielle pour l'Europe.

(10) COM(2018) 293 final – Annexe 2 – Plan d'action stratégique sur les batteries.

(11) La stratégie « Trade for all » propose d'insérer un chapitre sur l'énergie et les matières premières dans chaque accord commercial.

(12) Le Comprehensive and Economic Trade Agreement (CETA), conclu entre l'UE et le Canada, inclut un dialogue bilatéral sur certaines matières premières (article 25.4).

(13) Directive 2014/52/EU.

(14) Directive 2009/147/CE.

(15) Directive 2000/60/EC.

(16) Directive 2006/21/EC.

pratiques au travers de comités consultatifs, d'études ou de projets.

Plusieurs thèmes ont ainsi été abordés avec les États membres, tels que les politiques minières et d'aménagement du territoire, les procédures d'octroi de permis et le développement de bases de données sur les ressources minières en Europe ; ce dernier projet étant essentiel pour développer le potentiel existant.

Économie circulaire et recyclage

Favoriser une utilisation plus efficace et une meilleure exploitation des matières premières dites « secondaires », c'est-à-dire celles issues de la récupération et du recyclage, est un enjeu majeur pour l'Europe.

Même si beaucoup a été accompli pour assurer une meilleure exploitation des « gisements » de minerais issus des déchets, force est de constater que le pourcentage de minéraux et métaux recyclés, en particulier les matières premières critiques, est encore trop faible, voire négligeable.

Il existe plusieurs obstacles au plein développement des matières premières secondaires. Il s'agit non seulement de leur performance, de leur disponibilité ou de leur coût, mais également de l'absence d'un marché suffisamment fonctionnel.

En 2015, la Commission lançait le Plan d'action pour l'économie circulaire (PEC)⁽¹⁷⁾ avec un ensemble de mesures comprenant notamment une stratégie pour une utilisation plus circulaire des matières premières et un cadre pour le suivi des progrès réalisés.

La Commission européenne a évoqué, dans un rapport de 2018, la situation des matières premières critiques dans le cadre de l'économie circulaire⁽¹⁸⁾, examinant les principales sources de données ainsi que les meilleures pratiques et les possibilités d'actions futures, à travers l'analyse de quelques secteurs clés (par exemple, l'exploitation minière, l'équipement numérique, les batteries, l'automobile, les énergies renouvelables...).

En s'appuyant sur le travail réalisé depuis 2015, la Commission a adopté, en mars 2020, un Nouveau plan d'action pour l'économie circulaire, qui constitue l'un des principaux éléments du Pacte vert pour l'Europe.

Ce nouveau plan se focalise sur la conception et la production des produits dans la perspective de l'économie circulaire. Il aborde l'analyse du cycle de vie des produits, l'instauration d'une politique visant à une plus grande durabilité des produits, ainsi qu'une meilleure information des consommateurs sur la « réparabilité » et la durabilité des produits. Il met l'accent en particulier sur les secteurs dont la contribution potentielle à l'économie circulaire est la plus élevée (matériels électroniques, batteries, emballages, construction et bâtiments, etc.)

(17) COM(2015) 614 final – Boucler la boucle – Un plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire.

(18) Critical Raw Materials and the Circular Economy – Background report, JRC Science-for-policy report, EUR 28832 EN, Publications Office of the European Union.

Le financement

Mobiliser des financements pour des projets d'exploration, extraction minière, traitement et recyclage à l'intérieur et à l'extérieur de l'UE est nécessaire pour assurer l'approvisionnement durable de l'économie européenne en matières premières.

La Banque européenne d'investissement (BEI) soutient la transition vers une économie climatiquement neutre par des financements, des services de conseil et la sensibilisation. Entre 2014 et 2018, elle a consacré 2,3 milliards d'euros au cofinancement de projets liés à l'économie circulaire et étend désormais ses prêts à des projets innovants visant à réduire les quantités de déchets, à prolonger la durée de vie des produits et à fermer des boucles de vie des produits. En novembre 2019, la BEI, dans le cadre de sa nouvelle politique dans le secteur de l'énergie, a ouvert ses financements aux projets étendant l'économie circulaire aux matières premières critiques nécessaires au développement des technologies à faible émission de carbone dans l'UE.

La Banque européenne pour la reconstruction et le développement (BERD) finance des projets estampillés « Économie circulaire » dans certaines régions européennes et des pays voisins considérés comme éligibles. En 2015, elle lançait l'approche vers une économie verte (*Green Economy Transition – GET*) visant à porter le financement vert à environ 40 % du financement total de la BERD en 2020, avec une catégorie spécifique pour des projets consacrés à l'utilisation durable et efficace des matériaux et des ressources. En ce qui concerne le secteur minier, plus d'un milliard d'euros ont été investis dans 30 projets sur la période 2012-2017 ; la stratégie pour le secteur minier de 2018-2022, qui vient consolider ce portfolio, a érigé la compétitivité, le développement durable et la maximisation des effets en la matière dans les communautés locales comme priorités principales.

En décembre 2019, la Commission a approuvé un projet d'intérêt européen commun (IPEEI) dans le domaine des batteries, lequel est identifié comme l'une des chaînes de valeur d'importance stratégique. Totalisant un investissement d'environ 3,2 milliards d'euros jusqu'en 2031, ce projet, présenté par sept pays, sert d'exemple aux autres chaînes de valeur et devrait être suivi par des initiatives similaires. Pour cet exercice, l'ensemble de la chaîne des valeurs est prise en considération, y compris donc les matières premières primaires nécessaires, leur transformation, leur durabilité et leur recyclage.

De futurs programmes européens comme Horizon Europe, Digital Europe Programme, le Single Market Programme, le Fonds d'innovation, InvestEU, ainsi que tous les programmes structurels seront aussi mobilisés pour soutenir la compétitivité des différentes chaînes de valeur européennes.

La recherche et l'innovation en Europe

L'innovation joue un rôle primordial dans la sécurisation des approvisionnements et contribue ainsi à la compétitivité du secteur. Le développement de solutions innovantes dans des domaines tels que la prospection, l'extraction et la transformation, permet d'accéder à davantage de ressources, alors que de nouvelles solutions technologiques dans les domaines de la substitution et du recyclage peuvent contribuer à diversifier les sources d'approvisionnement.

La mise en place d'un cadre propice à l'innovation en Europe est donc apparue comme une nécessité. C'est ce qui a été réalisé dans le cadre du projet Horizon 2020 avec un volet spécifique consacré aux matières premières. Ainsi, pour la période 2014-2020, ce sont près de 600 millions d'euros qui auront été dédiés par l'Union européenne à la R&D dans le domaine des matières premières.

Horizon Europe, le futur programme de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation pour la période 2021-2027, inclura les matières premières.

Conclusion

Dans un monde changeant et imprévisible, la transition vers une Europe efficiente en ressources et climatiquement neutre ne sera possible qu'en assurant une utilisation efficace des ressources et un approvisionnement durable et diversifié en matières premières.

Les objectifs de la Stratégie européenne des matières premières restent encore valides, mais l'Europe se doit d'adopter une approche plus géostratégique et utiliser davantage ses ressources domestiques, à la fois primaires et secondaires.

Ce n'est qu'ainsi qu'elle pourra réduire les dépendances de ses chaînes de valeur, générer de la valeur économique et garantir que son approvisionnement en matières premières soit éthique et durable.

Ces dernières années, l'Union européenne a mis en place toute une série d'initiatives et des lignes de financement ; elle continuera à le faire, mais l'adoption d'une approche plus coordonnée et concertée, avec la participation de tous les acteurs concernés aux niveaux européen, national et régional, est souhaitable.

Annexe

Initiative	Détail de l'initiative
Comités consultatifs	Raw Materials Supply Group – Approvisionnement en matières premières non énergétiques ; European Innovation Partnership on Raw Materials (EIP-RM) – Recherche et adoption des innovations ; High Level Group on Energy Intensive Industries (HLG EII) – Politiques applicables aux industries à forte intensité énergétique.
Echange de bonnes pratiques	Evaluation and Exchange of Good Practice for the Sustainable Supply of Raw Materials within the EU (2014) ; Legal framework for mineral extraction and permitting procedures for exploration and exploitation in the EU (MINLEX study) ; EC guidance on undertaking non-energy extractive activities in accordance with Natura 2000 requirements (including case studies). Critical Raw Materials and the Circular Economy – Background report (JRC Science Report).
Projets ⁽¹⁹⁾	CEWASTE, Voluntary certification scheme for waste treatment ; COLLECTORS, waste COLLECTiOn systems assessed and good pRacticeS identified ; MINGUIDE, "Minerals Policy Guidance for Europe" ; MINATURA 2020, "Developing a concept for a European minerals deposit framework" ; MINLAND, "Mineral resources in sustainable land-use planning" ; MIREU, "Mining and metallurgy regions in the EU" ; ORAMA, "Optimising quality of information in RAW Materials data collection across Europe" ; ProSUM, Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining waste ; SCREEN, Solutions for CRITICAL Raw materials – A European Expert Network ; SMART GROUND, SMART data collection and inteGRation platform to enhance availability and accessibility of data and infOrmation in the EU territory on SecoNDary Raw Materials.
Financement	<u>Banque européenne d'investissement (BEI)</u> <ul style="list-style-type: none"> • EIB Circular Economy Guide – Supporting the circular transition (2019). • EIB Circular Economy Guide – Supporting the energy transformation (2019). <u>Banque européenne pour la reconstruction et le développement (BERD)</u> <ul style="list-style-type: none"> • Green Economy Transition (GET) (2018). • EBRD Extractive Mining Industries Strategy (2017).
Raw Materials Information System (RMIS)	Le Raw Materials Information System (RMIS) est la plateforme de connaissances de référence de la Commission européenne sur les matières premières non énergétiques (https://rmis.jrc.ec.europa.eu/).

(19) Projets de coordination et de soutien portant sur des matières premières primaires non énergétiques : des projets financés par l'Union européenne dans le cadre du programme Horizon 2020.

Production d'hydrogène décarboné : la troisième voie

Par Laurent FULCHERI

Directeur de recherche, Université PSL, MINES ParisTech, PERSEE (Centre Procédés, Énergies renouvelables et Systèmes énergétiques)

L'hydrogène sera très probablement amené à jouer un rôle clé au cours des prochaines décennies. Malheureusement, la méthode actuelle de production d'hydrogène à échelle industrielle la plus courante – reformage à l'eau (SMR) – s'accompagne, en moyenne à l'échelle mondiale, de plus de 10 tonnes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ par tonne d'hydrogène ! L'électrolyse de l'eau est évidemment une option idéale à long terme pour la production d'hydrogène « décarboné » (H_2 vert). Malheureusement, la réaction de dissociation de l'eau est extrêmement énergivore. Une troisième voie souvent appelée « H_2 bleu », suscite aujourd'hui un intérêt croissant. Cette voie est basée sur la pyrolyse du gaz naturel à haute température pour la coproduction d'hydrogène et de carbone solide. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est thermodynamiquement beaucoup moins énergivore que la dissociation de l'eau. Des recherches sur la pyrolyse du méthane par plasma thermique sont menées à MINES-ParisTech depuis plus de vingt-cinq ans. La technologie est maintenant mature et une première usine commerciale destinée à la coproduction d'hydrogène et de noir de carbone est aujourd'hui en construction aux États-Unis par Monolith Materials, Inc.

L'hydrogène « bleu »

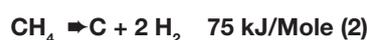
Dans la perspective d'une nécessaire transition vers une « décarbonation » massive de l'énergie, l'hydrogène sera très probablement amené à jouer un rôle clé au cours des prochaines décennies. Malheureusement, la méthode actuelle de production d'hydrogène à échelle industrielle la plus courante – reformage à l'eau ou « Steam Methane Reforming (SMR) » – s'accompagne, en moyenne à l'échelle mondiale, de plus de 10 tonnes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ par tonne d'hydrogène !

La plupart des compagnies pétrolières et gazières travaillent aujourd'hui sur l'option SMR + CCS qui consiste à capturer le CO_2 en sortie de procédé et à le stocker géologiquement. Cette option n'est à ce jour pas déployée à l'échelle industrielle pour des raisons économiques mais également sociétales et environnementales.

L'électrolyse de l'eau est évidemment une option idéale à long terme pour la production d'hydrogène « décarboné » (H_2 vert) sous réserve de l'utilisation d'électricité faiblement carbonée. Malheureusement, la réaction de dissociation de l'eau est extrêmement énergivore, car elle nécessite 285 kJ par mole (eq 1), ce qui correspond à environ 40 kWh/kg H_2 , ce qui rend le développement à grande échelle de cette technologie problématique à court et moyen terme en raison des coûts de production très élevés (de 6 à 4 \$ US par kg H_2 , respectivement pour le court et le moyen terme) malgré des rendements faramineux d'électrolyseurs actuels qui atteignent 60 %.



Une troisième voie émergente maintenant appelée « H_2 bleu », suscite aujourd'hui un intérêt croissant. Cette voie est basée sur la pyrolyse du gaz naturel à haute température (eq 2) pour la production d'hydrogène et de carbone solide.



Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est thermodynamiquement beaucoup moins énergivore que la dissociation de l'eau, car elle nécessite environ sept fois moins d'énergie par masse (ou mole) d'hydrogène (38 kJ vs 285 kJ par mole H_2). Un autre avantage est qu'elle permet la coproduction de deux produits valorisables, respectivement le carbone solide et l'hydrogène.

Procédés de pyrolyse du méthane

Les procédés de pyrolyse du méthane ou du gaz naturel connaissent un regain d'intérêt en raison notamment du faible coût actuel du gaz naturel par rapport au pétrole et des infrastructures existantes pour son transport et sa distribution. Un rapport, publié en 2017 en réponse à une demande émanant du Département américain de l'Énergie et des piles à combustible, « An Overview of Natural Gas Conversion Technologies for Co-Production of Hydrogen and Value-Added Solid Carbon Products », fournit un excellent état de l'art sur le sujet (Dagle, 2017). Les principales conclusions de ce rapport sont synthétisées *infra*.

Les différents procédés envisagés à ce jour peuvent être classés en 5 grandes familles.

Décomposition thermique non catalytique

Ce procédé est depuis très longtemps utilisé dans l'industrie du noir de carbone pour produire un noir de carbone particulier appelé « *thermal black* » (Donnet, 1993) pour des applications allant des pneumatiques à certains équipements électriques (câblerie...). Au cours du temps, le gaz naturel comme matière première a été largement remplacé par des fractions de pétrole lourd, souvent caractérisées par de fortes teneurs en soufre. L'hydrogène produit étant directement brûlé pour fournir l'énergie de décomposition, on ne peut pas considérer cette méthode comme un véritable moyen de production de l'hydrogène. Par ailleurs, le traitement des effluents gazeux qui en résultent (oxydes de soufre et d'azote, notamment), augmente considérablement la complexité des installations, du fait notamment de la nécessité de se conformer aux normes environnementales.

Décomposition thermique catalytique

Cette approche a fait l'objet de très nombreuses recherches à l'échelle du laboratoire PERSEE pour, notamment, réduire les températures de réaction et l'énergie de conversion. Un grand nombre de catalyseurs métalliques et carbonés ont été envisagés. Les catalyseurs métalliques les plus étudiés sont : le nickel, le cobalt et le fer. Ces catalyseurs permettent de produire des carbones qui peuvent être amorphes ou plus ou moins structurés. Les catalyseurs carbonés les plus couramment utilisés sont les charbons actifs et les noirs de carbone. Différentes configurations de réacteurs ont été étudiées : lits fixes, lits circulants, lits fluidisés...

Un procédé catalytique, procédé HYPRO™ d'UOP, a été développé à la fin des années 1960. Ce procédé a rapidement été abandonné, car il n'était pas compétitif par rapport au procédé SMR. Le carbone produit était brûlé pendant l'étape de régénération du catalyseur. Par la suite, plusieurs pilotes de démonstration basés sur le même principe, développés notamment par la NASA, le Département américain de la Défense et le DOE, ont vu le jour sans jamais atteindre le stade industriel.

Bien que de très nombreuses formulations de matériaux catalytiques hautement actifs aient été utilisées, la désactivation des catalyseurs par le dépôt de carbone, leur recyclage et leur stabilité mécanique au cours des cycles restent des problèmes majeurs non totalement résolus à ce jour. Par ailleurs, la récupération du carbone et sa séparation du catalyseur, ainsi que la « contamination » du carbone par des fragments de catalyseur restent également des problèmes majeurs.

L'optimisation de ce type de procédé pour permettre à la fois de produire des carbones valorisables de qualité contrôlée et de l'hydrogène répondant aux spécifications requises reste un défi majeur. Par ailleurs, le caractère incomplet de la décomposition du méthane à l'issue d'un seul passage augmente considérablement la complexité des systèmes du fait de la mise en place nécessaire de

dispositifs pour assurer la séparation et le recyclage des gaz. Aujourd'hui, cette approche continue de faire l'objet de nombreuses recherches, notamment en Allemagne : TUD (Dortmund), RUB (Bochum) et développements à l'échelle pilote, notamment par BASF, Linde Group et ThyssenKrupp (Bode, 2014).

Bain de métaux fondus

Cette approche, qui consiste à faire buller du méthane à travers une colonne remplie de métal en fusion, fait l'objet de nombreuses recherches, notamment au KIT (Karlsruhe), à l'IASS (Posdam), au TNO (Pays Bas), au BNL (États-Unis) (Plevan, 2015 ; Steinberg, 1990), et de développements à l'échelle pilote, notamment à l'initiative de Czero (CA, États-Unis), Mazer (Australie) et Ember-TNO (Pays-Bas).

De très nombreux métaux et alliages métalliques ont été proposés, le rôle du métal pouvant être purement thermique, mais également catalytique. Cette technologie est relativement facile à mettre en œuvre et est peu énergivore ; elle souffre cependant d'importantes limites liées notamment à la température maximale relativement faible du bain fondu, qui, en pratique, peut difficilement dépasser les 1 000°C et qui généralement ne permet pas d'obtenir une conversion totale du méthane. La récupération d'un carbone de bonne qualité et « valorisable » est également problématique. À notre connaissance, les technologies les plus avancées restent au stade du pilote et aucun procédé industriel basé sur cette technologie n'a abouti à ce jour.

Solaire à concentration

De nombreuses recherches sur la pyrolyse du méthane à très haute température par énergie solaire à concentration ont été menées, notamment en France, au PROMES-CNRS, et en Suisse, à l'ETH (Zurich). Ces recherches ont conduit à d'importantes avancées scientifiques, en particulier sur la compréhension des mécanismes de nucléation-croissance, les transferts radiatifs en présence de particules..., et ont donné lieu à de nombreuses et excellentes publications scientifiques (Stenfeld, 2005 ; Rodat, 2007 ; Abanades, 2009). Ces travaux n'ont cependant pas dépassé le stade du laboratoire. La gestion et le transport du carbone solide au sein du procédé posent, en particulier, de sérieux problèmes technologiques non résolus à ce jour. Le contrôle de la qualité des carbones produits et les coûts des centrales solaires restent également des verrous importants pour le déploiement de cette technologie.

Plasmas non thermiques

L'utilisation de plasmas froids ou non thermiques a également été envisagée. À notre connaissance, les avancées les plus significatives ont été réalisées au Canada par la *start-up* Atlantic Hydrogen⁽¹⁾, qui a développé une technologie à un stade pré-industriel à Fredericton (New Brunswick). Malheureusement, la société a fait faillite en

(1) <https://www.technologyreview.com/s/413344/turning-natural-gas-green/>

2015, victime notamment de problèmes technologiques et d'une trop faible valorisation des carbones produits pour pouvoir s'assurer un modèle économique viable. Aujourd'hui, la compagnie Gazprom semble à nouveau s'intéresser à cette approche. À notre connaissance, les recherches en sont au stade du laboratoire.

Plasmas thermiques

Les plasmas thermiques permettent la conversion d'énergie électrique en énergie thermique avec des rendements d'autant plus élevés que la taille de l'installation est importante. Ils permettent un apport d'énergie flexible et contrôlable à très haute température, à partir de tout type de gaz, sans émissions directes de CO_2 . Ils sont particulièrement adaptés aux procédés endothermiques, lesquels nécessitent de (très hautes) températures.

L'idée de base n'est pas récente, puisque le premier brevet sur la décomposition des hydrocarbures par plasma thermique a été publié par Rose (en 1920). De 1920 à 1990, de très nombreux producteurs de noir de carbone ont suivi les traces de ce précurseur ; on peut citer notamment : Goodyear, Ashland Oil and Refining, Continental Carbon ou Phillips Petroleum. Pour un historique détaillé sur le sujet, on se référera à l'article de Gonzalez *et al.* (2007).

Dans les années 1990, la société d'ingénierie norvégienne Kvaerner (aujourd'hui Akker-Kvaerner) a travaillé intensivement sur le développement d'une technologie plasma à courant continu DC pour la coproduction de noir de carbone et d'hydrogène à partir du gaz naturel. Les travaux initiaux ont été conduits en collaboration avec l'équipe du Professeur Bakken, à Sintef-NTNU Trondheim-Norvège. En 1992, un premier pilote plasma de 3 MW a été installé et testé avec succès en Suède dans les installations ScanArc à Hofors. En 1997, Kvaerner a commencé la construction d'une première unité industrielle à Karbomont (au Canada) d'une capacité de 20 000 tonnes de noir de carbone et 70 millions de Nm^3 d'hydrogène par an. Malheureusement, le développement de la technologie a été stoppé en 2003 en raison de problèmes technologiques et d'une qualité insuffisante du carbone produit pour le marché du noir de carbone (Lynum, 1993 ; Gaudernack, 1997).

Quasi simultanément, Fulcheri (1993) a initié des recherches sur le développement d'un procédé basé sur une technologie plasma triphasée. Cette technologie a fait l'objet de nombreux brevets et articles scientifiques. Pour un historique complet sur l'évolution de cette technologie, on se référera à Fulcheri (2015).

Par la suite, ont suivi d'autres recherches menées par différentes équipes basées au Canada, en Chine, aux États-Unis et en Corée du Sud, qui ont elles aussi travaillé sur des dispositifs de laboratoire basés sur différentes technologies plasma (induction, micro-ondes, arc).

Technologie plasma à électrodes en graphite

Le dispositif plasma triphasé développé initialement au PROMES-CNRS, puis à MINES-ParisTech, est alimenté

par une source électrique triphasée fonctionnant directement à la fréquence du réseau, soit 50 Hz, ce qui présente un énorme avantage par rapport aux technologies à courant continu qui nécessitent le recours à des redresseurs AC-DC très coûteux. En sortie de cette alimentation électrique, chaque phase est reliée à chacune des trois électrodes en graphite situées en tête du réacteur. Un écoulement d'hydrogène gazeux est introduit axialement à grande vitesse dans la partie supérieure du réacteur. Sous l'effet du courant électrique, cet écoulement gazeux se ionise et se comporte comme un conducteur électrique gazeux pour former un écoulement plasma. L'amorçage du plasma est initié par contact (court-circuit entre les trois électrodes) ; les trois électrodes sont écartées une fois le plasma établi. Le réglage de la distance inter-électrode permet de « régler » les tensions d'arc. Le courant est, quant à lui, contrôlé à partir de l'alimentation électrique. Une vue schématique du dispositif est représentée dans la Figure 1 ci-après. Les électrodes sont des éléments consommables du dispositif. Leur érosion est compensée par un dispositif d'avance et d'alimentation automatique. Cette érosion reste cependant limitée du fait du mouvement rapide des arcs entre les trois électrodes sous l'effet des alternances de courant et des forces électromagnétiques, chaque électrode agissant successivement comme anode et cathode. Le méthane est injecté en aval du plasma, dans des conditions extrêmement contrôlées. Ce méthane se décompose en carbone solide et en hydrogène sous l'effet des hautes températures. Un filtre à manche situé en sortie du dispositif permet de séparer le carbone solide de l'hydrogène. La température moyenne de réaction peut varier entre 1 200 et 2 000°C en fonction de la qualité recherchée du noir de carbone. Cette température est établie à partir des débits entrant (gaz plasma et méthane) et de la puissance injectée dans le plasma. La Figure 2 de la page suivante présente une vue du dispositif et de la zone d'arc.

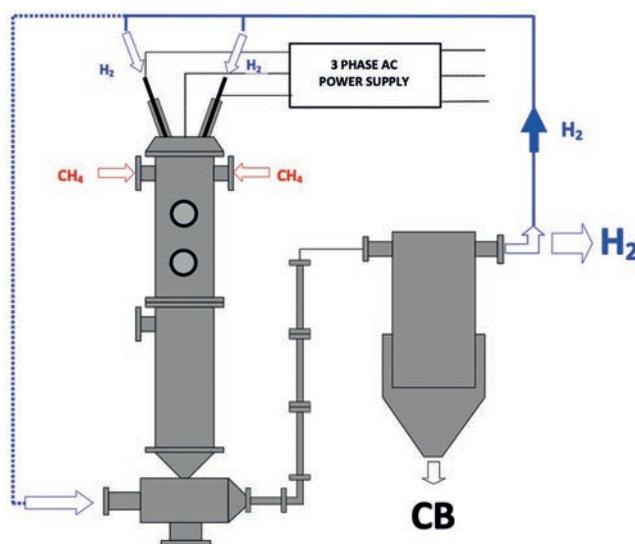


Figure 1 : Schéma de principe du dispositif triphasé.



©D.R.

Figure 2 : Inauguration du réacteur plasma triphasé 250 kW développé au Centre PERSEE de MINES-ParisTech en présence notamment du sénateur Pierre Laffitte, de Vincent Lafèche, directeur de MINES-ParisTech, et de Pete Jonhson et Rob Hanson, tous deux membres fondateurs de Monolith Materials, Inc. (juillet 2019).

En 2012, la *start-up* californienne Monolith Materials, Inc.⁽²⁾ a entrepris le développement industriel de ce procédé pour la co-production de noir de carbone et d'hydrogène en collaboration avec l'équipe PERSEE du Centre MINES-ParisTech. En effet, à court terme, l'économie du procédé dépend largement de la valeur et de la qualité du carbone produit ; le domaine du noir de carbone a été ciblé, car il constitue, à ce stade, le domaine le plus intéressant compte tenu des volumes du marché (12 millions de tonnes par an) et de la forte valeur ajoutée du carbone avec des prix sur le marché compris entre 1 000 et 3 000 USD par tonne en fonction de la qualité (grade) du noir de carbone.

Un premier pilote d'une puissance d'environ 1 MW a été développé et testé avec succès de 2013 à 2018 dans la Baie de San Francisco Redwood City – Seaport, au cœur de la Silicon Valley californienne (voir la Figure 3 de la page suivante).

À l'automne 2018, les résultats obtenus au stade pilote ont été jugés suffisants pour démanteler l'unité pilote de Seaport et initier la construction d'une première unité industrielle, OC1, implantée à Lincoln dans le Nebraska,

d'une capacité de 14 000 tonnes et de 4 600 tonnes par an pour produire, respectivement, du noir de carbone et de l'hydrogène⁽³⁾. Le démarrage de l'installation est prévu en 2020 (voir la Figure 4 de la page suivante). Aujourd'hui, après le démantèlement du pilote de Seaport, la plupart des activités de R&D sont poursuivies en France, en collaboration avec l'équipe PERSEE du Centre MINES-ParisTech, et se concentrent sur le dispositif plasma triphasé de 250 kW.

Co-production de noir de carbone et d'hydrogène

L'hydrogène peut être considéré comme la forme ultime de la « décarbonation » des hydrocarbures. Pour des raisons économiques, l'hydrogène mis sur le marché mondial est produit pour plus de 95 % à partir d'hydrocarbures, principalement à partir du gaz naturel (SMR), avec des impacts directs considérables en termes d'émissions de CO₂.

De même, depuis la révolution industrielle, la production de noir de carbone a régulièrement augmenté pour atteindre aujourd'hui 12 millions de tonnes par an. De nombreuses

(2) <https://monolithmaterials.com/>

(3) https://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2019/08/20191113.0935-Hanson_2019_AIChE_Ammonia-Synthesis_Pyrolysis.pdf



©D.R.

Figure 3 : Vue aérienne du pilote installé en Californie (Seaport).

études montrent que la demande continuera de croître et qu'elle devrait atteindre les 20 millions de tonnes avant 2030. 90 % de la production de noir de carbone sont utilisés dans l'industrie des pneus ; 95 % étant produits à partir du procédé « *furnace* ». Ce procédé, développé il y a environ un siècle, repose sur la combustion incomplète de différents hydrocarbures lourds issus de la distillation. Il est extrêmement polluant en termes d'émissions de SOx et NOx et se caractérise par de très mauvais rendements en carbone, puisque la plus grande partie de l'hydrocarbure de départ est brûlée pour fournir l'énergie nécessaire au craquage de la fraction restante, avec, comme conséquence directe, des émissions de CO₂ comprises entre 3 et 5 tonnes CO_{2eq} par tonne de noir de carbone.

Les développements en cours visent, à terme, à remplacer les procédés mentionnés *supra*, tous deux caracté-

sés par leurs impacts environnementaux majeurs, par un nouveau procédé plus sobre et respectueux de l'environnement (aucune émission directe de CO₂), et plus efficace (rendement en carbone solide voisin de 100 %), pour assurer la co-production d'hydrogène et de carbone solide à partir de gaz naturel et d'une source d'énergie électrique « décarbonnée ».

Qu'est-ce que le noir le carbone ? ⁽⁴⁾

Le noir de carbone est un matériau nanostructuré possédant un taux de carbone très élevé, généralement supérieur à 98 %. Il se présente généralement sous la forme de fines particules quasi sphériques, appelées « particules primaires », qui sont reliées entre elles par des liaisons covalentes pour former des agrégats ou qui peuvent présenter des structures plus ou moins complexes. Les agrégats peuvent former des agglomérats par des liaisons faibles qui peuvent se briser sous l'effet de contraintes mécaniques. Le diamètre moyen des particules primaires varie entre quelques dizaines et quelques centaines de nanomètres en fonction de la qualité des noirs de carbone.

Le terme de « structure » se réfère à l'organisation des particules primaires au sein de l'agrégat. Une structure élevée correspond à une organisation comprenant un grand nombre de particules très ramifiées et largement entrelacées. Une faible structure correspond à une organisation constituée de particules isolées ou d'agrégats (agglomération d'un petit nombre de particules). La Figure 5 de la page suivante représente une image obtenue par microscopie électronique à transmission (TEM) d'un agrégat



©D.R.

Figure 4 : Vue générale d'OC1 (Lincoln, Nebraska).

(4) "What is Carbon Black... not just a scientific name for soot?", Degaussa advanced filler an pigments, Technical booklet.

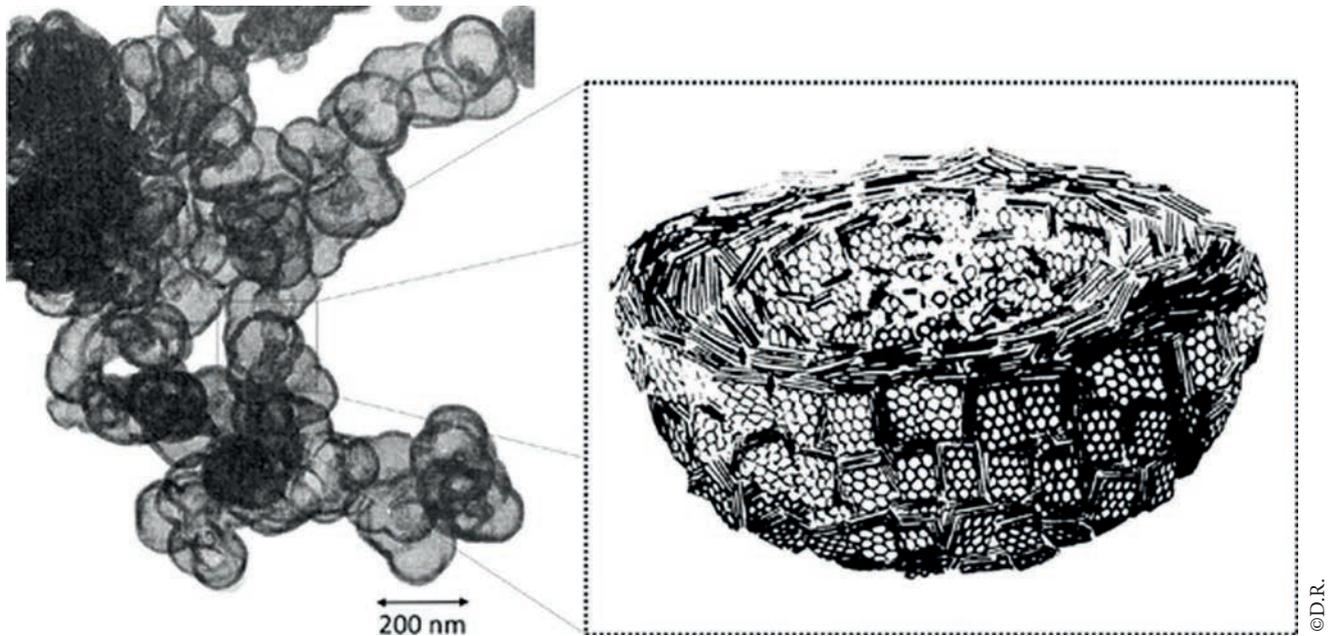


Figure 5 : Image obtenue par microscopie électronique à transmission (TEM) d'un agrégat de noir de carbone caractéristique et représentation schématique de la section d'une particule primaire.

de noir de carbone caractéristique, ainsi qu'une représentation schématique de la section d'une particule primaire.

Les particules de noir de carbone sont généralement composées de petites cristallites présentant un arrangement atomique turbostratique. Une certaine confusion peut exister dans la littérature entre les termes « noir de carbone » et « suie » (ou « soot »). En effet, le premier fait référence à un matériau produit dans des conditions contrôlées, tandis que le second fait référence à un résidu de combustion qui peut être dangereux. Nous verrons dans la suite de cet article que ces deux types de nanomatériaux carbonés sont généralement issus de mécanismes de croissance très similaires.

Les propriétés des noirs de carbone dépendent fortement des conditions de leur synthèse : températures, temps de séjour... Leurs applications industrielles dépendent d'un très grand nombre de paramètres physicochimiques, qui ne seront pas développés ici. Notons cependant que deux paramètres jouent un rôle particulièrement important pour les applications dans les élastomères (pneumatiques) composés, ces paramètres sont : 1) le diamètre moyen des particules et 2) la structure du noir de carbone. Les noirs de carbone natifs ne présentant généralement aucune porosité, il existe par conséquent une relation directe entre la taille des particules et la mesure de la surface spécifique (BET) exprimée en m^2/g . Pour ce qui concerne l'estimation de la structure moyenne des agrégats, les méthodes les plus utilisées sont basées sur leur capacité d'absorption des liquides ; l'estimation de ces deux paramètres clés fait l'objet d'une norme ASTM très largement utilisée.

La formation des noirs de carbone à partir du méthane suit un processus de déshydrogénation continu ultra-rapide de différents composés hydrocarbonés. Dans les premières étapes, on assiste à des ruptures d'un certain

nombre de liaisons C-H sous l'effet des très hautes températures et à la création de liaisons C-C thermodynamiquement plus stables à haute température, générant ainsi des précurseurs alcènes et alcyne. L'acétylène, particulièrement stable à haute température, apparaît comme un précurseur majeur. Dans l'étape suivante, les premiers précurseurs réagissent entre eux pour progressivement former des composés aromatiques, couramment appelés « hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ». Différents mécanismes de formation des HAP ont été identifiés, mais le mécanisme principal est appelé « HACA » (H-Abstraction-Acétylène-Addition). La cinétique du mécanisme HACA décroît au fur et à mesure de la croissance des *clusters*, en raison de l'augmentation de la barrière énergétique. Intervient alors un second mécanisme de croissance résultant des collisions entre HAP. Le principal mécanisme d'assemblage des HAP par collision reste sujet à débat. Les forces de Van der Waals semblent jouer un rôle important, néanmoins l'hypothèse de la création de liaisons covalentes semble également probable, en particulier pour les processus à très haute température (2 000 K). Cette étape de collision des premiers HAP est connue sous le nom de « processus de nucléation », les *nuclei* produits résultant d'un nombre de cycles aromatiques compris entre 10 et 20. L'étape suivante conduit à la formation de nano-gouttes de goudron très visqueuses par collision coalescente de plusieurs *nuclei*. La solidification de ces gouttelettes, aussi appelée « maturation », se produit par un réarrangement interne de la constitution des HAP, en couches turbostratiques, et sous l'effet d'une perte progressive d'hydrogène au sein de la particule. Les particules passent alors d'un état visqueux à un état quasi solide. Une fois cet état atteint, le mécanisme de croissance par collision passe d'un mode de coalescence à un processus d'agrégation continue pour former des agré-



Figure 6 : Principales applications du noir de carbone représentées par chiffre d'affaires sectoriel (production mondiale : 13 millions de tonnes par an).

gats qui, généralement, présentent une organisation fractale, comme illustré sur la Figure 5 de la page précédente.

La production industrielle de noir de carbone a démarré il y a plus de 100 ans. Aujourd'hui, ce secteur fait partie des 50 industries chimiques les plus importantes. Le marché mondial est d'environ 12 millions de tonnes par an pour un chiffre d'affaires d'environ 13 milliards USD. L'essentiel de cette production est utilisé dans les caoutchoucs, principalement les pneumatiques. Le schéma ci-dessus (voir la Figure 6) présente les principaux domaines d'application représentés en fonction du chiffre d'affaires du secteur.

Un procédé potentiellement disruptif

Le procédé plasma DMD (Direct Methane Decarbonization), issu de plus de 25 ans de R&D conduites au sein du laboratoire PERSEE, permet de produire de l'hydrogène « bleu » et du carbone solide par pyrolyse du gaz naturel à très haute température sans émissions directes de CO_2 à partir d'une source d'énergie électrique « décarbonée ». Ce procédé, aujourd'hui disruptif dans le domaine du noir de carbone, est cité dans le dernier rapport établi par l'Agence internationale de l'énergie en 2019. Il pourrait également le devenir en ce qui concerne la production d'hydrogène⁽⁵⁾.

Ce procédé nécessite, en fonction de la qualité du carbone produit, entre 10 et 20 kWh par kg H_2 , ce qui est très inférieur à l'électrolyse de l'eau qui nécessite entre 60 et 80 kWh par kg H_2 .

Ce procédé utilisant du méthane (CH_4) comme matière première et de l'électricité (décarbonée), sa viabilité économique actuelle dépend largement : 1) du coût du gaz naturel, 2) du coût de l'électricité et 3) de la valeur du carbone produit. Rappelons qu'en termes de masse, 1 tonne de méthane permet de produire 250 kg d'hydrogène... et 750 kg de carbone !

Ainsi, à court terme, le développement de cette technologie va se focaliser logiquement sur la production de noir de carbone, un nanomatériau carboné massivement utilisé dans l'industrie (12 millions de tonnes par an) et présentant une valeur ajoutée élevée. Après avoir développé avec succès un pilote en Californie, une première unité industrielle a été construite par Monolith Materials, Inc., dans le Nebraska, État américain qui possède d'importantes fermes éoliennes pour la production d'électricité « décarbonée », ainsi que d'importantes ressources et infrastructures de gaz. La mise en service est prévue pour cette année (2020).

À moyen terme, en fonction des décisions politiques qui pourraient être prises (taxes, crédits CO_2 ...) et des conditions économiques en vigueur, le développement de cette technologie pourrait s'orienter vers la production massive d'hydrogène. Se posera alors la question fondamentale de l'utilisation du carbone solide à de très grandes échelles. Sur la base d'une production annuelle d'hydrogène de 80 millions de tonnes (production actuelle), la production d'hydrogène par pyrolyse du méthane conduirait à la production de 240 millions de tonnes de carbone par an, ce qui est 20 fois supérieur au marché mondial du noir de carbone. Dans cette perspective, plusieurs pistes sont actuellement à l'étude au sein de l'équipe PERSEE, comme l'utilisation du carbone dans les matériaux de construction (béton, ciments...) ou encore l'utilisation du carbone comme amendement dans les sols, à l'instar de ce qui peut être fait avec du biochar ou de la lignite (voir l'Encadré de la page suivante).

À plus long terme, le procédé plasma DMD pourrait apparaître comme une alternative crédible à l'option SMR avec stockage de CO_2 (CCS), qui est actuellement à l'étude chez la plupart des pétroliers. En effet, même si, dans ce scénario, l'énergie du carbone est perdue, le stockage souterrain du carbone solide présente de nombreux avantages par rapport au stockage du CO_2 , aussi bien sur le plan des coûts de mise en œuvre que sur celui de la sécurité et de l'acceptabilité sociétale.

(5) IEA, "The future of hydrogen", Report prepared by the IEA for the G20, Japan, June 2019, <https://webstore.iea.org/the-future-of-hydrogen>

Utilisation du carbone dans les sols

Parallèlement à la photosynthèse qui se déroule dans la partie aérienne des plantes, des recherches récentes démontrent le rôle crucial du carbone dans les sols, notamment en ce qui concerne la diversité microbiologique vivante : des bactéries, des champignons..., qui se développent en symbiose avec les végétaux et qui jouent un rôle clé dans le transport de l'eau et des nutriments inorganiques vers les racines.

Une idée émergente envisagée au sein de l'équipe PERSEE consiste à étudier la possibilité d'utiliser le carbone – par exemple, par pyrolyse – dans les sols. L'utilisation du carbone solide dans les sols pourrait permettre d'accroître la croissance des cultures, tout en stockant le carbone solide dans ces derniers de manière utile, durable et sûre⁽⁶⁾, à l'instar du carbone d'origine organique. Le carbone natif produit par le processus de pyrolyse plasma étant pulvérulent et hydrophobe, celui-ci devra, au préalable, avant son injection dans les sols, être prétraité afin d'augmenter son caractère hydrophile et, idéalement, pour pouvoir y introduire les propriétés suivantes :

- capacité d'échanges anioniques afin de lutter contre le phénomène de lessivage affectant les nitrates,
- capacité d'échanges cationiques,
- rétention d'eau,
- conductivité électrique,
- surface spécifique/porosité afin de maximiser les capacités de liaison et fournir des sites d'habitat aux micro-organismes,
- fixation d'éléments, tels que N, P, K...

(6) PELLERIN S., BAMIÈRE L. (pilotes scientifiques) et al., *Stocker du carbone dans les sols français – Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ?*, Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 pages, juillet 2019.

Références

DAGLE R. A. et al. (2017), *An Overview of Natural Gas Conversion Technologies for Co-Production of Hydrogen and Value-Added Solid Carbon Products*, United States: N. P., DOI: 10.2172/1411934.

DONNET J. B. (1993), *Carbon Black: Science and Technology*, Second Edition, CRC Press Published, May 13.

BODE A. et al. (2014), "Research cooperation develops innovative technology for environmentally sustainable syngas production from carbon dioxide and hydrogen", presented at the 20th World Hydrogen Energy Conference, Gwangju Metropolitan City, Korea, June 16-21.

PLEVAN M. et al. (2015), "Hermal cracking of methane in a liquid metal bubble column reactor: Experiments and kinetic analysis", *International Journal of Hydrogen Energy* 40.

STEINBERG M. (1999), "Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming", *Int. J. Hydrogen Energy*, 24, p. 771.

STEINFELD A. (2005), *Solar thermochemical production of hydrogen: a review*, *Solar Energy*, vol. 78, issue 5, pp. 603-615.

RODAT S. et al. (2009), "Hydrogen production from solar thermal dissociation of natural gas: development of a 10 kW solar chemical reactor prototype, Solar Energy Solar thermal cracking of me-

thane in a particle-flow reactor for the co-production of hydrogen and carbon", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 83, issue 2, pp. 1599-1610.

ABANADES S. & FLAMANT G. (2007), "Experimental study and modeling of a high-temperature solar chemical reactor for hydrogen production from methane cracking", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, issue 10-11, pp. 1508-1515.

ROSE J. R., *Process of and apparatus for producing carbon and gaseous fuel*, United States Patent Office (1,352,085).

GONZALEZ-AGUILAR J. et al. (2007), "Carbon nanostructures production by gas-phase plasma processes at atmospheric pressure", *J Phys D Appl Phys* 40(8).

LYNUM S. et al. (1993), *Production of carbon black*, Patent WO 9320154.

GAUDERNACK B. & LYNUM S. (1996), "Hydrogen from natural gas without release of CO₂ to the atmosphere", *In Proceedings of 11th World Hydrogen Energy Conference*, Stuttgart, Germany, pp. 511-523.

FULCHERI L. & SCHWOB Y. (1995), "From methane to hydrogen, carbon black and water", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 20, n°3, pp. 197-202.

FULCHERI L. et al. (2015), "Three-phase ac arc plasma systems: a review", *Plasma Chemistry Plasma Processing* 35(4):565e85.

Raw materials and new forms of dependency

Introduction

Isabelle Wallard, engineer from the Corps des Mines, Conseil Général de l'Économie

Increased pressure on raw materials because of the energy and digital transitions in developed countries and economic development elsewhere

From value chains to pricing mechanisms: A comprehensive analysis of base metal markets

Patrice Christmann, consultant and researcher, Société Krysmine, and Yves Jégourel, associate professor at Bordeaux University, assistant director of Cyclope and senior fellow at the Policy Center for the New South

Mineral (nonenergy) raw materials are an indispensable factor of production in human societies. The structure of the complex, globalized value chains that underlie the production of most of the goods and services that contemporary societies commonly use is described and then illustrated with an account of the major transactions in copper from the production and trading of minerals to the supply of this metal to the world market for the production of consumer goods. Products of mining (concentrates) and metallurgy (refined metals, alloys) are intensely traded internationally; the major players in these transactions often are not mining companies or metal-working firms. The mechanisms of commercialization and for setting prices (which connect mining companies or metallurgical firms to manufacturers downstream in the value chain) are then described along with the key role played by traders in raw materials and the functions of the markets of secondary products.

Various energy scenarios and the future availability of raw materials

Olivier Vidal, Institute of Earth Sciences (ISTerre), Grenoble-Alpes University, CNRS

The world's population, the average GDP per inhabitant, and the consumption of energy and raw materials all follow the same trend: a nearly exponential growth rate for more than a century now. Humanity is using an unprecedented level of mineral resources: 70 billion tonnes of minerals extracted from under the earth per year and a consumption per inhabitant that we have never previously observed. Future consumption is predicted to fall in the line with this past trend. The annual quantity of metal to be produced from now till 2050 could amount to from three to ten times more than the current quantity. The cumulative amount of metals to be produced during the next 35 years will exceed the cumulative quantity extracted since Ancient Times. For mineral resources, the stakes are enormous

– with major implications for all sectors of the economy and technology, in particular, energy. This overview insists on the many factors and dynamic nature of the trends observed.

The importance of rare earths for information and communications technology: The case of Orange

Samuli Vaija, analyst of product life cycles and the circular economy, Orange, and Éric Philipot, environmental advisor

Since 2016, when its business processes started taking account of the circular economy, Orange has undertaken several programs to improve its knowledge of materials. It has carried out life-cycle analyses to identify materials with the heaviest environmental impact and then expanded them to cover the equipment used for ICT networks. A program was launched in 2018 for updating the map of the Orange Group's exposure to critical materials. It focuses on the new forms of technology for which specific materials will probably be necessary. Orange has also worked on setting standards (at ADELE and ITU-T) for the efficiency of materials. It intends to draft a state-of-the-art proposal about these efficiency requirements and integrate them in its procurement processes.

Recycling will not satisfy needs

Grains of wheat on a chessboard, an illustration of the limits on the growing consumption of metals and on recycling as a source of metals

Jean-François Labbé, former geologist-economist at BRGM

Calculating the number of grains of wheat necessary to fill the 64 squares on a chessboard by starting with one and then doubling the amount in each successive square, as the legend has told us, provides an image that corroborates the impossibility of an endlessly rising demand for metals. The worldwide demand for most metals has grown without hardly any interruptions since the start of the industrial era. A variant on this legend that takes account of recycling confirms that we are deluded to imagine that recycling – even optimal or at 100% – will offer us a sustainable economic growth without any need of new raw materials.

Recycling circuit boards in France

Christian Thomas, founder and scientific director, TND, and president of the business cluster TEAM²

Printed circuit boards at the end of the life cycle of the equipment containing them are, once recuperated, a rich source of precious, critical minerals. Recycling them is not only useful but also profitable. Thanks to the adoption

of regulations about waste electronic and electrical equipment (WEEE) and the end of the life cycle of motor vehicles, the waste collection and primary processing of these materials has improved. France has devoted major R&D efforts to extracting and purifying the metals contained in WEEE wastes, which are hard to process. However the country does not yet have a strong enough metal-working industry. Most metals in our wastes are sent abroad, mainly to southeastern Asia. An overview of the current situation, of players on the French market and of emerging projects...

French industrialists and the risks threatening their supply chains

CSF Mines et Métallurgie and the supply of metals and strategic materials

Christel Bories, president of CSF Mines et Métallurgie, CEO of Eramet Group

The supply of strategic metals is a major issue of national sovereignty. It is also a concern for CSF Mines et Métallurgie, a multiparty organization and the inescapable partner in the relations between public authorities and firms in mining and metallurgy. The Covid-19 pandemic has made it even more urgent to see to the security of our supply chains, especially in strategic metals and materials, and to develop an ambitious public policy.

Metals critical to the French economy

Gaëtan Lefebvre, Department of Georesources, BRGM

A metal is said to be critical following an assessment and, therefore, in relation to our perceptions. A critical metal strongly risks being in shortage, and this shortage would have a heavy impact. For French industrialists, there are many sorts of risks: bottlenecks on the supply chain; stiff competition between sectors; the impossibility of replacing scarce materials for precise uses; and the unavailability of metals for geological or technical reasons. Studies of criticality, as conducted by BRGM, seek to improve our knowledge of these risks so as to orient economic agents toward the best solutions for protecting themselves and conducting concrete actions.

French industry's titanium supply: The current situation and prospects

Pierre-François Louvigné, consultant

Titanium is an irreplaceable chemical element for several industrial processes in high technology: aeronautics, nuclear power, weaponry, medicine, petrochemistry, the space industry, etc. France and Europe depend on importations of titanium from great powers such as the United States, Russia or China – countries that are competitors in the sectors that use this element. Drafting a supply chain strategy thus calls for solid knowledge about the market and a dynamic analysis of the risk factors of dependency, especially during a crisis. For these reasons, titanium is subject to an economic and geostrategic monitoring supported by big industrial groups in France and by the state's services concerned with the access to raw materials.

Ambition 2025: The Orange Group's strategy for developing a digital technology that is less energy-intensive and more economical in critical materials

Philippe Tuzzolino, director of Environment, Orange Group

Even as customers are increasingly using it, digital technology must, given the climate emergency, reduce its environmental footprint. In compliance with the objective of limiting global warming to 1.5°C and with the recommendations of the Intergovernmental Panel on Climate Change and the Paris Agreement, Orange wants to pursue a path toward lowering the CO₂ emissions stemming from its activities. It has set the ambitious objective of reducing the absolute quantity of its CO₂ emissions in 2025 by at least 30% compared with 2015. Orange will achieve this mainly by relying more on electricity from renewable sources (more than 50% by 2025). In pursuit of these new goals, studies are being planned of the resources necessary for this policy. Orange manufactures nothing directly; it purchases all its equipment. Its Strategic Committee on the Circular Economy, set up in 2017, has among its fields of action the risks related to raw materials and scarce resources. Its actions include new research on the materials critical to the Group, their procurement processes and relations with suppliers.

Raw materials, their criticality and the automobile industry's strategic axes

Gildas Bureau, head of the work group PFA Filière Automobile et Mobilité

The automotive sector with 400,000 jobs in France is one of the national strategic industries. This industry uses many increasingly complex technological equipment that it has managed to make reliable and affordable. The integration of these technological functions is necessary for active and passive safety, passenger compartment comfort, compliance with environmental standards and for on-board connectivity.

These technical, economic, sustainable and safe performances are the fruit of technological developments and breakthroughs that have been made possible thanks to the industrial use of raw materials with exceptional properties, whatever they can be electronic, electrical, magnetic, optical...

If we go up the supply chain of these automotive components, there are materials and raw materials. Even at the time of digitalization, an automobile remains a collection of more than a ton of materials.

As we will see, these raw materials are at the heart of a complex, international and interdependent ecosystem with high stakes. In this context, different levers can be used to establish one – or should I say several strategies – for the management of strategic raw materials.

The reactions of nation-states and of the European Commission

The war for rare metals, the hidden face of the energy and digital transitions

Interview with Guillaume Pitron, journalist and film director

The US government's strategy for seeing to the security of the supply of critical minerals for industry

Alexis Sahaguian, Direction Générale du Trésor, Matthieu Fernandez and David Krembel, embassy of France in the United States

The response to the question of critical raw materials in the United States has taken shape around many axes: geopolitical (rivalry with China), industrial (repatriating the production of goods in strategic sectors, seeing to the security of the supply chain) and ideological (the country's autonomy for reasons of national security). The federal government's strategy has methodically been designed like a pyramid, each ministry providing input and means of action under a presidential order of December 2017. However this leaves out of account several questions related to local environmental issues and multilateral trade, questions overridden by the objectives set by the federal government.

A sustainable consumption of natural resources: A planetary issue

Doris Nicklaus, engineer from the Corps des Ponts, des Eaux et des Forêts, and Dominique Viel, honorary general controller

Given the increasing extraction of resources worldwide, the sustainability of using them has become a full-fledged public policy question at the international, European and national levels. France's first "resource plan" was introduced in July 2018. As part of the roadmap for a circular economy, a second plan is being drafted with a focus on mineral resources for the low-carbon transition and on an industrial policy with ambitious goals for recycling materials. As the work on these plans has shown, France and Europe are dependent for their supply of minerals and metallic components even as demand is constantly growing – including for satisfying needs related to the low-carbon transition and development of digital technology. The Covid-19 economic recession is revealing this fragility. It raises questions about the relocation of industrial activities, including mining and the processing of raw materials.

France's policy of mineral (nonenergy) raw materials

Rémi Galin and Jean-François Gaillaud, Direction of Water and Biodiversity, DGALN/MTES

France's dependency on metals is not new. When setting objectives for the supply of metals however, the situation to be taken into account has changed. The vulnerability of our leading industries, the multiplication of substances, and the pressure on the planet's resources are new parameters that require placing the question of the supply of minerals in a more virtuous economic model: the model of the circular economy. France has dynamic

strategic guidelines in its "resource plan". Furthermore, it can rely on the operational expertise of the CNI's industry-based strategic committees, in particular the committee on mining and metal-working industries. By mobilizing European forces and our industries in mining and metallurgy and in innovation, industrial programs should take shape on the basis of national resources and in collaboration with operators with whom we share the same values.

The European raw materials strategy

Gwenole Cozigou, director, Direction Industrie Durable et Mobilité

Raw materials, essential to our modern lifestyle, are used in a wide variety of products ranging from construction materials to the food industry, not to forget electronics or "clean" energy. They will, in the future, remain essential to the competitiveness and resilience of industrial value chains on the scales of the European Union and the global economy. Given that the Covid-19 pandemic has exposed points of vulnerability in supply chains, Europe must actively pursue a more strategic approach that considers the access to resources to be an essential factor for carrying out the green transition and reducing its dependency on critical raw materials.

Miscellany

A carbon-free production of hydrogen: The third method

Laurent Fulcheri, research director, Université PSL, MINES ParisTech, PERSEE (Centre Procédés, Énergies Renouvelables et Systèmes Énergétiques)

Hydrogen will probably play a key role in the next decades. Unfortunately, the most current method for H₂ production, often referred as "grey H₂": Steam Methane Reforming (SMR) is responsible, in average at the worldwide scale, for more than 10 tons CO₂eq per ton of Hydrogen! Water electrolysis is obviously an ideal long term option for the production of decarbonized H₂ ("green H₂"). Unfortunately water splitting reaction is extremely energy intensive. A third way which is today coming back on the front of the wave, often called as "Blue H₂", is based on the high temperature Natural Gas pyrolysis for the co-production of Hydrogen and solid carbon. The main advantage of this approach is that is thermodynamically much less energy intensive than water splitting. Research on Methane pyrolysis by thermal plasma have been carried out at MINES-ParisTech for more than 25 years. The technology is now mature and a first commercial plant for the co-production of hydrogen and carbon black is today under construction in the US by MONOLITH Materials, Inc.

Issue editor: Isabelle Wallard

Ont contribué à ce numéro



D.R.

Christel BORIES est présidente directrice générale d'Eramet et présidente du CSF Mines et métallurgie.

Diplômée de l'École des hautes études commerciales (HEC), Christel Bories a d'abord exercé en tant que consultante en stratégie chez Booz Allen & Hamilton, puis au sein du cabinet Corporate Value Associates (1986-1993).

Elle a ensuite rejoint le Groupe Umicore pour occuper le poste de directrice de la Stratégie et du contrôle (1993-1995). Elle a par la suite évolué au sein du Groupe Pechiney où elle a été successivement : directrice de la Stratégie et du contrôle de gestion (1995-1998), directrice du secteur Emballages (1999-2003) et membre du comité exécutif.

Après l'acquisition de Pechiney par Alcan, elle devient membre du comité exécutif d'Alcan et présidente et CEO d'Alcan Packaging (2003-2006), puis d'Alcan Engineered Products (2006-2010) devenu ensuite Rio Tinto Alcan. En 2011, suite à la cession par Rio Tinto des activités aluminium, elle devient CEO de Constellium.

En 2013, elle rejoint le secteur de la pharmacie en tant que directrice générale déléguée d'Ipsen, qu'elle quittera en 2016.

En février 2017, elle rejoint le Groupe Eramet, dont elle devient la présidente directrice générale.

Christel Bories est administratrice indépendante de la société Legrand.

Son parcours témoigne d'une expérience approfondie de l'industrie, des questions stratégiques, ainsi que de la transformation des entreprises, le tout dans des contextes très internationaux.



D.R.

Gildas BUREAU justifie d'une maîtrise de chimie des matériaux de l'Université de Nantes et d'un Master en caractérisation des matériaux de l'Université de Poitiers. Il est maître-expert matériaux au sein du Groupe PSA.

Avec les communautés d'experts internes et externes, il anime les activités des matériaux stratégiques au sein du constructeur automobile précité et au sein de la filière automobile PFA (filiale automobile et mobilité).

Son parcours professionnel s'est déroulé au sein de différents groupes industriels. Ces choix ont été guidés par les matériaux, la qualité. Cela commence par l'étude des couches minces pour des barrières thermiques d'aubes de turbine aéronautique, au sein d'un organisme de recherche aéronautique.

Puis, il est le responsable d'un laboratoire expert dans les polluants des bâtiments, qui couvre l'analyse des maté-

riaux amentifères et contenant du plomb, les formations des professionnels du bâtiment et le suivi des accréditations COFRAC pour les ministères de tutelle.

Ensuite, il travaille chez un équipementier automobile spécialisé dans les systèmes d'injection Diesel, où il est en charge du suivi du retrait du chrome hexavalent et du plomb, puis du développement des matériaux et procédés par voie sèche avant de rejoindre le Groupe PSA.



D.R.

Patrice CHRISTMANN est un chercheur et un consultant indépendant spécialisé dans le domaine des matières premières minérales. Il est titulaire d'un Doctorat en géologie appliquée (Grenoble, 1979) et d'un diplôme de l'ESCP Europe (1993). Il a servi le BRGM, le service géologique national français, de 1977 à 2016, notamment dans les domaines

des ressources minérales, de la recherche et de la stratégie. Détaché pendant huit ans à Bruxelles, dont trois ans auprès de la Commission européenne et cinq ans en tant que Secrétaire général de l'Association des services géologiques européens, EuroGeoSurveys. Il a été membre du COMES, au titre du BRGM, pendant cinq ans et membre du groupe de travail « Approvisionnement en matières premières » de la Commission européenne pendant vingt ans. Aujourd'hui, il enseigne la gestion durable des ressources minérales à l'EPF, une école d'ingénieurs, et intervient plus ponctuellement à Mines ParisTech. Il exerce une activité d'évaluation scientifique pour la Commission européenne et d'autres clients. Il appuie plusieurs projets européens en tant qu'expert associé.

Il est membre du Groupe international pour l'étude des ressources naturelles des Nations Unies (GIER – resourcepanel.org).



D.R.

Gwenole COZIGOU est directeur, en charge de l'Industrie durable et de la Mobilité, au sein de la Commission européenne.

Économiste de formation, il est fonctionnaire à la Commission européenne depuis 1985 dans les domaines de la politique industrielle et des relations extérieures. Ancien chef adjoint du Cabinet du Commissaire Liikanen en charge

de la politique d'entreprise et industrielle, il a occupé plusieurs postes d'encadrement dans les services suivants :

- Industrie alimentaire et biotechnologie ;
- Coordination de la législation du marché intérieur pour les biens de consommation ;
- Politique d'entreprise et industrielle ;
- Défense, industries aérospatiales et maritimes.

Depuis décembre 2008, il est directeur à la DG Growth (DG pour le Marché intérieur, l'industrie, l'entrepreneuriat et les PME), et est responsable pour les questions de compétitivité et de la législation du marché intérieur de l'Union européenne dans divers secteurs industriels.

Aujourd'hui, ses principales responsabilités couvrent : l'économie circulaire, la politique européenne pour l'énergie, les industries énergivores, la construction, l'industrie automobile, les matières premières et les métaux, l'industrie ferroviaire, l'industrie maritime et les industries d'ingénierie.



D.R

Matthieu FERNANDEZ est attaché au service économique régional de l'Ambassade de France aux États-Unis, où il travaille sur la politique commerciale américaine pour la direction générale du Trésor depuis juin 2019. Précédemment en poste à l'Atlantic Council, *think-tank* de politique étrangère basé à Washington, il est diplômé de l'École des affaires internationales de Sciences Po.

nales de Sciences Po.



D.R

Laurent FULCHERI est diplômé de l'École nationale supérieure des Arts et Métiers (ENSAM-ParisTech). Il obtient un DEA de l'INP-Grenoble en 1984, un Doctorat en 1989 et une Habilitation à Diriger des Recherches en 2003. En 1989, il entre à l'École des Mines de Paris (CENERG) en tant que responsable scientifique. En 1995, il crée une nouvelle équipe

de recherche sur les procédés plasmas. Il est nommé maître de recherche en 2007, puis directeur de recherche en 2013.

Depuis 2016, il est professeur honoraire à l'École d'ingénierie de l'Université de Kwazulu-Natal, au Howard College Campus de Durban (RSA).

Responsable de la spécialité doctorale « Énergétique et procédés » – ED SMI 432 – de 2012 à 2018, il est depuis 2019 responsable de la spécialité doctorale « Énergétique et génie des procédés » – IED ISSME 621. Il supervise à ce titre entre 60 et 80 doctorants appartenant aux quatre centres de recherche du département « Énergétique et procédés » de MINES-ParisTech (flux annuel moyen de 20 à 30 nouveaux doctorants par an).

Il est l'auteur de 83 articles publiés dans des revues scientifiques internationales de rang A et a encadré 19 doctorants à ce jour (h-index = 18 Web Of Science & Scopus ; h-index = 21 Google Scholar). Il a déposé 12 brevets, dont 7 ont été étendus à l'échelle internationale.

Ses activités de recherche portent sur le développement de procédés plasmas thermiques et non thermiques pour les applications énergétiques et environnementales.

Laurent Fulcheri travaille notamment depuis plus de vingt ans sur le développement d'un nouveau procédé de décarbonation directe du méthane (DMD) pour la co-production d'hydrogène et de carbone solide nanostructuré (son HDR,

obtenue en 2003 portait sur cette thématique).

Outre ses activités sur les procédés plasmas, Laurent Fulcheri est un spécialiste de la modélisation CFD et MHD appliquée au traitement thermo-chimique assisté par plasma.



D.R

Jean-François GAILLAUD est diplômé de l'École des Mines d'Alès (2000). Il a débuté sa carrière dans l'administration en tant qu'inspecteur des installations classées au sein de la direction régionale de l'industrie et de l'environnement de Picardie. En 2005, il rejoint le Secrétariat général des DRIRE pour accompagner la mise en œuvre de la LOLF au sein du

réseau des DRIRE. En 2008, il est nommé à la DIRECTION des Pays-de-La-Loire, comme chargé de mission en charge des filières navales et aéronautiques. En 2011, il devient conseiller Développement durable et industrie au sein du Service économique de l'Ambassade de France aux Pays-Bas. En 2015, il est nommé adjoint au chef du bureau des Éco-industries à la direction générale des Entreprises, où il sera en charge des sujets relatifs à l'utilisation efficace des ressources et prendra part aux travaux d'élaboration de la feuille de route « Économie circulaire ». Depuis 2019, il est adjoint au chef du bureau de la Politique des ressources minérales non énergétiques.



D.R

Rémi GALIN est diplômé de l'École des Mines d'Alès (1981). Après une première expérience dans une entreprise de travaux routiers, il rejoint le ministère de l'Industrie en 1983, comme Secrétaire du Comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats. En 1987, il est nommé chef de la division d'exploitation du système d'oléoduc militaire franco-américain Donges-Melun-Metz au sein de la direction des Hydrocarbures du ministère de l'Industrie. En 1994, il est nommé à la direction régionale de l'industrie et de l'environnement d'Île-de-France et prend en charge le développement économique des petites et moyennes industries en Essonne. En 1996, il devient adjoint au chef de la division Sous-sol de la DRIRE Île-de-France et anime le contrôle des exploitations de carrières, d'hydrocarbures, de géothermie profonde et de stockages souterrains de gaz. En 2002, il est nommé chef de l'unité territoriale en Essonne pour diriger le contrôle des installations classées pour la protection de l'environnement. Depuis 2012, il est chef du bureau de la Politique des ressources minérales non énergétiques.

co-américain Donges-Melun-Metz au sein de la direction des Hydrocarbures du ministère de l'Industrie. En 1994, il est nommé à la direction régionale de l'industrie et de l'environnement d'Île-de-France et prend en charge le développement économique des petites et moyennes industries en Essonne. En 1996, il devient adjoint au chef de la division Sous-sol de la DRIRE Île-de-France et anime le contrôle des exploitations de carrières, d'hydrocarbures, de géothermie profonde et de stockages souterrains de gaz. En 2002, il est nommé chef de l'unité territoriale en Essonne pour diriger le contrôle des installations classées pour la protection de l'environnement. Depuis 2012, il est chef du bureau de la Politique des ressources minérales non énergétiques.

Yves JÉGOUREL est maître de conférences à l'Université de Bordeaux, directeur-adjoint de CyclOpe et *Senior fellow* au Policy Center for the New South. Yves Jégourel mène des recherches sur l'économie des matières premières et la gestion des risques financiers. Ses travaux les plus récents portent sur l'intégration internationale des marchés gaziers, sur la modélisation du comportement du négociant en ma-



D.R

tières premières, ainsi que sur la dynamique des prix du minerai de fer. Il est l'auteur de plusieurs livres dans le domaine de la finance, dont un ouvrage sur les produits dérivés financiers. Yves Jégourel est par ailleurs vice-doyen au sein de la Faculté d'économie, de gestion et d'AES de l'Université de Bordeaux, où il dirige le Master 2 « Banque, finance et négoce international ». Il est également ancien auditeur de l'Institut des hautes études de Défense nationale (IHEDN) et conseiller du commerce extérieur de la France.



D.R

David KREMBEL est conseiller Écologie, énergie et changement climatique au Service économique régional de l'Ambassade de France aux États-Unis depuis septembre 2016. En 2013, il fait partie du Secrétariat général du Débat national sur la transition énergétique, avant de rejoindre la direction générale de l'Énergie et du climat au sein du ministère de

l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en tant que chef du bureau des Infrastructures gazières. Il intègre le Corps des Mines en 2012. Auparavant, il a occupé différentes fonctions au sein de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Il a débuté sa carrière à l'Institut franco-allemand de recherche pour la Défense, puis comme responsable de subdivision à la direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement d'Alsace. David Krembel est ingénieur des Mines de Douai et diplômé d'études approfondies en chimie organique et macromoléculaire de l'Université de Lille.



D.R

Jean-François LABBÉ est ingénieur de l'École polytechnique de Palaiseau et ingénieur civil de l'École des Mines de Paris, en spécialité Sciences de la Terre. Il est entré au BRGM (Bureau de Recherches géologiques et minières) en 1980. Il a pris sa retraite en 2019.

Il y a d'abord mené pendant une vingtaine d'années une série de

projets d'exploration minière pour divers métaux (or, cuivre, plomb, zinc, tungstène, étain, etc.) dans divers pays (Arabie Saoudite, Yémen, Congo, Gabon, Ghana, Indonésie, Antilles), sur divers financements (étatiques, institutionnels ou privés). Il a ensuite supervisé ou suivi de tels travaux dans plusieurs autres pays, principalement en Afrique (Côte d'Ivoire, Soudan, Mali, Mauritanie, Kenya).

Entre 2001 et 2005, il a été détaché à la Coopération française comme assistant technique auprès du ministère des Mines et de la géologie de Guinée. Puis, entre 2006 et 2009, il a dirigé le projet d'évaluation des ressources en bauxite des permis de Batafong et Lélouma, en Guinée, pour le compte de Mitsubishi Corp., alors détenteur des

permis, avec plusieurs campagnes de forage, jusqu'à la certification des ressources.

Entre 2010 et 2018, après avoir rejoint l'unité du BRGM en charge d'économie minérale, il y réalise ou contribue à plusieurs études de marché et analyses de criticité de divers métaux rares (béryllium, cobalt, lithium, platinoïdes, sélénium, tellure, terres rares, tungstène, etc.) pour le compte du ministère français en charge du Développement durable. Il a aussi réalisé ou contribué à des panoramas de marchés d'autres métaux (bauxite/alumine/aluminium, chrome, cuivre, indium, nickel) pour d'autres demandeurs. Il a collaboré avec le groupe de travail *ad-hoc* sur la criticité des matières premières de la Commission européenne. Il s'est aussi particulièrement intéressé aux limites de la contribution du recyclage pour l'approvisionnement en métaux et a publié quelques communications sur le sujet. Parallèlement, il a continué à participer à des projets d'exploration minière menés par le BRGM en Afrique. Il a ainsi dirigé un projet d'exploration régionale par géochimie au Burkina Faso (2015-2016), participé à un projet d'interprétation géophysique aéroportée au Malawi (2017) et mené un projet d'exploration régionale par géochimie dans le centre-sud de la Guinée (2018-2019), tous ces projets étant financés par la Banque mondiale.

Gaétan LEFEBVRE est géologue et analyste des marchés des métaux au BRGM.

Après un double cursus d'ingénieur de l'École nationale supérieure de géologie de Nancy et d'économie des ressources naturelles à la Toulouse School of Economics, Gaétan Lefebvre est entré au BRGM en 2014. Il y réalise des analyses économiques et prospectives sur les marchés de divers métaux et leurs chaînes de valeur pour le compte d'acteurs publics et privés. Ses spécialités comprennent les marchés du lithium, du cobalt et des terres rares. Il participe régulièrement aux travaux du Comité aux métaux stratégiques (COMES) et à la diffusion de ces travaux *via* le portail public Mineralinfo (www.mineralinfo.fr).



D.R

Pierre-François LOUVIGNÉ est physicien de formation, expert en matériaux. Il a mené l'essentiel de sa carrière dans le domaine de l'innovation au profit de la Défense. Il a débuté sa carrière dans le monde de la recherche à l'Université Simón Bolívar de Caracas (Venezuela), puis à l'Établissement technique central de l'armement à Arcueil, où il a, en particulier, contribué au

développement de l'emploi du titane comme matériau de blindage. Il a ensuite assuré différentes fonctions au profit de différents programmes, tout en gardant une expertise sur ce métal. Depuis 2001, il est le « Monsieur Titane » du ministère de la Transition écologique et solidaire et, à ce titre, assure une veille économique et géostratégique sur ce marché sensible. Il intervient en tant que conseil indépendant auprès des ministères et organismes publics concernés par les matières premières, ainsi qu'auprès des grands groupes industriels consommateurs de titane.



D.R

Doris NICKLAUS est ingénieur en chef des ponts, des eaux et des forêts et est titulaire d'une maîtrise en analyse et politique économiques. Elle travaille depuis 2007 au ministère en charge de l'Environnement. Après avoir été chargée du suivi du plan national Santé Environnement, elle a occupé de 2008 à 2011 le poste d'adjoint au chef du bureau, chargée

de l'Économie des déchets, puis, entre novembre 2011 et février 2020, le poste de chef du bureau de l'Économie des milieux, des matières et des risques. Jusqu'en février 2020, elle a été point focal pour la France sur le sujet de l'utilisation durable/efficace des ressources et a piloté les travaux d'élaboration du plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone.



D.R

Éric PHILIPOT a réalisé ses études dans sa ville natale, Rennes. Titulaire du diplôme d'ingénieur Environnement de l'École des métiers de l'environnement (EME), il réalise son stage de fin d'études au sein du Groupe Orange, dans l'entité Orange Labs Networks de Cesson. Il y a mis en œuvre un outil de calcul de l'indice de criticité des matériaux utilisés

dans les télécoms. Cette étude lui a permis de développer des compétences sur les problématiques de ressources matérielles dans les équipements électroniques, notamment ceux utilisés dans les réseaux. Cette courte période au sein du laboratoire d'Orange a également été l'opportunité pour lui de participer à la rédaction d'un article pour la conférence Care Electronics 2018, sur les questions d'économie circulaire dans le domaine des télécommunications. Puis, il devient conseiller Environnement à la Coopérative agricole du Gouessant, basée à Lamballe, dans les Côtes-d'Armor (22). Il y côtoie un nouveau milieu, celui des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) en milieu agricole. Ses missions premières sont d'accompagner les exploitants agricoles dans leur démarche environnementale et de mener à bien leurs projets. Éric Philipot développe ses connaissances et ses compétences dans ses domaines de prédilection comme l'énergie et les déchets. Il participe à de nombreux projets et favorise la communication au sein de son service en proposant de nouvelles méthodes de travail. Il rédige également un article sur des pratiques alternatives de désherbage. Il participe au rayonnement de l'agriculture en participant à des événements comme la Roazhon Ferme.

Guillaume PITRON est journaliste et réalisateur. Il a publié en 2018 le livre « La guerre des métaux rares – La face cachée de la transition énergétique et numérique » aux Éditions LLL (toutes les informations sont disponibles sur le site web dédié : <https://www.guillaumepitron.com/>).

Des terres rares chinoises au pétrole extrait en Alaska en passant par la gomme arabique soudanaise, il accorde une place importante aux matières premières et aux en-



©Agence Anne & Arnaud

jeux économiques, politiques et environnementaux liés à leur exploitation.

Ce fil rouge thématique se double d'une cohérence géographique : le continent africain, en particulier l'Afrique du Sud, où il a été correspondant de presse.

À ce jour, Guillaume Pitron est l'auteur d'une centaine de reportages, enquêtes et documentaires, réalisés dans une quarantaine de pays.

Guillaume Pitron est lauréat de 14 prix français et étrangers, dont le prix Erik Izraelewicz de l'enquête économique, le prix du livre d'économie 2018 et le grand prix BFM Business du livre d'économie.

Il est diplômé d'un DEA des Universités de Paris et d'un Master de droit de l'Université de Georgetown (États-Unis).

Alexis SAHAGUIAN est adjoint au chef du bureau de la



D.R

Politique commerciale à la direction générale du Trésor, au ministère de l'Économie et des Finances depuis novembre 2015. Porte-parole de la France auprès du Conseil de l'Union européenne, de la Commission européenne et à l'OCDE pour les problématiques douanières, ainsi que sur les enjeux acier et matières premières stratégiques, il est par ailleurs

expert en matière de règles d'origine, conseiller stratégie commerciale Euromed, chargé de cours occasionnel à Sciences Po et représentant du Trésor au sein du Comité métaux stratégiques français (COMES). Diplômé de l'Institut d'études politiques d'Aix-en-Provence, titulaire d'un 3^{ème} cycle à l'INALCO en économie internationale et en japonais, il est également diplômé de l'École nationale des Douanes.



D.R

Christian THOMAS est diplômé de l'École polytechnique et de l'École des Mines de Paris.

De 1976 à 1987, il exerce dans l'industrie minière des non-ferreux. Il est en charge de responsabilités diverses : production, exploration, ingénierie, dans divers pays (France, Maroc, Brésil, Portugal, Nouvelle Calédonie).

De 1987 à 2003, il travaille dans le secteur de la métallurgie extractive et de la chimie des métaux non ferreux, notamment des métaux précieux et spéciaux. Il y exerce diverses responsabilités : production, R&D, ingénierie, direction générale, finance..., dans divers pays (France, Allemagne, Italie, Espagne, Brésil, Mexique). Depuis 2003, il œuvre au développement d'une *start-up* spécialisée dans l'extraction des métaux critiques contenus dans les déchets : TND, dont il est le fondateur et le directeur scientifique. Il est également le président du pôle de compétitivité TEAM².



D.R

Philippe TUZZOLINO est le directeur Environnement du Groupe Orange. Il a en charge l'Environnement et l'organisation du changement climatique. Il définit les politiques et surveille la consommation d'énergie et l'empreinte globale du Groupe (Orange est présent dans 164 pays pour le *business*). Comme responsable de l'empreinte carbone, il a participé

à l'élaboration de méthodologies du secteur des TICs pour que le secteur soit en conformité avec les recommandations du GIEC en tant que membre du groupe d'étude UIT-T « Changement climatique » et participe également aux COP. Il est membre du Comité pour les matériaux stratégiques de Bercy. Avant son entrée dans le Groupe Orange, Philippe Tuzzolino a occupé plusieurs postes relatifs à la conduite de projets d'innovations stratégiques à la direction générale de La Poste et au ministère français de la Défense.



D.R

Mikko Samuli VAIJA est titulaire d'un Master 2 en ingénierie système et d'un Mastère spécialisé en éco-conception & management environnemental. Mikko Samuli Vaija débute son parcours professionnel en 2010 au sein d'Orange Labs Services à Meylan. Il réalise tout d'abord des analyses de cycle vie de téléphones portables afin de mettre à jour la méthode

d'affichage environnemental d'Orange et participe aux travaux de normalisation avec l'ADEME. Son domaine d'activité s'étend ensuite à la réalisation de multiples analyses de cycle de vie de produits électroniques pour couvrir le périmètre des produits Orange (modems-routeurs ADSL, décodeurs TV, tablettes, etc.) et permettre à l'entreprise d'améliorer sa connaissance en termes d'impacts environnementaux. Cette expérience lui permet d'être associé aux travaux de normalisation ITU-T (recommandation L.1410) et ETSI sur les méthodes d'analyse de cycle vie dans le secteur des télécommunications, ainsi qu'aux pilotes de la Commission européenne sur le programme Product Environmental Footprint (PEF). À partir de 2014, Mikko Samuli Vaija participe notamment au projet d'éco-conception de la quatrième génération de Livebox et de décodeurs TV, visant, par exemple, à améliorer la capacité de ces produits à être facilement démontables pour un reconditionnement plus efficace. En 2017, Mikko Samuli Vaija rejoint l'entité Orange Labs Networks de Cesson-Sévigné pour couvrir les aspects d'économie circulaire des équipements réseaux, avec notamment des travaux sur les impacts environnementaux de la virtualisation ou de la modularité avec la fondation Ellen MacArthur. Il est aujourd'hui impliqué dans la mise en place d'indicateurs autour de l'empreinte carbone des équipements réseaux et de l'évaluation de leur efficacité matière, notamment à travers des travaux avec l'ITU-T ou d'autres opérateurs au sein du Joint Audit Cooperation.



D.R

Olivier VIDAL est directeur de recherche au CNRS-INSU à l'Institut des sciences de la terre, Grenoble. Après un Doctorat en sciences de la terre, il s'est spécialisé dans la modélisation thermodynamique des réactions minéralogiques avec des applications fondamentales et dans le domaine du stockage de déchets radioactifs et du CO₂, ainsi que dans la production naturelle

d'hydrogène. Sa recherche est maintenant focalisée sur les liens énergie-matières premières et la modélisation dynamique de la demande et capacités de production, des coûts de production et des prix long terme des ressources minérales. Il a été directeur du laboratoire de géodynamique de Grenoble, chargé de mission au ministère de la Recherche au CNRS/INSU et coordinateur scientifique du premier réseau européen sur les matières premières (ERA-MIN).



D.R

Dominique VIEL est contrôleur général économique et financier honoraire et ancienne élève de l'ENA (1980). Elle travaille en coopération avec le ministère en charge de l'Environnement depuis 2008, d'abord en qualité de présidente du Comité opérationnel Déchets du Grenelle de l'Environnement, puis de celui du Grenelle de la Mer en 2009. Elle

est aujourd'hui présidente de l'atelier Déchets marins, du groupe de travail sur les déchets sauvages, et, depuis mars 2019, présidente du groupe d'experts sur les ressources minérales de la transition bas-carbone, dont les travaux serviront à préparer le futur plan de programmation des ressources d'ici à la fin de l'année 2021.



D.R

Isabelle WALLARD, ingénieure générale des Mines, a rejoint le Conseil général de l'Économie, du ministère de l'Économie et des Finances, en novembre 2015, en tant que présidente suppléante de la section « Régulation et ressources ». Elle y traite notamment les dossiers concernant les matières premières minérales non énergétiques, préside le groupe de

travail permanent concernant les titres miniers et est Secrétaire générale du Comité pour les métaux stratégiques (COMES).

Après une dizaine d'années dans l'administration, exerçant en direction régionale de l'industrie (DRIRE), au ministère des Transports, puis au ministère de l'Industrie (direction des Hydrocarbures – Service Exploration/production), Isabelle Wallard a occupé plusieurs postes de responsabilité au sein du Groupe Aéroports de Paris de 1992 à 2015. Elle était membre du Comité des directeurs, depuis 2009, et Secrétaire général adjoint du Groupe de 2013 à 2015.