

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)



Les métaux stratégiques, un enjeu mondial ?

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES

FONDÉES EN 1794

N° 82
AVRIL 2016

Publiées avec le soutien de
l'Institut Mines-Télécom

Les métaux stratégiques, un enjeu mondial ?

03

Avant-propos

Emmanuel MACRON

04

Introduction

Alain LIGER

Cadre général et stratégies des États

08

Développement économique et croissance des usages des métaux

Patrice CHRISTMANN

16

Un facteur déterminant de la géopolitique des matières premières : la stratégie industrielle de la Chine

Joël RUET

24

La stratégie européenne des matières premières

Gwenole COZIGOU

29

Le Comité pour les métaux stratégiques (COMES), un lieu de dialogue consacré à l'industrie

Alain LIGER

34

Les modes d'action de la stratégie d'approvisionnement japonaise en métaux non-ferreux stratégiques

Jean-Claude GUILLANEAU

Une priorité : l'économie circulaire

40

Métaux rares et dépendance stratégique

François VALÉRIAN

45

Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux

Jean-François LABBÉ

57

Recyclage des cartes électroniques : un aperçu de l'état de l'art

Christian THOMAS

62

Strategic metal recycling: adaptive metallurgical processing infrastructure and technology are essential for a Circular Economy

Dr Markus A. REUTER et Antoinette VAN SCHAİK

67

Métaux stratégiques : la mine urbaine française

Alain GELDRON

L'industrie française et sa réponse au risque

74

Mines et minéraux : un secteur clé mobilisé au service de l'industrie française de demain

Catherine TISSOT-COLLE

77

Le renouveau minier français et les matières premières stratégiques

Rémi GALIN

81

Les enjeux pour le groupe Delachaux de son approvisionnement en chrome

Philippe LIEBAERT

86

Les enjeux européens de l'approvisionnement en titane

Patrick DELABORDE

92

Le lithium, un métal au cœur des enjeux industriels, économiques et environnementaux du XXI^e siècle

Hughes-Marie AULANIER

97

De la stratégie d'Orange à la mise en place de méthodes d'évaluation pour le secteur des technologies de l'information et de la communication

Philippe TUZZOLINO

99

L'analyse du cycle de vie au service d'une politique responsable de consommation des métaux stratégiques chez Orange

Mikko Samuli VAIJA

105

La gestion des matières premières stratégiques chez Renault

Philippe SCHULZ

110 Traductions des résumés

123 Biographies des auteurs

 Le dossier est coordonné par Alain LIGER

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN : 1268-4783
Série trimestrielle • n°82 - Avril 2016

Rédaction

Conseil général de l'Economie, de l'Industrie,
de l'Energie et des Technologies, Ministère de
l'Economie, de l'Industrie et du Numérique
120, rue de Bercy - Télédocus 797 - 75572 Paris Cedex 12
Tél : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

Pierre Couveinhes
Rédacteur en chef

Gérard Comby
Secrétaire général

Carine Guégan
Assistante de la rédaction

Marcel Charbonnier
Correcteur

Myriam Michaux
Webmestre

Membres du Comité d'Orientation

Le Comité d'Orientation est composé des membres
du Comité de Rédaction et des personnes dont les
noms suivent :

Jacques Brégeon
Collège des hautes études de l'environnement
et du développement durable, ECP, INA P-G, SCP-EAP

Christian Brodhag
Ecole nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne

Xavier Cuny
Professeur honoraire Cnam, Conseil supérieur
de la prévention des risques professionnels

William Dab
Cnam, Professeur

Thierry Chambolle
Président de la Commission « Environnement »
de l'Académie des technologies

Hervé Guyomard
CNRA Rennes

Vincent Lafèche
Président du BRGM

Yves le Bars
Cemagref

Patrick Legrand
Inra, Vice-président de la Commission nationale du débat
public

Benoît Lesaffre
CIRAD

Geneviève Massard-Guilbaud
Ecole des Hautes études en sciences sociales,
Directrice d'études

Marc Mortureux
Directeur général de l'ANSES

Alain Rousse
Président de l'AFITE

Virginie Schwartz
Directrice de l'Energie, MEDDE

Membres du Comité de Rédaction

Philippe Saint Raymond
Président du Comité de rédaction
Ingénieur général des Mines honoraire

Pierre Amouyel
Ingénieur général des Mines honoraire

Paul-Henri Bourelrier
Ingénieur général des Mines honoraire, Association
française pour la prévention des catastrophes naturelles

Mireille Campana
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie
Haut fonctionnaire de développement durable

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, MEDDE

Jérôme Goellner
Chef du service des risques technologiques,
Direction générale de la prévention des risques, MEDDE

Jean-Luc Laurent
Directeur général du Laboratoire national de métrologie et
d'essais (LNE)

Richard Lavergne
Chargé de mission stratégique Energie-Climat au
Commissariat général au développement durable, MEDDE

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
Ingénieur en chef des Mines, Conseil général de l'Économie

Photo de couverture :

Extraction du lithium : collecte du sel sur le lac salé d'Uyuni,
Bolivie.

Photo © Sebastian Bolesh/LINEAIR FOTOARCHIEF-BIOS-
PHOTO

Iconographie

Christine de Coninck

Abonnements et ventes

COM & COM
Bâtiment Copernic - 20 Avenue Edouard 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 : Printcorp

Editeur Délégué :

FFE - 15 rue des Sablons 75116 PARIS - www.ffe.fr
Fabrication : Charlotte Crestani
charlotte.crestani@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

Avant-propos

Par Emmanuel MACRON

Ministre de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique

Les matières premières stratégiques ne sont pas des biens comme les autres. Elles sont au cœur de nos vies et de notre quotidien : nos téléphones portables, nos ordinateurs, nos réseaux de communication, nos systèmes de production et d'énergie contiennent un nombre croissant de métaux, terres rares et minerais précieux. Ces matières premières ont des propriétés spécifiques : il est extrêmement difficile de les substituer. C'est pourquoi l'approvisionnement en matières premières stratégiques est une des clés de l'indépendance et de la force de notre industrie, d'autant plus que la demande mondiale pour ces métaux est en croissance rapide.

Dans un marché mondialisé, il ne s'agit plus d'être autonome, mais de sécuriser ses approvisionnements dans les matières les plus stratégiques au moyen de trois leviers :

- l'économie circulaire et la récupération des matières contenues dans les produits en fin de vie : c'est un des axes majeurs de la transition écologique qui fait dire parfois que « nos décharges sont les mines du XXI^e siècle ». Si la récupération des métaux usuels est en place de longue date, une filière d'excellence est en train d'émerger dans la récupération de métaux précieux contenus dans les déchets électroniques ;
- la diversification des approvisionnements pour s'affranchir des risques géopolitiques (notamment la dépendance vis-à-vis d'un pays producteur en situation de quasi-monopole) et faire jouer la concurrence. L'approvisionnement français en pétrole, par exemple, s'est beaucoup diversifié depuis le début des années 2000, et aujourd'hui aucun pays ne fournit plus de 20 % de nos besoins.
- la création de nouvelles mines en France, de taille raisonnée et obéissant aux meilleurs standards environnementaux et sociaux. C'est un objectif à notre portée, car le sol français est riche en métaux et minéraux inexploités. Ma conviction est que la France métropolitaine et l'outre-mer ont un avenir minier. Pour ce faire, nous devons tirer les enseignements du passé. Dans un contexte d'acceptation locale difficile, les acteurs doivent se montrer irréprochables en termes de transparence et de dialogue avec les populations concernées. C'est le sens de l'initiative sur la « Mine responsable » que j'ai lancée et qui doit permettre de définir les contours sociaux et environnementaux de la Mine du XXI^e siècle.

Plus que jamais, nous devons accélérer la sécurisation de nos approvisionnements en matières premières stratégiques. Au vu des tensions géopolitiques à l'œuvre, la période l'exige.

Introduction

Par Alain LIGER

Ingénieur général des Mines honoraire, ancien secrétaire général du COMES

Le présent numéro de *Responsabilité et Environnement* paraît dans une période marquée par une orientation à la baisse des prix des matières premières minérales et énergétiques. Dans cette conjoncture, aborder l'enjeu des matières premières minérales pourrait paraître peu opportun ou à tout le moins d'un intérêt limité ; une conclusion analogue pourrait être tirée de l'évolution des prix des terres rares au cours des années 2011 et 2012, et de la non concrétisation de la pénurie prédite en 2010-2011.

Mais l'augmentation de leurs prix n'est pas le seul enjeu d'une éventuelle situation de crise d'approvisionnement en matières premières minérales.

En effet, une période de prix bas peut être au contraire un moment fort opportun pour réexaminer cet enjeu des matières premières minérales qui refait périodiquement surface en France, et plus généralement en Europe occidentale.

Leur enjeu stratégique à l'échelle mondiale est bien connu. Ainsi, certaines matières premières minérales sont produites par un tout petit nombre de pays, voire par un seul : la littérature abonde en publications et en cartes montrant que la Chine produit entre 75 et 95 % des terres rares, de l'antimoine, du tungstène, du gallium et du germanium du monde, que la mine d'Araxá, au Brésil, produit 80 % du niobium mondial ou encore que la mine de Spor Mountain, dans l'Utah, assure à elle seule plus de 85 % des 230 tonnes annuelles de béryllium produites dans le monde.

Nous ne reviendrons pas sur ce point dans ce numéro de *Responsabilité et Environnement*, préférant aller plus loin en abordant la situation et l'action de l'industrie française dans ce domaine.

Le cadre général et la stratégie des États

Plusieurs auteurs nous aideront tout d'abord à faire le point sur le cadre général de la problématique des matières premières minérales.

Patrice Christmann explore le lien entre développement économique et croissance des usages des métaux : il met en évidence le nombre de plus en plus grand de métaux utilisés dans des applications et des outils de la vie quotidienne des hommes et l'explosion des tonnages utilisés, et il pose la question du caractère soutenable de ces approvisionnements au niveau mondial.

J'ai déjà mentionné que la Chine est un producteur dominant de nombreuses substances stratégiques. Mais le type de consommation de la Chine en matières premières minérales est aussi un paramètre incontournable des analyses du secteur.

Joël Ruet nous fait toucher du doigt le fait que le développement économique de la Chine ne se traduit pas seulement par l'augmentation de ses consommations et de ses importations de métaux : les productions industrielles chinoises deviennent de plus en plus technologiques et ont tendance à concurrencer les productions européenne et française par l'aval industriel. Il nous montre que cet état de fait résulte d'une stratégie délibérée s'appuyant sur les ressources minérales et les transferts de technologies, avec pour objectif de dominer les marchés mondiaux de produits technologiques (comme les éoliennes, les panneaux solaires ou la voiture électrique... et, demain, les éco-cités).

Face aux risques d'approvisionnement, les actions développées au niveau mondial sont variées.

Au niveau européen, la sécurité d'approvisionnement en matières premières est considérée comme un sujet d'importance, et une stratégie a été développée à cet effet depuis 2008.

Gwenole Cozigou, directeur à la direction générale Marché intérieur, industrie, entrepreneuriat et PME de la Commission européenne nous décrit l'« Initiative Matières premières » européenne et ses liens très forts avec les thématiques de l'éducation, de la recherche-innovation et de l'entrepreneuriat.

La France a choisi la voie du dialogue entre les multiples parties prenantes concernées par ce secteur, tant dans les industries que dans les administrations.

Alain Liger nous décrit la manière dont les travaux du Comité pour les métaux stratégiques (COMES) impliquent toutes les branches industrielles concernées ; ces travaux, qui se sont traduits dans des actions publiques, mettent en évidence l'émergence d'une culture du dialogue sur les objectifs à atteindre et les actions à mettre en œuvre.

Enfin, Jean-Claude Guillaneau nous donne un aperçu de la manière dont, au Japon, l'État, *via* la société JOGMEC, tente d'assurer un approvisionnement stable de l'économie nipponne en métaux stratégiques : son action se caractérise par l'importance des moyens financiers alloués et par l'implication, non seulement des acteurs miniers, mais aussi et surtout de l'ensemble des acteurs industriels.

L'économie circulaire : un incontournable non autosuffisant, à faire progresser

La prise de conscience du caractère limité des ressources de notre planète a commencé à faire entrer la notion d'économie circulaire dans nos discours et nos actes quotidiens ; elle est *a priori* un moyen vertueux de résoudre en partie l'équation entre une concurrence croissante dans l'accès aux ressources et la sécurité d'approvisionnement. La loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte engage, dans son article 69, le gouvernement à soumettre au Parlement, tous les cinq ans, une stratégie nationale de transition vers l'économie circulaire.

Ce numéro de *Responsabilité et Environnement* se devait nécessairement d'aborder cet enjeu majeur du recyclage et de l'économie circulaire.

La démonstration économique de François Valérian conclut tout d'abord que nous ne développerons pas l'économie circulaire par les seuls appels à la vertu écologique ni par la réglementation environnementale - et qu'il est primordial, pour réussir, que l'économie circulaire soit une économie réelle.

Une idée couramment répandue est que le recyclage serait l'alpha et l'oméga de l'approvisionnement en métaux... Or, la démonstration de Jean-François Labbé nous convainc qu'en situation - mondiale ou locale - de croissance des consommations, le recyclage ne nous fait gagner que quelques années avant l'épuisement des réserves naturelles, mais qu'il ne saurait en aucun cas se substituer en totalité à l'extraction des matériaux primaires : ceux-ci doivent donc continuer à être extraits (si l'on prend en considération le périmètre mondial) ou extraits localement et/ou importés (si l'on s'intéresse à un périmètre local).

L'industrie française est, de fait, déjà engagée dans des démarches d'économie circulaire.

Dans son article sur la criticité des matières premières pour Renault, Philippe Schulz, expert leader en matière d'environnement, d'énergie et de matières premières stratégiques de ce constructeur automobile, mentionne le développement de boucles d'économie circulaire compétitives visant à détendre la dépendance du groupe Renault vis-à-vis de ses approvisionnements extérieurs : il donne l'exemple des platinoïdes présents dans les pots catalytiques des véhicules hors d'usage recyclés.

Christian Thomas, de Terra Nova Développement, nous expose les réalités de la récupération de métaux stratégiques (tantale, or, argent, palladium) à partir de cartes électroniques recyclées, ainsi que les enjeux de la R&D associée, éléments capitaux du maintien de la compétitivité industrielle dans ce secteur marqué par une évolution permanente des produits.

D'autres exemples auraient pu être également cités, comme la récupération de métaux critiques et stratégiques contenus dans des batteries Nickel-Métal-Hydrure

et Lithium-Ion par les installations de la SNAM, celle de terres rares par l'usine Solvay de La Rochelle, de l'indium par l'usine de Nyrstar à Aubry (Nord), et d'autres encore. L'industrie française est riche en exemples et en potentiel.

Pour autant, l'engagement sur la voie de l'économie circulaire ne va pas sans difficultés.

Il s'agit tout d'abord (élément capital d'une approche économique) de disposer des outils nécessaires. Nous avons fait appel à deux des coauteurs du rapport paru en juin 2013 "*Metal Recycling – Opportunities, Limits, Infrastructure*" du Programme des Nations unies pour l'environnement, le Dr Markus A. Reuter et le Dr. Antoinette Van Schaik, pour nous faire prendre conscience à quel point une infrastructure de collecte, de traitement et de métallurgie qui soit capable de s'adapter à des situations très variées est essentielle au succès de l'économie circulaire (leur article (en anglais) vous donnera certainement l'envie de lire le rapport dans son intégralité, téléchargeable à l'adresse URL suivante : http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metal_Recycling_Full_Report.pdf).

Mais il s'agit aussi de réfléchir à une stratégie. Nous devons à Alain Geldron, expert national matières premières de l'ADEME, une remarquable réflexion sur la difficulté d'évaluer la « mine urbaine » des métaux stratégiques en France, ainsi que les performances en matière de recyclage et les marges de progrès possibles.

Des éléments de réponse sur le territoire français : mines, métallurgie, consommateurs

Catherine Tissot-Colle, présidente de l'Alliance des minerais, minéraux et métaux (A3M), nous amène à réfléchir sur les conditions de la pérennisation de l'industrie des métaux dans le cadre français et européen, et attire notre attention sur une concurrence mondiale marquée par des conditions de compétition inégales, tant sur le plan réglementaire que sur le plan énergétique ou environnemental.

Notre territoire lui-même (tant terrestre que maritime) peut aider à répondre à l'enjeu du risque pour l'industrie aval. Par ailleurs, l'exploitation des ressources minières du territoire national n'est pas limitée aux métaux stratégiques : les mesures engagées par l'État, que décrit Rémi Galin, chef du bureau des Ressources minérales du ministère chargé de l'Environnement, ont pour objectif plus général de permettre aux investisseurs motivés d'être des acteurs d'un renouveau minier français, et à ces investisseurs et aux communautés locales d'établir un dialogue sur ces investissements.

La loi de transition énergétique, déjà citée, appelle (dans son article 69) l'élaboration d'« un plan de programmation des ressources nécessaires aux principaux secteurs d'activité économique (...) 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 ». Cette mise en évidence de la concomitance entre l'existence de ressources territoriales inexploitées et notre dépendance vis-à-vis de

l'importation de certaines ressources stratégiques devrait être de nature à susciter un débat constructif !

L'industrie métallurgique française est directement exposée au risque d'approvisionnement en minerais métalliques et en métaux, ceux-ci étant les *inputs* de base de l'élaboration de ses produits. Or, l'existence d'installations métallurgiques de production de métaux stratégiques en France et les capacités de l'industrie française en la matière sont peu connues du grand public.

Parmi les nombreux exemples pouvant être cités, Philippe Liebaert, de DCX Chrome (groupe DELACHAUX), et Patrick Delaborde, d'Aubert et Duval (groupe ERAMET), illustrent les cas respectifs du chrome et du titane.

Dans ce même domaine, Hughes-Marie Aulanier, qui est en charge des études de marché, des finances et de la recherche de partenaires pour le projet Lithium d'ERAMET, nous expose l'analyse du marché de ce métal stratégique pour la transition énergétique, et plus particulièrement pour le stockage d'électricité.

Les industriels de l'aval technologique français présentent des degrés d'exposition au risque d'approvisionnement variés ; ils développent des réponses adaptées aux enjeux de leurs produits (que certains ne fabriquent d'ailleurs pas directement). La variété de leurs démarches démontre à la fois la sensibilité des responsables d'entreprise à cette question et le développement d'une ingénierie du risque pointue qui mérite d'être connue.

Pour des raisons de place, mais aussi, parfois, de confidentialité des processus industriels, n'est présenté dans ce numéro qu'un nombre limité de cas d'entreprises et de groupes développant une stratégie en matière tant d'approvisionnement que d'intégration et de recyclage de matériaux stratégiques.

Parmi ceux-ci, Orange n'est probablement pas le premier groupe industriel auquel on pense lorsque l'on évoque la problématique des matières premières minérales.

Dans deux contributions à ce numéro de *Responsabilité et Environnement*, le groupe Orange nous dévoile certains éléments de sa stratégie.

Ainsi, Philippe Tuzzolino, directeur Environnement du groupe Orange, nous expose en détail les paramètres de la démarche de son groupe. Le fondement en est surtout la nécessité de savoir ce que ce groupe intègre dans les produits qu'il commercialise : les risques pris en compte pour définir le caractère critique des matériaux sont loin

de se limiter au seul risque d'approvisionnement ! La réflexion débouche sur des outils concrets d'évaluation et d'action.

Prenant un exemple très concret, celui du téléphone portable, Samuli Vaija nous montre les difficultés de la construction d'une analyse du cycle de vie de ce type de produit, et nous fait découvrir les méthodes utilisées par Orange à cette fin.

Chez Renault, les 2,8 millions de tonnes d'acier, 330 000 tonnes de fonte et 310 000 tonnes d'aluminium achetées annuellement suffisent à nous situer dans l'industrie lourde - sans parler des éléments utilisés en plus petites quantités, comme les terres rares.

Dans son article (déjà mentionné plus haut), Philippe Schulz, expert leader Environnement, énergie et matières premières stratégique chez Renault, expose la démarche de définition de la criticité suivie par cette entreprise, ainsi qu'une partie des mesures adoptées par celle-ci.

Nous aurions pu retenir d'autres exemples : parmi les participants réguliers aux réflexions du COMES, Peugeot, Airbus ou les industriels du secteur de la défense développent des stratégies de même niveau que celles présentées ici, avec, parfois, des limitations bien compréhensibles en matière de communication publique.

D'une manière générale, les exemples donnés dans ce numéro restent très discrets sur les liens avec les industriels des amonts minier ou métallurgique. Ceux-ci (contrats d'enlèvement ou participation au financement - voire au capital - des sources d'approvisionnement, par exemple) étaient au cœur de la stratégie allemande de Rohstoffallianz GmbH et caractérisent l'action des gouvernements du Japon (voir l'article de Jean-Claude Guillauneau) ou de la Corée du Sud. Il semble qu'ils soient bien présents dans les réflexions d'une partie des stratégies minières. Mais ils ne sont pas spontanément évoqués par les consommateurs.

Assurément, les métaux stratégiques relèvent de problématiques mondiales.

Mais en tant qu'enjeu de compétitivité à tous les niveaux de l'industrie et de la R&D européennes, ils représentent bel et bien un défi pour l'économie française et européenne - un défi que l'industrie française aborde, forte de ses capacités technologiques et stratégiques, les pouvoirs publics ayant pour responsabilité d'organiser un encadrement économique et réglementaire efficace.



www.brgm.fr



Assurer l'approvisionnement de la France en ressources minérales constitue un enjeu stratégique pour l'économie française. Le BRGM mène dans ce domaine stratégique des travaux d'intelligence économique en appui des politiques publiques et des actions commerciales.

- Rédaction de la revue mensuelle Ecomine sur l'actualité des minéraux et métaux, et publication sur le site mineralinfo.fr.
- Production d'un Annuaire statistique mondial des minerais et métaux.
- Réalisation de panoramas du marché de 16 substances ou de groupes de substances (gallium, germanium, niobium,...) pour aider à déterminer l'exposition de la France aux risques pesant sur les approvisionnements.
- Production de fiches de criticité 8 fiches sont actuellement disponibles (antimoine, cobalt, germanium, néodyme, palladium, platine, tantale et tungstène, téléchargeables sur www.mineralinfo.fr).
- Traitement de demandes d'études de type analyses prospectives des marchés ou analyses de filières industrielles pour des entreprises françaises.
- Études sur le potentiel minier de régions ou de pays comme en Arabie, au Congo, à Madagascar ou au Tchad.

Siège - Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009
45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : (33) 2 38 64 34 34



Waste treatment
Energie solaire **Défense** Air
Training **Energies** Chaudières Eau
Environnement Lignes de galvanisation
HRSGs Boilers **Sidérurgie** Aeronautics Simulators
Solar energy **Maintenance** Operational efficiency
Stations d'épuration Services aux projets **Equipment**
Know-how Galvanizing lines **Energies** Laminoirs HRSGs
Spécialistes **Environnement** Systèmes d'armes Durable
Métaux Industrial furnaces Weapon systems Biomasse
Services to industries Projects services Water
Savoir-faire Fours industriels **Equipment** Simulateurs
Efficacité opérationnelle **Metals** Biomass Rolling mills
Specialists **Services aux industries** Air
Formations Aéronautique **Défense**
Sustainable **Maintenance**
Steelmaking

**Concevoir
les équipements
du futur**



Développement économique et croissance des usages des métaux

Par Patrice CHRISTMANN

Direction de la Stratégie et de la Recherche, BRGM

Depuis l'origine des sociétés humaines, il y a 2,5 millions d'années, le recours aux ressources minérales n'a fait que progresser au gré des innovations en permettant ou en nécessitant l'usage. Le vrai âge des métaux n'a cependant commencé qu'après la Seconde Guerre mondiale grâce aux effets cumulés de la disponibilité d'une énergie abondante et bon marché et de découvertes réalisées en chimie et en physique permettant l'usage en quantités de plus en plus importantes de la quasi-totalité des métaux. Aujourd'hui, les métaux et autres matières premières d'origine minérale sont indispensables à de nombreux secteurs de l'économie. Ils sont au cœur des enjeux énergétiques : si la consommation énergétique nécessaire à leur production représente 10 % de l'énergie mondiale, ils sont aussi indispensables au développement des énergies renouvelables. Le défi majeur du XXI^e siècle va donc être de repenser nos modes de croissance, nos modes de vie, dont l'usage des métaux fait partie, afin que leurs impacts n'excèdent pas les capacités de résilience de l'écosystème mondial, dont dépend la vie sur Terre.

Les multiples matières premières non énergétiques d'origine minérale (roches, minéraux, métaux) sont essentielles au développement humain par les fonctions qu'elles rendent possibles, au même titre que l'eau, l'énergie, les produits agricoles ou de l'élevage ou encore les ressources halieutiques. Les grandes étapes de l'évolution de l'usage des matières premières minérales sont des marqueurs de l'histoire des civilisations. Leurs multiples usages sont consubstantiels au développement depuis les premiers âges de l'humanité jusqu'à l'époque actuelle. Celle-ci se caractérise par une intensification de plus en plus grande de l'usage des ressources naturelles, un usage à l'origine de nombreux impacts environnementaux.

Si les métaux ont joué un rôle clé dans le développement, puis dans la décadence de cités, de pays et d'empires, dont Athènes et Rome sont des exemples célèbres, jamais le monde n'avait utilisé autant de métaux *per capita* qu'aujourd'hui. À l'échelle mondiale, la période moderne se caractérise par une croissance démographique forte, ainsi que par le développement rapide d'une classe moyenne et de l'urbanisation. Dans les prochaines décennies, l'intensification du recours aux énergies renouvelables devrait encore faire croître la production et la consommation de métaux - et les pressions environnementales associées.

Les risques de conflit liés à la compétition internationale dans l'accès aux ressources productives, la montée des

nationalismes, la dégradation rapide de l'écosystème mondial, dont le changement climatique n'est que l'une des manifestations, pourraient sérieusement compromettre l'avenir de l'humanité et nous entraîner collectivement vers un nouveau Moyen Âge aux sombres perspectives. Seul l'avènement d'une gouvernance internationale des ressources naturelles, y compris des minerais et des métaux, pourrait éviter à l'humanité la catastrophe qui la menace. Cette gouvernance présuppose notamment le développement de l'économie circulaire à l'échelle planétaire, avec l'intégration dans le prix des métaux des externalités générées par leur production et leurs usages, notamment pour pouvoir financer les mesures de mitigation nécessaires. L'avènement d'une gouvernance des ressources naturelles, de manière générale (et donc y compris des minéraux et des métaux), basé sur les 17 objectifs de développement durable des Nations unies, ainsi que la transparence et la responsabilité sociétale élargie (RSE) des acteurs économiques sont des enjeux centraux pour notre avenir.

Préhistoire et Antiquité

Les premiers outils en pierre grossièrement taillée marquant le début du premier âge de pierre datent d'il y a au moins 2,6 millions d'années. Découverts dans la région des Afars, en Éthiopie [1], ils ont permis à l'homme de chasser plus efficacement, et donc de mieux se nourrir. C'est à l'usage des silex que l'on doit probablement la dé-

couverte du feu. Pendant plus de deux millions d'années, le développement humain a été limité au seul usage de la pierre, de plus en plus finement travaillée pour aboutir à la hache en pierre polie, environ 6 000 ans avant notre ère. La première exploitation d'une mine souterraine daterait de plus de 40 000 ans. Il s'agit de la Grotte du Lion (Lion Cave), au Swaziland, une exploitation d'oligiste (un oxyde de fer cristallisé en fines paillettes) ayant servi à la production de peintures rituelles.

Il faudra attendre jusqu'à 9 000 ans avant notre ère pour voir apparaître l'usage des métaux [2], avec l'utilisation de cuivre natif pour produire de petits objets (épingles, poinçons) par martelage de fragments de cuivre collecté dans les montagnes du sud de la Turquie ou de l'Irak, ainsi que de l'ouest de l'Iran actuels. En Amérique du Nord, l'exploitation du cuivre natif de la région de Keewenaw (Lac Supérieur, États-Unis) remonterait à environ -7000 ans.

Puis la découverte de la possibilité d'obtenir une fusion du cuivre natif en le jetant dans le feu a initié l'histoire de la métallurgie, il y a 3 800 ans avant notre ère, à Tepe Yahya, en Iran [2]. D'abord limitée au cuivre natif, cette technique s'est rapidement élargie au traitement de minerais oxydés (azurite et malachite) par adjonction de poudre de charbon de bois lors de la fusion. L'âge du cuivre (chalcolithique) commençait.

Le travail de l'or trouvé à l'état natif dans la nature, métal malléable et donc très facile à travailler, date également de cette époque, les plus anciens objets travaillés en or datant d'environ 5 000 ans avant notre ère (trésor de la nécropole de Varna, en Bulgarie).

La métallurgie du plomb, peut-être initialement développée à partir de minéraux oxydés de plomb particulièrement faciles à traiter pour en extraire le plomb, remonte au minimum à -6 000 ans. Il s'agit d'une baguette en plomb découverte dans la grotte d'Ashalim (désert du Néguev, Israël) [3], le plomb ayant pu être extrait de minerais turcs ou iraniens, les gisements de minerais oxydés les plus proches géographiquement d'Israël.

L'âge du bronze a succédé à l'âge du cuivre environ 3 000 ans avant notre ère, mais le « bronze » du premier âge du bronze était en réalité du cuivre arsénié, un alliage obtenu en sélectionnant empiriquement des minerais oxydés de cuivre provenant de gisements riches en arsenic, un type de gisement relativement courant. Son usage a notamment permis la fabrication de socs métalliques pour les araires, une innovation majeure facilitant le labour tout en le rendant plus efficace. Il s'agit d'une étape majeure dans l'histoire des pratiques agricoles, le gain de productivité obtenu favorisant la sédentarisation de populations jusqu'alors largement nomades et le début de l'urbanisation.

Le véritable bronze est un alliage cuivre-étain contenant environ 12 % d'étain, il est particulièrement résistant à l'usure et est facile à travailler. Son usage ne s'est répandu qu'au cours de la dernière partie de l'âge du bronze, à partir de -1 500 ans.

L'étain est un métal assez rare, dont les gisements ne sont pas localisés aux mêmes endroits que ceux du cuivre. Alors

que ce dernier provenait de Mésopotamie, de Chypre ou d'Iran, l'étain n'existait que dans les Cornouailles ou dans le Devon (Angleterre), la Bohême et la Saxe, soit bien loin de l'est du bassin méditerranéen. Le commerce à très longue distance a été nécessaire pour voir se développer son usage, l'étain étant un métal dont la dureté a permis de nombreuses applications en agriculture, mais aussi dans le domaine militaire. Le développement du commerce sur de très longues distances date d'il y a environ -1 400 ans : de l'ambre de la Baltique ayant été découverte en Égypte, dans les tombes de pharaons, et des perles de verre d'origine égyptienne datant du XXIV^e siècle avant notre ère ayant été trouvées dans une tombe antique danoise [4].

L'utilisation du mercure, un métal très rare, à l'origine de graves empoisonnements, a également commencé au XV^e siècle avant notre ère. Les Grecs l'ont utilisé dans la production... d'onguents, les Romains et les Égyptiens l'utilisant dans des produits... cosmétiques !

La métallurgie de l'argent, sous-produit du minerai de plomb, est plus récente que celle du cuivre ; les vestiges les plus anciens connus attestant de son usage datent d'il y a environ 2 000 ans avant notre ère. Au VI^e siècle avant notre ère, l'extraction à grande échelle de l'argent à partir du minerai des riches mines du Laurion, à l'est d'Athènes (Grèce), a permis le développement de la monnaie métallique dans la partie européenne du monde. La drachme athénienne en argent a été largement utilisée dans la Grèce de l'époque, une source de richesse ayant contribué à l'avènement et à la prospérité de la démocratie athénienne, ainsi qu'à sa puissance militaire. L'argent a notamment permis de décider, en -483, de la construction d'une flotte de 200 trirèmes qui a permis à Athènes de résister à plusieurs tentatives d'invasion par la Perse. Mais il a aussi causé la chute d'Athènes, lorsqu'en -413, les troupes de Sparte, la grande rivale d'Athènes, réussirent à dévaster l'Attique et ses mines du Laurion, entraînant la fuite des esclaves qui y travaillaient et coupant la route permettant l'acheminement de l'argent vers Athènes. Selon De Callatay [5], le stock d'argent disponible en Grèce au VI^e et V^e siècles avant notre ère peut être estimé à environ 400 tonnes (soit moins de 2 % de la production mondiale de l'année 2015, estimée à 27 300 tonnes selon l'U.S.G.S. [6]).

La métallurgie du fer, le métal le plus largement utilisé dans les économies modernes, ne se développe que très progressivement à partir du troisième millénaire avant notre ère, son usage semblant pendant longtemps confiné à la production sporadique de quelques pièces en fer, le bronze demeurant pendant longtemps le matériau métallique le plus largement produit. En Europe, l'usage du fer ne se répand largement qu'au début du premier millénaire avant notre ère.

Des estimations statistiques donnent des ordres de grandeur de la production annuelle de quelques métaux à l'époque de l'Empire romain (voir le Tableau 1 de la page suivante) et une estimation de la production *per capita* fondée sur une évaluation de la population de ce même empire s'établissant à 48 millions de personnes [7]. Comme pour Athènes, la disponibilité des métaux a forte-



Photo © Ratael Ibáñez Fernández, Wikimedia

Figure 1 : Anciennes exploitations d'or à Las Medulas (remontant à l'époque romaine, Espagne).

ment contribué au développement, puis à la chute de l'Empire romain. À l'époque romaine, ils étaient importés à partir de plusieurs grands centres : la Cornouaille, le Pays de Galles et le Devon anglais (pour l'étain), l'Espagne, Chypre et la Turquie (pour le cuivre, l'argent et l'or). De nombreuses petites exploitations d'or et d'argent étaient aussi disséminées dans les massifs cristallins d'âge hercynien (Portugal, Espagne, France, sud de l'Angleterre, Allemagne, République tchèque dans sa configuration géographique actuelle). Le développement de techniques hydrauliques élaborées impliquant le détournement de rivières a conduit à l'exploitation de l'or à ciel ouvert sur plus de 10 km² à Las Medulas (voir la Figure 1 ci-dessus), dans l'actuelle province espagnole de León, une exploitation minière qui a entraîné de profondes modifications du paysage.

Métal	Estimation de la production annuelle (en tonnes)	Source	Population en millions d'habitants (Source : [7])	Intensité en métal, en kg per capita
Argent	200	[5]	48	0,004
Cuivre	15 000	[8]	48	0,330
Fer	82 500	[8]	48	1,719
Plomb	80 000	[8]	48	1,667
Or	6	[5]	48	0,000

Tableau 1 : Ordres de grandeur de la production annuelle de métaux de l'Empire romain et de la production *per capita* – Source des données : [4], [5], [7].

Encore plus importante fut l'exploitation de l'argent, du cuivre, de l'or et du plomb en Andalousie, dans la mine de Rio Tinto. Un pic de production de l'argent aurait été constaté entre -50 et la fin du premier siècle de notre ère, le stock d'argent produit est estimé à 10 000 tonnes [4] (soit vingt-cinq fois le stock grec lors de l'apogée de la civilisation grecque classique). La métallurgie du plomb était particulièrement importante à cette époque, à la fois comme source d'argent métal, mais aussi pour la réalisation d'objets en plomb qui sont devenus alors d'usage relativement courant [8] (notamment des canalisations et des gouttières en plomb). Le plomb provenait notamment des mines de Rio Tinto (Espagne), de Sardaigne, du sud de l'Angleterre, et sa métallurgie était si intensive qu'une teneur très anormale en plomb datée de cette époque est détectable dans les glaces du Groenland [9]. Le « goût » des romains pour l'acétate de plomb, résultant de la préparation du *sapa*, un jus de raisin lentement épaissi par chauffage dans des chaudrons en plomb, pourrait avoir contribué au déclin de Rome en ayant favorisé le développement du saturnisme.

À la fin de l'Empire romain, la production minière et métallurgique se limitait à un nombre restreint de métaux, une situation qui allait assez peu changer jusqu'à la Révolution industrielle (et même jusqu'à l'époque moderne, XIX^e et XX^e siècles). Les métaux en question étaient l'argent, l'arsenic, le cuivre, l'étain, le fer, le mercure, l'or et le plomb.

Révolutions industrielles et période actuelle

À la chute de l'Empire romain a succédé le Moyen Âge, une longue période d'instabilité politique, de crises et de faible croissance en Europe, surtout au cours de la période allant jusqu'au X^e siècle de notre ère (marqué par l'apparition de la société féodale). Cette première période du Moyen Âge s'est traduite par une chute des productions d'or et d'argent et par des pillages systématiques par les Vikings des stocks monétaires d'argent disponibles dans les villes côtières de l'Europe du Nord-ouest.

La découverte, en 983, de la riche mine d'argent, de cuivre et de plomb des monts Rammelsberg, près de Goslar (centre-nord de l'Allemagne), a constitué une étape importante dans l'histoire du Saint Empire romain germanique, la ville de Goslar devenant ville impériale au X^e siècle, l'empereur s'y faisant construire un palais au XI^e siècle. Le développement progressif de nombreuses exploitations souterraines d'argent dans les Vosges (Sainte-Marie-aux-Mines), la Forêt Noire, la Bohême, la Saxe et la Sardaigne marqua profondément la structure économique et politique du continent européen pendant la seconde partie du Moyen Âge et même jusqu'au début du XIX^e siècle. La poudre noire utilisée pour la première fois comme explosif en 1627 dans la mine de Banská Štiavnica, aujourd'hui située au centre de la Slovaquie, a été l'innovation technologique majeure de cette période. C'est dans cette ville qu'a été créée la première École des mines d'Europe, en 1735.

La Révolution industrielle est en fait une série d'évolutions intervenues au cours d'une période couvrant plus de deux siècles, marquée par des innovations majeures dans les domaines des mines et de la métallurgie :

- La machine à vapeur, mise au point par Thomas Newcomen au début du XVII^e siècle, puis fortement améliorée par James Watt en 1769, a été à l'origine de la première Révolution industrielle, en permettant le pompage des eaux souterraines et donc l'exploitation plus en profondeur des riches gisements d'étain des Cornouailles ;
- La découverte de la stratigraphie et des séquences de déposition des formations géologiques par William Smith dans le sud de l'Angleterre, en 1801, a fourni un guide de prospection jusqu'alors inexistant, qui a permis de trouver des gisements de charbon en profondeur, un élément clé de l'industrialisation de l'Angleterre ;
- La naissance de la métallurgie moderne de l'acier (sidérurgie), avec l'invention du convertisseur Bessemer, en 1857. Avant cette date, l'acier était très rare et presque aussi cher que l'argent ;
- La naissance de la production industrielle d'aluminium grâce aux procédés Bayer de production d'alumine à partir de la bauxite (1898) et de production d'aluminium à partir de l'alumine, par électrolyse, au moyen du procédé Hall-Héroult (1886-1888). Avant ces dates, la production de l'aluminium à partir du procédé Sainte-Claire Deville (1859) était si coûteuse que son usage était essentiellement réservé à la production d'objets précieux, notamment par l'orfèvre Christofle ;
- La dynamite, découverte par les frères Nobel en 1866, permettant d'énormes gains d'efficacité dans le creusement de galeries et de tunnels ;
- La disponibilité massive d'énergies fossiles bon marché et l'électrification, à partir du XIX^e siècle, permettent l'avènement du machinisme moderne.

Tous les éléments étaient désormais en place pour permettre l'explosion de l'usage des métaux au cours du XX^e siècle. À son commencement, la gamme des métaux cou-

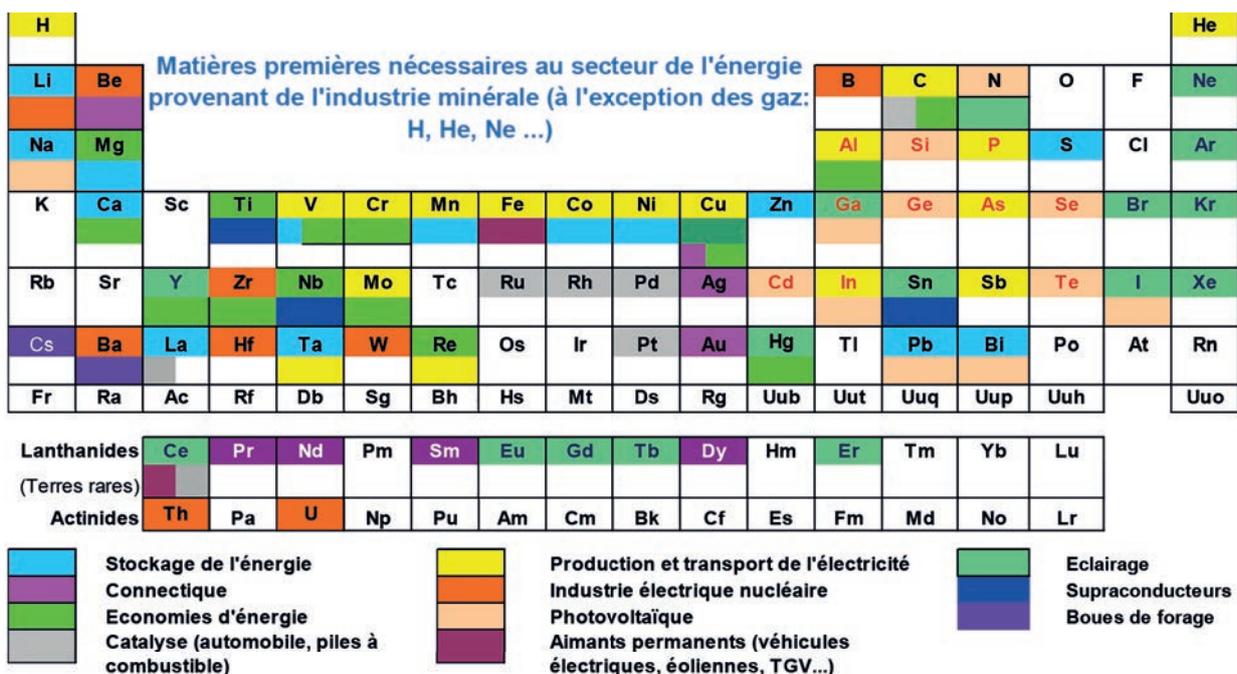


Figure 2 : Éléments nécessaires aux technologies de production et de stockage, ainsi qu'à la distribution ou aux économies d'énergie.

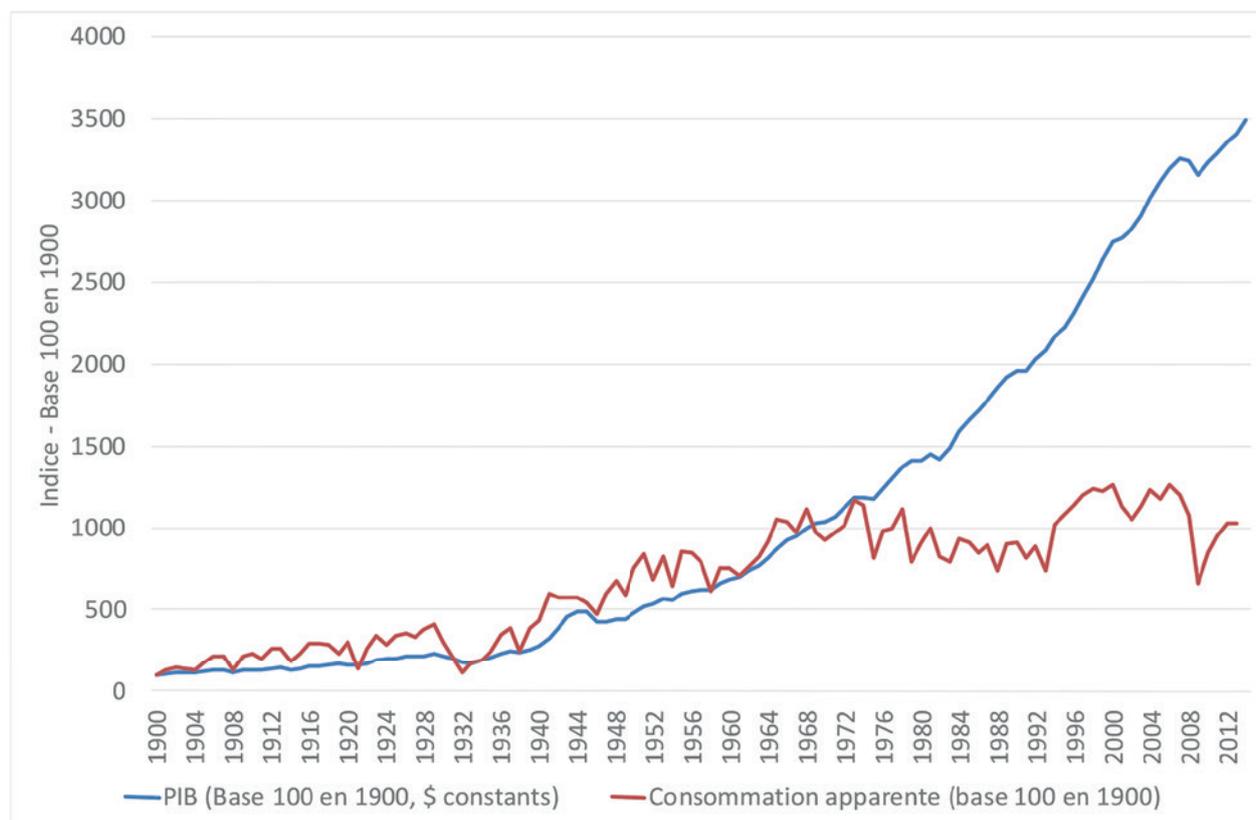


Figure 3 : Évolutions relatives du PIB et de la consommation apparente d'acier aux États-Unis - Période 1900-2013.
Source des données : USGS Data series, Bureau of Economic Analysis (GDP 1929-2013).

ramment utilisés n'avait que peu évolué depuis l'époque romaine, seuls l'aluminium et le zinc étaient venus s'ajouter à la liste des métaux d'usage courant.

Un peu plus de cent ans plus tard, la situation est très différente : aujourd'hui on dispose pratiquement de tous les éléments du tableau périodique des éléments chimiques, qui sont nécessaires au fonctionnement des technologies modernes (voir la Figure 2 de la page précédente, qui prend l'exemple du domaine de l'énergie). À cette diversification se combine une massification de la production.

Plusieurs groupes de métaux sont des marqueurs du développement économique moderne :

- Les métaux indispensables à la construction des bâtiments, des infrastructures et aux transports : ce sont essentiellement l'acier (voir la Figure 3 ci-dessus), l'aluminium, le cuivre, le plomb et le zinc (métaux d'infrastructure) ;
- Les métaux liés à la production, au stockage, à la distribution ou aux économies d'énergie (voir la Figure 2 de la page précédente) ;
- Les métaux nécessaires aux technologies de l'information et de la communication (TIC) : pas moins de soixante éléments chimiques sont utilisés dans la production des ordinateurs, des tablettes et autres *smartphones*.

La production et la consommation des métaux d'infrastructure croissent rapidement tout particulièrement en début de cycle de développement économique. La croissance de la consommation apparente d'acier est alors corrélée à la croissance du PIB, comme le montre

l'exemple des États-Unis (voir la Figure 3 ci-dessus), pendant la période 1900-1972, qui se caractérise par le poids du développement urbain et des infrastructures, ainsi que par l'essor de son industrie productrice de biens, avec au premier rang l'automobile. Après 1972, la croissance du PIB continue mais de manière décorrélée par rapport à la consommation apparente d'acier, qui, elle, cesse de croître. La croissance du PIB au cours de cette seconde phase est largement sous-tendue par le développement des services et de produits de haute technologie à forte valeur ajoutée. L'économie chinoise se situe actuellement au point de transition entre ces deux stades majeurs du développement économique.

Les deux autres segments (les métaux pour des applications dans le domaine de l'énergie et les métaux destinés aux TIC) se sont rapidement développés au cours des quarante dernières années sous l'effet d'innovations technologiques de plus en plus rapides. Ils font appel à de nombreux métaux rares, dont beaucoup n'étaient auparavant connus que des seuls physiciens et chimistes. Quelques exemples de ces métaux rares et de leurs usages sont indiqués ci-après :

- l'euporium et le terbium, deux terres rares très rares servent à la génération des couleurs de nos écrans lumineux (postes de télévision, tablettes, *smartphones*), mais aussi, avec l'holmium, à la protection des billets de banque contre la contrefaçon ;
- l'indium et l'étain sont utilisés dans les conducteurs électriques transparents des écrans plats ;
- le néodyme, le fer et le bore pour la fabrication des ai-

mants permanents présents dans de très nombreuses applications (automobile, aéronautique, défense, éoliennes à entraînement direct, disques durs, *smartphones*) ;

- des métaux réfractaires (niobium, molybdène, rhénium, tantale, tungstène) entrent dans la composition des superalliages indispensables à la fabrication des réacteurs performants des avions modernes ;
- argent, bismuth, arsenic, cuivre, fer, gallium, germanium, or, plomb, silicium, sélénium, tantale, tellure, palladium, yttrium et zirconium nécessaires (notamment) à la production des cartes mères de nos *smartphones*, de nos ordinateurs et de nos tablettes. Ainsi les cinq milliards de *smartphones* construits à ce jour à travers le monde représentent-ils un stock représentant 36 % de la production mondiale annuelle de palladium, et 6 % de celles d'argent et d'or. Le gallium est aussi essentiel à la production des diodes électroluminescentes dont l'utilisation pour l'éclairage croît très rapidement, car elles permettent un gain énergétique d'au moins 75 % par rapport aux ampoules à filament de tungstène, tout en durant, en moyenne, 25 fois plus longtemps ;
- le lithium et le cobalt sont utilisés pour fabriquer les batteries au lithium qui sont omniprésentes dans les appareils électriques et électroniques mobiles, ce marché connaissant actuellement une croissance de l'ordre de 20 % par an ;
- argent, arsenic, bismuth, cadmium, cuivre, iode, indium, gallium, sélénium, silicium et tellure sont utilisés par les

diverses technologies de panneaux solaires photovoltaïques ;

- le béryllium pur présent dans les gyroscopes et les sondes anémométriques des avions, dans les télescopes spatiaux (Hubble, James Webb), dans les haut-parleurs des chaînes audio de haut de gamme ou encore dans les appareillages de rayons X et, sous la forme d'alliages cuivre-béryllium, dans de nombreuses pièces soumises à des frottements intenses (rotules de trains d'atterrissage, charnières des portes d'avion...).

Ce ne sont là que quelques exemples. Nos sociétés modernes ont développé une dépendance absolue vis-à-vis de métaux parfois extrêmement rares, l'exemple extrême étant le rhénium, dont la production mondiale, en 2015, n'a été que de 46 tonnes (selon l'USGS [9]). Sans lui nos avions de ligne seraient plus énergivores.

Le lecteur intéressé trouvera sur le portail français dédié aux matières premières minérales (<http://www.mineralinfo.fr>) des informations détaillées sur nombre des métaux rares évoqués ici.

Les défis pour l'avenir

Les applications d'innovations technologiques peuvent rapidement connaître le succès sur les marchés mondiaux. Cela se traduit par une croissance élevée de la production des métaux (voir la Figure 4), un défi pour l'industrie minière, car il faut trouver et mettre en production

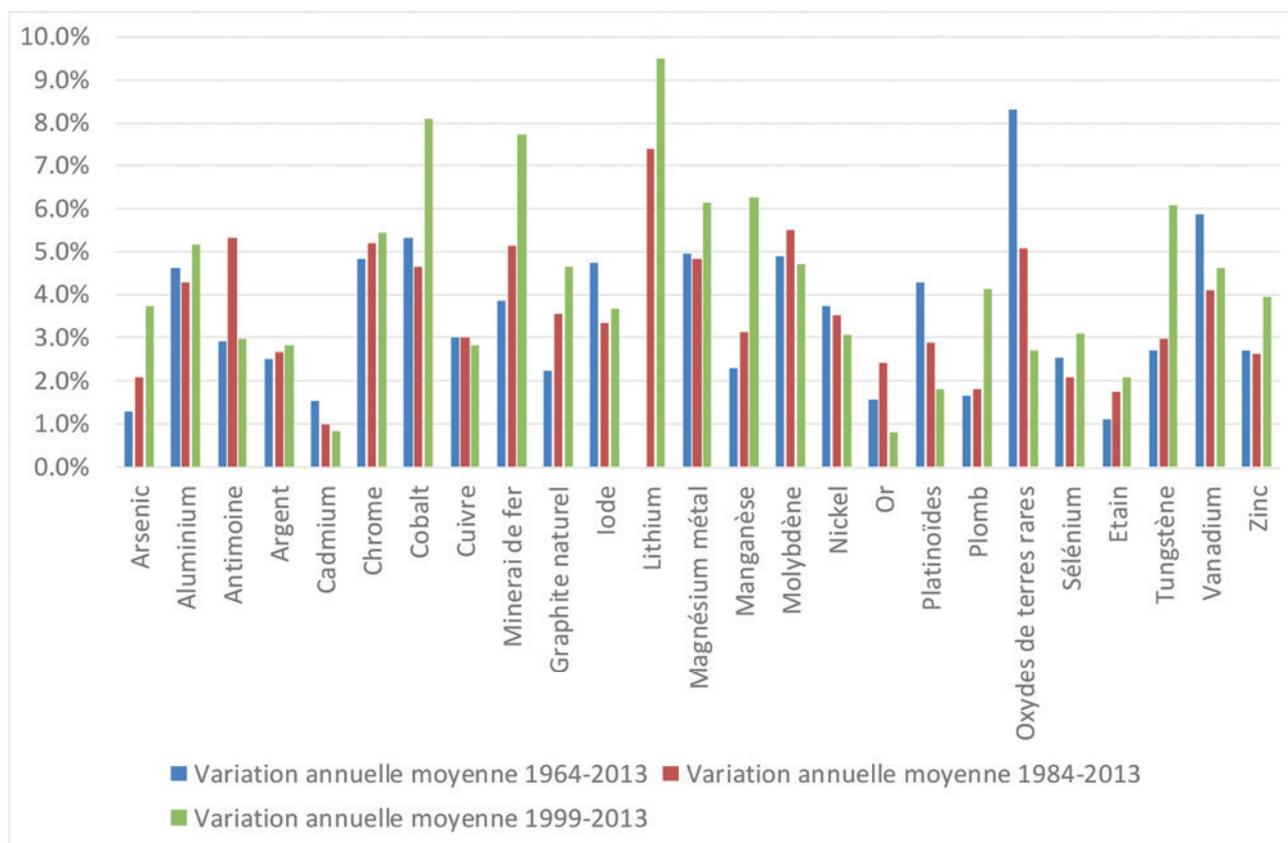


Figure 4 : Évolution au cours de trois périodes (1964-2013 : 50 ans, 1984-2013 : 30 ans, et 1999-2013 : 15 ans) de la production annuelle moyenne d'une sélection de matières premières minérales.

Source des données : USGS Data Series 140 et World Mining Data - Photo © P. Christmann, BRGM.

de plus en plus de gisements. Cela nécessite des investissements importants tant en recherche minière (20 milliards de dollars en 2012, un record historique) que pour la mise en exploitation de nouveaux gisements (un investissement qui a été de 250 milliards de dollars en 2012 [10]). Depuis 1900, l'augmentation de la production de métaux a été massive, elle est sans précédent historique : la production d'acier a été multipliée par 57, celle d'aluminium par environ 7 000, celle de cuivre par 36 et celle de phosphates par 70.

Une telle envolée de la production n'a été possible que grâce à la disponibilité d'énergies fossiles bon marché. La production de métaux et de ciment consomme actuellement environ 10 % de l'énergie produite mondialement, la production de l'aluminium, de l'acier et du ciment représentant environ 90 % de ce total.

La croissance de la production mondiale (et donc de la demande, aux effets de stocks près) est souvent rapide (> 2 %/an), ce qui à terme peut poser nombre de problèmes. Si la disponibilité géologique ne paraît pas devoir être un problème compte tenu du très important stock de gisements encore inconnus disponibles dans les trois premiers kilomètres superficiels de la croûte terrestre - l'espace souterrain exploitable avec les technologies actuelles (voir, par exemple, les travaux de Kesler relatifs au cuivre [11]) ; de nombreux obstacles existent qui pourraient à l'avenir restreindre l'accès aux matières premières minérales. Un problème majeur est l'acceptabilité sociétale de l'industrie minière : une acceptabilité qui est très faible dans les pays développés densément peuplés, où le voisinage d'une mine ou d'une fonderie est considéré comme source de nuisances. Elle est décroissante dans les pays en développement, où là ce sont des conflits d'usage des terres qui freinent les projets miniers.

Ce développement rapide de la consommation de minerais pose aussi d'importantes questions en matière de disponibilité de l'énergie et des impacts liés à sa production, en raison de la part qu'y représentent les énergies carbonées fossiles. Or, la transition vers la production de sources d'énergie dé-carbonées accélèrera encore la demande mondiale en métaux, comme le montrent les travaux du Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques [12] et, en France, ceux de l'Alliance nationale pour la coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE) [13].

Il peut aussi avoir un impact important sur la quantité et la qualité d'eau disponible pour d'autres usages humains, ainsi que sur les terres arables. Il est source de rejets dans l'air et les eaux et de déchets (résidus miniers, résidus de traitement des minerais, de la métallurgie) potentiellement polluants. Ces résidus, qui peuvent représenter des centaines de millions de tonnes, peuvent être une source importante de pollutions chroniques, pendant des siècles (voire des millénaires). La dépollution et la mise en sécurité d'anciens sites miniers peuvent, dans certains cas, faire peser des risques importants sur les comptes publics. Ainsi, un récent rapport du Bureau de la vérificatrice générale de la province de l'Ontario [14], l'une des prin-

cipales provinces minières du Canada, estime à environ 1 milliard de dollars américains le coût de la réhabilitation environnementale des principaux sites miniers polluants de cette province (un coût non couvert par des provisions adéquates et donc potentiellement à la charge du contribuable ontarien).

Le développement de la RSE, de la transparence et de la gouvernance de l'industrie minière, l'intégration dans le coût des matières premières minérales d'externalités jusqu'ici laissées à la charge des États (et donc du contribuable), ainsi que celui de la circularisation de l'économie sont des enjeux majeurs pour l'avenir non seulement de l'industrie minière, mais aussi de l'humanité, comme le montre un récent ouvrage du Conseil général de l'économie au titre révélateur « L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources » [15].

Dans ce contexte, le rôle de la Chine, actuellement le premier producteur mondial de près de quarante matières premières minérales, sera déterminant. Aujourd'hui, la gestion des entreprises de ce pays est des plus opaques, celles-ci n'adhérant que très marginalement (ou pas du tout) aux initiatives internationales de développement de la transparence et de la RSE, telles que la *Global Reporting Initiative*. Cet organisme non gouvernemental promeut la publication de rapports RSE à l'aide de lignes directrices validées par un vaste groupe d'acteurs, dont le Programme des Nations unies pour l'environnement. Sur les 163 entreprises minières et/ou métallurgiques qui ont publié, au titre de l'année 2013, un rapport RSE conforme aux lignes directrices de la GRI, une seule était contrôlée par un groupe minier et métallurgique chinois.

Depuis l'aube de l'humanité, minerais et métaux sont des ressources stratégiques pour le développement humain. Leur contrôle est un élément important des politiques industrielles, une expression qui semble pourtant frappée d'obsolescence dans de nombreux pays développés d'Europe ou aux États-Unis, lesquels y voient peut être une lointaine réminiscence des pratiques planificatrices de l'ex-URSS. Un point de vue qui ne paraît pas être partagé par les dirigeants de divers pays asiatiques, parmi lesquels la Chine, la Corée et le Japon, trois des pays au cœur de l'émergence de l'Asie de l'Est en tant que nouvelle superpuissance économique mondiale (même si les rivalités territoriales non résolues en Mer de Chine pourraient en marquer les limites). Ces pays accordent une grande importance à la sécurité de leurs approvisionnements considérés comme stratégiques pour leurs filières industrielles qui en dépendent.

Les minerais et métaux étant essentiels au développement humain au même titre que les autres ressources naturelles, le XXI^e siècle se trouve confronté au problème majeur posé par les limites physiques de l'écosystème terrestre et de sa résilience face aux pressions résultant d'une population mondiale qui pourrait atteindre le chiffre de 11 milliards d'individus d'ici à la fin de ce siècle, avec des modes de vie de plus en plus intensifs en ressources mondiales. Le défi majeur de ce siècle est de concilier développement (au sens large) et développement durable.

Le succès de cette transition nécessite une réforme de nos sociétés et de nos modes de pensée qui soit aussi importante que celle introduite par la découverte de l'argent dans le massif grec du Laurion, six siècles avant notre ère.

Bibliographie

[1] SEMAW (S.), ROGERS (M.J.), QUADE (J.), RENNE (P.R.), BUTLER (R.F.), DOMINGUEZ-RODRIGO (M.), STOUT (D.), HART (W.S.), PICKERING (T.) & SIMPSON (S.W.), *2.6-Million-year-old stone tools and associated bones from OGS-6 and OGS-7, Gona, Afar, Ethiopia* - *J Hum Evol.*, 2003.

[2] TYLECOTE (R.F.), *A history of metallurgy - 2nd edition*, Maney, for the Institute of Materials, 1992.

[3] YAHALOM-MACK (N.), LANGGUT (D.), DVIR (O.), TIROSH (O.), ELIYAHU-BEHAR (A.) & EREL (Y.), *The Earliest Lead Object in the Levant*, *PLoS ONE* 10(12): e0142948, 2015 (doi:10.1371/journal.pone.0142948).

[4] VARBERG (J.), KAUL (F.) & GRATUZE (B.), *Danish Bronze Age glass beads traced to Egypt - ScienceNordic*, 2015 - Article en ligne sur Internet, daté du 8 décembre 2014 :

<http://sciencenordic.com/danish-bronze-age-glass-beads-traced-egypt>

[5] DE CALLATAY (F.), « Réflexions quantitatives sur l'or et l'argent non monnayés à l'époque hellénistique (pompes, triomphes, réquisitions, fortunes des temples, orfèvrerie et masses métalliques disponibles) », in *Approches de l'économie hellénistique*, Entretiens d'archéologie et d'histoire 7, Saint-Bertrand-de-Comminges, DESCAT (R.) et al. (eds.), 2006.

[6] U.S. Geological Survey, *Mineral commodity summaries 2016 - U.S. Geological Survey*, 2016, 202 p., <http://sciencenordic.com/danish-bronze-age-glass-beads-traced-egypt>

[7] MADDISON (A.), *The World Economy - Development Centre Studies - Development Center of the Organisation for Economic Cooperation and Development*, 2006.

[8] Article Wikipedia (édition anglaise) : *Roman metallurgy* (https://en.wikipedia.org/wiki/Roman_metallurgy, consulté le 2 février 2016).

[9] HONG (S.), CANDELONE (J.P.), PATTERSON (C. C.) & BOUTRON (C. F.), *Greenland Ice Evidence of Hemispheric Lead Pollution Two Millennia Ago by Greek and Roman Civilizations - Science*; September 23, 1994 ; 265, 5180, pp. 1841-1843.

[10] <http://www.snl.com/>, base de données sur l'industrie minière et métallurgique mondiale (accessible que sur abonnement).

[11] KESLER (S.) & WILKINSON (B.), "Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits", *Geology*, 36:255-25, 2008.

[12] MOSS (R.), TZIMAS (E.), WILLIS (P.), ARENDORF (J.), THOMPSON (P.), CHAPMAN (A.), MORLEY (N.), SIMS (E.), BRYSON (R.), PEARSON (J.), TERCERO ESPINOZA (L.), MARSCHIEDER-WEIDEMANN (F.), SOULIER (M.), LÜLLMANN (A.), SARTORIUS (C.) & OSTERTAG (K.), *Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (Petten, Netherlands), 2013 (<http://setis.ec.europa.eu/publications/jrc-setis-reports/jrc-report-critical-metals-energy-sector>).

[13] VIDAL (O.), AUTRET (E.), CHRISTMANN (P.), CLÉMENT (D.), PRIMARD (P.) & RIMBAULT (L.), « Ressources minérales et énergie », Rapport du groupe « Sol et sous-sol » de l'Alliance Ancre, VIDAL (O.) (coordinateur), 2015 (consultable en ligne :

http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1297&fn=Ancre_Rapport_2015-Ressources_minerales_et_energie_0.pdf).

[14] LYSIK (B.), rapport annuel du Bureau de la vérificatrice générale de l'Ontario (Canada), 2015, 892 p. (consultable en ligne : http://www.auditor.on.ca/fr/rapports_fr/fr15/2015AR_fr_final.pdf).

[15] VALÉRIAN (F.), CURCHOD (A.), OTT (N.) & PERTHAIN (C.), *L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources*, ouvrage du Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies publié par la Documentation Française, 2015.

Un facteur déterminant de la géopolitique des matières premières : la stratégie industrielle de la Chine

Par Joël RUET

Chercheur CNRS au Centre d'économie de Paris-Nord (CEPN) et chercheur associé i3-CRG

La « Chine technologique », ou cette partie avancée de l'écosystème industriel chinois, loin d'être seulement un marché pour les firmes occidentales ou une vaste entreprise de *dumping* pour des technologies mûres appelée à s'essouffler financièrement, possède un véritable « avantage comparatif construit » sur les plans de la technologie et de la techno-gouvernance. L'enjeu est de saisir comment ce véritable écosystème a été patiemment bâti au moyen d'une vision cohérente « de la mine au prescripteur technologique », pour évaluer ses résiliences actuelle et future.

Introduction

Leader mondial du photovoltaïque, premier marché pour les énergies éolienne et solaire, en avance sur la mobilité électrique et, plus généralement, numéro un mondial des investissements dans les énergies renouvelables, expérimentatrice à grande échelle dans l'urbanisme, la Chine est incontestablement bien placée dans la course globale aux technologies vertes et aux savoir-faire associés. Nouveau géant du nucléaire, après avoir effectué un véritable rattrapage technologique dans ce domaine, et y disposant d'une capacité de recherche avancée, porteur également d'un marché qui tire l'innovation dans le domaine des matériaux composites ou encore, à parité avec les États-Unis, dans la course aux supercalculateurs, ce pays est aujourd'hui un « producteur technologique ».

Avec la crise de surcapacités et la « crise de ralentissement » qu'elle connaît actuellement, la Chine peut-elle voir cette position altérée ? Ou bien sa stratégie industrielle unique lui permettra-t-elle de consolider l'avantage comparatif qu'elle a construit ?

Pour mesurer la capacité qu'a la Chine technologique à ne pas s'essouffler dans une course mondiale amenée à s'intensifier, un petit historique s'impose, au-delà des rhétoriques faciles en général inspirées de la théorie du commerce international, mais méconnaissant tout autant les réalités industrielles que la possibilité, en dynamique, de « construire des avantages comparatifs », auxquels la théorie du commerce international reste attachée, mais d'une manière trop statique. Ainsi, en 2012 et 2013, quand les États-Unis, l'Europe et le Japon ont vilipendé la Chine l'accusant de concurrence déloyale dans le secteur photovoltaïque, les explications se sont limitées au fait que le géant asiatique avait accordé des subventions douteuses

et des prêts à des taux très préférentiels à ses industriels nationaux.

Mais la réalité est plus complexe. Les chiffres, impressionnants, étant connus (voir ZHAO & RUET, 2014), on privilégiera ici la mise au jour des régularités stylisées, les modèles d'affaires et de gouvernance et les stratégies qui sous-tendent ces évolutions ; cet article s'appuyant sur une patiente enquête ⁽¹⁾.

Comment d'une faiblesse faire un avantage, ou les ressorts miniers de l'appareil d'Etat chinois

阴成为阳 Yin devient Yang

Faut-il lire la Chine par le commerce international et le marché, ou bien par la construction d'industries nationales et le hors-marché ?

(1) Cet article est le fruit d'enquêtes industrielles et d'entretiens menés de 2010 à 2012 dans les secteurs automobile, minier, sidérurgique et métallurgique, et nucléaire, et d'entretiens menés de 2013 à 2015 auprès d'experts, de décideurs et d'influenceurs chinois des secteurs énergétique, des « technologies vertes », de la mobilité électrique, des politiques industrielles et de l'innovation technologique. Il est impossible de citer tous ceux qui m'ont aidé par leurs contributions et leurs échanges à écrire cet article. Mais je tiens à remercier tout particulièrement pour le temps qu'ils m'ont consacré, pour leur constance et leur confiance : mes amis Kang Rongping, membre de l'Académie des Sciences sociales de Chine, ainsi que Jimmy Wang et Peng He, qui m'ont fait voir de l'intérieur la réalité de la pensée économique et publique chinoise, et le Centre for China in the World Economy de l'Université de Tsinghua, que dirigent Li Daokui, qui est membre du conseil monétaire chinois, et Frank Fan, qui, à l'époque, était directeur opérationnel du CCWE et qui, aujourd'hui, est Doyen de la faculté d'économie du Yunnan. Toutes les interprétations restent miennes.

L'approche de l'économie chinoise par le commerce international conduit vite à une aporie : dans cette lecture, même si les investissements étrangers ont été massifs, même si le marché intérieur est large, et que l'épargne l'est plus encore, la Chine serait bloquée dans la voie de l'exportation, et ce d'autant plus que son outil productif resterait en large partie contrôlé, du moins quant au capital et plus encore à l'appropriation de la valeur ajoutée, par les firmes étrangères. Le talon d'Achille indépassable de la Chine, un pays pourtant bien doté par la nature, mais un « pays nombreux », disait De Gaulle en raccourci, serait alors sa dépendance énergétique et minière, dépendance quantitative (*sourcing*) et dépendance économique (*pricing*). Une telle analyse statique conduit à penser que cette voie chinoise ne peut que déboucher sur sa dépendance aux importations, son blocage dans une économie de faible valeur ajoutée et, finalement, sur une Chine « vieille avant d'avoir été riche ». Cette lecture évoque les mots du peintre romantique Eugène Fromentin dans son *Année dans le Sahel*, laissant voir une Chine qui « voyage orgueilleusement, mais assez tristement, dans la prose ». Nous pensons que cela conduit à des erreurs d'analyse. Par exemple, Artus (2016) explique par la baisse de la compétitivité prix de la Chine la baisse de ses importations ; le pays rentrerait dans sa trappe commerciale.

L'observation d'une Chine au quotidien un peu plus allante (sinon épique, telle que la dépeint sa propagande) nous fait penser le contraire : si le commerce a ses mérites, il faut réhabiliter la lecture par l'industrie... et la mine (voir RUET 2016, à paraître). À l'inverse d'Artus, nous pensons que cela traduit tout simplement moins d'assemblage pur (pour la ré-exportation), donc bien une reconfiguration de l'appareil industriel vers les marchés locaux, et surtout que cela révèle une augmentation continue du taux d'intégration locale de la production des firmes en Chine, nationales ou étrangères, visant l'exportation ou le marché domestique. Bref, un écosystème industriel diversifié local existe, que la théorie du commerce international n'explique pas.

Reposons la question en des termes industriels : la Chine a capitalisé sur sa trajectoire de politique industrielle et a activement orienté les investissements directs étrangers pour servir un objectif d'appropriation technologique. Mais la thèse la plus centrale de cet article est que c'est sur la base du secteur minier que le pouvoir central a repris le contrôle de son industrie et qu'il a réussi à encadrer largement la captation des savoir-faire technologiques. Cela en deux temps, tous deux « hors-marché » :

- un temps méconnu : celui de la reprise en main par le pouvoir central du secteur minier (et énergétique) domestique, et de la constitution d'oligopoles concurrentiels domestiques d'État alignés sur ses objectifs politiques, qui prépare le second temps :
- un temps *a priori* connu sur l'amont, celui de l'instauration de quotas d'exportation sur les métaux rares, mais peu documenté sur sa face technologique en aval : la mise en place de stratégies administrées de partage de la propriété intellectuelle en vue du rattrapage technologique.

Avec Deng Xiaoping et son successeur direct Jiang Zemin, le pouvoir central a fonctionné par essais et erreurs.

Cela lui a permis de développer, en s'ouvrant aux investissements étrangers, mais aussi grâce au relais du Parti communiste au niveau des provinces et des municipalités, l'économie exportatrice chinoise. C'est cette période qui correspond au mythe tenace de la libéralisation chinoise par le commerce (avec déjà sa face non-libérale opportunément occultée, celle du parti communiste local bon gestionnaire « hors-marché » de la croissance).

Graduellement, à partir de l'arrivée de Zhu Rongji comme Premier ministre de Jiang Zemin en 1998, et plus encore pendant le règne du président Hu Jintao (2003-2012), le pouvoir central, qui avait économiquement perdu la main face aux provinces, dans les décennies 1980 et 90, a repris l'avantage.

Notre thèse est qu'il l'a fait à partir du domaine minier, en forçant les entreprises minières publiques provinciales (de véritables États dans l'État, quand, par exemple, le groupe Jinchuan Nickel, de la province du Gansu, contrôle 92 % des réserves nationales de ce minerai, ou quand la Nature a concentré d'énormes dépôts de cuivre dans la province du Guanxi...), à passer, pour leur internationalisation, par des entreprises centrales nouvellement créées dotées d'un seul actif, à savoir : le monopole dans l'accès aux investissements à l'étranger.

Le système externe était très simple : tout investissement minier de la Chine à l'étranger devant passer par un *consortium* dirigé par une des entreprises « de Pékin », celles-ci ont fini par attirer les meilleurs cadres, à capter les ressources des banques d'État et les meilleures parts des bénéfices. C'est par le biais de ces entreprises qu'ont été conclus les contrats « infrastructure contre ressources », notamment avec des États africains, mais aussi les contrats d'ingénierie dans l'Asie en développement : là encore, ce sont ces entreprises minières centrales, avec les entreprises d'infrastructure dépendant du pouvoir de Pékin, qui ont la haute main sur les prix de valorisation des matières premières, une valorisation étant nécessairement subjective et politique sur ce « hors-marché ».

Ces coquilles initialement vides, créées à dessein, collectivement dotées d'un quasi-monopole d'accès aux marchés étrangers, ont vite repris la préséance sur les entreprises provinciales, les « vassalisant » en quelque sorte, aspirant également leurs meilleurs cadres, et sont vite devenues ce qu'elles sont aujourd'hui, à savoir des champions financiers et techniques (Chinalco, Minmetals...). Elles ont, en outre, su investir dans la R&D minière et métallurgique.

Cette politique de *consortiums* a été d'application sévère pour pouvoir être couronnée de succès. Elle fut surtout plus efficace que sa contradiction idéologique libérale ne le croit, car elle fut assortie d'une volonté de créer ce que nous appelons un « oligopole concurrentiel », à travers la concentration du secteur entre les mains de quelques acteurs idéalement inféodés à Pékin, mais sans aller jusqu'au monopole domestique. Ainsi, dans le domaine des métaux non-ferreux, le pouvoir a visé à ce que trois ou quatre entreprises se partagent la redéfinition du secteur, dans l'acier ce sont sept champions qui furent dési-

gnés (à défaut pour le pouvoir politique central de pouvoir concentrer plus) et, dans le domaine pétrolier, initialement contrôlé par un champion central, le pouvoir a scindé ce monopole pour créer un oligopole compétitif de trois entreprises principales. La compétence technologique a fini par devenir un des éléments centraux de différenciation entre ces entreprises ainsi mises en concurrence intra-étatique.

Elles sont de plus parfaitement alignées sur le pouvoir central et parfaitement en mesure de favoriser les industries aval jugées prioritaires. C'est ce transfert de pouvoir amont en une influence sur la modernisation de l'aval, *via* des administrations ayant répliqué les recettes ayant fonctionné à l'amont, qui est selon nous typique du rattrapage technologique industriel chinois. C'est en effet après cette première étape d'organisation de la structure industrielle de l'amont et de son internationalisation que l'État chinois a mis en place le second instrument de la puissance chinoise (après une tentative avortée d'organiser un monopole de la production au moyen de concentrations forcées) consistant en l'instauration des quotas sur les exportations de terres rares... assortis de réglementations de coentreprises avec des partenaires « suggérés » par le pouvoir et de transferts de technologie « réglementés » au sein des filières aval.

Lanckriet (2012) identifie bien le mécanisme de conduite forcée vers le transfert de technologie au travers d'une étude de cas : « *Gamesa est le premier industriel étranger (espagnol) à avoir réalisé une joint-venture [avec la Chine] dans le secteur de l'éolien. Le transfert de technologie qui en a résulté et sa reproduction à très grande échelle par les industriels chinois leur ont permis de devenir des leaders mondiaux du secteur* ».

En 2003, la compagnie espagnole Gamesa obtient le droit de s'implanter sur le marché chinois en échange d'un transfert de technologie et de savoir-faire à destination des entreprises locales.

En 2005, Gamesa détient 35 % d'un marché chinois en pleine explosion.

En 2005, l'État chinois fait passer une loi de protection de son marché éolien imposant que 70 % des pièces utilisées dans les projets éoliens développés en Chine soient fabriquées localement, et par des industriels chinois.

Dès 2008, les entreprises chinoises détiennent 85 % du marché intérieur.

En 2010, les entreprises chinoises dominent le marché mondial.

Source : Lanckriet (2012).

Le même constat s'impose en ce qui concerne l'éolien, avec notamment, en 2005, une co-entreprise formée entre le géant BP Solar (filiale de British Petroleum) et China Xinjiang SunOasis.

En quelque sorte, si l'on s'abstrait de l'analyse par le commerce (investissements entrants ou sortants, matières premières entrantes brutes ou sortantes transformées), et que l'on se place sur le plan de l'accès à la technologie par les entreprises centrales, la stratégie de voie de pas-

sage obligée pour la sortie des entreprises provinciales chinoises a été émulée en voie de passage contrainte vers l'entrée des entreprises internationales.

Opportunes terres rares, précieux lithium, précieux graphite

举一反三 Listes-en un, infères-en trois

Ce qui est bon pour les terres rares l'est aussi pour le lithium, qui est très concentré dans le monde (les gisements en sont contrôlés au premier rang par des firmes australiennes, puis par la Bolivie et le Chili, et en quatrième position par le Tibet chinois).

Ce phénomène s'accroît avec le marché potentiel du lithium, les technologies du véhicule électrique voient se former, rien qu'entre General Motors et le constructeur automobile chinois de Shanghai SAIC, pas moins d'une dizaine de coentreprises *joint-venture*, qui « donnent souvent naissance à la construction de centres technologiques spécialement dédiés à la recherche et au transfert de connaissances. GM maîtrise bien le mécanisme, qu'il utilise à son avantage pour contrôler le niveau de technologie qu'il accepte de transférer et bénéficier, en échange, de l'ouverture du marché chinois et de l'accès à la manne des aides financières chinoises » ⁽²⁾ (LANCKRIET, 2012).

C'est en effet dans ce contexte qu'il faut comprendre les *soft loans* du système chinois, et non dans celui d'un hors sol financier : si le mécanisme s'accompagne de crédits ouverts à l'industrie chinoise, c'est parce qu'il est assorti d'une vision plutôt « nationalisatrice » - la propriété intellectuelle acquise grâce à des aides publiques chinoises appartenant à toutes les entreprises publiques chinoises. Si cette vision n'est pas passée dans les textes (malgré une tentative allant dans ce sens), elle a été longtemps actée dans les esprits (RUET, 2012).

Si l'on stylise, maintenant : très pourvue sur son territoire (42,3 % des réserves mondiales), profitant du court-termisme minier mondial dans l'amont et du court-termisme en termes d'accès aux marchés en aval, la Chine a opportunément joué sur les volumes et les prix pour asphyxier ses concurrents. Résultat : depuis 2006, plus de 90 % de la production mondiale de terres rares provient, selon les estimations, de Chine.

(2) Lanckriet (2012) mentionne entre autres : la création en 2012 de la joint-venture entre le constructeur automobile chinois, BAIC/BJEV, et le fabricant américain de batteries électriques, Boston Power's. En contrepartie de sa joint-venture avec BAIC/BJEV et de l'obtention d'un financement de 125 millions de dollars, Boston Power's a accepté d'établir en Chine un centre de R&D et d'ingénierie sur les batteries au lithium, ainsi qu'une usine de production de batteries. 2000-2012 : la joint-venture créée entre General Motors (GM) et SAIC Pékin s'est déclarée fortement intéressée par un transfert de technologie de la part de GM concernant la technologie hybride de la Volt, les négociations sont toujours en cours entre le constructeur américain et le gouvernement chinois.

2012 : création de Denza, une joint-venture entre Daimler et BYD.

2012 : accord de collaboration entre le constructeur chinois de véhicules électriques BYD et l'industriel américain spécialisé dans les batteries électriques, Boston Power's.

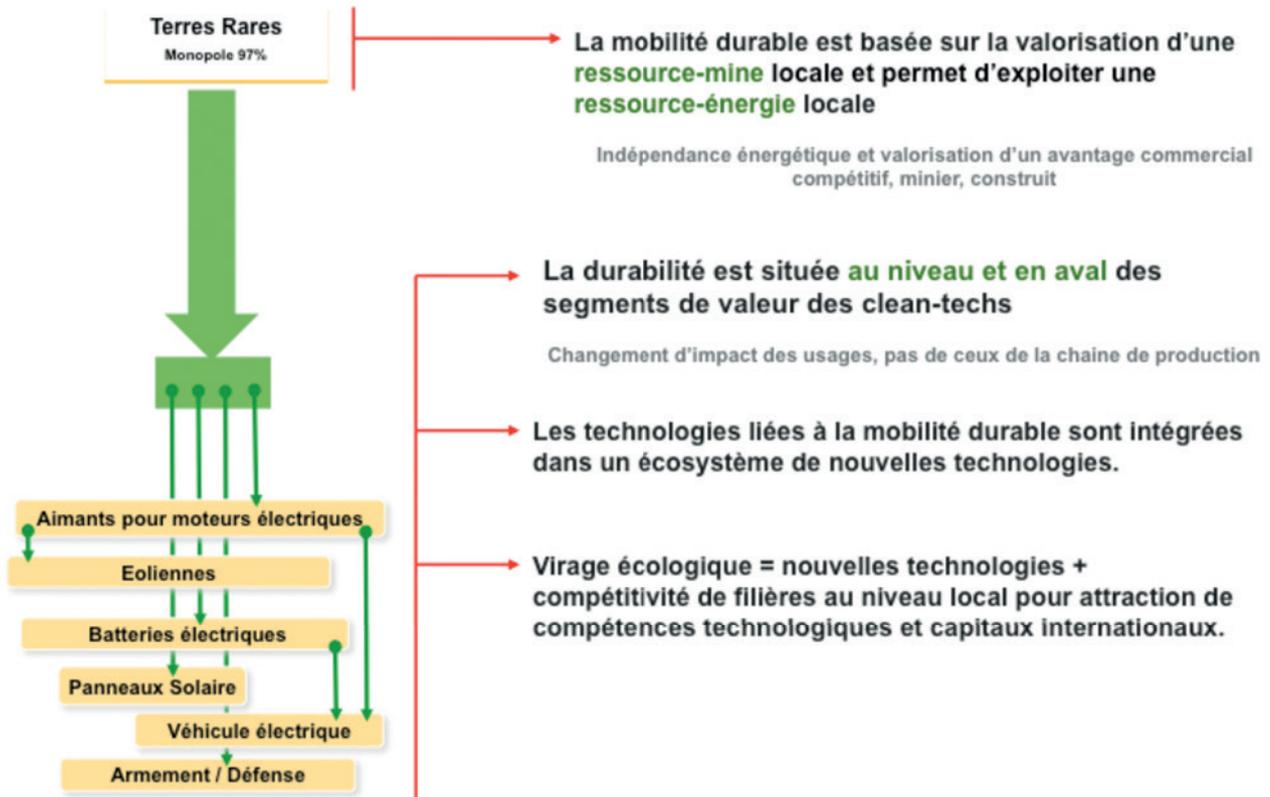


Figure 1 : Structuration amont-aval d'une filière technologique (Source : Lanckriet & Ruet (travaux non publiés), Institut mobilité durable - Mines ParisTech).

Une fois cet avantage absolu, mais non durable opportunément atteint, elle a stratégiquement préparé un avantage comparatif construit en attirant à elle et en fixant sur son sol un écosystème qui renforce et construit le sien propre : elle a utilisé les terres rares pour forcer les transferts de technologies existantes et les capacités de R&D vers son territoire, et ce afin de renforcer ses industries nationales dans le domaine des nouvelles technologies (voir la Figure 1 ci-dessus).

Soumis à aucune restriction d'accès aux terres rares, les industriels chinois ont, quant à eux, rapidement pu bénéficier d'un avantage prix. Et, pour assurer la montée en puissance de son savoir-faire technologique, la Chine a permis aux industriels étrangers d'avoir un accès comparable aux terres rares, mais sous conditions : réaliser une *joint-venture* minoritaire avec une entreprise chinoise dans un secteur « clé » autorisé par le gouvernement et délocaliser leur centre de production sur son sol.

De grands noms des *cleantechs* et des énergies renouvelables ont ainsi apporté à la Chine de précieux outils qui lui ont permis de produire des technologies efficaces et bon marché. Au-delà même de co-entreprises aux équipes mixtes toujours méfiantes, les transferts de savoir-faire par les consultants ont vite joué le rôle d'accélérateur de transferts et de transmetteurs non standards, dans d'autres secteurs (pour l'automobile : voir BALCET & RUET, 2011) ou vers d'autres contrées (voir HENRY, RUET et WEMAËRE, 2015).

Si sa politique des quotas dénoncée auprès de l'OMC par les États-Unis, l'Europe et le Japon en 2014, a été stoppée

depuis lors, le géant asiatique a pu en quelques années seulement s'imposer sur le marché des énergies renouvelables, et ce d'autant plus que la Chine a accordé un très large soutien financier (de manière plus ou moins transparente) aux entreprises chinoises désireuses de se lancer à l'international. Mais loin de se contenter de simples incitations ou de subventions tirées de la classique boîte à outils économiques, le pays a construit son positionnement en bâtissant un véritable écosystème de gestion technologique administrée sur son territoire. Celui-ci a en retour attiré tout un écosystème de *start-ups* technologiques.

Cette stratégie « hors-marché » de long terme s'est avérée payante, quand, ailleurs dans le monde, les acteurs du secteur minier, en particulier, se sont limités à une vision de marché de court terme.

Surtout, le choix de secteurs industriels des *cleantechs* (voir la Figure 2 de la page 21) est remarquablement adapté, d'une part, aux contraintes auxquelles la Chine est confrontée (sa dépendance au pétrole) et, d'autre part, à sa dotation naturelle (non seulement en terres rares, mais aussi en lithium). Mais, elle a également su pousser très loin sa réflexion dans certains domaines, réalisant une véritable révolution copernicienne industrielle, comme dans le cas du véhicule électrique. Pauvre en platinoïdes, mais riche en graphite, la Chine est particulièrement bien placée en ce qui concerne les intrants des batteries (voir les Figures 2 et 3 en pages 21 et 22).

Grâce au choix d'une construction industrielle-gestionnaire, elle a acquis un avantage comparatif au travers d'un écosystème technologique très résilient.



Photo © C. Johnston/The New York Times-REDUX-REA

Mine de terres rares à Baishazen (Chine), décembre 2010.

« La Chine a utilisé les terres rares pour forcer les transferts de technologies existantes et les capacités de R&D vers son territoire, et ce afin de renforcer ses industries nationales dans le domaine des nouvelles technologies. »

Le temps long et la « Chine technologique »

千方百计 — « 1000 méthodes et 100 plans »

Ces séquences « minières-technologiques » sont venues se greffer à un tissu industriel ancien que l'État a remanié afin de créer une « Chine technologique ».

L'acquisition de son *leadership* dans les *cleantechs*, la Chine l'a en fait construite dès le milieu des années 2000 en structurant sa filière industrielle depuis l'amont jusqu'à l'aval. L'avantage comparatif (voire absolu) qu'elle possède aujourd'hui sur ses concurrents n'aurait pu être confirmé sans un autre avantage, préconstruit celui-là, qu'elle détient dans le secteur minier.

Pour en donner une définition rapide, cette « Chine technologique » serait, au sein de l'écosystème industriel chinois :

- en compréhension, sa partie « nomadisée » ou nomadisable au sens de Pierre-Noël Giraud, c'est-à-dire sa partie aujourd'hui capable de mettre en relation entre eux divers territoires de l'industrie globale en fonction de ses intérêts propres,
- et en extension, a) les grandes entreprises d'État les plus internationalisées des secteurs précités, quelques

entreprises privées mais proches des gouvernements de province ou de grandes municipalités (par exemple, BYD aujourd'hui leader mondial dans le secteur des véhicules électriques - nous ne reviendrons pas ici sur les entreprises des télécommunications ou de l'électronique), b) les écosystèmes de fournisseurs technologiques et de sociétés de services regroupés dans des *clusters* industriels en général « historiques »⁽³⁾ qui ont été séquentiellement reconfigurés lors des années 2000-2015 pour créer des zones de spécialités et des champions nationaux et, enfin, c) les grandes universités ou les grandes administrations d'État en charge des politiques d'innovation (ministères techniques, State Council, National Development and Reform Commission - NDRC, Académies des sciences et des sciences sociales...) ou de la gestion des entreprises d'État (notamment, au niveau

(3) Il s'agit de districts établis du temps de l'occupation européenne (Shanghai, Nanjing) ou japonaise, puis de l'aide soviétique (Mandchourie : Harbin, Dalian, Shenyang) ou de clusters initiés ou redynamisés pour soutenir l'effort de guerre, puis du temps de Mao Zedong (Chongqing, Wuhan, Tianjin, Lanzhou, et, dans une certaine mesure, Beijing et Hefei). Shenzhen, sous-province du Guangdong, étant l'exception (véritable création de Deng Xiaoping, elle a certes été fondée en raison de sa proximité avec Hong Kong, mais elle s'inscrit également, et ce, dès sa conception, dans une logique d'économie ouverte à l'international).

central, la SASAC (*State-Owned Assets Supervision and Administration Commission*), sans oublier l’outil des plans quinquennaux, moteur clé dans les objectifs sinon de verdissement effectif de l’économie, tout au moins de dynamisation des technologies vertes (RUET et PAS-TERNAK, 2010).

Une fois ces restructurations opérées et un écosystème technologique mis en place, la Chine s’est positionnée en vue de sa diversification en un écosystème de technologie-services, structuré en particulier autour des *smart cities*, des *smart grids* et autres « éco-cités » : une stratégie se concrétisant avec les 89,5 milliards de dollars investis pour la seule année 2014 dans les énergies vertes, ou encore avec les expérimentations à ciel ouvert qu’elle mène à Tianjin ou à Wuhan.

Dans la première de ces deux villes, si les habitants tardent à arriver en masse et si le coût colossal des réalisations est critiqué, la Chine avance sur la voie de l’éco-cité. Ainsi, 20 % des besoins énergétiques de Tianjin seront couverts par un parc éolien et des installations photovoltaïques, la climatisation sera assurée par géothermie et des bus électriques circuleront dans ses rues.

La seconde, Wuhan, baptisée (au choix) la « Chicago chinoise » ou la « Détroit chinoise », est le théâtre d’un des plus grands projets d’éco-cité du monde : il s’agit d’un partenariat sino-français qui mettra sur un mix de technologies vertes pour transformer ce pôle urbain de 10 millions d’habitants, avec au menu : une architecture bio-

climatique, des éoliennes, des solutions solaires, des centrales biomasse et l’utilisation de piles à combustibles ⁽⁴⁾.

Une crise à sa porte ?

Vue de 2016, comme dans d’autres secteurs de son industrie, la Chine doit faire face à des enjeux de surcapacité. Et toute la question est de savoir si elle saura toujours trouver les débouchés pour ses nouveaux champions des *cleantechs*.

Contrairement à son industrie sidérurgique, par exemple, dont le développement n’a été pensé que pour répondre à ses besoins internes ou à ceux de pays émergents, sa filiale *cleantech* devrait bénéficier de l’appel d’air engendré par une demande mondiale de transformation énergétique. Notons également que la dépréciation du yuan devrait devenir un instrument régulièrement utilisé par les pouvoirs publics chinois. De quoi donner ou redonner du souffle au secteur, sur un marché par nature très concurrentiel.

La grande inconnue reste, en revanche, la capacité de la Chine à rester dans la course technologique. Dans les cinq prochaines années, elle devra démontrer sa propension à innover par elle-même, et même à « disrupter ».

(4) Pour ces paragraphes, l’auteur remercie Fanny Costes pour son appui à l’analyse.

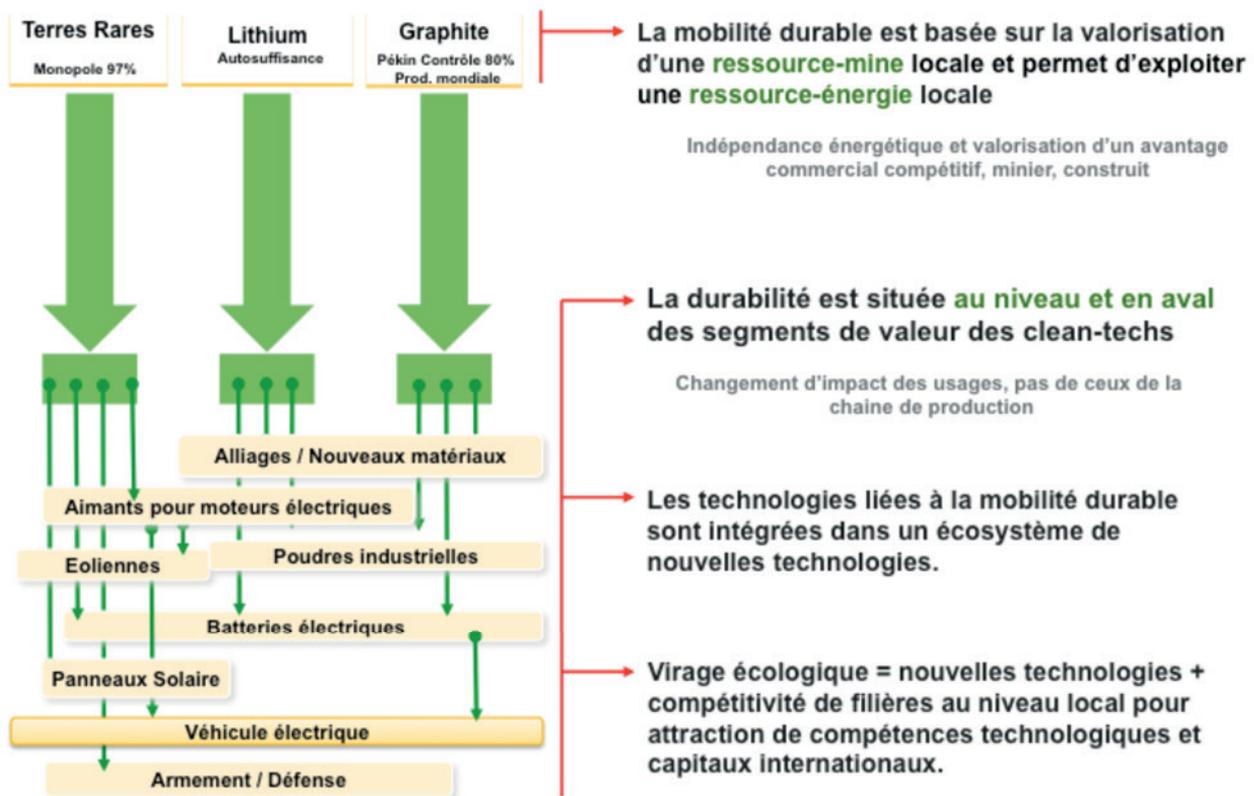


Figure 2 : Construction d’un écosystème de filières domestiques de mobilité durable (Source : Lanckriet & Ruet (travaux non publiés), Institut mobilité durable - Mines ParisTech).

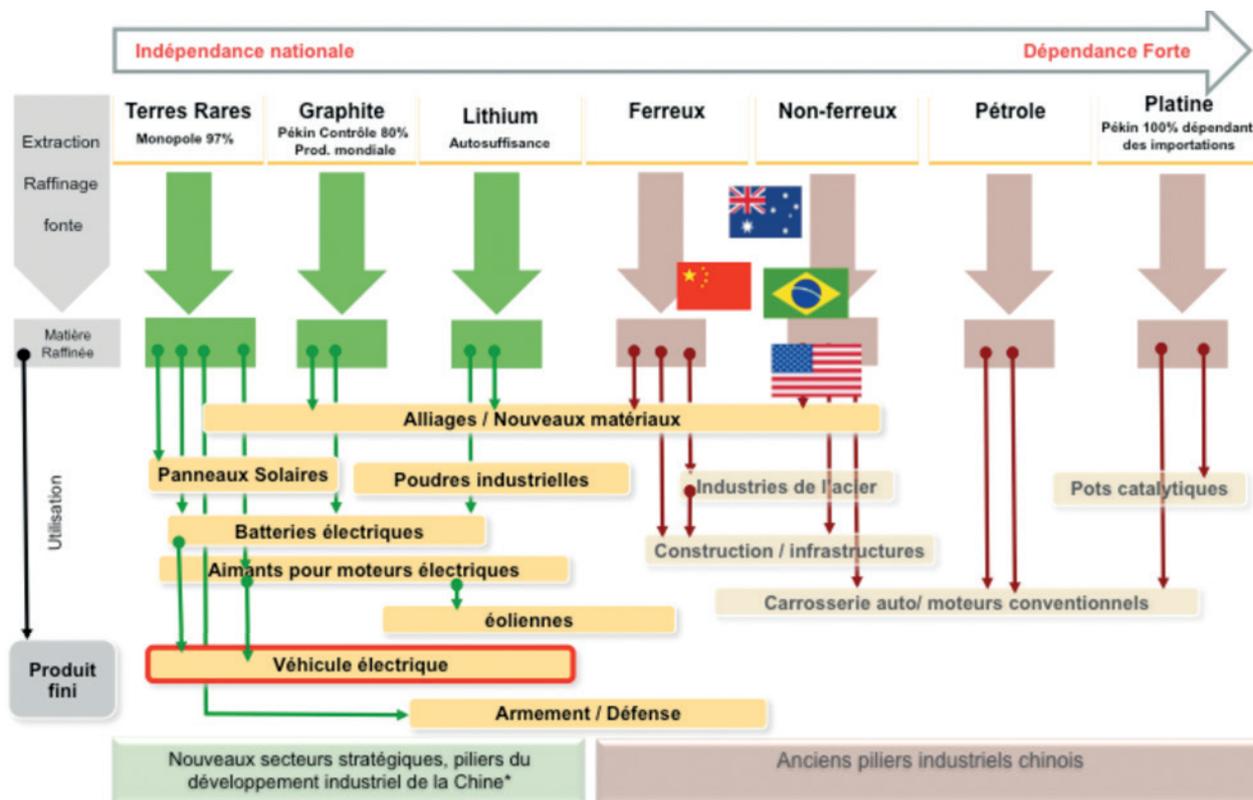


Figure 3 : Caractère stratégique de l'écosystème : adaptation aux avantages naturels et reconversion autour des anciens piliers industriels (Source : Lanckriet & Ruet (travaux non publiés), Institut mobilité durable - Mines ParisTech).

En effet, la Chine ne pourra forcer le transfert de technologie éternellement, même si son monopole sur les terres rares reste incontesté, en raison des coûts de production élevés et d'un impact non négligeable sur l'environnement. Pour le lithium, par exemple, si la Chine est une fois encore bien dotée, d'autres pays, d'Amérique latine notamment, le sont eux aussi et attireront des voisins très demandeurs, comme les États-Unis, où le constructeur automobile Tesla inaugurera bientôt une *gigafactory* de batteries lithium-ion.

Surtout, le double défi de l'adaptation au changement climatique et de la mitigation appelle des innovations de haute volée. Un jour ou l'autre, l'avantage minier de la Chine viendra à se résorber, la grande puissance industrielle qu'elle est devenue sera alors jugée sur son potentiel d'innovation pure.

Difficile, aujourd'hui, de trancher sur ce sujet. Mais quelques signaux prédisent à la Chine une place de choix, dans une *green race* globale en plein boom. À commencer par son projet de 13^{ème} plan quinquennal, qui, selon les informations qui ont filtré en octobre 2015, mettrait l'accent sur l'innovation, la coordination et le développement vert.

Conclusion : que penser de la révolution industrielle chinoise ?

Zhou Enlai disait, parlant des effets de la Révolution française, qu'il était encore « trop tôt pour les évaluer »...

Genèse, élans et structuration d'une Chine minéralo-technologique, accélérations, innovations et crise de

transformation : les faits diront ce qu'il en est, et toute prospective en la matière serait imprudente... Nous préférons ici mentionner la résilience de la politique publique chinoise, qui maintient une bourse nationale du carbone, alors qu'au niveau mondial le projet de l'instauration d'une telle bourse semble avoir été abandonné. Nous soulignons aussi les ressorts commerciaux, avec, au sortir de la COP 21, des perspectives mondiales d'accélération de la diffusion des technologies vertes et, dans ce contexte, une Chine dotée des moyens et des outils financiers (ainsi que d'agences de développement) nécessaires pour assurer la pénétration de ses technologies dans les pays du Sud.

C'est en tout cas ainsi qu'elle se positionnait lors du dernier Sommet Chine-Afrique de décembre 2015, fière de ses résultats et prête à les « partager ». Si la Chine en vient à accélérer la transition technologique au niveau global, on pourra alors parler de bonne nouvelle pour l'économie publique mondiale.

Bibliographie

ARTUS (Patrick), <https://www.research.natixis.com/GlobalResearchWeb/Main/GlobalResearch/DownloadDocument/t5SHieZzcMWdQjZUqh7x-w%3d%3d>

BALCET (Giovanni) & RUET (Joël), "From Joint Ventures to National Champions or Global Players? Alliances and Technological Catching-up in Chinese and Indian Automotive Industries", in *European Review of Industrial Economics and Policy*, n°3, 2011.

HENRY (Guillaume), RUET (Joël) & WEMAËRE (Matthieu), « Développement durable et propriété intellectuelle : l'accès aux technologies par les pays émergents », rapport INPI, Paris, 2015.

LANCKRIET (Édouard), « Stratégie de développement des énergies renouvelables et des technologies renouvelables en Chine - Étude « Green Race Chine » », rapport (non publié) réalisé conjointement par l'Iddri et Sciences Po pour l'ADEME. Il a été rédigé sous la supervision de Joël Ruet et de Tancrede Voiturez, 2012.

RUET (Joël), « Des capitalismes non-alignés : les pays émergents ou la nouvelle relation industrielle du monde », *Raisons d'Agir*, Paris, 2016.

RUET (Joël), « Les Pays émergents poussent à une technologie sans propriétaire », *Le Monde* (supplément Éco-

nomie) du 9 juillet 2012. Pour plus d'informations, se reporter à l'adresse suivante :

http://www.lemonde.fr/economie/article/2012/07/09/les-pays-emergents-poussent-a-une-technologie-sans-propretaire_1730919_3234.html

RUET (Joël) & PASTERNAK (Jean), « La Chine se lance à son tour dans l'économie verte », *Le Monde* (supplément Économie) du 11 janvier 2010.

ZHAO (Wei) et RUET (Joël), « Chine : comment la transition économique redessine l'innovation », chapitre 14, *Regards sur la Terre*, Paris, 2014, pp. 343-355.

La stratégie européenne des matières premières

Par Gwenole COZIGOU

Directeur Transformation industrielle et Chaînes de valeur avancées à la Commission européenne

La sécurité d'approvisionnement en matières premières non énergétiques et non agricoles constitue un sujet d'importance pour l'Europe dont les industries, qui sont au cœur de la place économique qu'elle occupe dans le monde, sont très majoritairement alimentées par des importations. Si, par le passé, l'accès aux matières premières était relativement aisé, la situation actuelle est plus incertaine. Faire face à ces défis nécessite le développement d'une stratégie à long terme. C'est l'objectif de la stratégie européenne des matières premières, intitulée « Initiative Matières premières ». Cette stratégie s'est incarnée dans une série d'actions plus spécifiques couvrant l'innovation (avec le Partenariat européen d'innovation sur les matières premières), la recherche et le développement (avec un thème dédié aux matières premières dans le programme de recherche et développement européen Horizon 2020) et, enfin, le triptyque Éducation/Recherche-Innovation/Entrepreneuriat (avec le lancement d'une Communauté de l'innovation et de la connaissance (KIC) sur les matières premières). Cet ensemble correspond à un effort financier considérable, de plus d'un milliard d'euros de financement communautaire sur la période 2014-2020.

La sécurité des approvisionnements des pays européens en matières premières non énergétiques et non agricoles constitue un sujet qui, bien qu'ayant marqué notre histoire, a été un peu oublié au fil des décennies. Ce n'est que tout récemment que son importance a de nouveau été reconnue, notamment du fait de la montée en puissance de nouveaux acteurs industriels mondiaux. De plus, la crise financière de 2008 et la volatilité accrue des prix de certains métaux et minéraux ont renforcé cette attention. Enfin, même le grand public a pu prendre conscience, avec l'éclatement de la crise des terres rares en 2011, de l'importance d'un approvisionnement sécurisé en matières premières.

Les États membres de l'Union européenne dans leur grande majorité ont recours très majoritairement aux importations pour alimenter leurs industries. Si, par le passé, l'accès aux matières premières était relativement aisé, la situation actuelle est plus incertaine. La pression de la demande, momentanément relâchée sous l'effet du ralentissement de la croissance chinoise, reste une tendance de fond du fait du développement des pays émergents. Face à cette forte demande, l'offre souffre d'une réduction généralisée des investissements qui se combine à un changement de stratégie d'une grande majorité des pays producteurs (nouvelle stratégie se traduisant, par exemple, par la mise en place de mesures visant à limiter leurs exportations).

Faire face à ces défis nécessite le développement d'une stratégie à long terme et d'un ensemble d'outils et de mesures pour apporter des solutions durables aux problèmes posés.

C'est sur la base du constat que les matières premières n'avaient peut-être pas fait l'objet de l'attention que leur importance économique justifie, que, dès 2008, l'Union européenne (UE) proposait une stratégie européenne des matières premières intitulée « Initiative Matières premières » ⁽¹⁾, une initiative réaffirmée en 2011 ⁽²⁾, et dont l'objectif est d'assurer un approvisionnement équitable et durable des pays membres en matières premières en favorisant une diversification des sources d'approvisionnement.

Cette stratégie s'est vu renforcée, ces quatre dernières années, par une série d'actions plus spécifiques couvrant : a) l'innovation avec le Partenariat européen d'innovation sur les matières premières, b) la recherche et le développement, avec un thème dédié aux matières premières dans le programme de recherche et développement eu-

(1) COM/2008/699 final : http://eur-lex.europa.eu/legal_content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0699&from=EN

(2) COM(2011) 25 final : http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:f1babcca-93a7-46cc-a46e-e47384f4aeb6.0022.03/DOC_1&format=PDF

ropéen Horizon 2020, et, enfin, c) le triptyque Éducation/Recherche-Innovation/Entrepreneuriat, avec le lancement d'une Communauté de l'innovation et de la connaissance (KIC) sur les matières premières.

L'Initiative Matières premières

Cette Initiative propose une série d'actions fondées sur trois piliers : a) garantir un accès équitable et non discriminatoire aux matières premières sur les marchés mondiaux, b) favoriser un approvisionnement durable en matières premières en provenance de sources européennes et, enfin, c) promouvoir l'utilisation la plus efficace possible des matières premières primaires dans l'UE et favoriser le recyclage.

Garantir un accès équitable et non discriminatoire aux matières premières sur les marchés mondiaux

Garantir l'approvisionnement durable en matières premières sur les marchés mondiaux est l'un des piliers de la stratégie de l'UE en la matière. Pour ce faire, l'UE poursuit un certain nombre d'initiatives :

- a) l'inclusion des matières premières comme priorité dans la politique commerciale européenne visant à éliminer les restrictions à l'exportation (quantitatives ou relatives aux prix), et ce dans le cadre des négociations d'accords de libre-échange bilatéraux, des accessions de nouveaux membres à l'Organisation mondiale du commerce (OMC) ou encore dans le cadre du processus de règlement des différends de l'OMC ;
- b) en parallèle, l'UE conduit une diplomatie des matières premières avec ses partenaires stratégiques (parmi lesquels les États-Unis, le Canada, le Japon, l'Union africaine et plusieurs pays d'Amérique latine) ;
- c) l'UE, *via* ses politiques de développement, promeut par ailleurs de nouvelles activités minières dans des pays tiers, qui pourraient avoir un impact positif sur l'offre mondiale. Il s'agit ici de promouvoir une coopération « gagnant-gagnant » permettant aux pays en développement de valoriser leurs ressources en matières premières pour stimuler leur croissance économique et leur développement.

Un exemple révélateur des actions de l'UE est le règlement des différends pris à la suite de la première décision de l'OMC du 30 janvier 2012, qui, face à des restrictions à l'exportation de la Chine sur un certain nombre de matières premières (bauxite, coke, fluorure de calcium, magnésium, manganèse, carbure de silicium, silicium métal, phosphore jaune et zinc), a jugé qu'elles étaient incompatibles avec les règles de l'OMC. Suite à ce succès, l'UE a déposé, le 13 mars 2012, en collaboration avec les États-Unis et le Japon, une deuxième plainte concernant ces mêmes restrictions à l'exportation de la Chine, mais en y incluant cette fois-ci les terres rares, le tungstène et le molybdène. La décision de l'OMC du 26 mars 2014 a confirmé que les droits d'exportation et les quotas d'exportation imposés par la Chine sur les différentes formes de terres rares et sur le tungstène et le molybdène, constituaient là encore une violation des règles de l'OMC. L'UE attend donc maintenant de la Chine qu'elle se conforme à

la décision de l'OMC en supprimant rapidement ses restrictions à l'exportation, et qu'elle mette son régime global d'exportation en accord avec les règles de l'OMC.

Assurer un approvisionnement durable au sein de l'Union européenne

Des projets de R&D récents, (tels que PROMINE, MINERALS4EU, EURARE, etc.), cofinancés par l'UE, ont montré que l'Europe, contrairement à l'idée reçue selon laquelle elle ne disposerait pas de matières premières, possède toujours d'importants gisements de minéraux industriels, de minerais métalliques et de minéraux de construction. Ces projets ont cependant également mis en évidence la nécessité d'avoir une meilleure connaissance du sous-sol européen en particulier à des profondeurs supérieures à plusieurs centaines de mètres.

D'autres projets européens, tels que MIDAS et BlueMining, ont, pour leur part, mis l'accent sur l'extraction des ressources disponibles sur les fonds marins, ainsi que sur la nécessité de réaliser des études poussées des impacts de ces activités sur les écosystèmes. D'un point de vue technologique, l'Europe présente de nombreux atouts, comptant notamment de nombreuses compagnies leaders dans ce domaine. Bien entendu, l'extraction minière de métaux stratégiques en eaux profondes n'en est qu'à ses balbutiements, mais il est important que l'Union européenne se positionne dès à présent sur ce secteur émergent, notamment pour en promouvoir le développement durable.

L'acquisition d'informations et de connaissances sur les sources potentielles d'approvisionnement en matières premières est fondamentale et fait partie intégrante de ce pilier. Plusieurs études ont été réalisées et plusieurs bases de données ont été développées, grâce, en particulier, à l'implication des services géologiques nationaux. Nous citerons, par exemple, l'étude sur la compréhension des flux de matières premières critiques à toutes les étapes de la chaîne de valeur. Les résultats en seront prochainement disponibles sur le Système d'information sur les matières premières (RMIS - accessible à l'adresse suivante : <http://rmis.jrc.ec.europa.eu/>), qui a été développé par le Centre commun de recherche de la Commission européenne, à Ispra (en Italie).

La relance et le développement de l'activité minière en Europe se heurtent cependant à plusieurs obstacles.

Le premier est l'opposition d'une partie de la population et de certains pouvoirs locaux à la plupart des projets de mines - le secteur de l'extraction minière étant perçu des plus négativement par le public, d'après la dernière enquête Eurobaromètre -, et ce malgré la mise en place dans la plupart des États membres de structures d'information et d'échange permettant d'associer les populations aux effets économiques et environnementaux de l'activité minière dès la genèse des projets.

Un deuxième obstacle est un cadre réglementaire qui reste contraignant et l'ensemble des acteurs s'accordent d'ailleurs sur le fait que le traitement des demandes d'autorisation pour des activités de prospection et d'extraction dans les États membres est toujours trop long. Il est cependant



Photo © Xinhua/ZUMA-REA

Tri de composants résultant de la déconstruction d'équipements électroniques, Guiyu (Chine), juin 2012.

« L'UE essaie de mettre en œuvre tous les moyens possibles pour éviter les transferts illégaux d'équipements (principalement électriques et électroniques) et de véhicules en fin de vie - équipements qui constituent une source importante de matières premières critiques qui ne sont pas recyclées en Europe et qui constituent donc une perte pour le secteur concerné en termes d'activité et d'importations évitées. »

certain, à la lumière de l'expérience acquise depuis 2008, que l'Initiative Matières premières a eu un impact positif sur ce point particulier. Plusieurs États membres ont en effet développé ou revisité leur propre politique nationale sur les matières premières. C'est notamment le cas de la France, avec la mise en place du COMES, le Comité des métaux stratégiques, en 2011, le lancement d'une réforme du Code minier et, plus récemment, le lancement d'une réflexion sur le concept de « mine responsable ». Au niveau européen, la Commission européenne a travaillé avec les États membres à l'échange de bonnes pratiques. Plusieurs thèmes ont été abordés dans ce cadre, tels que les politiques minières et d'aménagement du territoire, les procédures d'octroi de permis et le développement de bases de données favorables à des activités de prospection et d'extraction en Europe.

Promouvoir une utilisation la plus efficace que possible des matières premières dans l'Union européenne et en favoriser le recyclage

Favoriser une utilisation plus efficace des matières premières et mieux exploiter les matières premières dites « secondaires », c'est-à-dire celles qui sont issues de la récupération et du recyclage, constituent un enjeu majeur

pour l'Europe. Même si beaucoup a déjà été accompli pour arriver à une meilleure exploitation des « gisements » de minerais issus des déchets (aussi appelés « mines urbaines »), force est de constater que le pourcentage de minéraux et métaux recyclés, et en particulier des matières premières critiques, est encore trop faible, voire négligeable. Cela représente à la fois un défi en termes de nouvelles technologies (en particulier, d'écoconception : comment utiliser moins de matières et rendre celles-ci plus facilement recyclables), mais aussi en termes de législation et d'incitation à une collecte et à un traitement plus efficaces des déchets.

Concrètement, l'UE a lancé un important chantier, avec l'évaluation *ex-post* (*fitness check*) de cinq directives européennes relatives aux flux de déchets, aux boues d'épuration, aux PCB ⁽³⁾/PCT ⁽⁴⁾, aux emballages et déchets d'emballage, aux véhicules en fin de vie et aux batteries, ainsi qu'avec la refonte de deux directives : la première (directive ROHS) relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses présentes dans les

(3) PolyChloroBiphényles.

(4) PolyChloroTerphényles.

équipements électriques et électroniques, et la seconde (directive WEEE) relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (les DEEE).

Un autre défi concerne le renforcement du règlement sur le transfert des déchets. L'UE essaie de mettre en œuvre tous les moyens possibles pour éviter les transferts illégaux d'équipements (principalement électriques et électroniques) et de véhicules en fin de vie - équipements qui constituent une source importante de matières premières critiques qui ne sont pas recyclées en Europe et qui constituent donc une perte pour le secteur concerné en termes d'activité et d'importations évitées.

L'ensemble de ces actions est à placer dans le contexte plus général du paquet de mesures sur l'économie circulaire qui a été adopté le 2 décembre 2015.

Des matières premières critiques pour l'Europe

Une des mesures phare de l'UE a été de définir une liste des matières premières considérées comme critiques pour l'économie européenne. Si toutes les matières premières sont importantes pour l'économie européenne, certaines qui le sont encore plus présentent un risque de pénurie d'approvisionnement plus élevé. Elles peuvent donc être considérées comme « critiques ». La liste de ces matières premières « critiques » a été établie initialement en 2011. Elle comprenait 14 matières premières sur 41 matières analysées : l'antimoine, le béryllium, le cobalt, la fluorite, le gallium, le germanium, le graphite, l'indium, le magnésium, le niobium, les métaux du groupe du platine, le tantale, le tungstène et les terres rares.

La « criticité » étant un concept dynamique, il a été décidé d'actualiser cette liste tous les trois ans. C'est ainsi que la dernière liste (publiée en mai 2014) a identifié 20 matières premières critiques : on y trouve 13 des 14 matières identifiées dans l'étude précédente (seul le tantale n'est plus sur la liste de 2014) et 7 nouvelles matières : les borates, le chrome, le charbon de cokage, la magnésite, la roche phosphatée et le silicium (métal). Aucune des matières biotiques analysées (2 variétés de bois et le caoutchouc naturel) n'a été classifiée comme « matière première critique ».

L'analyse a par ailleurs révélé que pour les 54 matières considérées, 91 % de l'approvisionnement de l'UE proviennent de sources non-UE : cela est particulièrement vrai pour la majorité des métaux de base, les métaux de spécialité, les métaux précieux et le caoutchouc naturel.

Cette liste joue un rôle primordial dans la définition des actions prioritaires à engager et permet de mieux cibler nos interventions, que ce soit dans le domaine de la recherche et développement, dans la négociation des accords commerciaux bilatéraux avec nos partenaires économiques ou encore lors de la contestation de mesures entraînant une distorsion du commerce, comme cela a été le cas pour les terres rares.

L'UE n'est certes pas la seule instance à avoir développé une liste de matières premières critiques. Au Japon,

par exemple, 30 matières premières ont été dotées du statut de « ressources minérales stratégiques ». Les méthodologies utilisées pour définir ces matières premières critiques ou stratégiques font d'ailleurs l'objet d'échanges et de débats avec nos partenaires internationaux, et l'UE a décidé, dans le cadre de la prochaine révision de la liste des matières premières, de peaufiner sa méthodologie. Plusieurs paramètres sont ainsi en cours d'évaluation, tels que l'existence de restrictions au commerce ou l'existence ou l'inexistence d'accords commerciaux et, lorsqu'ils existent, leurs impacts sur le risque d'approvisionnement. La prochaine mise à jour de la liste de l'UE est prévue pour 2017.

Recherche et innovation

L'innovation joue un rôle primordial dans la sécurisation des approvisionnements en matières premières et contribue à la compétitivité du secteur. Le développement de solutions innovantes dans les domaines, tels que la prospection, l'extraction et la transformation des matières premières, permet d'accéder à davantage de ressources, tandis que concomitamment de nouvelles solutions technologiques dans le domaine 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.

Le Partenariat Européen d'Innovation (PEI) sur les matières premières

Lancé fin 2012, le PEI sur les matières premières rassemble de nombreux acteurs européens du monde de la recherche, de l'industrie, de la société civile et du monde institutionnel afin de travailler au développement de solutions innovantes sur l'ensemble de la chaîne de valeur, ainsi qu'à leur mise rapide sur le marché.

Le PEI a tout d'abord développé et adopté (en 2013) un Plan stratégique d'Innovation (PSI) définissant sept thèmes prioritaires déclinés en plus de 90 actions dans le secteur des matières premières. Plus de 700 partenaires de toute l'Europe se sont ensuite engagés volontairement à contribuer à sa mise en œuvre par le biais de 80 « engagements matières premières », qui mettent en avant et proposent un certain nombre de solutions innovantes. Un nouvel appel à engagement a été lancé début décembre 2015.

Les matières premières dans le programme Horizon 2020

Le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 constitue une première. C'est en effet la première fois qu'un programme cadre de Recherche & Développement européen intègre une partie spécifiquement consacrée aux matières premières, dans le cadre du défi sociétal « Climat, environnement, efficacité des ressources et matières premières ».

Ainsi, pour la période 2014-2020, ce sont près de 600 millions d'euros qui seront dédiés par l'Union européenne à la R&D dans le domaine des matières premières, il s'agit

ici d'un effort sans précédent. La Commission européenne s'est, quant à elle, assurée de refléter les priorités identifiées dans le PSI en lançant des appels à projets dans des domaines, tels que le recyclage des matières premières, la mise en place d'un inventaire des matières premières « secondaires », le développement de nouvelles solutions pour la production de matières premières (par exemple, l'exploitation de gisements complexes, les technologies flexibles de transformation, l'extraction en milieu profond sur le continent ou en milieu marin...), le développement de solutions de substitution à des matières premières utilisées dans les appareils électriques ou utilisées dans des environnements extrêmes (de température, de pression, de pH...). Deux appels à projets ont déjà été lancés et plus de 25 projets ont d'ores et déjà été financés (pour un montant total de 130 millions d'euros).

Par ailleurs, il convient de souligner la contribution à l'effort en faveur des matières premières que représentent d'autres thèmes d'Horizon 2020, tels les travaux concernant les matériaux avancés ou le partenariat public-privé SPIRE sur les procédés industriels durables.

Le triptyque Éducation/Recherche-Innovation/Entreprenariat

Un des succès dans la prise en compte des défis posés par les matières premières a consisté dans le lancement, en décembre 2014, d'une Communauté de la connaissance et de l'innovation sur les matières premières. L'Institut européen d'innovation et de technologie (EIT) a en effet désigné un *consortium* européen de plus de 116 partenaires, qui rassemble des universités, des centres de recherche et des entreprises de 22 États membres regroupés autour de 6 centres de colocation situés en Belgique, en Finlande, en France, en Italie, en Pologne et en Suède. Il est intéressant de noter que la grande majorité de ces acteurs est aussi fortement impliquée dans le PEI Matières premières. Cet EIT Matières premières a pour missions : a) de renforcer la compétitivité, la croissance et l'attractivité du secteur européen des matières premières et b) de développer des synergies entre l'ensemble des acteurs, afin

de soutenir la création de valeur par l'accompagnement de l'innovation, l'aide à la création de *start-ups* et le développement de formations scientifiques et technologiques, et ce, sur l'ensemble de la chaîne de valeur des matières premières (exploration, extraction, traitement, recyclage et substitution). L'EIT Matières premières recevra une dotation de plus de 350-400 millions d'euros sur sept ans (une somme importante, mais qui ne représente toutefois que 25 % du volume total d'activités amont et aval de la KIC, les 75 % restants devront être mobilisés *via* d'autres sources d'investissements, en particulier privées). L'UE compte beaucoup sur cette initiative, qui est de très loin la plus importante au monde dans ce domaine, pour avoir un impact important sur son secteur des matières premières.

Conclusion

L'Union européenne, grâce à l'implication des États membres et des parties prenantes tant du secteur public que du privé, s'est dotée d'un ensemble d'instruments lui permettant de répondre aux défis posés par son accès aux matières premières et la durabilité de son approvisionnement. Il conviendra désormais d'assurer une coordination efficace et un suivi attentif de ces initiatives afin de développer un maximum de synergies et d'en retirer tous les bénéfices.

Cet ensemble d'initiatives correspond à un effort financier considérable, de plus d'un milliard d'euros de financement communautaire sur la période 2014-2020, qui démontre l'importance accordée par l'UE à ce sujet.

À court terme, il est important de pouvoir relancer l'investissement dans le secteur des matières premières en Europe : la mise en place du nouveau Fonds européen pour les investissements stratégiques pourrait d'ailleurs représenter une opportunité pour le secteur.

Il n'y a en effet pas d'échappatoire : l'UE se doit d'être volontariste si elle veut préserver sa sécurité d'approvisionnement en matières premières (primaires et secondaires), et donc son bien-être économique et sociétal.

Le Comité pour les métaux stratégiques (COMES), un lieu de dialogue consacré à l'industrie

Par Alain LIGER

Ingénieur général des Mines honoraire, ancien secrétaire général du COMES

En 2010, prenant conscience du risque pour l'économie nationale de la dépendance de notre industrie vis-à-vis de sources extérieures, le gouvernement français a mis en place une nouvelle stratégie minérale. L'un de ses premiers actes fut la création du Comité pour les métaux stratégiques (COMES), dès le début de 2011.

Le COMES est une organisation où se tient un dialogue entre, d'une part, les représentants des nombreuses branches industrielles concernées par les matières premières minérales et, d'autre part, les non moins nombreux ministères en charge des problématiques sous-jacentes. Les participants à ces groupes de travail débattent d'enjeux liés aux besoins de l'industrie et à son exposition au risque d'approvisionnement, des débats qui portent sur les ressources primaires, les ressources secondaires, les objectifs de l'économie circulaire ou la substitution pour certains métaux stratégiques.

Ces débats menés dans les groupes de travail du COMES ont inspiré des actions de l'administration, comme la mise en place d'un outil digital permettant aux PMI de porter un diagnostic sur leur exposition au risque d'approvisionnement en diverses matières premières ou la création d'un portail en français pour diffuser des analyses et des données sur les matières premières minérales.

Introduction

Les années 2000 ont vu, au moins en Europe, une prise de conscience d'une fragilité de nos économies induite par la très grande dépendance des industries manufacturières vis-à-vis de sources d'approvisionnement étrangères. La concentration de la production de plusieurs métaux et minéraux dans un nombre limité de pays et la croissance fulgurante des consommations et des importations chinoises de ces mêmes produits, liée à son essor industriel et technologique, ont aidé à cette prise de conscience.

C'est particulièrement le cas en France. La production minérale française (hors produits destinés à l'industrie de la construction) est devenue très limitée au cours du XX^e siècle, l'industrie française importe dès lors la quasi-totalité de ses approvisionnements en minéraux.

Les enjeux industriels et technologiques des métaux stratégiques, souvent peu connus du grand public, font l'objet d'une stratégie de l'État, présentée au cours du Conseil des ministres du 27 avril 2010. Le communiqué établit à

l'issue de ce conseil indiquait que « l'accès à ces métaux dans de bonnes conditions est nécessaire pour assurer à l'industrie française les conditions de son développement et lui permettre l'élaboration de produits plus vertueux et plus compétitifs ».

L'État arrêta alors une stratégie minérale, c'est-à-dire un plan d'action de long terme, portant sur :

- le besoin de cerner la vulnérabilité des différentes filières concernées,
- l'extension de la connaissance géologique du territoire national et des fonds marins de la zone économique exclusive française (la deuxième au monde) et le développement de nouveaux outils d'exploration,
- une politique de recyclage des métaux stratégiques de la « mine urbaine »,
- enfin, l'instauration d'un dialogue organisé entre l'État et les industriels concernés par la sécurité d'approvisionnement.

À la suite du Conseil des ministres précité, le Premier ministre, la ministre de l'Économie et le ministre de l'Industrie



Photo © Marlène Awaad-MAXPPP

Installation du COMES par le ministre chargé de l'Industrie, de l'Énergie et de l'Économie numérique, Éric Besson, Paris, 30 mars 2011.

« À la suite du Conseil des ministres du 27 avril 2010, le Premier ministre, la ministre de l'Économie et le ministre de l'Industrie contresignaient, le 24 janvier 2011, le décret n°2011-100 créant le Comité pour les métaux stratégiques (COMES). »

contresignaient, le 24 janvier 2011, le décret n°2011-100 créant le Comité pour les métaux stratégiques (COMES).

Le COMES est un lieu de dialogue privilégié entre les nombreuses branches industrielles et les nombreuses administrations concernées par la thématique des métaux stratégiques. Le Comité stratégique de filière (CSF) des industries extractives et de première transformation (IEPT), créé en 2013, prend, quant à lui, en charge les enjeux plus larges de la filière minérale elle-même.

Le Comité pour les métaux stratégiques (COMES)

Le COMES est présidé par le ministre chargé des Matières premières (à la date de cet article, le ministre de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, M. Emmanuel Macron).

Ses membres sont répartis en trois collèges : le collège des administrations, celui des fédérations professionnelles et industrielles et celui des organismes techniques.

La composition du collège des administrations illustre la diversité des ministères concernés par la problématique des métaux stratégiques : outre le ministre chargé des Matières premières (déjà cité), ce collège comprend les ministres chargés respectivement de l'Économie, de l'In-

dustrie, de l'Environnement, des Affaires étrangères, de la Recherche et de la Défense ; il comprend, en outre, le secrétaire général de la Défense et de la Sécurité nationale, le vice-président du Conseil général de l'économie et le délégué interministériel à l'Intelligence économique.

De manière symétrique, la composition des représentants des fédérations professionnelles et industrielles est cohérente avec le fait que les enjeux des métaux stratégiques concernent, bien sûr, les industries extractives et métallurgiques, mais aussi, plus largement, tous les secteurs industriels français. Ainsi, ce collège comprend bien entendu la Fédération des minerais, minéraux industriels et métaux non ferreux (FEDEM - aujourd'hui l'Alliance des minerais, minéraux et métaux (A3M)) et l'Union des industries chimiques (UIC), mais également les fédérations représentant les « consommateurs », qui sont, quant à elles, plus nombreuses : il s'agit du Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales (GIFAS), du Comité des constructeurs français d'automobiles (CCFA), de la Fédération des entreprises du recyclage (FEDEREC), de la Chambre syndicale des producteurs d'aciers fins et spéciaux (SPAS), de la Fédération des industries électriques et électroniques et de communication (FIEEC), du Groupement des industries de construction et activités navales (GICAN) et de la Fédération des industries mécaniques (FIM).

Enfin, le collège des organismes techniques comprend les organismes de l'État concernés : l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'Agence française de développement (AFD), le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER).

Les travaux du COMES se déroulent essentiellement dans le cadre de plusieurs groupes de travail thématiques. En tant que de besoin, ces groupes de travail invitent ponctuellement des représentants des ministres non membres du comité, des personnalités qualifiées ou des représentants des entreprises du secteur invités à présenter leurs travaux ou leurs actions relatifs aux métaux stratégiques.

À partir des contributions et de l'expérience de leurs membres, les groupes de travail peuvent être amenés à faire des recommandations d'actions publiques ou privées. Dans la plupart des cas, ces actions sont simplement intégrées, quelquefois sans référence au COMES, par les administrations participantes à leur programme d'action. Ni le COMES ni son secrétaire général ne disposent en effet de budget d'intervention et d'une quelconque autorité sur les services de l'État, et ils n'ont bien entendu aucune prise sur les stratégies industrielles : cette dernière caractéristique essentielle renforce le besoin de consensus, la force de conviction, qui doivent animer les groupes de travail.

La sensibilisation des entreprises aux fragilités de leur outil industriel

Un des premiers outils mis en place à la suite de la création du COMES est un outil d'analyse de la vulnérabilité des entreprises au regard de leur approvisionnement en matières premières minérales stratégiques.

L'objectif de cet outil est de permettre à chaque entreprise qui le souhaite de déterminer les métaux pour lesquels elle est exposée à un risque d'approvisionnement, et de comprendre les raisons de cette exposition pour être à même de développer des stratégies de sécurisation concertées, entre secteurs et entre industries de tailles très différentes.

Cet outil a été développé par la direction générale de la Compétitivité, de l'industrie et des services (la DGCIS, qui a pris le nom de direction générale des Entreprises (DGE) en septembre 2014) en collaboration avec les fédérations professionnelles participant au COMES. L'outil a été mis au point avec le Cabinet de conseil en environnement et développement durable BIO Intelligence Service. Il a été conçu, puis testé par un panel d'entreprises (des grands groupes et des PME).

La liste des matières premières prises en compte par le système choisi a été discutée par les participants d'un groupe de travail du COMES afin d'assurer un compromis entre la couverture des besoins industriels et la difficulté de construire un modèle qui couvre toutes les situations. Elle comprend les matières premières minérales suivantes : l'aluminium, le béryllium, le chrome, le cobalt, le cuivre, le fer, le lithium, le nickel, le niobium, le platine,

le palladium, le rhodium, le néodyme, le dysprosium, le tantale et le titane.

L'outil fonctionne à partir de données synthétiques portant sur les substances de cette liste, ces données étant analysées à l'aune de variables comme la stabilité politique des pays producteurs, le niveau de concentration de la production et des producteurs, l'existence d'entraves au libre commerce, la volatilité historique des prix et la part de production de ces substances résultant en tant que sous-produits de l'extraction d'autres matières premières minérales. La plupart des données sont issues de tables de références internationales.

Pour chacun des « systèmes » définis par l'utilisateur, un graphique permet de visualiser les résultats sur deux axes : un axe « Risque d'approvisionnement » (indépendant de l'entreprise) pour chaque matière présente dans le système et un axe « Vulnérabilité de l'entreprise » par rapport à ce risque (dépendant de l'entreprise). Un graphique global reprend les résultats des systèmes et les pondère avec les chiffres d'affaires de chaque système pour l'entreprise concernée.

Le site Internet de la DGE met cet outil d'autodiagnostic à la disposition des entreprises désireuses d'évaluer le niveau de vulnérabilité de leurs approvisionnements en métaux stratégiques. Les fédérations professionnelles membres du COMES ont sensibilisé leurs adhérents à l'existence et à l'intérêt de cet outil.

Cet outil ne résume pourtant pas à lui seul toute la problématique des sensibilités des modes de production et de leur fragilité vis-à-vis du risque d'approvisionnement. Les chaînes de production sont en effet complexes et font de plus en plus appel à des métiers très spécialisés. Il est donc fréquent qu'un industriel français importe en vue de sa production non pas des métaux stratégiques, mais des composants contenant des métaux stratégiques. Par exemple, si certaines terres rares sont des éléments indispensables pour la fabrication d'aimants à haute performance, il n'en résulte pas pour autant que l'industrie automobile française ou les fabricants français de turbines d'éoliennes de grande puissance seraient directement dépendants de sources minières de terres rares : en effet, il existe dans le monde entier un nombre très limité de métallurgistes maîtrisant la technologie des alliages comportant ces métaux stratégiques, la réflexion sur la sécurisation de l'approvisionnement doit donc aussi porter sur cette étape de la sous-traitance. La prise en compte de toute la complexité de la réalité industrielle mérite de nouveaux développements de l'outil et la sensibilisation des entreprises à son existence et à son usage.

Une information nationale sur les ressources minérales stratégiques

Les travaux du COMES ont permis de constater l'existence d'une information sur le secteur des matières premières sur Internet, dans la presse spécialisée ou dans les débats d'instances internationales auxquelles participent les autorités françaises. Mais ils ont aussi permis de constater la difficulté et le coût excessif d'accès et d'in-

interprétation de cette littérature pour les PME et les ETI ; certaines sources sont en outre d'une fiabilité douteuse.

Les groupes de travail du COMES ont ainsi recommandé de développer un système d'information qui permet de rassembler et d'améliorer la connaissance sur les ressources minérales, et de faciliter l'accès à une information structurée.

La structuration de l'information passe par sa mise à disposition sur un portail informatique dédié. Ce site (www.mineralinfo.fr) a été développé par le BRGM en 2013 et 2014 sous le pilotage du ministère chargé des Mines (bureau des Ressources minérales) dans le cadre d'un groupe de travail COMES dédié.

Là encore, le dialogue en groupes de travail du COMES a permis de définir les paramètres de ce portail. Les données et les informations proposées concernent les quatre grands domaines d'activité du secteur : les potentiels économiques des ressources primaires terrestres et marines, les besoins de l'industrie, le recyclage des ressources secondaires et la recherche, les aspects internationaux.

Elles comprennent une cartographie des organisations collectives mises en place par l'industrie et par l'administration, des informations générales sur les matières premières minérales (que celles-ci soient primaires ou secondaires) et sur la législation et la réglementation françaises et une description sommaire des techniques. Mais y sont également disponibles des données brutes, des données agrégées, des cartes, des graphiques, des documents, des liens vers d'autres sites et sources externes...

Parmi les nombreuses informations disponibles, le site rassemble des monographies consacrées à des substances que l'on doit également aux travaux du COMES. Avant la mise en place du site, il avait en effet été décidé de concentrer en priorité l'effort d'information et de documentation sur la situation de plusieurs substances, sur la base d'une analyse globale réalisée au sein de deux groupes de travail du COMES. Ces fiches ont ensuite été réalisées, sur plusieurs années, pour la plupart par le BRGM, dans le cadre d'une convention de financement avec le ministère chargé des Mines (bureau des Ressources minérales).

Les études disponibles portent actuellement sur les substances suivantes : l'antimoine, le béryllium, le cobalt, le gallium, le germanium, le graphite, le lithium, le molybdène, le niobium, les métaux (au nombre de 5) du groupe du platine, le rhénium, le sélénium, le tantale, le tellure, les terres rares, le titane et le tungstène.

Ces panoramas passent en revue l'état de la demande mondiale et de son évolution, l'état des offres primaire et secondaire en France et dans le monde, la situation du recyclage et les prix constatés. Ils identifient les principaux acteurs français, européens et mondiaux, et comportent une évaluation de la criticité de chaque substance pour l'industrie française dans son ensemble.

Ces panoramas sont des outils d'aide à la décision tant pour les industriels que pour les pouvoirs publics. La version publique de ces monographies (téléchargeable sur le

site www.mineralinfo.fr) est destinée à une large diffusion dans un but de sensibilisation des acteurs de l'économie et d'information générale.

La limite de ces panoramas tient à l'évolution du contexte des différentes matières premières, qui peut être lente ou rapide en fonction des enjeux : outils de l'amélioration de la connaissance et de l'appréciation stratégique d'un secteur, ils ne sauraient remplacer une connaissance quotidienne des marchés.

Plus généralement, en facilitant l'accès à l'information, le site offre aux entreprises les moyens d'anticiper les situations à risque, et il permet au grand public de mieux appréhender les enjeux de ce secteur d'activité pour l'emploi et le développement économique, ainsi que ses enjeux environnementaux réels.

Les réflexions sur l'économie circulaire des métaux stratégiques

Le constat fait du caractère limité des ressources de notre territoire en métaux stratégiques et, par contraste, du nombre croissant de produits grand public présents sur le marché français contenant des métaux stratégiques ont amené le COMES à faire porter une partie de ses réflexions sur les enjeux liés à l'économie circulaire : deux groupes



« L'ADEME, qui participe aux travaux du COMES, a fait réaliser en 2013 une étude sur le gisement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) afin de mieux anticiper la manière de faire face à des objectifs de collecte croissants. »

de travail du COMES se penchent ainsi sur les questions de recyclage, d'écoconception et de substitution.

L'ADEME, qui participe aux travaux du COMES, a fait réaliser en 2013 une étude sur le gisement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) afin de mieux anticiper la manière de faire face à des objectifs de collecte croissants. Son étude montre la grande difficulté qu'il y a à appréhender avec un niveau de détail suffisant les enjeux de la « mine urbaine » : au-delà de la dispersion de cette filière en de nombreux types de collecte, on constate en effet que les contenus en métaux stratégiques sont très variables d'un produit à l'autre... et ne sont pas toujours bien connus.

Or, les DEEE ne sont pas les seuls produits contenant des métaux stratégiques : les piles et les accumulateurs constituent, eux aussi, une autre filière importante ; de même, les véhicules en contiennent des quantités de plus en plus importantes.

Face à ces contenus variables mais souvent faibles par rapport au volume total des déchets, les réflexions s'orientent, d'une part, sur la construction de filières de collecte et de déconstruction adaptées permettant d'envoyer les sous-composants contenant des métaux stratégiques vers des facilités métallurgiques permettant une valorisation effective de ces métaux et, d'autre part, sur les objectifs de collecte/recyclage des directives européennes, que la récupération des seuls métaux de base et des matières plastiques permet la plupart du temps de satisfaire.

Le gisement « urbain » de métaux stratégiques contenus dans les déchets est difficile à quantifier, mais il s'exporte, et dans certains pays des opérateurs industriels ou artisanaux savent le valoriser... Ces exportations représentent une perte de substances potentielles pour l'industrie française et en affectent la résilience. À cet égard, le COMES a fait porter sa réflexion sur deux enjeux :

- d'une part, les réflexions du COMES ont porté sur la mise en place d'un système de certification des procédés de recyclage pour décourager les exportations illicites de déchets comportant des métaux stratégiques. Une note des autorités françaises proposée par le COMES a débouché sur une prise en compte de cet enjeu au niveau européen ;
- d'autre part, de manière encore plus pratique, une action est en cours de montage dans le cadre d'un des groupes de travail du COMES visant à accroître la sensibilisation des acteurs territoriaux aux contenus en matière premières stratégiques des exportations illégales de déchets et à l'enjeu de leur contrôle.

Les débats des groupes de travail bénéficient par ailleurs régulièrement de la présentation de stratégies de développement et de R&D menées par des acteurs français (comme Rhodia, le CEA, Airbus, Orange, DCX Chrome et bien d'autres industriels encore).

Le renforcement des industries extractives et de première transformation

Une partie des réflexions sur les métaux stratégiques a très vite débouché sur le constat qu'il existait des enjeux plus généraux pour la filière industrielle spécifique, distincts de ceux des industries « consommatrices ». Afin de renforcer cette filière, le ministre en charge de l'Industrie et les fédérations professionnelles concernées ont créé, en mai 2013, le Comité stratégique de filière des industries extractives et de première transformation. Ce Comité regroupe les acteurs des industries minières, de l'aluminium, de l'acier, de la transformation des métaux, du verre, des céramiques, du ciment et du béton.

Le Comité stratégique de filière (CSF) a adopté, en mai 2014, un contrat de filière et des propositions d'actions concrètes permettant d'améliorer la compétitivité de la filière. Une partie de ces actions généralise à l'ensemble des matières premières minérales certaines des réflexions émanant du COMES (par exemple, des actions visant à renforcer et à sécuriser l'approvisionnement en matières premières primaires de l'ensemble de la chaîne de valeur industrielle, des actions visant le développement d'une industrie plus efficiente dans l'utilisation des ressources dans la perspective d'une économie circulaire). Le CSF aborde aussi des enjeux plus globaux et essentiels, comme la stimulation de l'investissement et de l'innovation, le développement des compétences et la sécurisation des parcours professionnels, le besoin d'un cadre énergie/climat compétitif ou encore l'acceptation sociétale.

Conclusion

L'analyse des enjeux des métaux stratégiques est complexe : chacun des métaux stratégiques est un cas particulier, l'information n'est pas directement disponible pour des acteurs ne faisant pas partie des circuits commerciaux, voire elle est d'une grande opacité, les filières industrielles au niveau mondial sont plus complexes qu'il n'y paraît, une dépendance apparente décelée à partir de la composition chimique d'un produit fini pouvant présenter un caractère de criticité totalement différent au niveau de l'analyse de ses composants et de leur maîtrise.

Dans ce contexte complexe, le dialogue entre les acteurs est capital afin de partager les données et de confronter les analyses. Les groupes de travail du COMES assurent une fonction essentielle à la résilience de l'industrie *high tech* française.

Plus largement, les réflexions sur les métaux stratégiques ont très vite débouché sur un constat, celui de la nécessité d'un dialogue entre la filière industrielle des industries extractives et de première transformation et les nombreuses industries « consommatrices » de métaux stratégiques.

Les modes d'action de la stratégie d'approvisionnement japonaise en métaux non-ferreux stratégiques

Par Jean-Claude GUILLANEAU
Directeur des Géoressources, BRGM

Le contexte récent des cours des matières extractives n'incite guère les pays industrialisés à prendre en compte ce domaine parmi leurs priorités nationales. Pourtant, des initiatives ont été prises au cours des dernières années, comme la communication de l'Union européenne ⁽¹⁾ qui définit trois piliers : a) garantir aux industries des pays membres un accès aux matières premières sur les marchés internationaux à des conditions identiques à celles de leurs concurrents industriels ; b) déterminer au sein de l'UE des conditions cadres propres à favoriser un approvisionnement durable en matières premières auprès de sources européennes et, enfin, c) dynamiser l'efficacité globale des ressources et promouvoir le recyclage afin de réduire la consommation de matières premières primaires de l'Union européenne et, par voie de conséquence, sa dépendance vis-à-vis des importations. Cette communication a contribué, en France, à la création du COMES, puis à la réflexion actuelle sur la « mine responsable ».

Dans d'autres pays, des initiatives ont été prises (comme en Corée ou au Japon) afin de sécuriser les approvisionnements. L'exemple japonais se concrétise, en 2004, à travers la création d'une organisation spécifique, le JOGMEC. Cette structure a pour rôle de sécuriser les approvisionnements de l'archipel nippon en hydrocarbures et en métaux. Elle emploie des stratégies multiples : constitution de stocks stratégiques, développements scientifiques (la biolixiviation en Amérique latine ou la télédétection au Botswana), veille sur les évolutions des cours des métaux et des projets d'exploitation à travers le monde et, enfin, étude des prises de participation ou des contrats d'enlèvement des résidus dans des projets miniers ; des stratégies conduites en étroite liaison avec des compagnies minières japonaises (comme Mitsubishi, Mitsui ou Sumitomo).

Introduction

Le rapport du Pipame ⁽²⁾ de mars 2015 sur les mutations économiques du secteur japonais des métaux non-ferreux identifie 11 leviers d'action pour répondre aux enjeux identifiés, parmi lesquels la relance des activités minières, le soutien à l'innovation, une meilleure sécurisation de l'accès aux matières premières et la stimulation des investissements. Ce rapport propose des actions s'inspirant de celles engagées depuis des années par la France pour sécuriser les approvisionnements en métaux de son industrie. Ces initiatives répondent à un contexte mondial qui connaît des évolutions rapides, mais dont la tendance lourde vers le développement conduit à attacher une attention particulière à la recherche de projets miniers sus-

ceptibles d'assurer les apports indispensables aux productions industrielles, et en particulier ceux nécessaires aux industries énergétiques fortes consommatrices de « petits métaux » et/ou de métaux stratégiques proprement dits.

Différentes stratégies sont adoptées par les pays industrialisés, au travers d'initiatives du privé (c'est le cas en

(1) Communication de la Commission au Parlement européen et au Conseil, Initiative « Matières premières » - « Répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe » (SEC(2008) 2741).

(2) Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques.

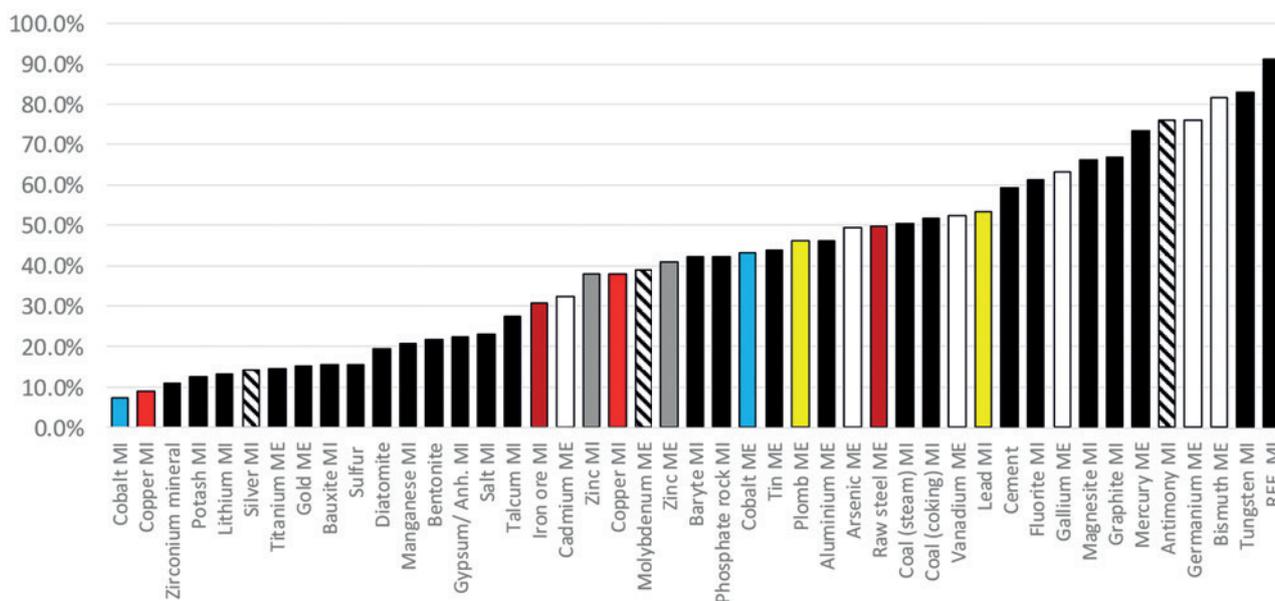


Figure 1 : Parts de la Chine dans les activités minière (MI) et métallurgique (ME) mondiale (Source : Darton Commodity).

Allemagne) ou de l'État (comme en France, en Corée et au Japon).

Dans ce dernier pays, la sensibilité de l'industrie, dans un contexte insulaire et d'une certaine dépendance vis-à-vis de la Chine, a conduit, en 2004, à la création d'une organisation multiforme dédiée à la sécurisation des approvisionnements en hydrocarbures et en métaux, le JOGMEC (*Japan Oil, Gas and Metals National Corporation*).

Éléments de contexte

Depuis la dernière décennie, la mondialisation et la montée en puissance des économies émergentes ont engendré des tensions accrues sur l'accès aux ressources naturelles. L'affirmation de nouvelles puissances économiques (comme la Chine et l'Inde) a provoqué une explosion de la demande mondiale en combustibles fossiles et en matières premières. Certaines de ces ressources peuvent être qualifiées de rares, car elles existent en quantité limitée ou parce que leur répartition géographique est inégale. À l'instar des hydrocarbures, les métaux stratégiques ou critiques sont vitaux pour les États. Utilisés dans le secteur des hautes technologies, ces métaux regroupent divers éléments, comme le lithium, le niobium, le titane, le platine, le tungstène ou encore les terres rares.

Alors que l'industrie n'utilisait qu'une quinzaine de ces éléments dans les années 1970, aujourd'hui ce sont plus de cinquante de ces substances métalliques qui entrent dans la fabrication de produits industriels, notamment dans les domaines innovants et celui des énergies nouvelles. Ainsi, les métaux rares sont indispensables à la production des ordinateurs, des téléphones portables, des batteries, des ampoules basse consommation, des éoliennes ou bien encore des cellules photovoltaïques.

Depuis les années 1990, le développement des nouvelles technologies a donc accentué la dépendance des États vis-à-vis de ces types de matière première. Cependant,

à l'échelle mondiale, certains pays disposent d'un quasi-monopole dans la production des minerais stratégiques, alors que d'autres ne possèdent, au mieux, que des gisements limités. Ainsi, cette situation conduit à s'interroger sur les politiques adoptées par le secteur privé ou les États consommateurs pour sécuriser leurs approvisionnements en métaux rares.

Une production dominée par les pays émergents

Au niveau mondial, la répartition des gisements de métaux stratégiques est tributaire de la composition géologique des sous-sols.

Très bien pourvue en ressources minières, la Chine possède 25 % des réserves de terres rares et produit plus de 90 % de cette ressource dans le monde. De plus, ce pays extrait aussi en quantités importantes de l'antimoine, du gallium, du germanium, de l'indium, de la fluorine et du tungstène.

Sur le plan mondial, plus de 85 % des réserves mondiales de lithium se concentrent dans un espace incluant certains territoires du Chili, de l'Argentine et de la Bolivie.

Sécuriser les approvisionnements en métaux stratégiques

Le quasi-monopole de la Chine dans la production des terres rares lui a permis d'imposer unilatéralement des restrictions à l'exportation sur ce type de matière première. Mis devant le fait accompli, les États-Unis, le Japon et l'Union européenne ont déposé, en 2012, une plainte collective auprès de l'Organisation mondiale du commerce pour contraindre les Chinois à respecter les règles du négoce international. Le 26 mars 2014 (après deux ans de procédure), l'OMC a finalement statué en faveur des plaignants en affirmant que l'État chinois en invoquant des considérations écologiques cherche en réalité à renforcer son contrôle du marché des terres rares.



Photo © Kyodo/MAXPPP

Un Japonais et un Bolivien travaillant sur un projet commun de construction d'une usine expérimentale d'extraction de lithium, Uyuni (Bolivie), février 2013.

« En ce qui concerne le lithium, le Japon et la Corée du Sud ont conclu avec le gouvernement bolivien des accords de coopération portant sur l'industrialisation de cette matière première. »

Une course aux investissements et aux partenariats

Pour sécuriser leurs approvisionnements en métaux critiques, les États ne se contentent pas de créer des stocks stratégiques. Dans le cadre d'une économie mondialisée, les puissances usent, au travers de la diplomatie commerciale, de leur *soft power* pour conclure des alliances et des partenariats. Ainsi, par exemple, la Chine et une alliance d'investisseurs japonais et coréens ont investi chacune plus de 2 milliards de dollars pour acquérir, l'une comme l'autre, 15 % de la firme brésilienne CBMM, le leader mondial de l'extraction de niobium. De son côté, le Royaume-Uni s'est également positionné au Brésil, où une société anglo-américaine exploite les mines de Catalão et d'Ouvidor, qui fournissent près de 3 % du niobium consommé dans le monde.

En ce qui concerne le lithium, le Japon et la Corée du Sud ont conclu avec le gouvernement bolivien des accords de coopération portant sur l'industrialisation de cette matière première. De la même manière, en août 2013, les Pays-Bas ont conclu avec la Bolivie un partenariat qui leur permet d'investir dans la transformation du lithium dans ce pays.

Dans ce climat de compétition, la France possède aussi des instruments lui permettant d'assurer ses approvisionnements miniers. En 2011, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a ainsi conclu un partenariat

avec la société kazakhe Kazatomprom portant sur l'identification d'éventuelles opportunités en matière de production de terres rares et de métaux critiques.

Si certains pays ont l'avantage de posséder des gisements de métaux rares, les puissances industrielles (qui en sont largement démunies) ont réagi en développant diverses stratégies pour sécuriser leurs approvisionnements. Cependant, quelles que soient les solutions adoptées par ces États, l'accroissement de la pression exercée sur les ressources en métaux critiques pose la question de leur surconsommation. En effet, l'accélération de l'obsolescence technologique accroît la dépendance des sociétés modernes vis-à-vis de ces matières premières. Dans ces conditions, la mise en place de filières spécialisées dans le recyclage des métaux rares pourrait atténuer la vulnérabilité des États vis-à-vis de leurs approvisionnements extérieurs. Toutefois, cette solution se heurte à des contraintes techniques et économiques qui laissent présager que la guerre économique dont sont l'objet ces minéraux est loin d'être terminée.

Le JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation), la réponse japonaise à cette criticité

Créé en 2004, le JOGMEC est un organisme que contrôle le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie

(METI) japonais. Sa mission est notamment d'aider les entreprises japonaises à sécuriser leurs approvisionnements en ressources naturelles, essentiellement en pétrole, en gaz et en métaux non ferreux. Le budget annuel du JOGMEC est d'environ 15 milliards d'euros (la part consacrée aux métaux est, quant à elle, assez faible, de l'ordre de 300 à 500 millions de dollars). Il compte environ 500 employés essentiellement basés au Japon (il dispose néanmoins de plusieurs bureaux situés à l'étranger, notamment à Londres et à Johannesburg).

Financement et investissement dans l'exploitation

Le JOGMEC finance et investit dans des activités d'exploration minière à l'étranger aux côtés de firmes japonaises. Les métaux concernés sont les métaux (et métalloïdes) dits rares : manganèse, nickel, chrome, tungstène, molybdène, niobium, tantale, antimoine, lithium, bore, titane, vanadium, strontium, terres rares, platinoïdes et uranium) et les métaux de base et précieux (cuivre, plomb, aluminium, étain, or et fer). Entre avril 2008 et mars 2009, le JOGMEC a investi 115 millions d'euros dans 9 projets d'exploration (cuivre au Pérou et au Chili, fer en Australie et uranium en Namibie).

Aujourd'hui, le JOGMEC compte 42 projets en *joint-venture*, dont un projet d'extraction de terres rares en Mongolie, 4 projets dans le sud de l'Afrique, 8 projets en Asie du Sud-est, 4 projets en Australie, 9 projets en Amérique du Nord et 14 projets en Amérique du Sud.

Le JOGMEC investit le plus souvent aux côtés d'entreprises japonaises de *trading* (les *shoshas*), ou encore de gros consommateurs de métaux (comme les sidérurgistes).

On peut ainsi citer la garantie de prêt accordée à la *shosha* Marubeni pour lui permettre d'acquérir 30 % de la mine de cuivre et d'or d'Esperanza, au Chili, ou encore le support technique et financier apporté par le JOGMEC à la *shosha* Toyota Tsusho, qui a investi, aux côtés d'Orocobre, dans le salar de Jujuy (en Argentine) pour produire du lithium.

Le JOGMEC a un centre de recherche dédié aux métaux, le Metals Technology Center, situé à Kosaka-Machi, dans lequel de nombreux projets de recherche sont conduits : développement de procédés hydro-métallurgiques innovants, de techniques de recyclage permettant de récupérer les métaux rares contenus dans les circuits électroniques, dans les disques durs d'ordinateurs, les déchets d'aciers d'outillages et de carbures cémentés...

Le JOGMEC détient des entrepôts dans lesquels il stocke du nickel, du chrome, du tungstène, du cobalt, du molybdène, du manganèse, du vanadium, de l'indium et du gallium. Ces stocks, qui, en temps normal, peuvent être partiellement vendus pour permettre à JOGMEC de réaliser quelques bénéfices, sont reconstitués en cas de crise forte survenant dans l'approvisionnement en certains de ces métaux. Enfin, il assure un contrôle environnemental des mines métalliques fermées au Japon.

Une collaboration scientifique entre le BRGM et le JOGMEC a été initiée au travers d'un accord, signé le 4 mars 2010, portant sur l'exploration des ressources minérales, l'analyse du marché de ces ressources et les développements techniques des procédés de contrôle des pollutions issues des mines fermées. Des échanges d'experts dans les domaines de la métrologie, des ressources minérales, de l'après-mine et du développement de procédés ont lieu régulièrement.

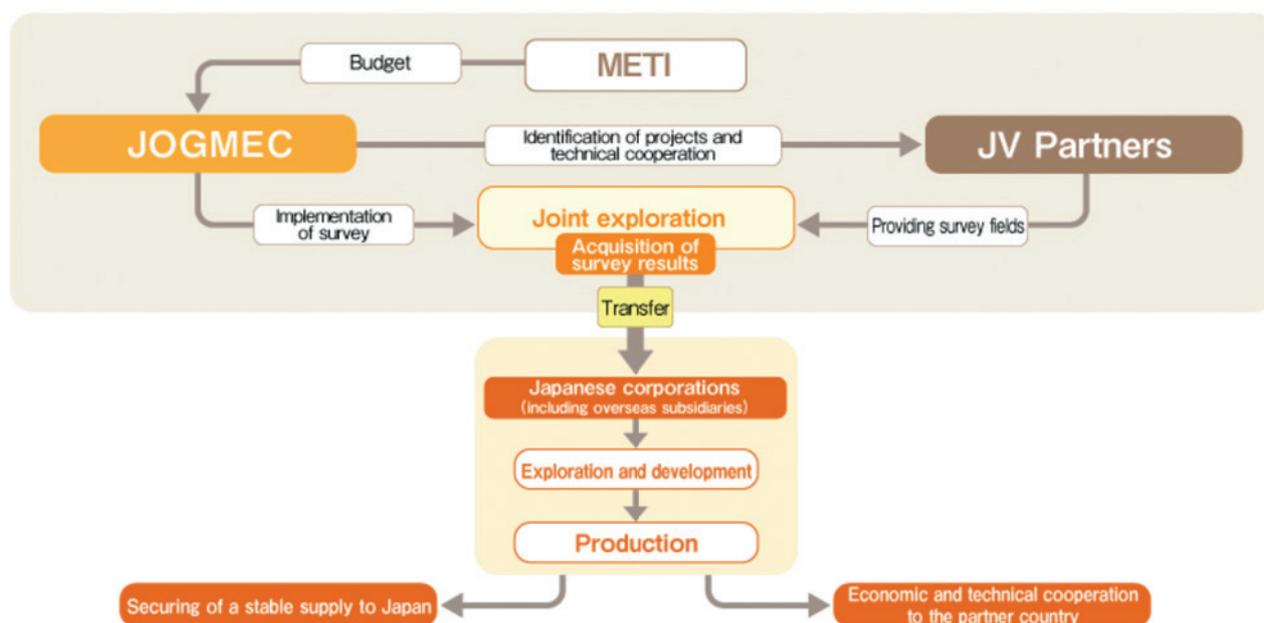


Figure 2 : Rôle de JOGMEC dans le processus de prise de participation.

Un exemple d'intervention du JOGMEC au stade de l'exploration (communiqué de presse)

Exploration Midland débute sa première campagne de forages avec JOGMEC sur son projet de terres rares, Ytterby Montreal, le 11 août 2011

Exploration Midland inc. (« Midland ») (Bourse de croissance TSX : MD) a le plaisir d'annoncer le début d'une campagne de forages sur son projet d'Éléments des Terres Rares (ETR) Ytterby. Détenue à 100 %, elle est présentement dans la deuxième année d'une entente d'option avec son partenaire Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC).

La foreuse est actuellement mobilisée sur Ytterby 3 et le début des forages est prévu pour la fin de la semaine. Ce nouveau programme de forages sera opéré par Midland et comprendra un minimum de 15 sondages totalisant 2 000 mètres de forage. Le programme testera plusieurs indices minéralisés de terres rares (ETR) identifiés l'an dernier sur les propriétés Ytterby 2 et Ytterby 3 situées respectivement à 65 et à 100 kilomètres au sud de Strange Lake et de la Zone-B. De la cartographie géologique aidée par du décapage mécanique et du rainurage sont présentement en cours sur les deux propriétés. Plus de 500 échantillons de rainures ont été récoltés et envoyés à l'analyse. L'an dernier, sur Ytterby 2, 29 prospectus minéralisés ont été découverts avec des valeurs variant de 0,3 à 18,0 % (TREO+Y₂O₃). Les proportions en oxydes de terres rares lourdes (TREO) et en oxyde d'yttrium (Y₂O₃) représentent respectivement 1,43 et 83,7 % du mélange TREO+Y₂O₃.

Sur Ytterby 3, 63 nouveaux prospectus minéralisés ont été trouvés titrant entre 1,03 et 7,94 % de TREO+Y₂O₃, (avec une moyenne de 2,72 % TREO+Y₂O₃). La proportion en oxydes de terres rares lourdes (HREO+Y₂O₃) représente de 2,4 à 15,4 % du TREO+Y₂O₃.

Ces nouveaux prospectus minéralisés sont ouverts dans toutes les directions. Le prochain programme d'exploration de Midland visera principalement des cibles susceptibles de mener à des gisements à large tonnage et à teneurs modérées pouvant être exploités par mine à ciel ouvert. Typiquement, les cibles sélectionnées pour être mises en valeur cet été seront de natures disséminées à moyennes et fortes teneurs en éléments des terres rares au sein de systèmes granitiques alcalins lités ou zonés, en association avec des hauts magnétiques et des anomalies radiométriques de thorium. Les forages planifiés devraient tester les cibles à des profondeurs variant de 70 à 250 mètres. Respectivement, 1 200 et 800 mètres de forage sont anticipés sur Ytterby 2 et Ytterby 3.

Conditions de l'entente d'exploration : JOGMEC a l'option d'acquérir un intérêt de 50 % dans le projet Ytterby d'ici au 31 mars 2012 en contrepartie de dépenses d'exploration pour un montant total de 2 500 000 \$, dont 1 000 000 \$ durant la première année. Midland agira à titre d'opérateur tant qu'elle détiendra un intérêt égal ou supérieur à 50 % dans le projet. JOGMEC a aussi le droit de transférer une partie ou l'ensemble de son intérêt dans le projet Ytterby à une ou plusieurs sociétés japonaises ou *consortium(s)* de sociétés japonaises.

À propos de JOGMEC : JOGMEC a été constitué en février 2004, dans le cadre du regroupement de Japan National Oil Corporation (JNOC) et de Metal Mining Agency of Japan (MMAJ). Elle est placée sous la juridiction du ministère japonais de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie et a pour mandat d'investir dans des projets de développement miniers partout dans le monde dans le but d'assurer à l'industrie japonaise un approvisionnement constant en ressources naturelles.

À propos d'Exploration Midland : Midland mise sur l'excellent potentiel minéral et sur le climat d'investissement favorable du Québec pour faire la découverte de nouveaux gisements d'or, de métaux usuels et de terres rares de classe mondiale. Midland est fier de compter sur des partenaires renommés, tels que Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, Mines Agnico-Eagle Ltée, Corporation Minière Osisko, Mines Aurizon Ltd, North American Palladium Ltd, Zincore Metals Inc. et Soquem Inc. Midland préfère travailler en partenariat et entend conclure rapidement des ententes à cet égard en ce qui concerne ses propriétés nouvellement acquises. Sa direction évalue actuellement d'autres opportunités et projets afin d'accroître le *portfolio* de la société.

Ce communiqué de presse a été préparé par Robert Banville, ingénieur géologue senior pour Midland et personne qualifiée selon la norme canadienne 43-101. Pour plus d'informations, veuillez consulter le site *Web* de la société ou contacter : Gino Roger, président et chef de la direction - Tél : 450 420-5977 - Téléc. : 450 420-5978 - Courriel : info@midlandexploration.com - Site *Web* : <http://www.midlandexploration.com/fr/sites/Midland/Main.aspx>



Traitement de catalyseurs

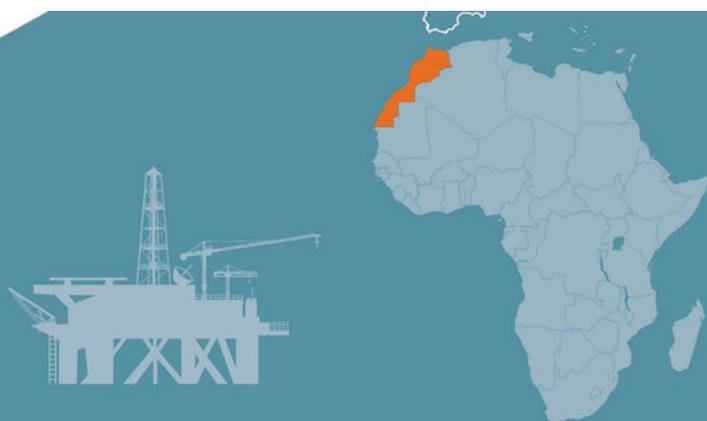
121 avenue Marie-Curie

Z.I. Jean-Jaurès

07800 LA VOULTE-SUR-RHONE - France

Tél. : +33 (0)4.75.62.04.02 - Fax : +33 (0)4.75.85.32.69

E-mail : eurecat@eurecat.fr - Site web : www.eurecat.fr



ROYAUME DU MAROC
ONHYM
المكتب الوطني للهيدروكربونات والمعادن
OFFICE NATIONAL DES HYDROCARBURES ET DES MINES

L'ONHYM promoteur du potentiel pétrolier
et minier national depuis 1928.

*Une expertise confirmée au
service de l'avenir... .*

5, Avenue Moulay Hassan • B.P.99, 10000 Rabat - Maroc
Tél. : +212 (0)537 23 98 98 • Fax : +212 (0)537 70 94 11
www.onhym.com • info@onhym.com



Métaux rares et dépendance stratégique

Par François VALÉRIAN

Conseil général de l'économie, professeur associé de finance au CNAM

Le Conseil général de l'économie a publié en 2015 un ouvrage intitulé *L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources* ⁽¹⁾, où il s'efforce de démontrer la nécessité d'une synthèse entre les préoccupations environnementales de rareté des ressources et l'impératif d'une meilleure compétitivité française et européenne face aux autres régions du monde. Le présent article applique les méthodes d'analyse développées par cet ouvrage au cas des métaux rares, emblématique d'une dépendance stratégique qui s'est créée à la faveur de progrès technologiques.

Les métaux rares offrent à la réflexion économique et politique un domaine intéressant où se rencontrent les évolutions de la demande, les rapports de force économiques entre différentes régions du monde, la volatilité des marchés des métaux, les politiques des entreprises et la politique, ou l'absence de politique, des pouvoirs publics européens.

Une belle histoire d'innovation technologique

Les éléments chimiques du groupe des lanthanides (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, prométhium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium et lutétium - auxquels on ajoute parfois le scandium et l'yttrium) ont trouvé sur les dernières décennies d'importantes applications dans de nouveaux objets, ou des objets plus performants, parmi lesquels on peut citer :

- les aimants permanents à base de néodyme, de praséodyme, de dysprosium ou de samarium, qui servent aux moteurs industriels, aux disques durs, à l'équipement automobile, et particulièrement aux véhicules hybrides et électriques, et aux éoliennes,
- les piles pour objets portables et connectés à base de lanthane ou de cérium,
- les alliages métalliques,
- la catalyse pour le raffinage pétrolier (lanthane) et les automobiles (cérium),
- les poudres abrasives et les additifs verriers à base de cérium,
- les lampes fluorescentes,
- les panneaux photovoltaïques.

Les métaux rares sont donc utilisés sur des marchés en pleine croissance comme ceux liés aux objets numériques

ou à la transition énergétique, au travers des nouveaux véhicules et de la production électrique solaire ou éolienne. Ils le sont aussi sur de vastes segments de la métallurgie ou de la pétrochimie.

Il n'y a jusqu'ici qu'une belle histoire d'innovations technologiques au service d'une économie plus propre ou davantage connectée.

Or, la confrontation économique des grandes régions du monde fait irruption dans cette histoire. La part de la Chine dans la production mondiale de métaux rares était de 86 % en 2014 ⁽²⁾, alors qu'elle était inférieure à 30 % il y a trente ans. L'inquiétude au sujet de cette domination chinoise était forte en 2011 et en 2012, quand les métaux rares se négociaient à des prix très élevés, qui n'avaient jamais été observés dans le passé (voir la Figure 1 ci-dessous).

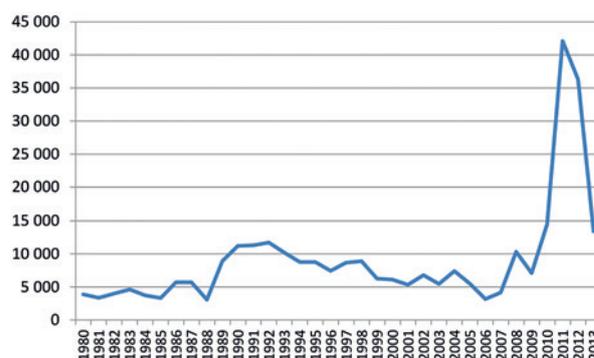


Figure 1 : Index des prix des métaux rares en dollars américains constants (1998) par tonne.

Source : US Geological Survey.

(1) Conseil général de l'économie, « L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources », La Documentation Française, 2015.

(2) US Geological Survey, Mineral Commodity Summary, 2015.

Photo © Xinhua/ZUMA-REA



La mine de terres rares de Bayan Obo en Mongolie intérieure (Chine).

« La part de la Chine dans la production mondiale de métaux rares était de 86 % en 2014, alors qu'elle était inférieure à 30 % il y a trente ans. »

Une dépendance stratégique vis-à-vis de la Chine

On prenait alors conscience d'une stratégie chinoise délibérée cohérente avec une conquête mondiale de gisements miniers (voir la Figure 2 ci-dessous) et une stratégie des prix qui renchérit les exportations par rapport au marché domestique (voir la Figure 3 de la page suivante). Cette stratégie des prix a recouru à des taxes à l'exportation, alors que la Chine avait conquis sa position prépondérante dans le commerce mondial des métaux rares par des subventions à l'exportation au début des années 2000.

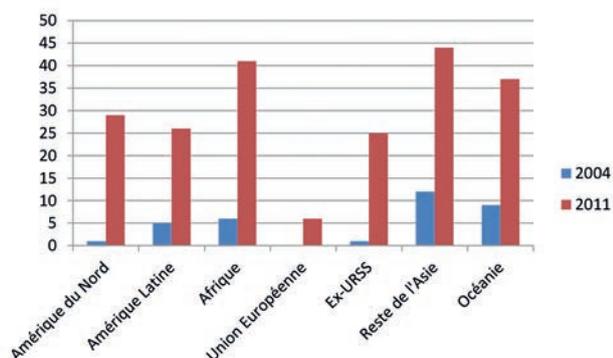


Figure 2 : Nombre d'investissements chinois dans des exploitations minières étrangères, 2004-2011.
Source : BRGM.

La question du risque stratégique que court l'Europe à dépendre ainsi de métaux chinois se pose à la faveur de prix très élevés, qui font d'ailleurs l'objet d'une procédure devant l'Union européenne. Or, depuis que les prix sont retombés, on entend moins parler de risque stratégique, et les entreprises qui avaient entrepris de recycler les métaux rares tendent à se désintéresser de ce type d'activité.

En janvier 2016, le groupe Solvay a annoncé l'arrêt, d'ici à la fin de l'année, de ses deux ateliers de recyclage des terres rares provenant des lampes basse consommation, situés à La Rochelle et à Saint-Fons, et dans lesquels le groupe avait investi 15 millions d'euros au plus haut des cours des métaux rares en 2011.

Il convient de prendre du recul par rapport à cet arbitrage entre métal vierge et métal recyclé et de modéliser la relation entre les différents paramètres qui expliquent les coûts associés à l'utilisation d'un métal rare dans l'économie.

Le lien entre recyclage et substitution

Sur une période donnée, l'économie a besoin d'une quantité q d'un métal. Cette quantité dépend du taux α de croissance de la production des objets qui contiennent ce métal, et du taux de substitution σ du même métal dans les objets, deux taux calculés sur la durée moyenne de vie des objets. Par ailleurs, elle recycle le métal contenu dans des objets arrivés en fin de vie. Si c_r est le coût uni-

taire de recyclage, Y le taux de collecte du métal comme déchet sur la période et ρ le taux de recyclage du métal collecté, la quantité recyclée est égale à $Y \rho \frac{q}{(1+\alpha)(1-\sigma)}$ car la collecte et le recyclage portent sur le métal incorporé dans des objets fabriqués au début de la durée de vie qui expire dans la période considérée. Le coût du recyclage est alors de $c_r Y \rho \frac{q}{(1+\alpha)(1-\sigma)}$. L'économie ayant besoin de la quantité q de métal, elle achète comme métal vierge $q - \frac{Y \rho q}{(1+\alpha)(1-\sigma)}$ à un coût $p_v (q - \frac{Y \rho q}{(1+\alpha)(1-\sigma)})$, où p_v est le prix unitaire du métal vierge. La quantité de métal collectée non recyclée est de $Y \frac{(1-\rho) q}{(1+\alpha)(1-\sigma)}$, éliminée à un coût unitaire c_e , et donc à un coût total de $c_e Y \frac{(1-\rho) q}{(1+\alpha)(1-\sigma)}$. Enfin, il nous faut tenir compte du coût de collecte et de tri, qui est de $c_c Y \frac{q}{(1+\alpha)(1-\sigma)}$, si c_c en est le coût unitaire.

En additionnant tous les coûts, nous parvenons donc à modéliser les coûts associés à l'utilisation d'un métal sur une période :

$$\begin{aligned} \text{coûts métal} &= p_v \left(q - \frac{Y \rho q}{(1+\alpha)(1-\sigma)} \right) + c_c Y \frac{q}{(1+\alpha)(1-\sigma)} \\ &+ c_e Y \frac{(1-\rho) q}{(1+\alpha)(1-\sigma)} + c_r Y \rho \frac{q}{(1+\alpha)(1-\sigma)} = \\ &q \left[p_v + \left(c_c Y / (1+\alpha)(1-\sigma) \right) + \left(c_e Y / (1+\alpha)(1-\sigma) \right) \right. \\ &\left. + \left((c_r - c_e - p_v) Y \rho / (1+\alpha)(1-\sigma) \right) \right] \end{aligned}$$

Avec :

- q = quantité de métal consommé sur la période par l'économie,
- p_v = prix unitaire moyen du métal vierge sur la période,
- c_c = coût de collecte et de tri unitaire moyen du métal comme déchet sur la période,
- c_e = coût unitaire moyen d'élimination du métal comme déchet sur la période,
- c_r = coût de recyclage unitaire moyen du métal sur la période,

- Y = taux de collecte du métal comme déchet sur la période,
- ρ = taux de recyclage du métal collecté sur la période,
- α = taux de croissance de la production des objets qui contiennent le métal sur la durée de vie moyenne de ces objets,
- σ = taux de substitution du métal dans les objets qui le contiennent sur la durée de vie moyenne de ces objets.

On mesure bien sur cette équation les enjeux croisés du recyclage et de la substitution, au travers du terme $(c_r - c_e - p_v) \frac{Y \rho}{(1+\alpha)(1-\sigma)}$. C'est en effet le seul terme dont le signe puisse changer et le seul aussi où apparaisse le taux de recyclage ρ .

On voit que deux cas distincts se présentent :

- $p_v > c_r - c_e$: le prix du métal vierge est supérieur au coût du recyclage diminué du coût de l'élimination. L'économie a alors intérêt au recyclage et est naturellement incitée à accroître ρ jusqu'au coefficient maximum ρ_{max} permis par la technique.
- $p_v < c_r - c_e$: le prix du métal vierge est inférieur au coût du recyclage diminué du coût de l'élimination. L'économie n'est pas alors naturellement incitée au recyclage et l'absence de recyclage ($\rho = 0$) minimise les coûts associés au métal.

En même temps, l'effet associé au taux de recyclage ρ est d'autant plus important que le taux de substitution σ est élevé, car la substitution permet alors de modérer la croissance d'utilisation du métal et de couvrir plus de besoins avec le recyclage.

Recyclage et substitution permettent donc, sous certaines conditions de prix du métal vierge, de réduire les coûts associés à l'utilisation d'un métal. Toutefois, même quand le prix du métal vierge est trop bas pour en rentabiliser le recyclage, le recyclage et la substitution permettent de

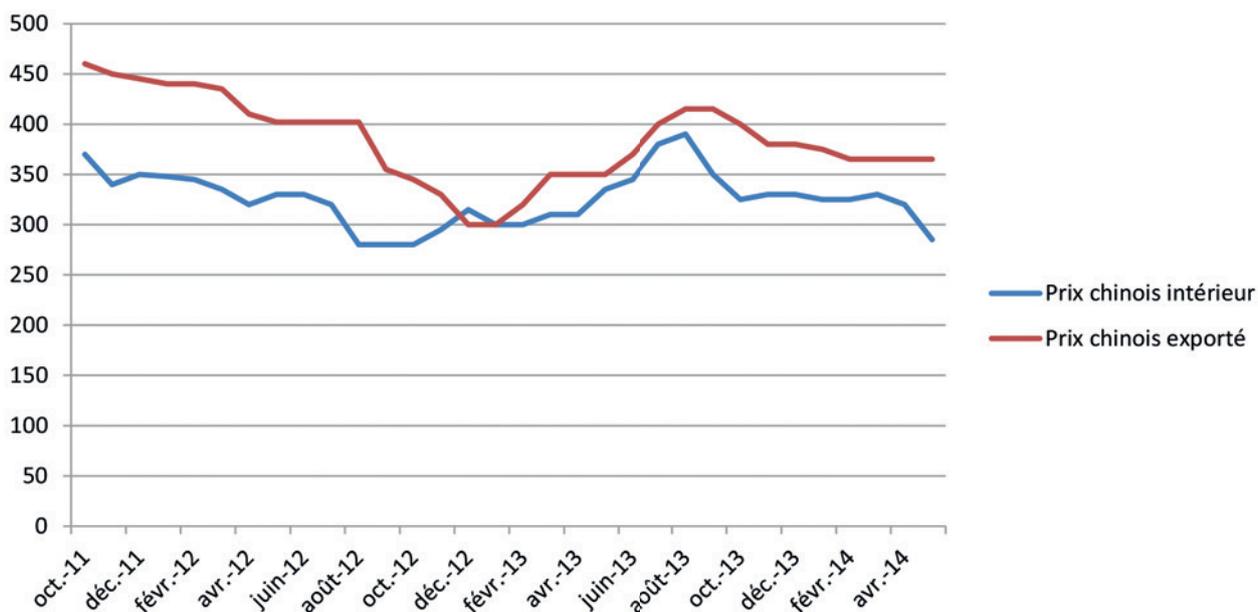


Figure 3 : Évolution des prix chinois, intérieur et exporté, du paratungstate d'ammonium, en dollars par unité de tonne métrique (10 kg). Source : Metal Bulletin.

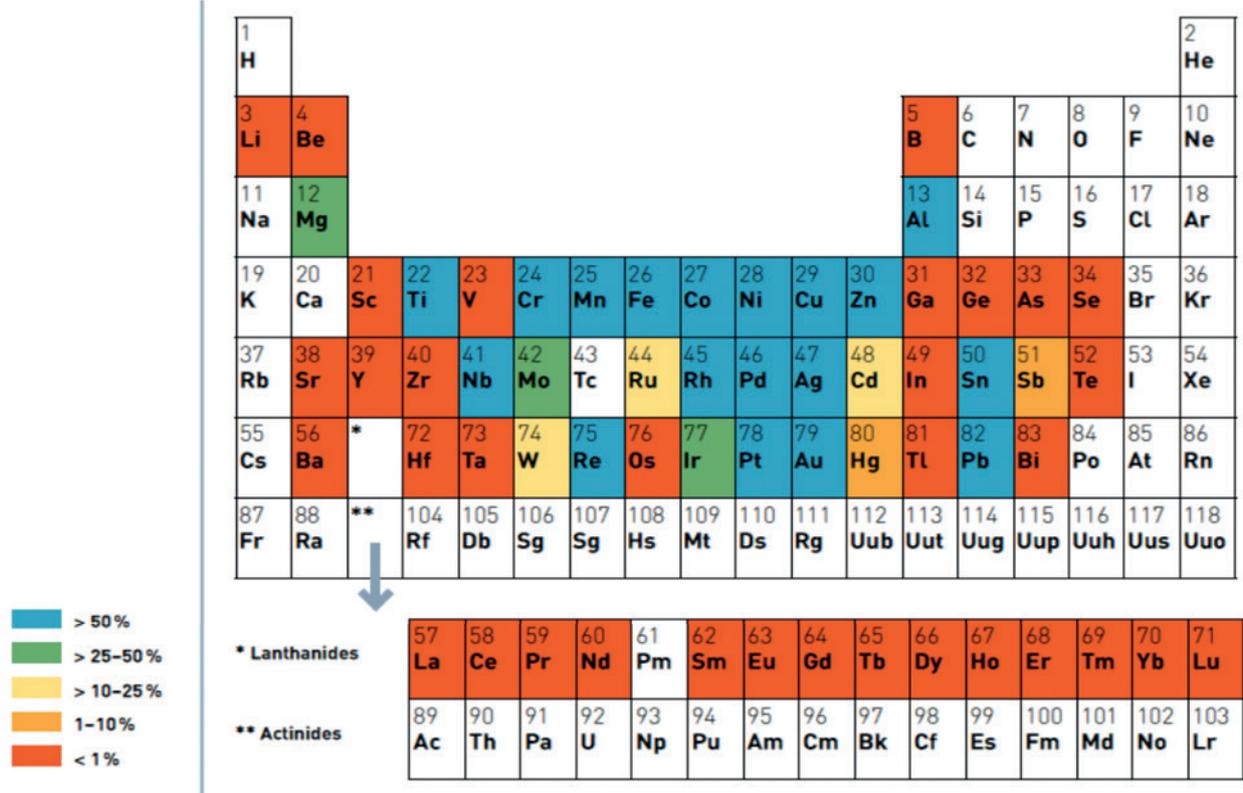


Figure 4 : Taux de recyclage (pourcentages de métaux récupérés après collecte et processus de recyclage) de 60 éléments à partir de produits en fin de vie.
 Source : UNEP & International Resource Panel, Recycling rates of metals (a status report), 2013.

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.

réduire la dépendance par rapport à un fournisseur prépondérant comme la Chine.

Le recyclage et la substitution des métaux rares sont cependant encore des sujets peu explorés, en dépit d'études intéressantes ⁽³⁾.

Le niveau actuel de recyclage des lanthanides reste faible, comme le montre la Figure 4 de la page précédente.

Quant à la substitution, elle n'est pas aisée, sans doute du fait de recherches encore insuffisantes (voir la Figure 5 de la page précédente).

La nécessité d'une politique publique

On arrive là sur un terrain que le monde de l'entreprise a toujours du mal à concevoir, et qui est celui du risque de dépendance stratégique vis-à-vis d'une autre région du monde ou d'une grande puissance comme la Chine.

Avec la retombée des prix des métaux rares, on a le sentiment que les problèmes stratégiques se sont atténués, alors qu'ils demeurent. La Chine riche en métaux, comme la Corée du Sud qui en est presque dépourvue, entretiennent des stocks stratégiques de métaux rares. La Chine semble faire participer au moins une entreprise privée, la Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earths, au stockage stratégique de métaux rares, et cette entreprise n'est certainement pas la seule à participer à l'effort national de stockage stratégique, car le plan de 15 ans adopté en 2007 prévoit de *combiner le stock national et le stock des utilisateurs, et d'imposer des réserves obligatoires aux entreprises fortement consommatrices de ressources* ⁽⁴⁾. En Corée, l'entreprise minière publique Korea Resources Corporation (Kores) constitue des stocks stratégiques qui

se retrouvent dans ses comptes sous l'appellation *Minerals held for reserve* et forment l'essentiel de ses stocks. Dans l'analyse que nous avons menée des comptes de Kores sur les dernières années, on trouve la trace de financements d'État sous la forme de remboursements partiels des achats de minéraux effectués par l'entreprise publique ⁽⁵⁾. L'Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earths aurait en stock entre 100 000 et 300 000 tonnes de métaux rares sous forme concentrée, tandis que Kores en aurait pour cent jours de consommation sous forme d'oxydes ⁽⁶⁾.

Le contraste est frappant entre un pays comme la Corée, pauvre en ressources mais déterminé dans sa stratégie de puissance, et une Europe dont les États membres ont peu à peu renoncé à leurs stocks stratégiques.

Il y a probablement, pour les puissances publiques à tout le moins ouest-européennes un rôle à jouer pour réduire notre dépendance stratégique en métaux rares vis-à-vis de la Chine, par une politique d'encouragement à la recherche de recyclage et de substitution, la reprise de la réflexion sur les stocks stratégiques, et sans doute une politique commerciale plus ferme.

(3) ADEME & Bio Intelligence Service, Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares, 2010.

(4) "Combine the national stockpile and users' stockpile, and impose a requirement for compulsory reserves at firms consuming a lot of resources", cité par United States National Research Council, Managing Materials for a Twenty-first Century Military, 2008.

(5) Korea Resources Corporation, Financial Statements, 2009, 2010, 2011, 2012.

(6) Commission européenne & Risk and Policy Analysts, Stockpiling of Non-energy raw materials, 2012.

Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux

Par Jean-François LABBÉ
BRGM

Le concept d'économie circulaire, qui vise à optimiser le recyclage et l'efficacité de l'usage des ressources minérales non renouvelables, est souvent interprété à tort comme un concept d'économie fermée, autosuffisante, qui s'alimenterait en matières recyclées et n'aurait plus besoin de ressources naturelles primaires. Or, à l'échelle du monde, tant qu'il y aura croissance de la consommation d'un métal donné - ce qui est le cas de manière quasi continue pour la grande majorité des métaux depuis le début de l'ère industrielle -, il restera impossible de satisfaire la demande par le seul recyclage. Et le taux de croissance de la production minière nécessaire pour satisfaire cette demande devra mathématiquement rester au moins égal au taux de croissance de la consommation, et ce, même avec un taux de recyclage idéal de 100 %. Les enjeux du recyclage sont d'éviter le gaspillage de ressources non renouvelables et l'accumulation de déchets potentiellement gênants ou polluants. Mais le recyclage ne pourra pas éviter le recours aux ressources minières tant que les besoins continueront à croître à l'échelle de la planète.

Introduction

Un des moyens souvent présentés pour atténuer la demande primaire en matières premières minérales est d'optimiser leur recyclage à partir des biens en fin d'usage (en « fin de vie »).

Il est évidemment souhaitable, de façon à minimiser la consommation de ressources naturelles non renouvelables et le rejet dans l'environnement de déchets potentiellement nuisibles, de maximiser :

- la récupération et le recyclage des chutes et rebuts de fabrication (*new scrap*),
- la récupération des produits hors d'usage (« en fin de vie ») et le recyclage des matières qui les composent : métaux, minéraux, mais aussi plastiques et autres matières organiques (pour les métaux : *old scrap*).

De plus, les coûts financier et énergétique de l'obtention d'un métal provenant du recyclage sont généralement bien inférieurs à ceux de l'obtention du même métal à partir de ses minerais.

La collecte des rebuts de fabrication et des produits hors d'usage contenant des métaux et le recyclage des métaux qui les composent ont donc été et sont de plus en plus promus, encouragés et développés afin, d'une part, de minimiser les mises en décharge et, d'autre part, de réinjecter les métaux ainsi récupérés dans le circuit de la pro-

duction industrielle sous la forme de nouvelles matières premières dites « secondaires ».

La Figure 1 de la page suivante, reproduite du rapport de 2010 du groupe de travail *ad hoc* de la Commission européenne chargé de la définition des matières premières critiques, illustre cette réintroduction des matières dans le circuit de production.

Une interprétation au premier degré de ce schéma pourrait laisser croire que l'approvisionnement primaire servirait essentiellement à compenser les pertes se produisant aux différentes étapes du cycle (extraction minière, métallurgie, fabrication des semi-produits, fabrication des produits de consommation, usage de ces produits, collecte en fin de vie, puis procédés de récupération des métaux à partir de ces produits collectés). Cette interprétation pourrait conduire à la conclusion qu'il suffirait de faire des efforts pour minimiser les pertes en ligne et pour maximiser les taux de récupération pour réduire à une part très minime les besoins en approvisionnement primaire.

Cette idée, erronée, qu'un recyclage optimisé pourrait répondre presque totalement aux besoins en matières premières minières est souvent véhiculée par les médias et est appropriée par une partie de l'opinion.

En réalité, cette notion d'une économie tendant vers la circularité ignore tout simplement l'accroissement de la demande et la dynamique des flux.

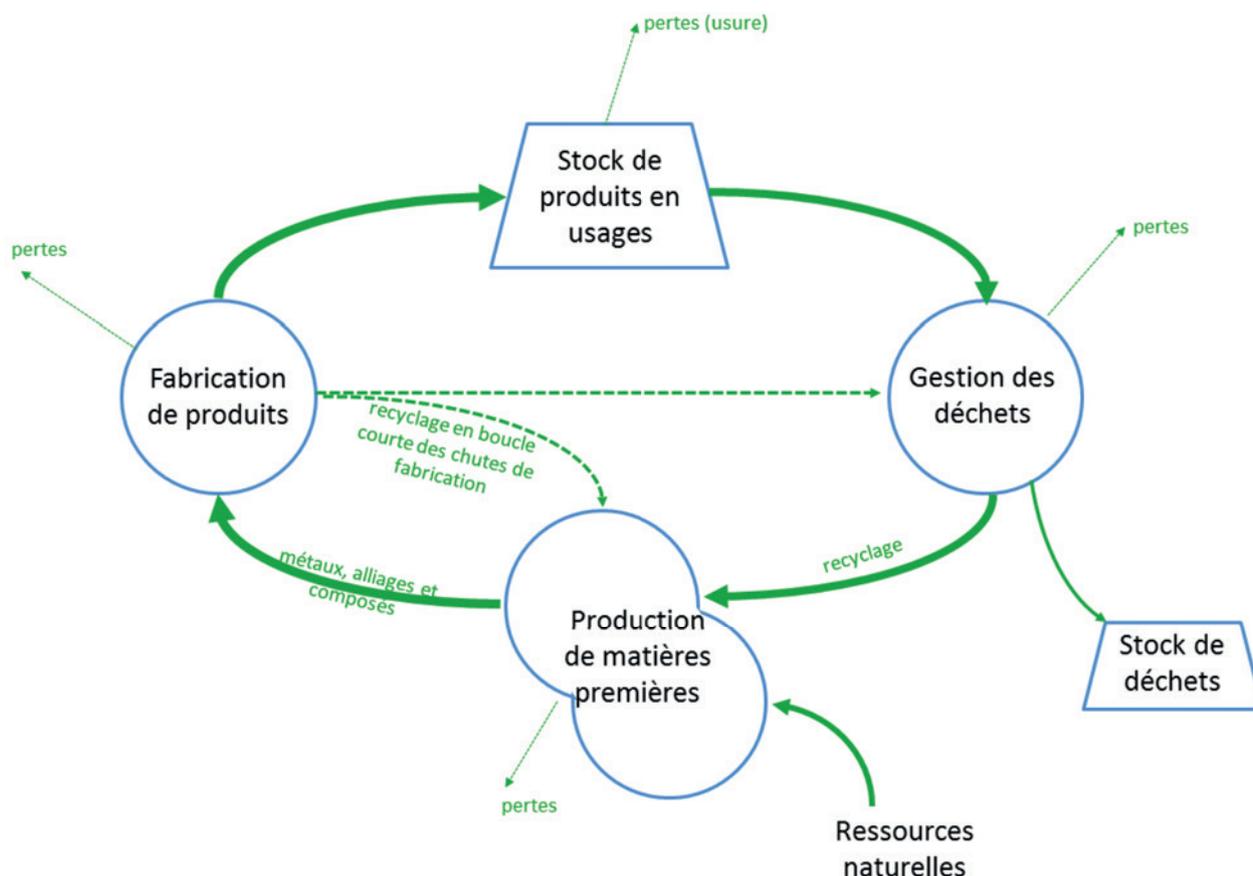


Figure 1 : Boucle de recyclage selon le rapport "Critical materials for the EU" du groupe de travail *ad hoc* de la Commission européenne, juin 2010.

En effet, comme nous l'expliquerons ci-après, dès lors qu'il y a croissance prolongée de la consommation d'un métal, le taux de croissance de la production primaire (minière) de ce métal nécessaire pour faire face à la demande doit rester au moins égal au taux de croissance de la consommation, et ce même avec un taux de recyclage de 100 %. Ce constat général avait déjà été exposé par François Grosse en 2010.

Croissance de la demande en métaux

Depuis le début de l'ère industrielle, il y a une croissance généralisée de la consommation de la grande majorité des métaux ⁽¹⁾, du moins en moyenne à moyen terme.

Ainsi, par exemple :

- la consommation de cuivre a crû en moyenne de 2,87 % par an depuis un demi-siècle, une croissance qui a même été de 3,45 % par an au cours des douze dernières années (de 2002 à 2014), et ce malgré la crise économique de ces dernières années (voir les Figures 2 et 3 de la page suivante) ;
- la consommation d'acier a augmenté de 3,62 % par an en moyenne depuis 1900, et même de 5,3 % par an depuis douze ans (de 2002 à 2014). Dans le détail, ces croissances ont connu des irrégularités importantes aussi bien dans le temps (elles ont été nettement plus faibles dans la période 1974-2002, voir les Figures 4 et 5 de la page 48) que dans l'espace (forte croissance

dans les pays émergents qui s'urbanisent et s'équipent en infrastructures, accalmie dans les pays matures déjà largement urbanisés et équipés) ;

- la consommation de lithium a augmenté de 7,5 % par an entre 2003 et 2013, et la plupart des analystes prévoient une poursuite de cette croissance à un niveau du même ordre pour de nombreuses années, tirée qu'elle est, en particulier, par la demande croissante de batteries au lithium ;
- pour des métaux « nouveaux » comme l'indium, la croissance a été de 8 % par an en moyenne depuis 25 ans.

Notons que les taux de croissance cités ci-dessus aboutissent à des doubléments de la consommation au bout des périodes indiquées dans le Tableau 1 de la page 49.

La durée de vie des métaux dans les produits

On ne peut insérer dans le circuit de recyclage que du métal ayant été extrait à un moment antérieur donné. Les temps de séjour d'un métal dans les produits et les infrastructures en cours d'utilisation (la « technosphère ») sont extrêmement variables selon les métaux et selon les usages.

(1) Il peut y avoir des baisses de production sur une à quelques années lors de périodes de crise, mais, globalement, sur le moyen terme, la consommation est nettement croissante pour la quasi-totalité des métaux, qu'ils soient majeurs ou mineurs.

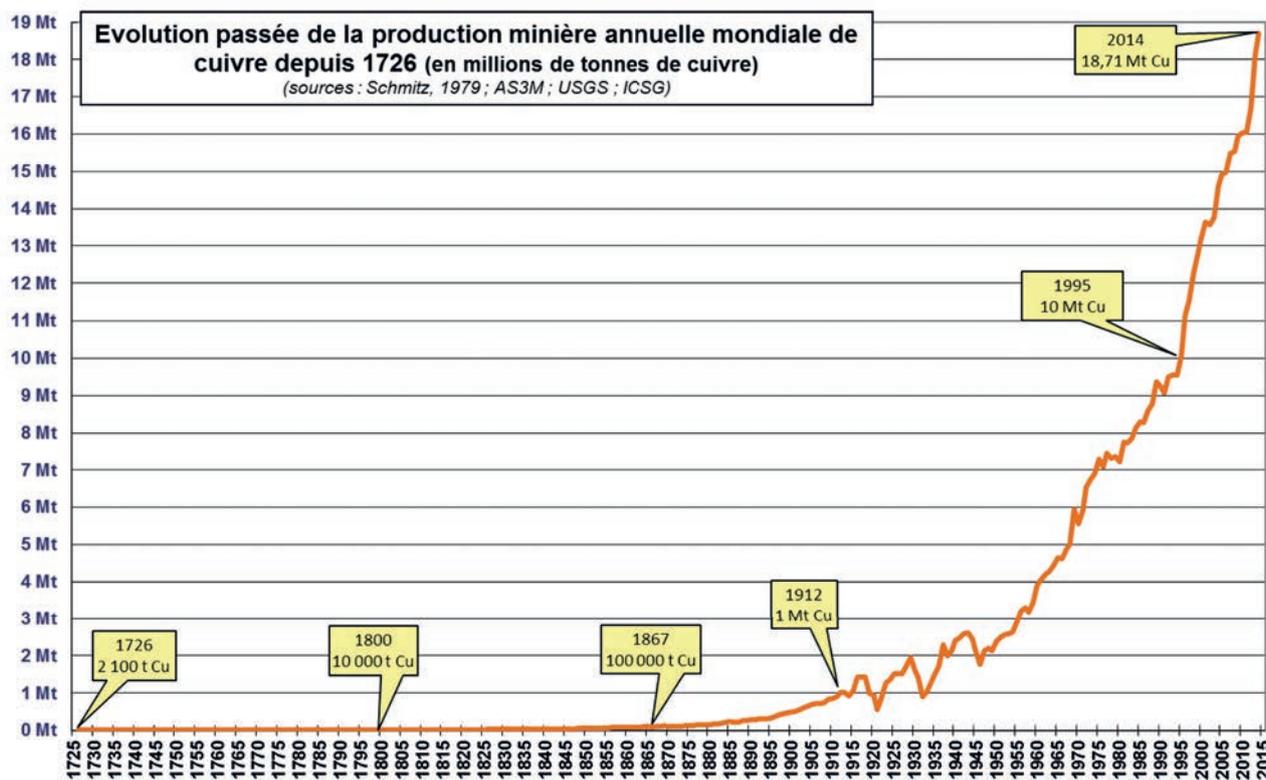


Figure 2 : Évolution historique de la production minière annuelle mondiale de cuivre.

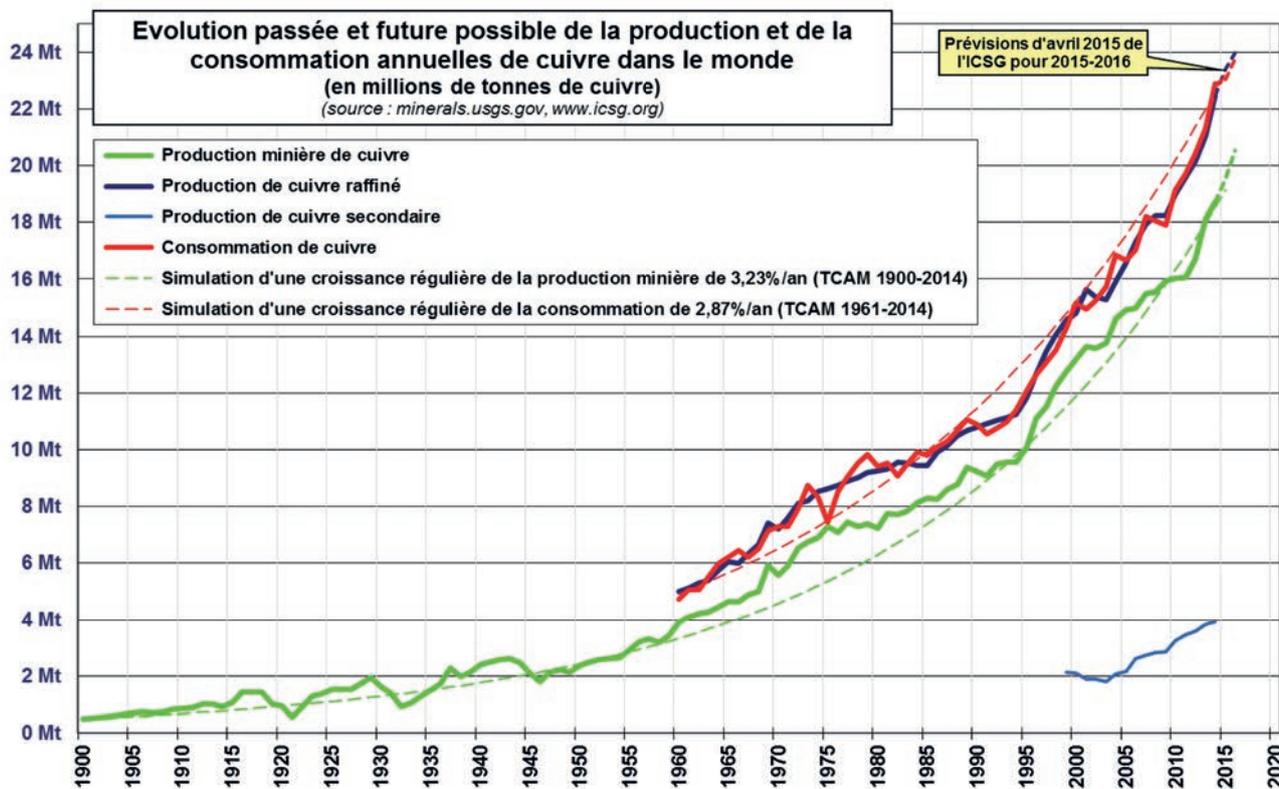


Figure 3 : Évolution des productions et consommations annuelles de cuivre dans le monde (production minière, cuivre raffiné, cuivre secondaire) et perspectives d'évolution à court terme.

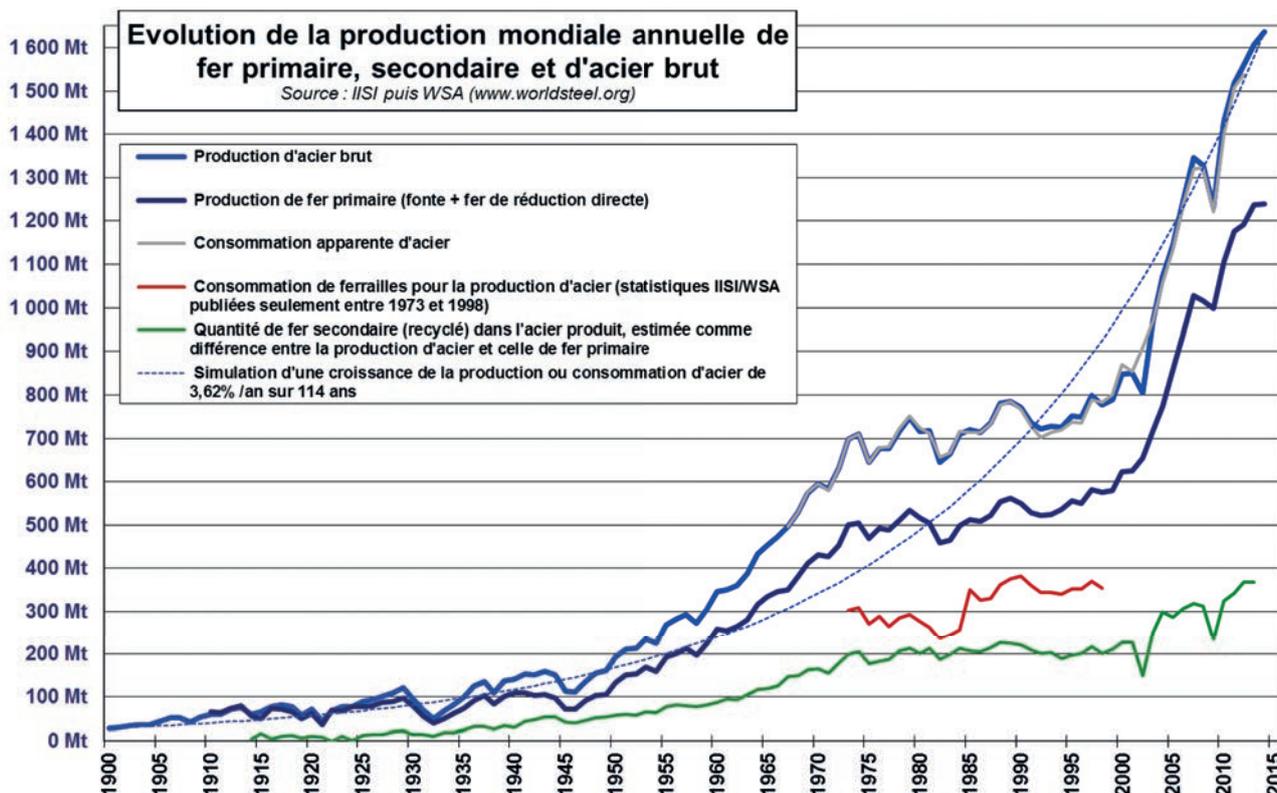


Figure 4 : Évolution des productions et des consommations mondiales annuelles de fer et d'acier.

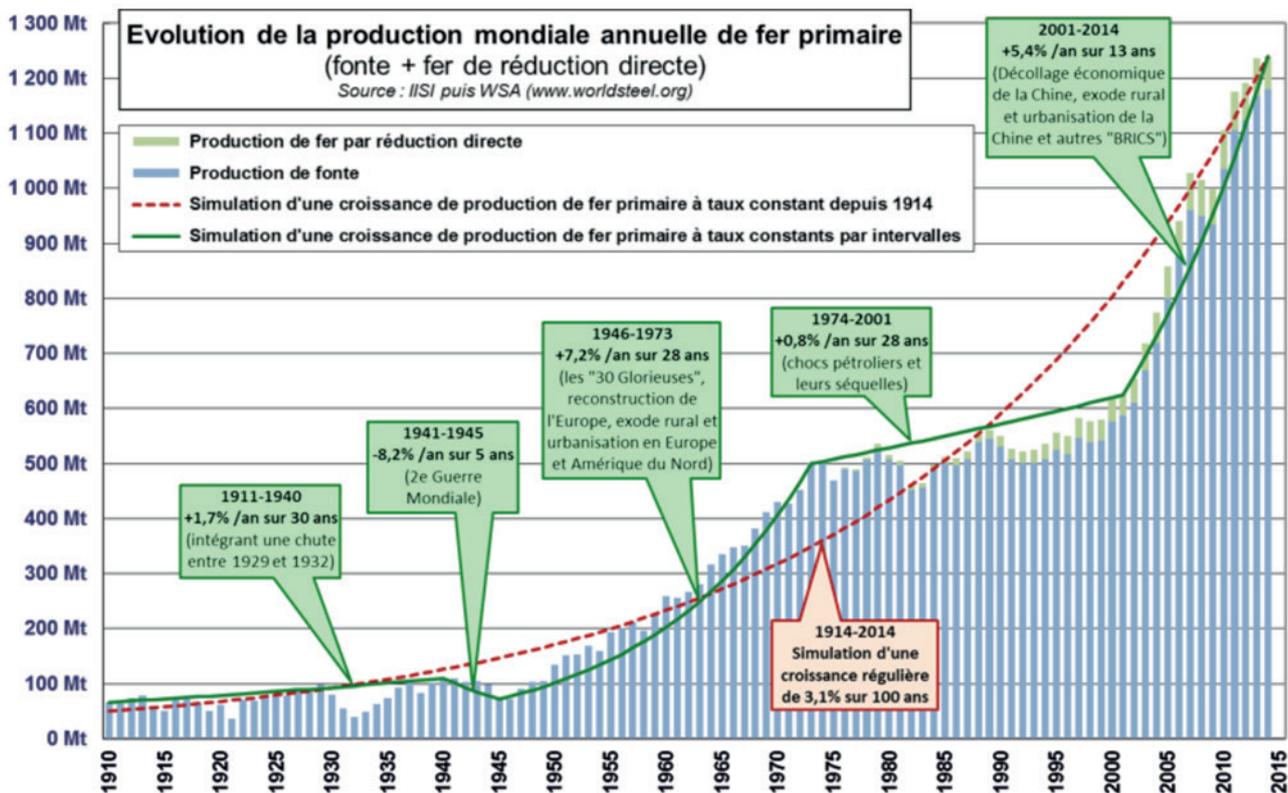


Figure 5 : Évolution de la production mondiale de fonte et de fer par réduction directe (correspondant en première approche à la production de fer primaire, c'est-à-dire issu des minerais de fer).

Taux de croissance annuel	Temps de doublement correspondant
1.00%	69.7 ans
2.00%	35.0 ans
2.85%	24.7 ans
3.00%	23.4 ans
4.00%	17.7 ans
5.00%	14.2 ans
7.00%	10.2 ans
9.00%	8.0 ans
15.00%	5.0 ans

Tableau 1 : Équivalence de quelques taux de croissance annuels et de temps de doublement de la consommation de métaux.

Ainsi, l'acier, l'aluminium, le cuivre et le zinc utilisés dans le bâtiment, de même que les métaux présents dans des infrastructures publiques ou collectives (rails, lignes à haute tension, lignes à moyenne tension, installations portuaires et aéroportuaires, bâtiments publics, glissières de sécurité, câbles de fibre optique, etc.) sont immobilisés pendant plusieurs dizaines d'années. Les métaux des véhicules sont immobilisés pendant 10 à 12 ans (en moyenne) avant de pouvoir alimenter le circuit du recyclage. Le plomb et l'antimoine des batteries au plomb sont immobilisés pour 5 à 10 ans. Les composants des panneaux solaires devraient être immobilisés pour 25 ans. Les métaux rares des écrans plats (indium, etc.) devraient être immobilisés une dizaine d'années au moins pour les téléviseurs et moniteurs, même si cette immobilisation est moindre pour les écrans des smartphones et autres appareils portables qui sont renouvelés plus fréquemment (en moyenne tous les 3 ans) en raison des évolutions technologiques et des effets de mode ⁽²⁾.

À l'inverse, le fer étamé des boîtes de conserve et l'aluminium des cannettes de boisson peuvent avoir un temps d'immobilisation allant de quelques semaines à quelques mois ⁽³⁾.

Pour un métal donné, comme le cuivre, le temps de résidence peut être très variable en fonction des usages. Graedel et al. (2010) ont publié les durées estimatives restituées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Catégorie	Usages	Part d'utilisati	Durée d'immobilisatio
Construction, bâtiments	Fils électriques, "plomberie"	50%	25 - 40 ans
Infrastructures	Câbles électriques pour production et transport d'énergie et télécommunications	22%	50 ans
Transport	Équipement automobile, ferroviaires, constructions navale et aéronautique	5%	10 - 30 ans
Équipements grand public	Électroménager, appareils électriques et électroniques, éclairage	5%	10 ans
Équipements secteur tertiaire	Électronique et informatique, éclairage	10%	20 ans
Équipements industriels	Machines, éclairage	8%	20 ans
Produits chimiques		<1%	1 an
Total		100%	
Moyenne pondérée			35 ans

Tableau 2 : Temps indicatifs de résidence et d'immobilisation du cuivre selon ses usages (GRAEDEL et al., 2010).

En France, les pouvoirs publics constatent qu'il y a une insuffisance de logements, ils voudraient promouvoir la construction de plusieurs centaines de milliers de nouveaux logements par an. Or, construire des logements requiert impérativement de disposer de matériaux, mais aussi de divers métaux ou de leurs composés (armatures en fer à béton ou, pour les plus grands immeubles, ossatures en poutres d'acier ; câblage électrique et tuyauterie en cuivre ; robinetterie chromée ; gouttières en zinc ; serrurerie en acier ou en laiton ; radiateurs en fonte ou en d'autres métaux (selon les types) ; menuiseries parfois en aluminium ; ignifugation des gaines recourant à l'antimoine ; peintures au dioxyde de titane ; tungstène et terres rares pour l'éclairage... On comprend bien que si l'on voulait construire ces nouveaux logements uniquement avec des matériaux et des métaux issus du recyclage, il faudrait avoir démolé au moins autant de logements construits précédemment pour en récupérer les matériaux. Et même davantage, si l'on tient compte de l'augmentation des niveaux d'équipement, en particulier ceux imposés par l'évolution des normes.

Ainsi, même en France, il faut continuer à ajouter de nouveaux métaux et matériaux à ceux qui nous équipent déjà : dans la distribution électrique, on ne détruit pas une ligne haute tension pour en récupérer les câbles et les pylônes à chaque fois que l'on a besoin de construire une nouvelle ligne ! Les éoliennes en cours d'installation ne sont pas toutes construites avec les éléments recyclés d'un nombre équivalent d'anciennes éoliennes démantelées... Il en va de même pour les câbles électriques destinés à relier ces éoliennes au réseau. Il faut donc bien de nouveaux matériaux, de nouvelles matières premières.

Dans quelles limites le recyclage peut-il satisfaire nos besoins en métaux ?

Dans le cadre du projet Polinaires du 7^{ème} programme-cadre de recherche et développement de la Commission européenne, L.A. Tercero Espinoza (2012) écrivait : « *Comme la demande en la plupart des métaux s'accroît fermement d'année en année, même la récupération complète de la totalité d'un métal quittant la phase d'utilisation ne conduirait pas à la satisfaction de la nouvelle demande* [Ce point est illustré dans la Figure 6 de la page suivante]. *Ainsi, la contribution relative du matériau recyclé dépend du laps de temps entre la production primaire et le recyclage d'un métal donné. [...].* »

(2) L'obsolescence rapide, voire intentionnelle et programmée, de certains appareils mobiles n'est pas un gage de développement « soutenable », même si elle peut alimenter plus rapidement le circuit du recyclage. Il est plus durable de pouvoir garder le même téléphone mobile pendant 10 ans que de recycler 5 fois des téléphones d'une durée de vie limitée à 2 ans.

(3) À l'inverse, d'autres usages immobilisent les métaux pendant plus d'un siècle, voire bien davantage. Les 7 300 tonnes de fer de la Tour Eiffel sont immobilisés depuis 126 ans ; le plomb de jointure et de scellement des vitraux des cathédrales gothiques depuis 650 ans ; sans parler de l'or du masque de Toutankhamon... même s'il s'agit là de quantités minimes au regard des productions et des consommations actuelles.

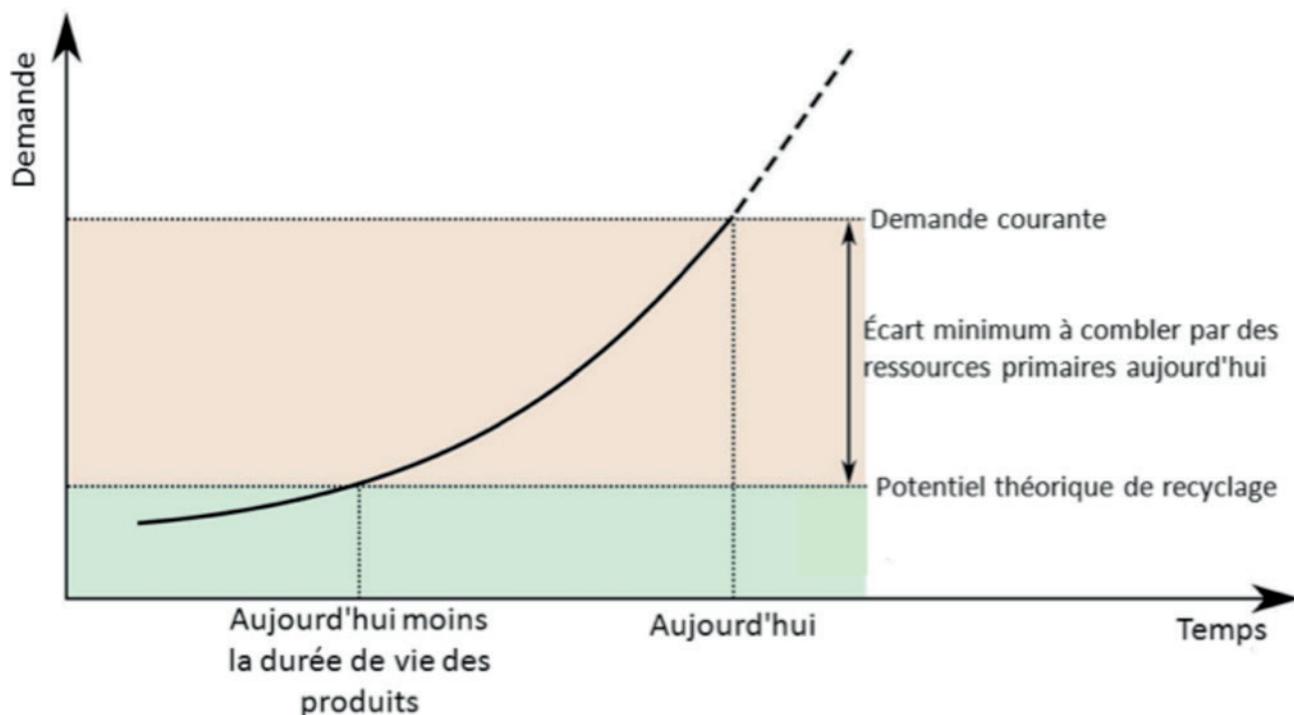


Figure 6 : Diagramme justifiant le besoin de matières premières minérales primaires même dans un scénario de recyclage à 100 % des produits en fin de vie (traduit de Tercero Espinoza, Fraunhofer ISI, mars 2012).

Tercero Espinoza ajoute : « Il est également important de noter que de la matière quitte constamment le cycle » (usure, pertes) et que « bien qu'il ne soit pas possible d'éviter que du métal quitte le cycle de manière irréversible, il est souhaitable d'explorer et d'exploiter toute mesure raisonnable susceptible de différer ces départs ». Il notait aussi qu'une contribution à la satisfaction de ce souhait serait de produire des articles ayant une plus longue durée de vie.

On comprend aussi qu'en cas de croissance continue de la demande, avec un taux de croissance moyen de la consommation sur le long terme de X % par an et un recyclage intégral de ce qui aura été consommé après un laps de temps préalablement déterminé progressant lui aussi de X % par an, le complément minier nécessaire devra lui aussi croître de X % par an, puisqu'il correspondra à la différence entre deux quantités croissant à un même rythme de X % par an.

C'est une réalité incontournable : en cas de croissance continue de la demande, le recyclage intégral des quantités consommées au cours d'un laps de temps fixé auparavant ne change rien au taux de croissance de la production minière nécessaire à la satisfaction de la demande.

Si la demande en un métal donné croît de 3 % par an sur la durée, l'offre minière devra elle aussi croître de 3 % par an pour la satisfaire, et ce, quel que soit le taux de recyclage, et même s'il était possible d'atteindre le taux maximum de 100 %. Le raisonnement est identique pour tout autre taux de croissance positif et pour toute durée moyenne d'immobilisation.

Le raisonnement peut se généraliser comme suit :

Soit un métal dont la consommation connaît un taux de croissance « R » régulier et positif, dont la durée moyenne de séjour dans son usage est « d » (nombre d'années) et dont le taux de recyclage est « K »⁽⁴⁾. La production minière (primaire) « PP_a » d'une année « a » nécessaire à satisfaire la demande « C_a » de cette même année « a » sera égale (abstraction faite du jeu des variations de stocks négligé ici) à :

$$PP_a = C_a - PS_a = C_a - K \times C_{a-d} = C_a - K \times C_a / (1 + R)^d = C_a \times (1 - K/(1+R)^d)$$

Où PS_a est la production secondaire de l'année « a », égale à K fois la consommation de l'année « a-d », K étant le pourcentage de recyclage effectif combiné du métal considéré.

Les taux de couverture de la consommation C_a par la production secondaire PS_a et la production primaire PP_a s'écrivent ainsi :

$$PS_a/C_a = K/(1+R)^d$$

$$PP_a/C_a = 1 - K/(1+R)^d$$

On voit donc que pour un taux de croissance fixe positif donné de la consommation, une durée de vie fixe donnée

(4) Conformément à la définition retenue par l'UNEP (2010), le taux de recyclage correspond au ratio de la quantité de produits effectivement recyclés sur la quantité de ces produits en fin de vie. Il combine le taux de collecte (part des produits en fin de vie effectivement collectés pour être mis dans le circuit de recyclage) et le taux de récupération de la substance donnée (ratio de la quantité de substance effectivement récupérée par rapport à la quantité présente dans les produits en fin de vie collectés et insérés dans le circuit du recyclage).

et un pourcentage de recyclage réel donné, la production minière nécessaire afin de satisfaire la demande reste toujours dans la même proportion que la demande et qu'elle devra donc évoluer dans le temps avec exactement le même taux de croissance.

Le recyclage, même optimal, ne change en rien le taux de croissance de la production minière nécessaire pour satisfaire une demande croissante d'un métal donné, tout du moins à l'échelle mondiale ⁽⁵⁾. Le taux de croissance annuel de la production minière nécessaire restera en moyenne égal au taux de croissance annuel de la demande, dès lors que ce taux de croissance reste positif dans la durée ⁽⁶⁾.

On déduit des équations ci-dessus que le pourcentage de la demande en un métal donné à satisfaire par la production minière sera d'autant plus élevé que le pourcentage de récupération sera faible, que la durée de séjour dans les usages sera longue et que le taux de croissance de la consommation sera élevé.

Le Tableau 3 ci-dessous illustre le pourcentage maximal possible de satisfaction de la demande par la production secondaire selon diverses durées d'immobilisation et divers taux de croissance annuelle pour quelques exemples de taux de recyclage ⁽⁷⁾.

Dans le cas du cuivre, en prenant une croissance annuelle de la consommation de 2,87 % (moyenne observée depuis 53 ans, voir la Figure 3 de la page 47), une durée moyenne de séjour dans ses usages de 35 ans (voir le Tableau 2 de la page 49) et un taux de récupération en

fin de vie variant de 43 % (GRAEDEL et al., 2011, citant GOONAN, 2010) à 53 % (GRAEDEL et al., 2004), le cuivre secondaire issu du recyclage « en fin de vie » ne pourra couvrir au mieux que 16,0 à 19,7 % de la demande.

Actuellement, ce taux de couverture de la consommation par le cuivre secondaire en fin de vie (*old scrap*) est de 15 à 17 % (voir la Figure 3 de la page 47).

Même si l'on parvenait, avec tous les efforts nécessaires, à un taux de récupération en fin de vie de 80 %, et en retenant les mêmes hypothèses de durée de séjour (35 ans) et de croissance annuelle (2,87 % par an), le cuivre secondaire issu du recyclage ne pourra jamais satisfaire davantage que 30 % de la demande.

Le schéma de la Figure 1 de la page 46 doit donc être adapté (voir la Figure 7 de la page suivante) pour visualiser les effets dynamiques liés au taux de croissance de la consommation.

Quantités absolues et taux de croissance

Nous avons vu que le taux de croissance de la production primaire nécessaire à la satisfaction d'une croissance de la demande à un taux positif durable devait être égal à ce taux quel que soit le taux de recyclage en fin de vie. Pourtant, l'approvisionnement en métal recyclé une année donnée diminue d'autant la production primaire nécessaire pour satisfaire la demande de l'année considérée.

En fait, avec le recyclage, il y a simplement un différé dans le temps d'un même besoin de production primaire pour satisfaire la même demande par rapport à ce qu'elle aurait

Taux maximaux possibles de couverture de la consommation par la production secondaire selon divers taux de recyclage en fin de vie "K"

K = 100%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	1%	99.0%	97.1%	95.1%	90.5%	78.0%	60.8%
	2%	98.0%	94.2%	90.6%	82.0%	61.0%	37.2%
	3%	97.1%	91.5%	86.3%	74.4%	47.8%	22.8%
	4%	96.2%	88.9%	82.2%	67.6%	37.5%	14.1%
	5%	95.2%	86.4%	78.4%	61.4%	29.5%	8.7%
	10%	90.9%	75.1%	62.1%	38.6%	9.2%	0.9%

K = 60%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%
	1%	59.4%	58.2%	57.1%	54.3%	46.8%	36.5%
	2%	58.8%	56.5%	54.3%	49.2%	36.6%	22.3%
	3%	58.3%	54.9%	51.8%	44.6%	28.7%	13.7%
	4%	57.7%	53.3%	49.3%	40.5%	22.5%	8.4%
	5%	57.1%	51.8%	47.0%	36.8%	17.7%	5.2%
	10%	54.5%	45.1%	37.3%	23.1%	5.5%	0.5%

K = 20%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%
	1%	19.8%	19.4%	19.0%	18.1%	15.6%	12.2%
	2%	19.6%	18.8%	18.1%	16.4%	12.2%	7.4%
	3%	19.4%	18.3%	17.3%	14.9%	9.6%	4.6%
	4%	19.2%	17.8%	16.4%	13.5%	7.5%	2.8%
	5%	19.0%	17.3%	15.7%	12.3%	5.9%	1.7%
	10%	18.2%	15.0%	12.4%	7.7%	1.8%	0.2%

Tableau 3 : Pourcentages maximaux possibles de contribution de la production secondaire pour satisfaire la demande selon quelques exemples de taux de croissance, de durée de vie des produits contenant des métaux stratégiques et de taux de recyclage K.

(5) À l'échelle plus locale de pays ou d'ensembles géographico-économiques, l'analyse est plus complexe : les pays émergents consomment beaucoup de matières premières pour leur urbanisation, leurs infrastructures et la montée en puissance de leur consommation de biens matériels (voitures, électroménager, etc.), mais il s'agit de consommations nouvelles qui n'alimentent pas encore, ou que très peu, le marché du recyclage. En revanche, dans les pays à économie mature et à industrialisation plus ancienne, les équipements en fin de vie sont plus abondants, alors que la consommation s'est ralentie ou stabilisée du fait d'un quasi achèvement de l'exode rural, de l'urbanisation, de la construction des infrastructures majeures et d'un équipement des ménages se focalisant davantage sur le renouvellement. Mais il convient alors d'analyser le problème en profondeur pour bien distinguer ce qui relèverait, dans ces pays à économie mature, d'une réelle stabilisation ou d'une baisse effective de la consommation d'une substance donnée dans les produits finis consommés, de ce qui relèverait de la simple délocalisation industrielle, les métaux continuant à être consommés, mais seulement intégrés dans des produits finis fabriqués ailleurs dans le monde.

(6) Le taux de croissance de la production minière nécessaire pourra éventuellement diminuer transitoirement :

- si l'on augmente de manière significative d'une année sur l'autre le taux de recyclage effectif, mais cela ne sera que transitoire puisque l'on ne pourra pas dépasser un taux de recyclage de 100 % et qu'une fois ce taux atteint, l'équation mentionnée restera vraie ;
- si l'on se met soudainement à recycler du matériel plus ancien qui ne l'était pas jusqu'alors. Mais cela signifiera seulement qu'il n'avait pas été recyclé les années précédentes, cela ne jouera donc pas sur le moyen terme.

(7) Selon la formule : PS/C (ratio production secondaire sur consommation) = $K/(1 + R)^d$.

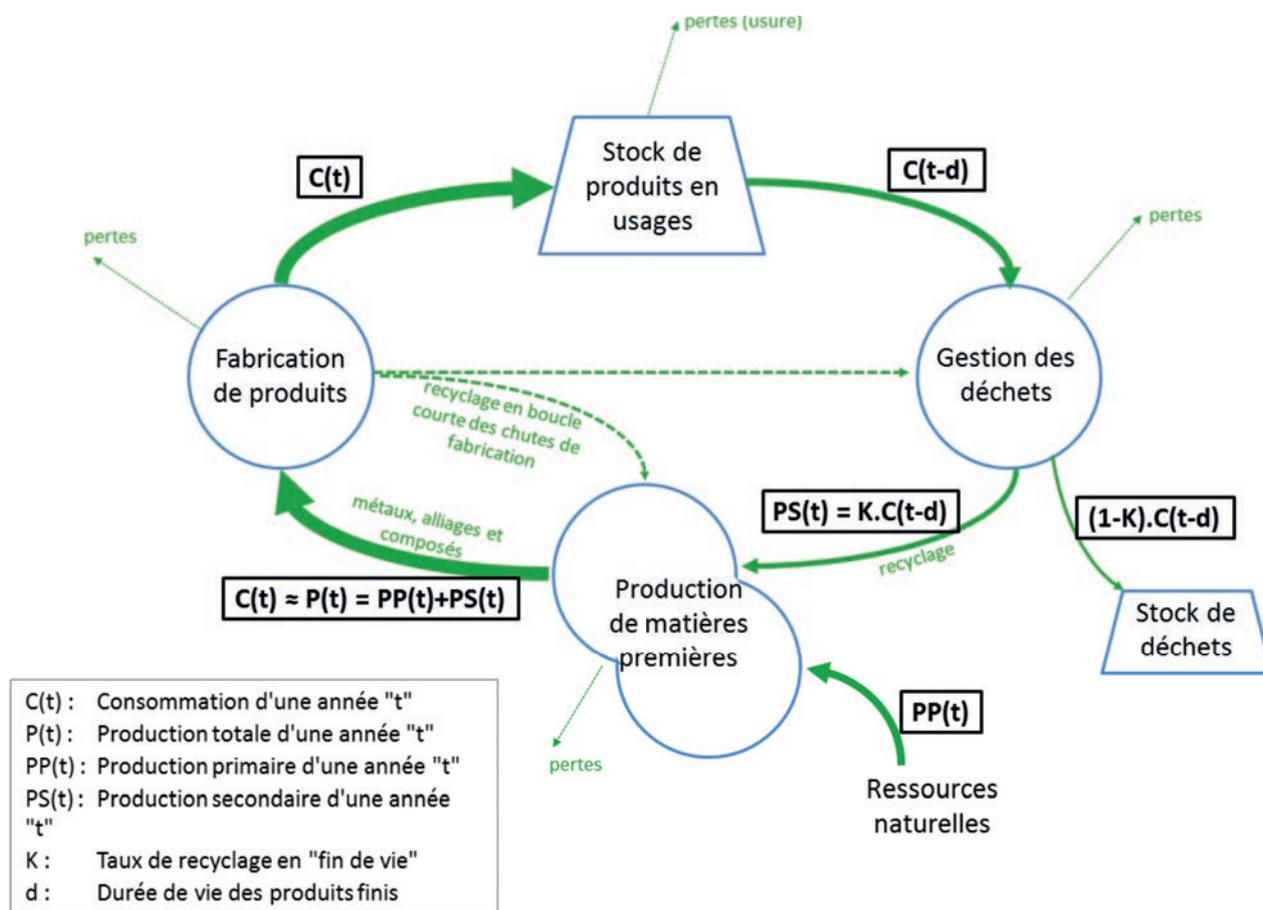


Figure 7 : Schéma simplifié de l'économie circulaire introduisant les notions de stock de produits en usage, de différentiel de temps et de flux entre la consommation et la remise en circuit des produits en fin de vie. Les boucles courtes (chutes de fabrication, ici en pointillés gras) et les diverses pertes (pointillés maigres) sont ici négligées ⁽⁸⁾.

été sans recyclage (voir le Tableau 4 et la Figure 8 de la page suivante) (voir aussi GROSSE, 2010 ⁽⁹⁾).

L'exemple de la Figure 8 se lit ainsi : pour une consommation de 100 en l'an 2000 et une croissance de 3 % par an, cette consommation atteindra 400 en 2047. Sans recyclage, la production primaire devrait donc être de 400 en 2047. Avec un recyclage de 80 % de ce qui aura été consommé 10 ans auparavant, la production primaire nécessaire pour satisfaire la demande en complément des quantités recyclées ne sera que de 162 en 2047, mais elle atteindra 400 en 2078, soit 31 ans plus tard. Ainsi, il y aura toujours un besoin des mêmes quantités primaires croissantes, mais 31 ans plus tard que cela aurait été le cas sans recyclage.

Ainsi, l'optimisation du recyclage, si elle est évidemment nécessaire, n'est en rien un gage de soutenabilité de la croissance. Elle recule juste l'échéance d'un nombre limité d'années.

L'exemple du cuivre

Les Figures 2 et 3 de la page 47 illustrent les évolutions historiques des productions et consommations de cuivre des origines à 2014.

Si l'on extrapole la production minière qui serait nécessaire pour satisfaire la demande avec un taux de croissance de

2,85 % (taux de croissance moyen réel de la consommation de cuivre de 1960 à 2012), on voit qu'il faudra extraire dans les 25 prochaines années (2015 à 2039 inclus) autant de cuivre qu'il en a été extrait depuis la nuit des temps jusqu'à 2014 (voir la Figure 9 de la page 54). Et il faudra en extraire autant au cours des 15 années suivantes.

Cela étant, ce doublement en 25 ans du cumul de la production primaire mondiale (c'est-à-dire le besoin d'extraire dans les 25 prochaines années autant de cuivre qu'il en a été extrait jusqu'à présent) ne doit pas étonner : c'est ce qui se passe depuis toujours. Le monde a extrait 327 Mt de cuivre entre 1991 et 2014 (en 24 ans), alors qu'il en avait extrait 314 Mt des origines à 1990. Et ainsi de suite ⁽¹⁰⁾.

(8) Le recyclage en boucle courte peut être intégré au processus de fabrication des produits finis utiles (voir TERCERO ESPINOZA, 2012).

(9) François Grosse présente une analyse comparable et en conclut que l'augmentation du taux de recyclage permet de différer l'échéance de la dépletion d'une ressource finie. Ce qui est vrai, mais cet « éloignement dans le temps » ne sera qu'un décalage se limitant à quelques années seulement.

(10) C'est une des propriétés intrinsèques des fonctions exponentielles : leurs primitives (qui permettent de calculer leurs intégrales, leur cumul) croissent exactement du même taux que les fonctions elles-mêmes.

Hypothèse de croissance annuelle de la consommation d'un métal donné	2.8%	3%	4%	5%	10%
Hypothèse d'un recyclage à 100% des quantités consommées 10 ans auparavant					
Taux de couverture de la consommation par le recyclage	75.9%	74.4%	67.6%	61.4%	38.6%
Différé dans le temps d'une même demande primaire absolue entre une contribution du recyclage de 100% des quantités consommées 10 ans auparavant et pas de recyclage.	52 ans	46 ans	29 ans	20 ans	5 ans
Hypothèse d'un recyclage à 80% des quantités consommées 10 ans auparavant					
Taux de couverture de la consommation par le recyclage	60.7%	59.5%	54.0%	49.1%	30.8%
Différé dans le temps d'une même demande primaire absolue entre une contribution du recyclage de 80% des quantités consommées 10 ans auparavant et pas de recyclage.	34 ans	31 ans	20 ans	14 ans	4 ans

Tableau 4 : Différé dans le temps d'une même quantité absolue de production minière nécessaire pour satisfaire une demande croissante avec des taux de recyclage de 100 % et de 80 %, par rapport à l'année où cette production minière aurait dû atteindre cette même quantité absolue en l'absence de recyclage.

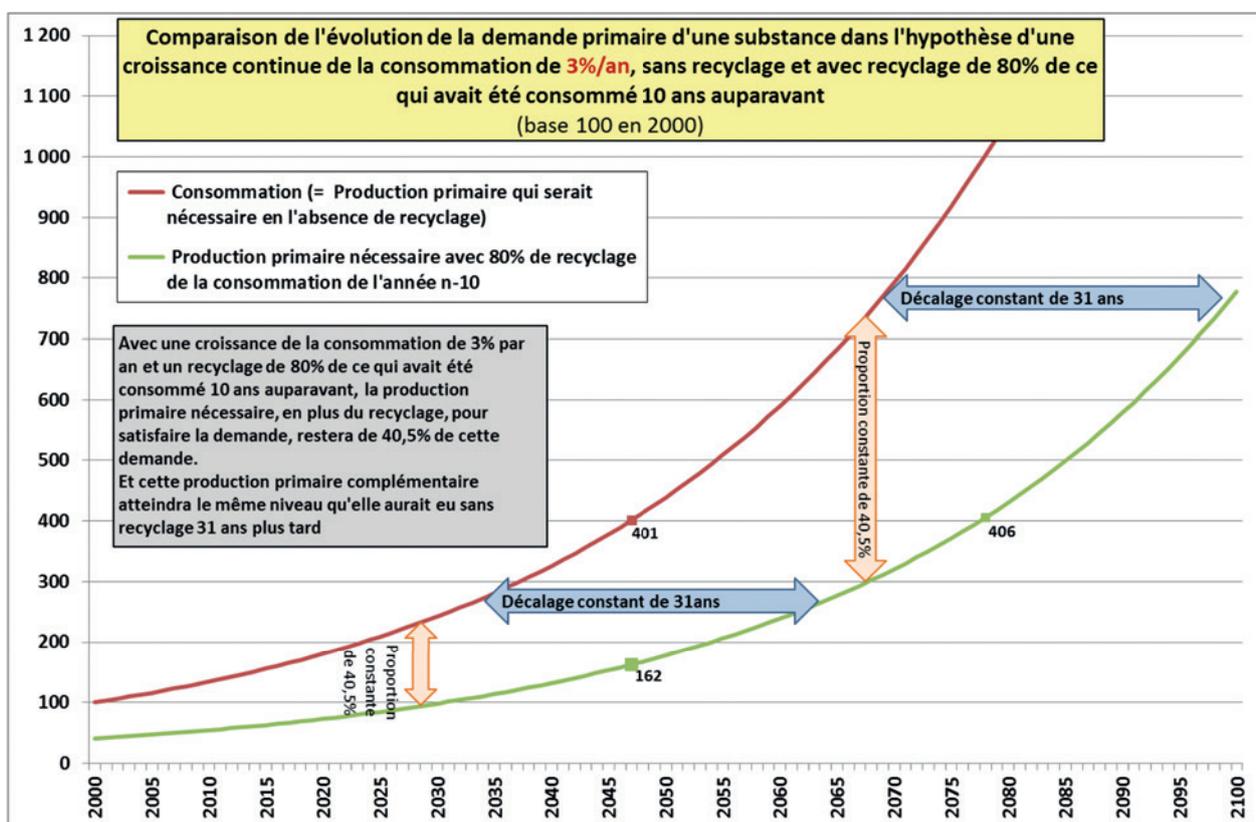


Figure 8 : Exemple de décalage dans le temps d'un même niveau de production minière nécessaire pour satisfaire une consommation croissante, avec et sans contribution du recyclage.

Ainsi, lorsque, dans le Tableau 1 de la page 49, on constate qu'une croissance régulière d'une production de 2,85 % par an conduit à son doublement tous les 24,7 ans : cela implique que le cumul total de la production depuis les origines doublera lui aussi tous les 24,7 ans. C'est-à-dire que pour toute période de 24,7 ans, on aura dû produire autant que depuis les origines jusqu'au début de la période considérée.

La minimisation des stocks de déchets par le recyclage

L'accumulation du stock de produits en usage obéit à cette même loi. À la fin de leur vie, les produits devenus hors d'usage quittent le stock en usage pour fournir un flux de déchets équivalent au flux de produits de l'année (t-d). Le stock grossit en fonction du taux de croissance

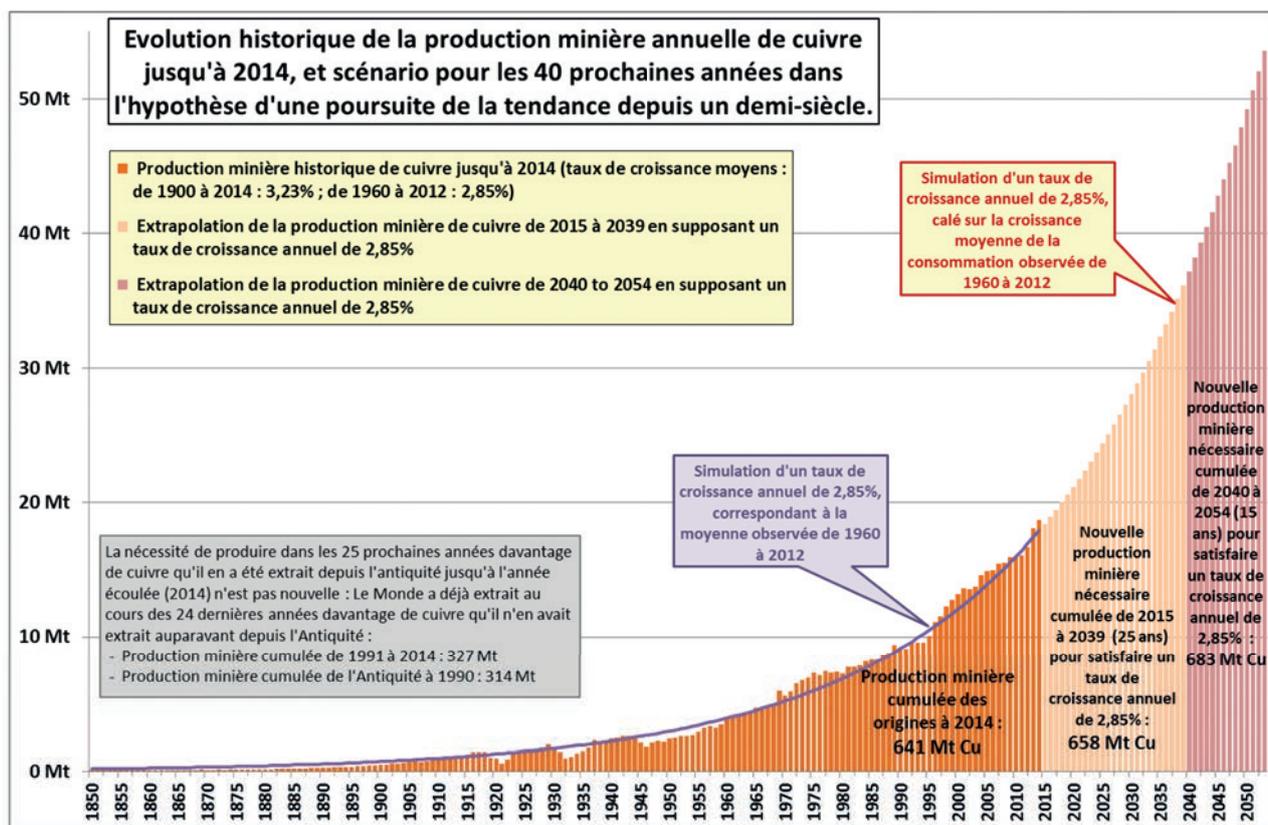


Figure 9 : Extrapolation des besoins de production primaire de cuivre dans les 40 prochaines années dans l'hypothèse d'une poursuite de la croissance de la consommation au taux annuel constaté depuis des décennies, soit 2,85%.

de la consommation, il en va de même du flux de déchets. Sans recyclage, l'ensemble de la production finirait, après la durée de vie « d » des produits, sous la forme de déchets qui s'accumuleraient dans l'environnement. Le stock des déchets générés correspond, avec un retard de « d », à la totalité de la production primaire. Le recyclage permet, en plus de sa contribution à l'approvisionnement en métaux, d'absorber tout ou partie de ce flux de déchets et donc d'éviter son accumulation dans l'environnement.

La demande va-t-elle effectivement continuer à croître ?

La Figure 9 ci-dessus interpelle. Extraire autant de cuivre dans les 25 prochaines années qu'il en a été extrait depuis l'origine, cela n'a rien d'anodin. Non que les ressources physiques n'existeraient pas, mais elles seront à des tenues de plus en plus faibles, à des profondeurs de plus en plus grandes, entraînant donc des coûts énergétiques d'exploitation et de traitement de plus en plus élevés (sans compter des conflits croissants autour de l'usage des surfaces nécessaires et les oppositions sociétales croissantes à l'extraction minière).

Or, selon toute probabilité, la demande de la plupart des matières premières minérales, notamment des métaux, continuera à croître, tirée par les divers facteurs suivants :

- a) la croissance démographique (avec toujours plus de besoins à satisfaire), l'exode rural et l'urbanisation (des besoins accrus en logements en dur, en infrastructures urbaines, en

électricité et en énergie, ainsi qu'en logistique alimentaire (pour acheminer la nourriture des campagnes vers les villes : transports, chaîne du froid, conserverie), etc. Rappelons qu'en France, 85,8 % de la population est urbanisée, alors qu'en Chine le taux d'urbanisation n'était encore que de 53,7 % en 2013 (CIA Factbook). Cela laisse augurer d'une poursuite du boom du développement et de la croissance des villes chinoises, qui aujourd'hui tire la consommation de nombreuses matières premières minérales. Et cette tendance à l'urbanisation ne se limite pas à la Chine ⁽¹¹⁾.

- b) l'aspiration d'une part croissante de la population mondiale à une société de consommation, à l'acquisition de biens personnels (voiture, électroménager, équipements de communication et de loisir, etc.). Cela concerne une part toujours plus grande de la population chinoise (déjà le plus grand marché automobile de la planète), mais aussi de celles de bien d'autres pays : ainsi, en Afrique, désormais, une très grande proportion des habitants possède un téléphone portable, voire plusieurs.

¹¹⁾ Même en France métropolitaine, la projection probabiliste médiane de la population est de 71,1 millions d'habitants en 2050, selon l'ONU (2015), soit 7 millions d'habitants supplémentaires d'ici là (soit une augmentation d'un ordre de grandeur correspondant à une fois l'agglomération parisienne comprenant Paris et sa petite couronne). Pour loger et doter cette population supplémentaire des infrastructures et équipements collectifs nécessaires, il faudra construire l'équivalent d'une nouvelle agglomération parisienne. Ne la construire qu'avec des matériaux recyclés impliquerait de démolir d'abord l'intégralité de l'agglomération parisienne existante ou d'une quantité équivalente de logements et d'infrastructures.

• c) Les évolutions technologiques : décollage relativement récent des besoins en néodyme (Nd), en praséodyme (Pr) et en dysprosium (Dy) pour les aimants permanents, et donc pour les moteurs électriques et pour les équipements électroacoustiques miniaturisés (désormais très répandus dans les équipements technologiques mobiles) ou pour certains générateurs équipant les éoliennes ; décollage des besoins en indium pour les écrans plats, des besoins en lithium avec le développement des piles et batteries au lithium observé depuis 15 ans et se poursuivant avec les perspectives de développement de voitures électriques et de celui d'alliages légers.

À l'inverse, certaines évolutions technologiques ou des restrictions réglementaires (pour des raisons sanitaires ou environnementales) peuvent conduire à une baisse des besoins et donc de la production (cela concerne le cadmium (Cd) et le mercure (Hg), et peut-être plus tard, le plomb (Pb)). Mais les métaux concernés par des baisses durables de leur demande sont une infime minorité. Même le plomb connaît toujours une demande croissante en raison du développement du marché automobile chinois.

Il est fort probable que la production ou même que la partie accessible des ressources souterraines ne permettra pas à chaque habitant de la Terre d'avoir à sa disposition autant de métaux que l'Occidental moyen d'aujourd'hui, ni a fortiori que l'Étatsunien moyen.

Le doublement tous les 25 ans de la quantité de cuivre extraite de terre (on pourra refaire des calculs similaires pour les autres métaux tant majeurs que mineurs) se heurtera forcément à une limite, si ce n'est de ressources physiques, au moins de coût financier et environnemental de l'accès à cette ressource ⁽¹²⁾.

Et, comme nous l'avons vu, le recyclage ne pourra pas résoudre durablement ce problème.

Conclusion

Tant qu'il y aura croissance de la demande d'un métal donné (croissance des métaux utilisés dans le bâtiment, par exemple, tant que le développement urbain mondial se poursuivra, mais le raisonnement vaut également pour les « petits » métaux technologiques), il sera nécessaire que la production minière suive la même croissance, et ce quel que soit le taux de recyclage de ce métal. L'approvisionnement secondaire, du fait qu'il est différé dans le temps, restera inférieur aux besoins et à la production primaire. La production minière restera donc cruciale et indispensable au niveau mondial.

Mais cela ne remet évidemment pas en cause l'impérieuse nécessité du recyclage, de sa contribution optimisée aux approvisionnements et à la minimisation de l'accumulation des déchets.

Il convient donc :

- de nous préparer à ce que la croissance matérielle globale fléchisse un jour ⁽¹³⁾, c'est inéluctable ;
- de poursuivre nos efforts d'optimisation du recyclage ;
- en attendant, d'admettre que la production minière reste indispensable et qu'il convient donc de ne pas se l'in-

terdire, pensant à tort qu'il suffirait, à la place, de recycler. Il conviendra donc de promouvoir l'activité minière (y compris en France), là où se trouvent des gisements, tout en promouvant une responsabilisation sociale et environnementale optimale de cette activité ;

- de poursuivre et approfondir les analyses de cycle de vie et le suivi des évaluations des productions, des consommations et des taux de recyclage réels de chacun des métaux et de leurs évolutions.

Bien évidemment, les tendances récentes à la stagnation économique, voire à la récession, si elles se généralisaient davantage, pourraient conduire à une baisse effective de la consommation, notamment des métaux. Et si cette récession devenait durable, voire définitive, on pourrait alors effectivement imaginer un possible approvisionnement de l'économie matérielle au moyen du seul recyclage. Mais comme des pertes seront inévitables à chaque cycle, cela conduira inéluctablement à une baisse progressive de la quantité de biens matériels détenus par l'humanité (logements, biens d'équipement et de transport, etc.).

(12) Mais il y aura forcément aussi une limite physique de la ressource. Elle est juste différée dans le temps et reste hors du champ d'analyse des prévisionnistes. 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 du 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 2,85 % par an, c'est cette quantité de cuivre qu'il aura fallu extraire de terre en l'an 2389 ! Ce n'est là qu'une vue de l'esprit, car il sera évidemment impossible de traiter l'intégralité du premier kilomètre de la croûte terrestre pour en extraire jusqu'au dernier atome le cuivre qui y est contenu. Plus raisonnablement, l'USGS estime à environ 3 Gt les ressources ultimes récupérables en cuivre, soit environ cinq fois ce qui a déjà été extrait depuis l'Antiquité. La poursuite d'une croissance de la demande à 2,85 % par an conduirait à épuiser la totalité de ces ressources en 2076. Une croissance indéfinie reste matériellement impossible dans un monde fini, comme le soulignent les rapports Meadows. Simple-ment, les analystes et les décideurs d'aujourd'hui ne cherchent que rarement à se projeter à un horizon de trois siècles.

(13) Grosse (2010) concluait son étude par : « En conclusion, une politique de développement durable ne peut pas compter en premier sur le recyclage, même si celui-ci en est une composante importante. Une telle politique devra, en premier lieu, viser la réduction de la consommation de chaque matière première non renouvelable de telle sorte que sa croissance annuelle reste en-deçà de 1 %. Et, dans tous les cas, pour être efficace comme deuxième composante d'une telle politique, le recyclage devra être développé à des taux de récupération bien supérieurs à ceux observés aujourd'hui. » Il pourra être objecté à François Grosse que 1 % de croissance ne constitue pas une limite miracle en dessous de laquelle la consommation de matières premières non renouvelables deviendrait soutenable sur la durée. En effet, une croissance de 1 % reste une croissance exponentielle, simplement son temps de doublement est de 70 ans, au lieu de 35 ans pour une croissance à 2 %, ce qui laisse un peu plus de répit. Et avec une croissance de 1 %, le calcul du temps de décalage d'une même production primaire nécessaire (avec 80 % de recyclage par rapport à ce qui serait en l'absence de recyclage) donne 130 ans, avec un temps de séjour (dans les produits) de 10 ans ; dans le cas du cuivre (l'exemple retenu ici), le décalage dans le temps serait de 85 ans, avec un temps de séjour de 35 ans. Mais cela ne change rien au raisonnement global : une croissance de 1 % par an de la consommation d'une matière première non renouvelable n'est pas durable non plus.

N'approvisionner l'économie matérielle qu'au moyen du recyclage conduira obligatoirement à la décroissance matérielle. C'est mathématiquement incontournable.

Pourtant, jusqu'à aujourd'hui, tous les pouvoirs politiques continuent à appeler de leurs vœux la croissance, y compris la croissance matérielle (par exemple, par une relance de la construction de logements), qu'ils considèrent comme la condition indispensable à l'amélioration de la situation de l'emploi. Le raisonnement ci-dessus démontre que, si l'on veut de la croissance, il faut obligatoirement poursuivre l'exploitation des ressources minérales primaires.

Bibliographie

Ad-hoc Working Group of the European Commission, *Critical raw materials for the EU*, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010, 53 p., 5 annexes and 2 appended compendiums: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf

Ad-hoc Working Group of the European Commission, Report on Critical raw materials for the E, 2014, 41 p., 4 annexes and 2 appended compendiums: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf

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

GRAEDEL (T.E.) & al., *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), 2010, 44 p., 7 figures, 8 app. : www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metalstocksinsociety.pdf

GRAEDEL (T.E.) & al., *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), 2011, 48 p., 4 figures, 2 app. : www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf

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

GROSSE (F.), "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, 2010: <http://sapiens.revues.org>

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

MONIER (V) & al., *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*, Bio Intelligence Service pour le compte de l'ADEME, Synthèse (13 p.), Partie 1 (222 p.) et Partie 2 (153 p.), 2010 : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=-1&cid=96&m=3&id=73279&ref=&nocache=yes&p1=111>

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

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

TERCERO ESPINOZA (L.A.), "How could the EU's methodology for defining critical raw materials be enhanced?", Fraunhofer ISI presentation to the EU-US workshop on mineral raw materials flows & data, Brussels, 12-13 September 2012 : http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/eu_us_defining_critical_raw_materials_en.pdf

Sites Internet

World Steel Association : www.worldsteel.org

International Copper Study Group : www.icsg.org

International Lead and Zinc Study Group : www.ilzsg.org

USGS mineral commodities : minerals.usgs.gov

Mineralinfo/AS3M : www.mineralinfo.fr

Le Kiosque de Bercy : www.lekiosque.finances.gouv.fr

Australian Government – Department of Industry and Science, Office of the Chief Economist : www.industry.gov.au/Office-of-the-Chief-Economist/Pages/default.aspx

Recyclage des cartes électroniques : un aperçu de l'état de l'art

Par Christian THOMAS

Fondateur de TND (société développant des technologies d'extraction métallurgiques innovantes)

Les cartes électroniques contiennent de 10 à 500 grammes d'or par tonne (g/t), de 7 à 100 g/t de palladium, de l'argent, du cuivre, de l'étain, du tantale, etc. Certains de ces métaux sont classés dans la liste des matières stratégiques (pour mémoire : les mines d'or à ciel ouvert sont exploitées à des teneurs inférieures à 1g/t).

En 2013, 51,1 millions de tonnes (Mt) d'équipements électriques et électroniques (EEE) ont été vendues sur la planète. La collecte de leurs déchets (les DEEE) est estimée à 10,8 Mt. L'Europe, le Japon, la Corée et la Chine sont les zones géographiques les plus efficaces dans ce domaine du fait de leur réglementation. La mise en place dans 25 États des États-Unis de règles contraignantes sur le recyclage des DEEE devrait permettre au continent nord-américain de rattraper son retard. La fabrication de cartes électroniques neuves est évaluée en 2013 à 2 Mt. La production annuelle de déchets de cartes est évaluée à 500 000 tonnes, avec une croissance de 5 % par an. Que contiennent ces cartes et comment en améliorer le traitement après leur mise au rebut ? C'est ce dont nous allons traiter dans cet article.

La vie d'une carte électronique

Un circuit imprimé (ou PCB, pour *printed circuit board*) est un support permettant de relier électriquement un ensemble de composants électroniques dans le but de réaliser un circuit électronique. Le circuit imprimé est constitué d'un mille-feuille de fines couches de cuivre séparées par un matériau isolant (en général de la résine époxy armée de fibres de verre et ignifugée par ajout de composés organobromés et de trioxyde d'antimoine).

Ces couches de cuivre sont gravées par lixiviation chimique pour obtenir un ensemble de pistes terminées par des pastilles. Ces pastilles sont alors perforées, établissant une liaison électrique soit entre les composants soudés sur le circuit imprimé, soit entre les différentes couches de cuivre superposées et isolées les unes des autres. Une très fine couche de palladium (métal platinoïde stratégique) est déposée dans les trous afin d'éviter l'oxydation, et une fine couche d'or est également déposée sur les parties (en cuivre) de la carte qui serviront de contacts lors de son installation dans l'équipement électronique auquel elle est destinée.

À ce stade, une carte électronique contient donc des fibres de verre, du cuivre, de la résine époxy, des traces de palladium et d'or, du brome et de l'antimoine.

Le montage des composants électroniques

Les composants électroniques sont alors soudés par des « pattes » dans les trous de la carte électronique avec un alliage à base d'étain. La soudure classique s'effectuait avec un alliage plomb-étain, qui devrait aujourd'hui être théoriquement remplacé par des alliages étain-argent-cuivre afin de se conformer à la directive européenne 2002/95/CE (RoHS) bannissant l'usage du plomb.

Les composants électroniques d'une carte électronique recouvrent donc une large gamme de métaux : aluminium (dans les radiateurs), fer et cuivre (dans les transformateurs), acier inox (dans les éléments de connexion) palladium et tantale (dans les condensateurs), or (dans les microprocesseurs et dans les dépôts de surface des connexions), nickel (dans les résistances), etc. En outre, des plastiques thermo-formables, des résines, des vernis, des électrolytes chimiques et des céramiques complètent ce très large inventaire.

Dans une carte électronique, le poids des composants dépasse souvent celui du circuit imprimé. Actuellement, une carte électronique contient environ 40 % de résine et de plastique, 30 % de fibres de verre + céramique et 30 % de métaux.

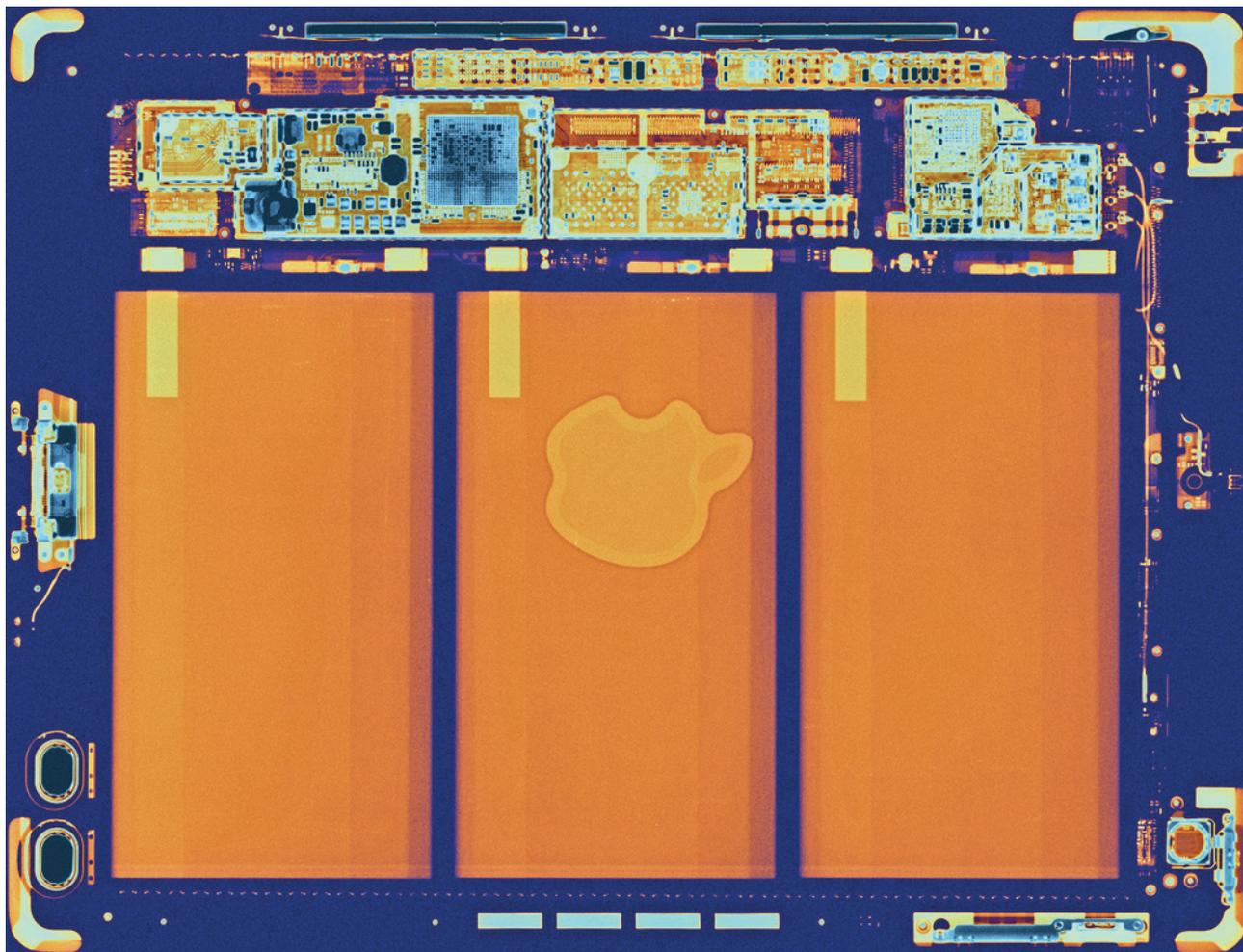


Photo © Pasięka/SPL-PHANTIE

Radiographie d'une tablette numérique iPad ® permettant de découvrir sa structure interne.

« Les appareils électroniques n'ayant en général pas vocation à être réparés, ils sont donc difficilement démontables (que dire des *I-pad*, dans lesquels la batterie au lithium est collée, et est, de ce fait, quasi indissociable de la coque aluminium ?). »

L'intégration des cartes électroniques dans le produit final

La carte est fixée mécaniquement et est connectée au câblage électrique de l'appareil concerné (dans un écran plat, on dénombre plusieurs centaines de vis !).

Les appareils électroniques n'ayant en général pas vocation à être réparés, ils sont donc difficilement démontables (que dire des *I-pad*, dans lesquels la batterie au lithium est collée, et est, de ce fait, quasi indissociable de la coque aluminium ?).

Le poids des cartes électroniques dans un équipement varie considérablement. Il peut représenter 10 % du poids d'un écran plat, mais parfois représenter moins de 0,1 % du poids d'un appareil blanc. Une voiture moderne (dont le poids moyen est d'environ 1,2 tonne) contient près de 10 kilogrammes de cartes électroniques.

La collecte et le démantèlement des cartes électroniques usagées

Le démantèlement consiste en général en une opération de broyage, voire en un simple démontage suivi d'un tri,

après quoi les ferrailles, l'aluminium, les plastiques, les batteries, les cartes électroniques sont séparés. L'opération n'est cependant pas parfaite : une partie des cartes est perdue et celles qui sont récupérées peuvent être polluées par des morceaux de l'appareil initial (notamment des plastiques), voire parfois par des corps étrangers.

L'extraction des métaux

À ce stade, la composition chimique des cartes est donc très complexe et très variable.

Le traitement métallurgique des cartes électroniques est de ce fait très difficile. Les technologies actuelles ne résolvent que partiellement ce problème. Elles affichent une récupération insuffisante des métaux et, dans certains cas, elles peuvent avoir un impact environnemental négatif. La principale raison de cette situation tient à la composition des cartes électroniques, notamment à la présence dans celles-ci :

- de plastiques et de résines (très gênantes lorsque sont utilisés des fours de pyrométallurgie),

- de fibres de verre et d'aluminium (qui rendent les scories difficilement fusibles),
- d'halogènes (fortement oxydants et tendant à former des sels métalliques en se combinant avec les métaux que l'on voudrait extraire), tels que le brome et le chlore,
- de divers métaux antagonistes sur le plan métallurgique.

Les séparations physiques

Broyage et séparation gravimétrique

Il est tentant d'essayer de s'affranchir des difficultés liées aux matières organiques et aux fibres de verre. Des broyages successifs et des séparations par densité permettent de récupérer une fraction polymétallique.

Les acteurs du Sud-est asiatique installent des capacités assurant ce type de traitement. La raison essentielle est d'ordre réglementaire. En effet, l'exportation de ces matières est interdite, si un prétraitement n'a pas été effectué au préalable.

Mais cette technologie très économique est handicapée par une récupération insuffisante des métaux (de l'ordre de 80 %) et par la production d'un déchet ultime polluant (la fraction légère) dans lequel se concentrent les résines phénoliques, les plastiques bromés et chlorés, les élec-

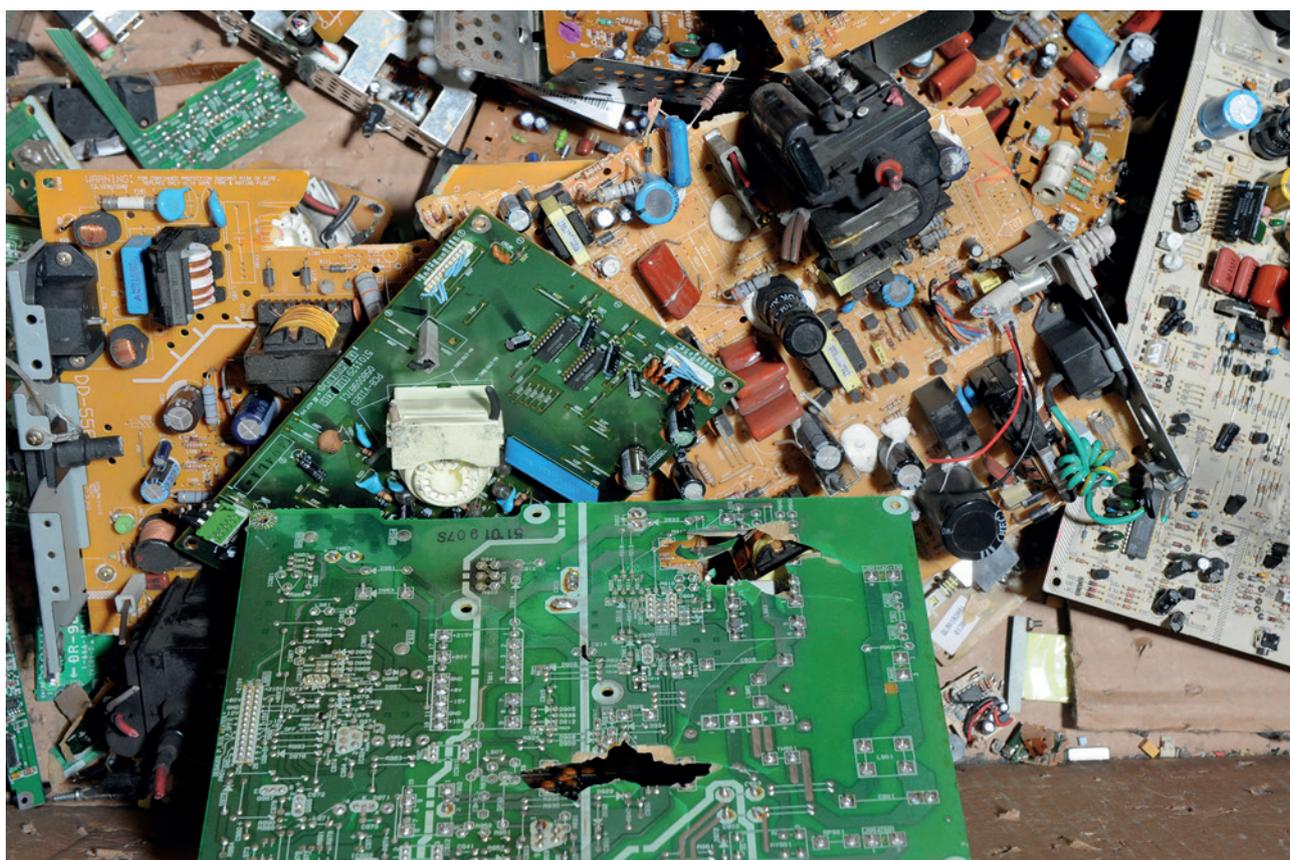
trolytes et un reste de métaux lourds. La fraction métallique peut alors être traitée plus facilement, bien qu'elle soit encore accompagnée de résine et de plastique (mais à un taux inférieur à 10 %). Des broyeurs et des appareils de séparation gravimétrique spécifiques aux cartes électroniques fabriqués en Chine sont même mis en vente sur Internet !

Héritée des techniques minières, la séparation mécanique fait l'objet de nombreuses recherches. En broyant la matière plus finement (moins de 100 μ) de façon à libérer les métaux de la résine époxy, on améliore la teneur en métal (qui atteint alors 90 %).

Le traitement des résidus légers est un enjeu primordial sur le plan environnemental. Leur valorisation énergétique et la récupération par distillation du brome peuvent être des solutions possibles.

En France, la société Bigarren Bizzi conduit un projet de R&D sur ce sujet.

En Allemagne, la société Adamec a investi 15 millions d'euros (en 2010) dans une usine permettant ce type de valorisation, mais dont l'arrêt de l'activité est intervenu au bout de seulement trois ans. En effet, la quantité de polychlorobiphényles contenue dans la fraction légère des



Cartes électroniques usagées en attente de traitement sur le site de Tri RA (Tri Rhône-Alpes), société de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), Pont-Évêque (Isère), octobre 2012.

« Le démantèlement consiste en général en une opération de broyage, voire d'un simple démontage suivi d'un tri, après quoi les ferrailles, l'aluminium, les plastiques, les batteries, les cartes électroniques sont séparés. »

DEEE était incompatible avec les standards européens de mise en décharge et/ou d'incinération.

Enfin, quelques ateliers chinois utilisent actuellement cette technologie, n'étant pas soumis aux contraintes environnementales beaucoup plus strictes prévalant dans le monde occidental.

Démontage et tri des composants

Pour s'affranchir du caractère antagoniste des métaux, un tri des composants électroniques peut s'avérer prometteur. Le principe consiste à dessouder les composants, puis à les trier. Cette opération peut être réalisée manuellement en trempant la carte dans un bain de plomb en fusion et en la secouant vigoureusement ! Cette opération est pratiquée en Chine. Les composants sont ensuite triés à la main (ce qui demande une certaine patience) ! C'est ainsi que les condensateurs au tantale sont récupérés à Hong Kong, avant d'être envoyés en Australie pour y être traités.

Le recours à l'hydrométallurgie pour dissoudre les soudures est plus sophistiqué. Plusieurs projets ont vu le jour, mais sans aboutir pour autant à une industrialisation (voir *infra* le paragraphe consacré à l'hydrométallurgie).

Des techniques de tri optique ont été envisagées, mais sans avoir jamais été mises en œuvre.

La pyrolyse

La pyrolyse consiste à détruire les plastiques et les résines par évaporation et *cracking* thermique des vapeurs produites. L'avantage est d'obtenir une matière brute polymétallique beaucoup plus facile à traiter dans les fonderies de cuivre, et ce sans perte de métaux ni production de déchets ultimes. Les gaz sont produits en petite quantité, ils sont de ce fait faciles à traiter. La pyrolyse est donc un moyen qui permet d'améliorer les performances des fonderies de cuivre.

Terra Nova a développé ce procédé en installant en 2010 une unité de traitement d'une capacité de 30 kt/an dans le nord de la France pour un investissement inférieur à 20 millions d'euros. Le procédé est conduit à une température de 500°C, ce qui permet d'éviter la fusion des métaux et des fibres de verre.

La pyrolyse respecte donc les fibres de verre, mais en dépit de nombreux efforts de recherche, la société Terra Nova n'a encore jamais réussi à séparer de façon satisfaisante les fibres de verre des métaux.

En 2014 et 2015, les sociétés LS (en Corée) et GEM (en Chine) se sont équipées de four à pyrolyse utilisant une technologie inspirée de celle adoptée par Terra Nova.

Boliden (en Suède) a opté pour une pyrolyse à haute température (1 150°C). La réaction est dans ce cas très violente et peut aboutir à des instabilités dans le *process*. Cette voie engendre par ailleurs une scorie très pâteuse, ce qui ne permet pas d'aboutir à une bonne séparation. Cette mauvaise qualité de la scorie tient à la composition chimique des fibres de verre et à la présence d'aluminium. Un investissement de 140 M€ a été réalisé pour une ca-

pacité de traitement de 70 000 tonnes de DEEE par an.

Alternative à la pyrolyse, la solvolysé a été assez peu étudiée. Une thèse de doctorat soutenue à l'Université de Dijon est à ce jour la seule référence dont nous ayons connaissance. La difficulté de ce *process* réside dans la maîtrise des effluents liquides.

La société Panasonic a développé une technologie originale de pyrolyse fondée sur l'utilisation de granulés de dioxyde de titane portés à 500°C. Les cartes sont immergées dans ces granulés chauffés et brassées par des pales. Le dioxyde de titane étant un catalyseur d'oxydation, il n'y a pas de carbone résiduel. La carte ainsi débarassée de ses plastiques et de ses résines est alors séparée du dioxyde de titane par tamisage. Une installation permettant de traiter 500 tonnes par an a été construite en 2010. Mais, à ce stade, le procédé n'est pas viable économiquement, en raison d'une forte consommation de dioxyde de titane (un produit coûteux).

Un projet de traitement sous eau en condition supercritique (pression de 250 bars et température de 600°C) fait actuellement l'objet d'un programme de recherche mené par un *consortium* dirigé par la société TND et regroupant le BRGM, le CNRS et la société Separex. Ce projet prometteur au stade du laboratoire est lauréat de la phase 2 du concours mondial pour l'innovation et est en train de passer au stade de démonstrateur. L'avantage de cette technologie est qu'elle réduit en poudre les fibres de verre, rendant ainsi la phase suivante, celle de la séparation, beaucoup plus performante. Un rendement métal de 98 % est ainsi atteint.

La pyrométallurgie

Le métal le plus présent dans les cartes électroniques est le cuivre. Les fondeurs de cuivre ont donc été logiquement les premiers à traiter des cartes électroniques, et ce depuis plus de 20 ans.

Neuf fonderies dans le monde se sont équipées pour pouvoir traiter de façon satisfaisante sur le plan environnemental cette nouvelle matière première (quatre au Japon, trois en Europe, une au Canada, et une autre en Corée).

Le processus technologique d'une fonderie de cuivre comporte deux étapes principales :

- une fusion à une température de l'ordre de 1 100°C, qui produit des gaz, une scorie et un cuivre impur (elle peut être éventuellement suivie d'une étape d'oxydation à chaud permettant d'améliorer la pureté du cuivre),
- un raffinage par électrolyse qui permet de produire, d'un côté, des cathodes de cuivre pur et, de l'autre, des boues contenant les métaux précieux.

Cette technologie a été inventée afin de traiter des minerais naturels essentiellement constitués de sulfures de cuivre. L'adaptation nécessaire au traitement des cartes électroniques est coûteuse en investissement et requiert une grande expertise métallurgique. L'investissement d'adaptation par tonne de matière traitée est de l'ordre de 2 à 5 000 euros par an (Natureo Finance).

Par ailleurs, les gaz et l'énergie résultant de la présence de plastiques et de résines dans les cartes électroniques limitent à 10 % de l'entrant la proportion de cartes que peut traiter un four. Au-delà de cette valeur, le four devient instable. Les métaux rares sont donc dilués dans un flux de matière important et sont, par conséquent, difficiles à récupérer. Alors que le cuivre et les métaux précieux sont très bien récupérés (à hauteur de 98 %), la rigidité du procédé ne permet pas toujours de récupérer les « petits métaux », comme l'étain, le nickel ou le tantale.

La pyrométallurgie ne permet pas à ce jour de traiter exclusivement des cartes électroniques. Outre les problèmes liés à la présence de produits organiques, le contenu en aluminium, en céramique et en fibres de verre des cartes conduit à des scories difficilement fusibles. Afin d'obtenir une scorie fluide en traitant exclusivement des cartes, il faut en effet atteindre une température supérieure à 1 500°C. La société Scanarc (en Suède) a réalisé des essais, mais sans atteindre un résultat satisfaisant à ce stade.

La société Morphosis (au Havre) développe un programme de R&D utilisant la technologie plasma pour traiter directement et exclusivement des cartes électroniques. Ce projet a été lauréat du concours mondial pour l'innovation (phase 2).

L'hydrométallurgie

L'acid process

Largement utilisée en Inde, en Chine et de façon plus sporadique en Afrique en raison de son faible coût d'investissement, la dissolution de l'or présent dans les contacts des cartes électroniques permet de traiter à petite échelle et dans des conditions très médiocres lesdites cartes. Plusieurs variantes techniques sont utilisées : cyanuration, attaque à l'eau régale, utilisation du mercure. La récupération des métaux n'excède pas 60 % et s'opère dans des conditions environnementales et sanitaires désastreuses. Toutefois, mieux organisé, ce procédé pourrait permettre de garder dans les pays d'origine une partie significative de la valeur des cartes, tout en évitant les graves problèmes sanitaires et environnementaux qu'elle génère.

La R&D en hydrométallurgie

Peut-on améliorer ce traitement par les acides, l'« acid process » ? De nombreux essais d'hydrométallurgie directe ont été tentés au cours des quinze dernières années. Toutes ces tentatives se sont heurtées à la production de déchets ultimes en quantités considérables et à la nécessité d'utiliser de grosses quantités de réactifs. Si la récupération des métaux est théoriquement excellente, l'impact environnemental de ces techniques les disqualifie totalement à ce jour.

Les premiers travaux ont été réalisés en 2000 par une équipe de scientifiques anglais dans le cadre d'un programme (d'une durée de cinq ans) conduit conjointement par Cambridge et par The London Imperial College. La technologie utilisait l'acide fluoroborique pour dissoudre les soudures étain-plomb et libérer ainsi les composants électroniques de leur support.

L'idée était de pouvoir recycler certains de ces composants. Cependant, leur obsolescence rapide faisait que la rentabilité de ce procédé était improbable. La deuxième étape consistait à utiliser l'eau régale (un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique) pour extraire les métaux précieux. Mais la présence d'aluminium et de fer entraînait une consommation d'acide excessive et une production très importante de résidus ultimes. Enfin, le palladium et le tantale étaient mal récupérés. Le programme a donc été abandonné.

Un projet très voisin a été conduit par la société italienne Engitec aboutissant à la construction d'une usine pilote en 2008. Mais ce projet a lui aussi été abandonné.

La société Managem (au Maroc) connue pour son expertise en hydrométallurgie a tenté une approche fondée sur l'acide sulfurique afin d'extraire le cuivre en premier, puis les autres métaux. Là encore, le projet n'a pas abouti.

En Angleterre, Itrimex (en partenariat avec Ultromex) conduit des essais de récupération de l'étain des cartes électroniques en utilisant l'acide fluoroborique ou l'acide fluorosilicique (ce programme est financé à hauteur de 550 000 £).

ATMI (aux États-Unis) a développé un procédé comparable à celui de Cambridge et a construit une unité pilote, qu'elle cherche à commercialiser.

Terra Nova, dans le cadre du projet SISENVA, a exploré les procédés hydrométallurgiques permettant de récupérer l'ensemble des métaux à partir de la matière issue de la pyrolyse.

Enfin, un nouveau programme de recherche a été lancé en 2015 au Royaume-Uni, il est doté d'un financement de 500 k£.

Quelques verrous technologiques

Le brome : cet élément présent dans les cartes électroniques se retrouve dans les plastiques bromés composant une grande partie des coques des appareils électriques et électroniques. Le brome est un halogène gênant pour les métallurgies classiques. Au-delà de l'enjeu environnemental du contrôle des émissions, la question de sa récupération et de son recyclage dans des conditions rentables est posée.

L'énergie : les cartes électroniques contiennent une portion importante de plastiques et de résines, qui sont combustibles : un des enjeux est l'utilisation intelligente de cette énergie.

Le tantale, l'étain : classé métal stratégique, le tantale est actuellement perdu lors du recyclage des cartes électroniques. La récupération économique de l'étain est également un des défis technologiques qui doivent être relevés.

Conclusion

Les cartes électroniques sont un exemple de mine urbaine riche dont l'exploitation présente un potentiel de progrès important nécessitant néanmoins un effort de R&D significatif et qui est susceptible de déboucher à terme sur de nouvelles formes d'industries génératrices d'emplois et de valeur.

Strategic metal recycling: adaptive metallurgical processing infrastructure and technology are essential for a Circular Economy

By Markus A. REUTER

Director Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology

and Antoinette VAN SCHAİK

Director/owner/founder Material Recycling and Sustainability (MARAS) B.V.

Recycling forms the heart of the Circular Economy (CE) system. Ultimately all products will have to be recycled at their End-of-Life (EoL). Maximizing the recovery of materials and also especially strategic elements from EoL products requires a deep understanding of the fundamental limits and the dynamics of the evolving system, thus an adaptive processing and metallurgical infrastructure is critical to recover all metals and materials. Paramount is the quantification of the “mineralogy”, the complex and interlinked composition of products, to trace and quantify specifically all the losses of materials, metals, alloys, etc. due to thermodynamic and other non-linear interactions. We named this product centric recycling. The recycling potential and performance must be quantified and demonstrated for products, collection systems, waste separation and recovery technologies, and material supply. Emphasis is also placed on informing the consumer through iRE i.e. informing Resource Efficiency in an easy-to-understand way. System Integrated Metal Processing (SIMP) using big-data, multi-sensors, simulation models, metallurgy, etc. links all stakeholders through Circular Economy Engineering (CEE), an important enabler to maximize Resource Efficiency and thus iRE.

Circular Economy (CE)

The EU has recently published its ambitious plan on Circular Economy (CE) (EU, 2015). Recycling plays a key role in CE. If all products were constructed from one material and recyclates were 100% pure CE would be an easy endeavour. However, if society would reduce drastically its consumption, the complicating issues of a CE will become trivial, in fact a CE could become irrelevant. However, present reality is that consumer products are complex, creating complex recyclates, have an often short life span and are intensively produced and consumed.

In addition, variability of products and materials demands a dynamically changing processing infrastructure. For metals, this means that for a CE, to be realized requires for example a high-tech adaptive metallurgical infrastructure that interlinks all materials processing industries (i.e. all carrier metals infrastructures must - for example in the EU - be able to interchange materials if there is an economic incentive to do so).

Realizing the full potential, challenges and fundamental innovations to achieve a CE system requires an understanding of the social, technological, economic and environmental opportunities and limits thereof. The innovations, tools and challenges to move towards a CE include among others:

- The use of minerals and metallurgical processing know-how and tools in the analysis of the CE system. The innovation lies in further developing these tools for recycling and linking these to the already established tools used for optimizing metallurgical systems (REUTER, 1998; VAN SCHAİK and REUTER, 2010, MENAD *et al.*, 2016). We have called this product centric recycling (REUTER and VAN SCHAİK, 2012).
- Quantifying the data of the CE for both products and recycling in a manner that acknowledges the complexity of a product centric approach, that takes all materials of the consumer product (i.e. from the Urban Mine) into consideration, much like a complex mineral from a Geological Mine. This approach captures the full non-linear effects

of the recovery and losses of all materials, elements, strategic & critical raw materials (CRMs) (EU 2014) etc. on each other (as well as the contamination of the materials on each other). This is analogous to processing of polymetallic complex minerals from geology and ensuring all elements, metals and gangue are processed to economically valuable to environmentally benign final products such as slag.

- Recyclates have to be quantified so that thermodynamic and physical properties can be used in industry linked simulation (REUTER *et al.*, 2015) to optimize the complete system. Properties of the recyclate particles and flows include enthalpy, entropy & exergy, alloy and material composition, conductivity, colour, magnetic susceptibility, density, shape, odour, near infrared properties, interlinkages of materials in scrap particles, brittleness, ductility, etc.
- A real-time feedback loop, that links product design and recycling system configurations to real-time grade monitoring of recyclates with suitable multi-sensors (to estimate possible contaminants and valuables in them) while linking this to high quality material and metal production processing – thus Design for Resource Efficiency (DfRE).
- Use of real-time data to calibrate recycling and CE system models that provide a basis to optimise the processing chain and providing the necessary detail to calculate Capital Expenditure (CAPEX) and Operational Expenditure (OPEX) as well as the environmental footprint. This simulation basis provides the true economic potential of CE as it rigorously maps all recoveries, losses and costs due to these losses.
- Determining the baseline recovery rate and potential for specific products based on a product centric approach. This permits the understanding of what actions to take to innovate in the CE system (REUTER, 1998; VAN SCHAİK and REUTER, 2014). Industry calibrated simulation models are key to optimizing the system i.e. methods will be applied to quantify both of quality and recovery, as well as opportunities and limits of recycling complex product material mixtures.
- On the basis of these rigorous adaptive CE models (REUTER and VAN SCHAİK, 2012), innovative circular business models can be developed that will design a closed loop system for material use preventing the loss of materials from the economy and into the environment including innovations to producer responsibility and new product ownership models. These models provide a basis to develop innovative collection and organisational approaches to increase the amount of sorted, collected and reported EoL goods and their subsequent reuse, recovery and closed loop recycling gleaning from the feedback from limits and critical issues in recycling learned from industry process simulation (UNEP, 2013).
- Involving end-users (consumers and businesses) in both the design of collection to maximise their participation in the testing of potential approaches and their acceptance to recycled and reused products.

In other words, business models will need to be connected to material science, underpinning policy with physics

and economics creating the field of Circular Economy Engineering. Ultimately energy and material efficiency should be optimized as a function of product and recycling and processing infrastructure design to fully reveal the opportunities and limits of the CE system. This is the key challenge to understand the role of an adaptive infrastructure and process technology to innovate the true potential of CE thinking. This adaptive infrastructure is called “System Integrated Metal and Materials Processing”.

System Integrated Metal and Materials Processing (SIMP)

A substantial challenge for realizing CE is the production of clean recyclates that can provide the physical material properties that impart the required functional properties in the consumer products these are applied. Complexity of recyclates and the complex mix of material properties, etc.: all affect the final recovery during physical and metallurgical processing.

While metals can be refined to high purity metal alloys during metal refining, plastics have a limit to how much recyclate (containing a mix of more or less of all other metals and materials in the EoL product) can be added to virgin plastics to produce high quality plastics once again. Just think of rheological, mechanical, thermal, visual properties of recyclates that could affect their usage in high performance electronic applications! (Figure 1 provides an overview of this interaction and the effect on quality on metals and plastics respectively). Creating the highest quantity and quality of recyclates for all materials at the same time is the “simple” task that CE should achieve, but it gives no indication of the complexity of the task at hand.

The linkage of all technologies and systems from product design to metal recovery we call System Integrated Metal and Materials Processing (SIMP) can help achieve these challenging goals. This requires new rules for physical recycling tied to product design and design for recycling linked via process metallurgy to high grade metal based materials. This involves reconsideration and where necessary redesigning the whole value chain to minimise material losses and reducing the unnecessary mixing of materials to reduce energy use and costs. Various base metals, steel, plastics etc. are the carriers to be understood to quantify interaction and recovery possible of all materials in the product as among others shown by the metal wheel (VERHOEF *et al.*, 2004). Digitalizing the CE and specifically the metals processing through SIMP is a key to recovering all materials (CRMs among others) from EoL products.

In SIMP, real-time data and big-data analysis will be used to calibrate the simulation models that will be used to quantify and provide the data for the business models and plans to innovate the CE system. Included must be environmental assessment linked to simulation as shown by Reuter *et al.* (2015). Crucial in innovating in the CE system is the comprehension of the baseline on a fundamental physics basis to innovate the future. Essential to SIMP and CE is a close communication and cooperation

Materials in input streams (from WEEE materials)	Society's Essential Carrier Metals: Primary Product Extractive Metallurgy's Backbone (primary and recycling metallurgy)							
	To Remelting, Smelting, Hydrometallurgy, Refining	Fe Steel (BOF&EAF)	Al Remelt/Refine	Cu Smelt/Refine	Zn RLE/Fume	Pb Smelt/Refine	Ni/Cr Stainless Steel	Rare Earths Hydrometallurgy
Ag								
Al								
Al ₂ O ₃								
Au								
Bi								
Br								
Cl								
Cr								
Cu								
Cu ₂ O								
Fe								
FeO _x								
Ni								
Pb								
Pd								
Sb								
Sb ₂ O ₃								
Si								
SiO ₂								
Sn								
Zn								
Elastomers								
Thermosets								
Thermoplastics (flame retardants etc.)								
Epoxy								

Figure 1: Interaction between Plastics and Metals: Miscibility charts (Van Schaik and Reuter, 2014) of different metal and polymer types.

between the original equipment manufacturers (OEMs) and the recycling industries (both recyclers and metallurgical and plastic recycling industries) in the value chain. Key enablers of System Integrated Materials Processing are:

- **Adaptive metallurgical infrastructure:** To maximize metals and CRMs from diverse changing EoL products requires a high-tech metallurgical infrastructure. Only where there are “holes” in the system should technology innovation take place, system innovation should be paramount and policy should be an enabler.
- **Metallurgical system optimization:** Optimal recycling routes supported by innovative developments in separation and real-time digitalization (i.e. on-line measurement technologies) are key: they will minimise the inclusion of contaminating materials affecting the properties of recyclates, hence enhancing the quality and uptake of secondary/recycled materials into new products.
- **Quantification of recycling rates - The recycling Index (RI):** Physics based rigorous process simulation tools to quantify and predict recycling rates and limits thereof for current and future products/systems will be calibrated based on the industry trials and real-time data derived from innovative sensor based measurements. This quantifies the limiting factors and options for improvements in

resource efficiency/reduction and reduction of generation of residual waste (See Figure 2)

- **Real-time big-data acquisition and analysis:** Based on detailed insights derived from real-time data acquisition and quality control and simulations, the physical limits of recycling can be translated into technology and industry driven Design for Recycling innovations of various products. Redesigns and innovated recycling routes will be addressed and quantitatively assessed on improved recyclability (i.e. process data are linked via simulation to computer aided design (CAD) supporting both product and process redesign for improved resource efficiency).
- **Criticality of process infrastructure:** Maintaining, innovating and simulating the metallurgical and recycling processing infrastructure enables the maximum recovery of all metals from the EoL products. This facilitates the redesign of the value and supply chain supplying CAPEX and OPEX data for the whole system, the basis for evaluating the business potential of CE.
- **Cross-sectorial symbiosis:** Incorporating quantifiable targets for measuring sustainable recovery, recycling and re-use of resources (including energy and material qualities) in the overall material flow chain from resources to consumer products in a data format which can be applied for all stakeholders allows for quantified symbiosis between different sectors.
- **Eco-innovative system analysis** is realised by the improvement of recycling and uptake of recycled materials into products. The relationships between stakeholders along the material and product value chain (such as collection systems, producers, recyclers and processors) are linked with quality monitoring and environmental life cycle assessment.
- **Quantification of regulatory barriers** will become evident through the systemic integrated approach in which critical and limiting issues (as well as physics based limits to recycling and resource efficiency) are pinpointed. As the product centric approach addresses recovery of both commodities (materials and metals), as well as CRMs and other materials (such as plastics and other non-metals), regulatory barriers are addressed as a trade-off between these, taking cognisance of functional product specifications.
- **Improve environmental assessment (LCA) methodology:** The detailed analysis and simulation of all streams in terms of compounds, recyclates, residue mineralogy etc. provides the detail to improve LCA methodology as well as environmental databases (REUTER et al., 2015).
- **iRE - informing Resource Efficiency** requires both a rigorous analysis of energy and material efficiency. Analysis is based both on material and energy flow, entropy (exergy) in addition to life cycle assessment tools.
- **Redesigning of collection and sorting systems for CE:** Understanding on how to minimise contamination and losses during recycling (e.g. critical issues in processing and decreased recyclate quality due to undesired material mixtures) that limit the recycling and arise as a consequence of product mixtures provides direct input to redesign the way EoL materials and products are collected and treated. This will result in well-designed collection

and sorting of the CE system with physical separation and thermodynamic as well as metallurgical and plastic processing options. This includes quality requirements of recyclates and materials.

Resource efficiency can be quantified and optimised for products by applying an innovative and unique combination of industrial model calibration, sensor based quality measurement and a rigorous simulation basis, which are key to realizing SIMP. This provides a quantitative, dynamic and predictive basis for reducing material losses in the chain as well as a reference for measuring improvements against the status quo. This allows to rigorously and systematically link product design with collection, recycling, processing and the effectiveness thereof from a plastic and metal quality point of view and required innovations to move towards circularity.

Innovative redesign of recycling systems and processes (e.g. metallurgical processing) will need to be combined with Design for Resource Efficiency for Circular Economy by developing and integrating product design, collection, processing, economics and environmental performance on the basis of industry calibrated system models and applying these to innovate and quantify new concepts, processes, technologies, designs and structure. We call this discipline, with its comprehensive engineering toolbox, Circular Economy Engineering.

Design for Recycling and Resource Efficiency

System Integrated Metal & Materials Processing (SIMP) will

result in an innovative eco-innovative systemic approach producing improved resource efficiency in the complexly interlinked CE system. Digitalization will link and visualize the complexity of interactions between consumers, Producer Responsibility Organisations, collectors, recyclers and processors, and producers and (re-)manufacturers. SIMP will provide a real-time as well as predictive (in future) quantification of the physical and economic limits of recycling and more specifically of critical technology elements.

Key to SIMP is to quantify design and inefficiency in separation cross-contaminated recyclates. It will quantify where metals and critical raw materials disappear into the wrong material, recyclate or waste flows and how recovery of all materials could be optimised, i.e. ensuring that for example plastic quality (i.e. purity) is maximized. SIMP goes beyond state of the art as it:

- establishes a technological and economic baseline for increased materials (plastics, metals and CRMs) recovery to maximise the opportunities for resource efficiency;
- acknowledges and includes the technological, economic and physics detail of all recycling, metallurgical and processing technology in the chain;
- provides the framework against which improvements in redesign, collection and recycling will be established, measured and quantified and provides a rigorous and measurable basis for innovation and business models for a CE, now and in future;
- uses a product centric recycling system approach taking into account the innovation potential of the main actors and stakeholders in the material processing value chain;

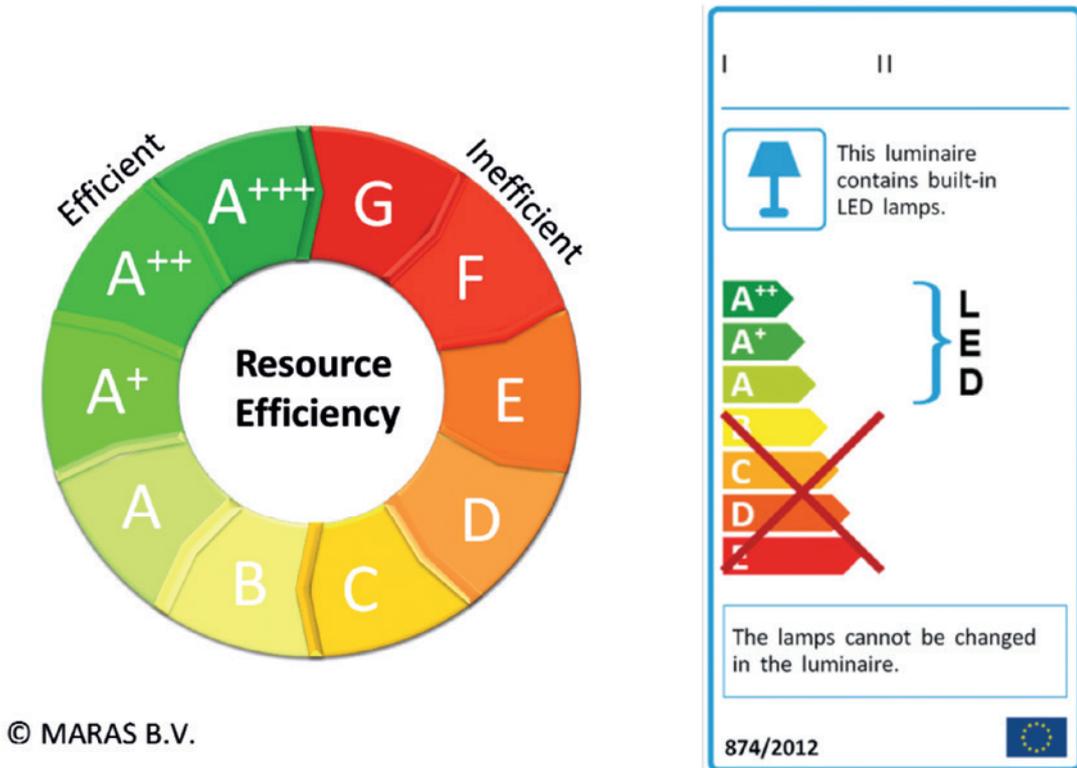


Figure 2: SIMP permits the optimization of both material and energy efficiency, thus providing the complete detail of informing Resource Efficiency (iRE), the sum of the Recycling Index (Reuter et al., 2015) and the accepted Energy Efficiency calculation (EU, 2012).

- improves recycling performance and recytrate quality via the development of optimised and new technologies and processes, sensor technologies, dynamic quality control and data interaction in simulation tools as well as the optimisation of the value chain via innovative business models;
- pinpoints and quantifies techno-economic limits to recycling and a CE;
- links CAD software, sensor-based measurement and recycling simulation tools to predict recycling rates and recytrates qualities to maximise plastic inclusion based on material properties affected (e.g. by CRMs and other materials) in the product;
- links different actors together into one harmonized business model which will require significant innovation in business science and approaches;
- creates data structures using common formats which can be communicated easily between designers and recyclers, thus compatible with common thermodynamic and material properties data formats; and
- enhances interaction between stakeholders in the value chain, in particular between manufacturers, producer compliance schemes, collectors, recyclers, legislators, consumers etc. to ensure sufficient information and intelligence sharing on product composition, material use, and product use, reuse and recycling.

In summary, SIMP leads to innovative product designs for recycling, processes, processing routes and sensor based real-time measurements linked to and integrated in predictive simulation tools. Figure 2 provides the present status of developing a Recycling Index-RI (REUTER et al., 2015) combined with the accepted energy label for products (EU, 2012). Combining these two symbols will be a key to informing the consumer and guiding CE development. This will help also to harmonize and integrate energy efficiency into the wider resource efficiency discussion. SIMP is thus a rigorous engineering toolbox that permits the calculation of a RI as well as RE, informing business models with the required depth to quantify disruptive and innovative CE business models.

Summary: Circular Economy Engineering

SIMP, the basis of Circular Engineering, provides the tools that will quantify evidence-based knowledge for enabling framework conditions (such as the regulatory or policy framework) to facilitate a broader transition to the CE.

Circular Economy Engineering (CEE) thus provides the engineering and economic tools that will help innovate the CE system.

The outcome of CEE is to join energy and material efficiency into one symbol (Figure 2) that informs the consumer and thus also guides the development, innovation and business models of the CE system.

We call this outcome of informing the consumer on a rigorous basis : iRE, thus Informing Resource Efficiency with engineering based tools providing a rigorous basis for developing new CE business models.

References

EU (2011): European Commission DG ENV, Plastic Waste in the Environment, Specific contract 07.0307/2009/545281/ETU/G2 under Framework contract ENV.G.4/FRA/2008/0112, Revised final report April 2011, 171p.

EU (2012): COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) No 874/2012 of 12 July 2012, supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of electrical lamps and luminaires.

EU (2014): COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, On the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative, Brussels, 26.5.2014 COM (2014) 297 final.

EU (2015): COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy, Brussels, 2.12.2015 COM (2015) 614 final.

MENAD (N.), KANARI (N.), MENARD (Y.) & VILLENEUVE (J.) (2016): Process simulator and environmental assessment of the innovative WEEE treatment process, International Journal of Mineral Processing (in press).

REUTER (M.A.) (1998): The simulation of industrial ecosystems: Minerals Engineering, 11(10), 891-917.

REUTER (M.A.) & VAN SCHAİK (A.) (2012): Opportunities and limits of recycling: A dynamic-model-based analysis, Material Research Society BULLETIN, 37(4), 339-347.

REUTER (M.A.), VAN SCHAİK (A.) & GEDİGA (J.) (2015): Simulation-based design for resource efficiency of metal production and recycling systems, Cases: Copper production and recycling, eWaste (LED Lamps), Nickel pig iron, International Journal of Life Cycle Assessment, 20(5), 671-693.

UNEP (2013): REUTER (M.A.), HUDSON (C.), VAN SCHAİK (A.), HEISKANEN (K.), MESKERS (C.) & HAGELÜKEN (C.): United Nations Environmental Protection (UNEP) Report "Metal Recycling: Opportunities Limits Infrastructure" report: <http://www.unep.org/resourcepanel/Publications/MetalRecycling/tabid/106143/Default.aspx>

VAN SCHAİK (A.) & REUTER (M.A.) (2014): Chapter 22: Material-Centric (Aluminium and Copper) and Product-Centric (Cars, WEEE, TV, Lamps, Batteries, Catalysts) Recycling and DfR Rules. In: Handbook of Recycling (Eds. WORREL (E.), REUTER (M.A.)), Elsevier, 307-378.

VERHOEF (E.), DIJKEMA (G.) & REUTER (M.A.) (2004): Process knowledge, system dynamics and metal ecology, Journal of Industrial Ecology, 8(1-2), 23-43.

Métaux stratégiques : la mine urbaine française

Par Alain GELDRON

Expert national matières premières à l'ADEME ⁽¹⁾

Si le recyclage a des origines lointaines, la mine urbaine et sa place dans l'approvisionnement en métaux stratégiques relèvent de pratiques relativement récentes. En la matière, la France dispose d'un potentiel non négligeable en termes de gisements, parfois difficile à évaluer, et d'acteurs à même de développer des solutions performantes. Cependant, la collecte des matières et des biens usagés reste insuffisamment efficace pour différents déchets comme les équipements électriques et électroniques usagés, les piles et les accumulateurs. En France, l'innovation technologique est très présente dans ce secteur, comme en attestent les nombreux projets ayant fait l'objet d'un dépôt de brevet et ceux retenus dans le cadre de différents appels à projets.

La notion de mine urbaine ⁽²⁾

De tout temps, des acteurs économiques (qu'il s'agisse de sociétés ayant pignon sur rue ou d'acteurs issus d'une économie plus souterraine) ont collecté des matériaux et des objets non utilisés ou hors d'usage pour les intégrer dans un circuit de recyclage.

Bien avant la constitution de cités, et donc de zones urbaines, l'espèce humaine recyclait ses productions. En octobre 2013, un colloque s'est tenu à Tel Aviv sur le thème *The Origins of Recycling: A Paleolithic Perspective*, qui a fait remonter l'origine du recyclage à plus d'un million d'années. Le recyclage a d'abord relevé de la subsistance individuelle, avant de devenir un secteur économique à part entière dont l'importance a été renforcée par des périodes de difficultés (guerres, crises économiques).

Ce secteur s'est développé jusqu'à une époque très récente avec pour seul moteur, l'intérêt économique que représente pour les utilisateurs le fait de disposer de matières premières à un coût moindre par rapport aux matières vierges correspondantes.

Ce n'est qu'à partir des années 1990 que les travaux sur les analyses de cycles de vie des produits industriels montrent l'intérêt environnemental d'un recyclage quasi systématique. Cet intérêt a deux facettes : d'une part, une modération de la production de matières vierges et, d'autre part, l'abandon (ou un moindre recours à) d'autres modes de traitement des déchets (à plus fort impact environnemental). Ainsi, les réglementations « déchets » intègrent dorénavant la priorité donnée au recyclage par rapport aux autres modes de traitement et elles fixent différents objectifs généraux en matière de recyclage.

Au début du XXI^e siècle est apparue la notion « d'économie circulaire », comme il a été constaté en France lors des 8^{èmes} Entretiens écologiques du Sénat organisés en juin 2005 par le magazine *Valeurs vertes*. Cette expression est alors synonyme de recyclage renforcé et efficient. Plus récemment, l'économie circulaire devient le symbole pour notre société d'un nouveau modèle économique global de production et de consommation, en opposition au modèle linéaire historique.

Le recyclage constitue un élément important de bouclage du cycle caractérisant cette économie circulaire, mais il ne répond pas à lui seul à la difficulté grandissante de l'accès aux ressources minérales résultant d'une demande en continuelle croissance, comme l'ont montré différents auteurs (GROSSE, 2014, [1] ; LABBÉ, 2013, [2]).

L'expression « mine urbaine » fait son apparition dans les échanges professionnels à la fin des années 2000, en lien avec les discussions sur le bien-fondé de la terminologie « matières premières secondaires ». En effet, la place économique, mais aussi environnementale, de plus en plus importante (et parfois dominante) qu'a pris le recyclage dans l'approvisionnement en matières premières s'oppose à la qualification de « secondaire ».

En des temps où l'adage « nos déchets sont des ressources » constitue un leitmotiv, la « mine urbaine » de-

(1) L'auteur remercie Rachel Baudry, Fabienne Benech, Erwann Fangeat et Éric Lecointre, du service Produits et efficacité matières de l'ADEME, pour leurs apports.

(2) Les marques MINE URBAINE et MINES URBAINES sont respectivement la propriété de la société RECUPYL et de la Fondation ParisTech.

vient le lieu de prospection de « nouveaux » gisements de matières premières, qui ne sont d'ailleurs pas qu'urbains.

Le recyclage, qui a pu être parfois marginalisé, bénéficie alors du même statut et de la même place que la mine traditionnelle.

La mine géologique et la mine urbaine : des différences sensibles

Si l'expression « mines urbaines » fait le parallèle avec celle de « mines naturelles » utilisant aussi la terminologie de « gisement », une telle mise en parallèle peut masquer des différences importantes entre elles qu'il convient de prendre en compte.

La mine urbaine a pour première caractéristique d'être disséminée sur l'ensemble du territoire. De ce fait, la notion de prospection n'a pas vraiment de raison d'être et l'exploitation de ladite « mine » consiste à rassembler et à concentrer des matières ou des objets dont le détenteur n'a plus l'usage au moyen d'une collecte réalisée sur un large territoire pour un coût économique acceptable : c'est la récupération (la collecte des déchets). À ce titre, la France, pays présentant un niveau élevé de consommation de biens, constitue un gisement important de déchets favorable au développement de ces « mines urbaines ».

La deuxième caractéristique des mines urbaines porte sur leur composition physico-chimique en matières ou en substances, celle-ci pouvant être assez simple pour les déchets de production, mais être beaucoup plus complexe pour les déchets post-consommation (en particulier pour ceux contenant des métaux stratégiques).

C'est notamment le cas lorsque ces biens comportent des composants électroniques. D'une part, les composants (ou phases) contenant ces métaux n'ont rien à voir avec les sulfures, oxydes, silicates ou carbonates de minerais naturels de ces métaux ou avec leur gangue et, d'autre part, un même produit contient plusieurs dizaines d'éléments chimiques : de 40 à 60 pour un ordinateur ou un *smartphone*, dont des phases organiques. Cela modifie et complexifie la « minéralogie » des métaux stratégiques que l'on veut récupérer par rapport au traitement classique de leurs minerais naturels.

La troisième caractéristique des mines urbaines est la nature évolutive en quantité ou en qualité de leurs gisements dans le temps. Nous sommes loin de la stabilité et de la taille des gisements naturels, qui permettent de conduire une recherche et une mise en exploitation pouvant parfois s'étendre sur une trentaine d'années, avant une exploitation durant au moins vingt ans. Les investissements nécessaires sont colossaux, comme le montre la mine de cuivre et d'or d'Oyu Tolgoi, en Mongolie, où, hors traitement métallurgique et avant la mise en exploitation, ce sont près de 5 milliards de dollars (OREWIN, 2014, [3]) qui ont été investis ; une mine dont l'exploitation devrait durer 35 ans *a minima*.

Dans le domaine des déchets, en revanche, l'évolution des produits peut conduire à une obsolescence très rapide des schémas industriels, comme le montre le cas

de la récupération des terres rares présentes dans les lampes fluo-compactes, alors que ces lampes sont appelées à être rapidement remplacées par les diodes électroluminescentes (DEL/LED). Il en avait déjà été ainsi du traitement des tubes cathodiques de nos téléviseurs, qui aujourd'hui ont été remplacés dans leur quasi-totalité par les écrans plats. Ainsi les schémas de traitement de produits usagés n'ont-ils parfois qu'une dizaine d'année de stabilité, ils doivent donc être capables de s'adapter à l'évolution permanente de la composition des produits.

Par contre, les déchets (une fois concentrés) présentent des teneurs en métaux stratégiques souvent bien supérieures à celles des minerais extraits des gisements naturels actuellement en exploitation, comme le montre la Figure 1 ci-dessous.

	Teneurs moyennes dans les minerais	Teneurs moyennes en métal dans les déchets	Déchets concernés
Or	De 1 à 10 g/t	De 1 à plus de 200 g/t	Cartes électroniques
Platinoïdes	De 1 à 8 g/t	260 g/t	Pots catalytiques
		100 g/t	Cartes électroniques
Terres rares	De 1 à 15 % (en oxydes)	35 %	Aimants permanents
		5000 g/t	Lampes fluocompactes
Indium	De 1 à 100g/t	175 g/t	Écrans LCD
Cobalt	0,3 %	15 %	Batteries Li-ion
Tantale	250 g/t de Ta ₂ O ₃	3 000 g/t	Téléphones portables
Lithium	0,04 % pour les salars et 1 % pour les mines	1,5 %	Batteries Li-ion

Figure 1 : Teneurs en minéraux stratégiques des gisements naturels et de la mine urbaine.

La question de l'évaluation des gisements urbains

À l'été 2009, le ministère chargé de l'Environnement a sollicité l'ADEME, dans le cadre de la préfiguration du Comité des métaux stratégiques (COMES), afin d'évaluer le potentiel de recyclabilité d'un certain nombre de métaux (rares, critiques ou stratégiques, suivant les dénominations usuelles) à partir des déchets générés sur le territoire national. Douze métaux divers, auxquels s'ajoutent le groupe des platinoïdes (6 métaux) et celui des terres rares (17 métaux, scandium compris), ont fait l'objet d'investigations.

Ces travaux ont abouti à une publication en 2010 (ADEME, 2010, [4]). Ils constituent une base pour l'évaluation d'un gisement forcément évolutif (comme nous l'avons rappelé précédemment). L'analyse des gisements conduit à sélectionner des couples produit usagé/métal afin d'estimer les tonnages disponibles à la collecte, pour déterminer les potentiels les plus intéressants.

Pour les déchets de ces métaux produits en France dans le cadre de procédés industriels (déchets de production),

il n'existe que très peu de données, car, d'une part, les quantités concernées sont faibles et, d'autre part, leurs prix pour la plupart élevés génèrent un recyclage systématique (cependant, des cas comme celui des boues de polissage qui contiennent des terres rares ne semblent faire l'objet d'aucun recyclage).

Il convient aussi de noter qu'en dehors de la fabrication d'alliages, assez peu de ces métaux sont des intrants directs pour les industriels français du fait que la fabrication des composants est pour l'essentiel assurée à l'étranger. C'est, par exemple, le cas de l'indium utilisé à 80 % dans les écrans plats, dont le procédé de fabrication génère plus de 50 % de déchets de production qui sont entièrement recyclés - mais pour l'essentiel cette fabrication est le fait de producteurs asiatiques. Pour ce qui est des déchets de production, le gisement potentiel en métal stratégique ne peut faire l'objet que d'une estimation grossière à partir de la consommation mondiale du secteur du métal considéré rapportée au chiffre d'affaires du secteur d'activité en France.

Pour les déchets post-consommation (produits usagés jetés par les particuliers ou les entreprises), l'estimation des gisements se heurte aux deux difficultés que sont la connaissance *ex-ante* des volumes mis sur le marché et celle de leur composition.

Pour la quasi-totalité des produits usagés post-consommation, il n'existe pas de mesure directe des tonnages de déchets générés. L'approche par la mise en marché des produits peut parfois être envisagée, mais elle se heurte, d'une part, à une connaissance insuffisante de ces mises sur le marché et, d'autre part, à la difficulté de connaître la durée de vie des produits considérés. C'est cependant souvent la seule approche possible. Une méthode a ainsi été développée par l'Université des Nations unies en 2011 pour les déchets d'équipements électriques et électroniques, puis elle a été utilisée aux Pays-Bas, en Belgique, en Italie et en France (ADEME et OCAD3E, 2013, [5]).

La connaissance de la composition des biens, notamment pour ce qui concerne les métaux stratégiques, se révèle extrêmement délicate. En effet, les importateurs n'ont aucune information et les fabricants français, qui sont plutôt des assembleurs, ne connaissent donc pas le contenu précis des composants qu'ils utilisent, comme le montrent les travaux d'un groupe de travail du COMES. Seuls les fournisseurs de composants élémentaires ont cette connaissance. Il est donc nécessaire de procéder par analyse de la littérature technique ou des dires d'experts.

Par ailleurs, les déchets générés ne sont pas systématiquement collectables et traitables pour un coût économiquement acceptable. Sur cet aspect du problème, un parallèle direct peut être fait avec les notions de ressource et de réserve de l'économie minière traditionnelle.

Il résulte de ces différentes contraintes que les estimations du contenu en métaux stratégiques de la mine urbaine en France doivent être considérées avec une grande prudence. Des travaux spécifiques sont encore nécessaires afin d'affiner les réels potentiels actuels et futurs.

Les principaux gisements

Sur la base des études actuellement disponibles, quelques gisements urbains représentent la fraction la plus intéressante en termes de potentiel actuel ou futur de fourniture de métaux stratégiques issus du recyclage. Il s'agit :

- des équipements industriels volumineux fixes ou mobiles comprenant des alliages qui méritent d'être séparés efficacement pour être valorisés au mieux en évitant la diminution de valeur pouvant résulter d'un mélange d'alliages aboutissant à une matière de moindre qualité technique (*downcycling* ou sous-cyclage) ;
- des systèmes d'éclairage, avec les lampes fluorescentes en tubes ou fluo compactes (actuellement) et les diodes électroluminescentes LED (demain) ;
- des équipements électriques et électroniques, avec leurs composants, que sont les écrans LCD, les cartes électroniques (dont les condensateurs au tantale), les aimants, les batteries (notamment lithium-ion) ou encore les disques durs ;
- des véhicules automobiles, avec les pots catalytiques (platine), les aimants ou les équipements électroniques (cartes et écrans). L'évolution vers des véhicules hybrides ou électriques (et bientôt autonomes) générera à terme de nouveaux gisements (moteurs électroniques de contrôle et batteries) ;
- des équipements producteurs d'énergie renouvelable électrique, éoliens ou photovoltaïques.

Tous ces équipements générant un jour des déchets ne sont pas au même niveau de maturité de marché et donc de stabilité des volumes. Par exemple, les gisements sont stables pour les véhicules classiques ; ils sont émergents pour les véhicules électriques ou les éoliennes, et sont décroissants à terme pour les lampes fluo-compactes. Il s'agit donc, pour une part importante, de gisements futurs.

L'état de la collecte

La valorisation de ces gisements dépend en premier lieu de la collecte des produits usagés. Pour un nombre croissant de types de biens usagés concernés, la réglementation européenne implique la mise en place de dispositifs de collecte gérés dans le cadre de la responsabilité élargie du producteur (REP). Ce cadre permet aux États membres de mettre en place une captation cohérente sur l'ensemble de leur territoire. C'est bien entendu le cas en France, avec la transposition des différentes directives. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), les lampes usagées, les piles et accumulateurs usagés et les véhicules hors d'usage (VHU) bénéficient directement de la dynamique des filières ainsi constituées.

S'agissant des équipements électriques et électroniques, sur 1,55 Mt (dont 1,325 Mt de produits ménagers comprenant 837 kt de gros électroménager) mis en marché en 2014, 427 kt (dont 264 kt de gros électroménager) ont été déclarées collectées en 2013 dans le cadre du dispositif officiel. Toutefois, la collecte officielle stagne, elle reste inférieure à ce qu'elle pourrait être, avec 36 % de taux de collecte estimé (ADEME, 2015a, [6]).



Photo © Alexandre Gelabart/REA

Site de déconstruction d'équipements électroniques de l'association ENVOI, Colombier (Haute-Garonne), décembre 2008.

« S'agissant des équipements électriques et électroniques, sur 1,55 Mt mise en marché en 2014, 427 kt ont été déclarées collectées en 2013 dans le cadre du dispositif officiel. Toutefois, la collecte officielle stagne, elle reste inférieure à ce qu'elle pourrait être, avec 36 % de taux de collecte estimé. »

L'étude réalisée en 2013 pour le compte de l'ADEME et de l'OCAD3E (ADEME et OCAD3E, 2013, [5]) estime le gisement de référence à 20 kg par habitant (pour une fourchette d'estimation allant de 17 à 24 kg/hab), soit 1,3 million de tonnes. Cette étude analyse aussi les différents circuits de collecte et en montre la diversité (voir la Figure 2 de la page suivante).

Ainsi, sur les 1,3 Mt de déchets générés :

- près de 400 kt rejoignent des destinations non identifiées dans ce travail (filiales non officielles, exportations non contrôlées vers d'autres continents) ;
- 315 kt, essentiellement du gros électroménager, sont traités en mélange avec la ferraille ;
- 120 kt sont directement incinérées ou enfouies via la collecte des ordures ménagères, avec lesquelles sont mélangés les équipements faute d'avoir été triés à la source par leurs propriétaires ;
- seules 480 kt relèvent actuellement d'une collecte pour les filières officielles dans le cadre de la REP : elles sont traitées à plus de 99 % en France (le 1 % restant l'étant en Belgique). Pour ces tonnages, des campagnes de caractérisation ont permis d'évaluer la quantité de mé-

taux non ferreux à environ 34 kt et la quantité de cartes électroniques à un peu plus de 10 kt (ADEME, 2015a, [6]). Des cartes qui représentent la principale source de métaux stratégiques récupérables.

Tous les autres circuits de destination de ces équipements ne conduisent pas forcément à une perte de métaux stratégiques, mais ils rejoignent des filières ne garantissant pas un traitement efficace.

Les lampes à décharge et les LED font l'objet d'une collecte spécifique, avec en 2014, 4 779 tonnes collectées pour 11 500 tonnes mises sur le marché (ADEME, 2015a, [6]), soit 42,3 % de taux de collecte apparent.

Les piles et accumulateurs contenant des métaux stratégiques (hors plomb) mis sur le marché se répartissent entre 10 kt à base de lithium, 4kt de type nickel-métal-hydrure (NIMH) et 2 kt de type nickel-cadmium. Concernant les déchets de piles et accumulateurs portables, le taux de collecte en tonnage est globalement estimé (tous couples électrochimiques confondus) à 37,5 % (ADEME, 2015b, [8]). Il est vraisemblable qu'une partie de ces déchets est stockée par les consommateurs et qu'une autre partie se retrouve dans les filières d'incinération et de mise en décharge du fait d'une collecte en mélange avec les ordures ménagères, faute d'une séparation opérée par leur détenteur.

Les véhicules hors d'usage représentaient en 2012 un gisement potentiel (estimation moyennement fiable, du

fait des incertitudes sur les imports/exports de véhicules d'occasion) de plus de 2 millions de véhicules pour une collecte dans le circuit officiel un peu supérieure à 1,2 million (ADEME, 2013, [9]). En 2013, les volumes collectés étaient un peu en baisse à 1,15 million (ADEME, données à paraître). Les métaux stratégiques contenus dans des alliages ne font que très peu (ou pas du tout) l'objet d'une séparation spécifique permettant leur recyclage. De même, les cartes électroniques des véhicules ne font pas aujourd'hui l'objet d'une collecte séparée. Les métaux qu'elles contiennent sont ainsi le plus souvent perdus dans les résidus de broyage (et ce bien que des offres sur Internet fassent état d'une reprise de calculateurs moteurs au tarif de 600 €/t).

Les pots catalytiques sont les composants les plus emblématiques des métaux stratégiques utilisés dans les véhicules automobiles. L'ADEME estime ainsi qu'un peu moins de 60 % des VHU (âgés en moyenne de 16,9 ans en 2013) étaient catalysés (proportion en augmentation chaque année) et que seuls 36 % des VHU catalysés réceptionnés dans les centres VHU faisaient alors l'objet d'une dépose de leur pot catalytique. La différence est liée au fait qu'une partie des VHU ne passent pas par les circuits officiels (leur traitement est réalisé par des entreprises illégales) et aussi au fait, par ailleurs, que certains centres VHU, malgré une valeur des pots catalytiques allant de 30 à 200 euros, semblent encore ne pas prendre le temps de les démonter avant la mise au broyage des carcasses...

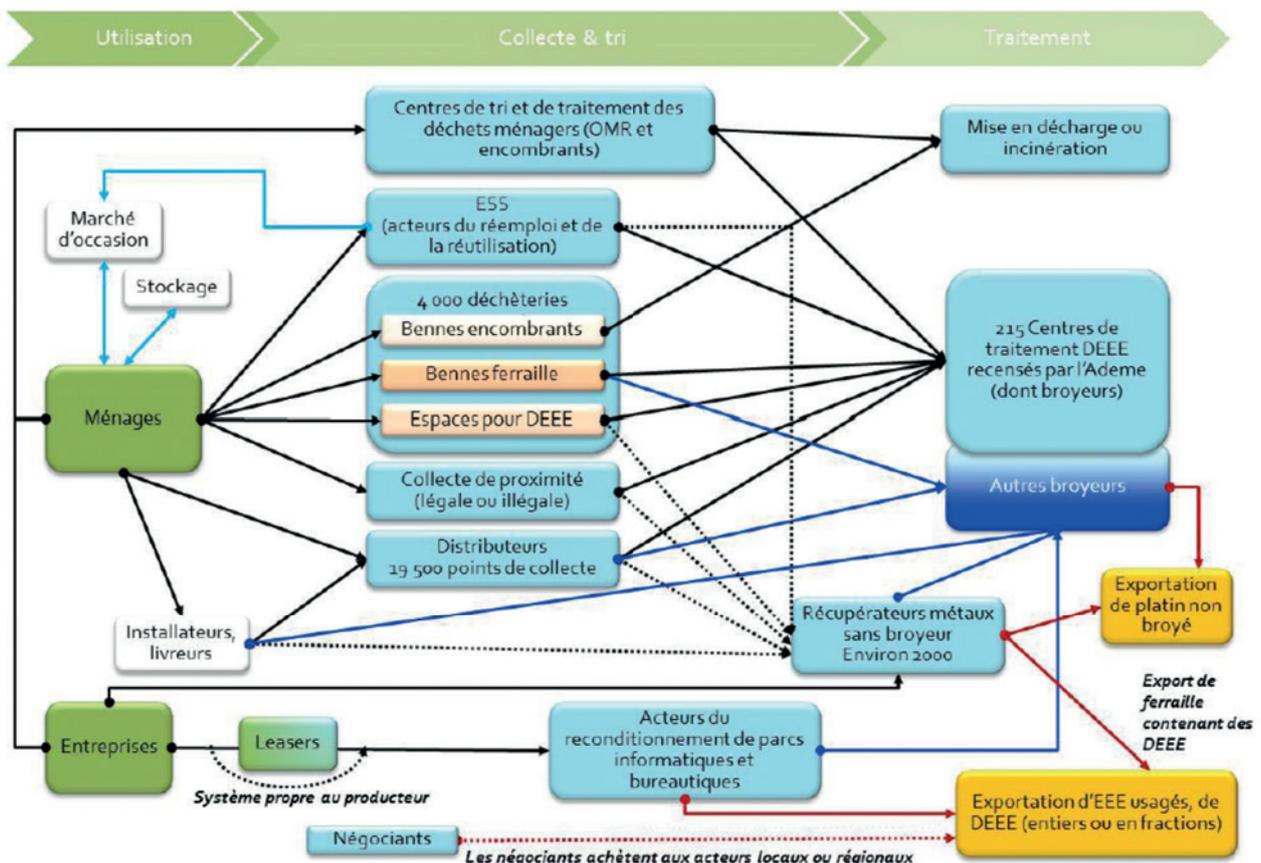


Figure 2 : Les différents circuits de collecte des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) - ADEME et OCAD3E, 2013.



Photo © Jérôme Chatin/ EXPANSION-REA

Récupération d'ampoules électriques basse consommation au centre de tri et de recyclage de Paprec à Corbeil-Essonnes, octobre 2013.

« Les lampes à décharge et les LED font l'objet d'une collecte spécifique, avec en 2014, 4 779 tonnes collectées pour 11 500 tonnes mises sur le marché, soit 42,3 % de taux de collecte apparent. »

Les équipements producteurs d'énergie électrique, éoliens ou photovoltaïques, ne représentent pas actuellement un flux de déchets significatif, mais leur potentiel à venir est indéniable. Il est à noter que l'intégration des panneaux photovoltaïques dans la réglementation européenne sur les DEEE a conduit à la mise en place, au 1^{er} janvier 2015, de la filière REP que pilote la société PV Cycle.

Au niveau actuel de développement des filières, avec un niveau de captation insuffisant, des progrès constants sont constatés, mais ces progrès restent lents. Il existe donc un potentiel important d'amélioration qu'il faut gérer, notamment dans le cadre de la REP et des objectifs fixés aux acteurs.

L'état du traitement et de l'extraction

De par sa réglementation « déchets », la France est dotée d'un nombre relativement important de centres de traitement des produits usagés concernés tant en ce qui concerne les DEEE (166 sites, dont 15 dédiés aux lampes) (ADEME, 2015a, [6] ; ADEME, 2014, [7]), les piles et les accumulateurs (17 sites) (ADEME, 2015b, [8]) que les VHU (1765 centres VHU et 60 broyeurs) (ADEME, 2013, [9]). Ce parc d'installations permet de prendre en charge la totalité des flux produits en France, voire de proposer des capacités de traitement pour des déchets étrangers, comme c'est notamment le cas pour les piles et les accumulateurs.

Tant pour les DEEE que pour les VHU, les installations de traitement peuvent avoir recours à des opérations de démantèlement manuel que complètent ou non des opérations automatisées. Il n'existe pas d'installation qui assure la totalité du traitement d'un équipement jusqu'au recyclage final des matières premières. Le traitement complet de ces déchets constitue de fait un écosystème d'acteurs qui s'organise sur le territoire au niveau national, mais aussi plus globalement au niveau européen, voire mondial. Ainsi, concernant une vingtaine de métaux stratégiques issus du recyclage, l'Europe abrite les principaux acteurs mondiaux, avec Umicore (en Belgique), Aurubis (en Allemagne), Boliden (en Suède) et Solvay (en France), pour les terres rares. Cependant, ce dernier acteur vient de fermer ses installations de recyclage en tout début de cette année. Le bassin d'approvisionnement de ces installations s'étend bien au-delà des frontières des pays où elles sont implantées, et pour des déchets comme les poudres luminescentes des lampes usagées, l'approvisionnement de l'installation Solvay de la Rochelle dépassait largement les frontières de l'Europe.

Cependant, des acteurs français engagent depuis quelques années des travaux de recherche et développement portant sur l'amélioration ou le développement du recyclage de métaux stratégiques. L'ADEME a ainsi identifié 21 projets aidés par les pouvoirs publics français

(ADEME, ministère de l'Industrie ou ANR) entre 2009 et 2014. Une étude (AUTRET (E.) et BRAMANT (M.), 2014, [10]) réalisée par l'ADEME et l'INPI a identifié 22 brevets français déposés entre 2004 et 2012 sur le sujet, pour 4 131 brevets déposés au niveau mondial sur la même période. La France se place à la huitième place mondiale - d'un classement largement dominé par la Chine - et à la deuxième place européenne pour les brevets portant sur le recyclage des métaux stratégiques.

D'autres projets existent, mais ils ne font pas l'objet de financement public ou de dépôt de brevet, les industriels concernés préférant privilégier la confidentialité. Par ailleurs, des dossiers de demande d'aide sont en cours d'examen à l'ADEME dans le cadre des Investissements d'Avenir. Six projets ressortent du dispositif Nouvelle France industrielle et trois ont été retenus au concours mondial de l'innovation organisé chaque année par la direction générale des entreprises (DGE).

La performance globale actuelle de la récupération des métaux stratégiques est délicate à établir, car chaque industriel reste très discret sur les niveaux de récupération auxquels il est parvenu, voire même sur la nature des métaux valorisés, et il n'y a aucun chiffre disponible sur les quantités de métaux stratégiques issues du recyclage et commercialisées par ces installations. Les procédés techniques conduisent à des choix technico-économiques des métaux à privilégier : ainsi, le tantale des condensateurs ou les terres rares des petits aimants permanents ne sont pas recyclés à ce jour.

Conclusion

Le recyclage des métaux stratégiques, en dehors d'équipements industriels spécifiques qui concentrent ces métaux (IRM du milieu médical ou éoliennes, par exemple), porte sur des biens d'équipement largement diffusés (en particulier tous ceux comportant de l'électronique) ou sur les véhicules, notamment catalysés. La France, comme les autres pays européens, s'est dotée d'une réglementation qui constitue une réelle opportunité pour la mobilisation de ces gisements. La collecte de ces déchets dans les filières adaptées et officielles doit être renforcée, car seul un tiers des déchets concernés font actuellement l'objet d'un recyclage. L'extraction des métaux stratégiques contenus dans ces déchets est partiellement réalisée, l'Europe constituant un pôle majeur au niveau mondial. Cependant, peu d'installations majeures ont été développées en France, bien que des opportunités existent pour le développement d'installations innovantes, plus souples en termes de procédé ou de taille, et plus performantes, notamment en matière de consommation énergétique. Cela nécessite cependant une plus grande coopération entre des acteurs qui s'ignorent, voire sont en concurrence, tant au plan national qu'euro-péen. Actuellement, des réflexions sont engagées dans différentes instances (comme le COMES - Comité des métaux stratégiques - et l'Alliance pour l'environnement) ou dans le cadre de programmes européens. De ces travaux doivent émerger des orientations convergentes afin d'engager un programme comportant des priorités définies, à l'image de ce que fait le Japon depuis plusieurs années.

Bibliographie

- [1] GROSSE (F.), « Les Limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières », *Annales des Mines, Responsabilité & Environnement*, n°76, Paris, avril 2014, pp. 58-63.
- [2] LABBÉ (J.-F.), « Les Limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement des métaux », conférence du 23 octobre 2013 donnée à l'Université d'Orléans, OSUC, exposés 2013-2014 : www.univ-orleans.fr/osuc/expos%C3%A9s-2013-2014 (consulté le 25 août 2015).
- [3] OREWIN PTY LTD., "Turquoise Hill Ressources Ltd, Oyu Tolgoï", Technical report, Job n°14003, octobre 2014.
- [4] ADEME (2010), « Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares », Bio Intelligence Service pour ADEME, contrat n°0902C0071, 2010 : www.ademe.fr/etude-potentiel-recyclage-certains-metaux-rares (consulté le 25 août 2015).
- [5] ADEME et OCAD3E (2013), « Projet de quantification des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en France », Bio Intelligence Service pour ADEME et OCAD3E, contrat n°1202C0048 : www.ademe.fr/projet-quantification-dechets-dequipements-electriques-electroniques-deee-france (consulté le 26 août 2015).
- [6] ADEME (2015a), « Rapport annuel sur la mise en œuvre de la réglementation relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) - Données 2014 », contrat n°1102C0071, octobre 2014 : <http://www.ademe.fr/rapport-annuel-registre-dechets-dequipements-electriques-electroniques-deee-donnees-2014> (consulté le 22 janvier 2016).
- [7] ADEME (2014), « Inventaire 2012 des sites de traitement de déchets d'équipements électriques et électroniques », contrat n°1202C0075, mai 2014 : <http://www.ademe.fr/inventaire-2012-sites-traitement-dechets-dequipements-electriques-electroniques> (consulté le 22 janvier 2016).
- [8] ADEME (2015b), « Rapport annuel du registre piles et accumulateurs - Données 2014 », contrat n°1402C0024, septembre 2015 : <http://www.ademe.fr/rapport-annuel-2014-registre-piles-accumulateurs> (consulté le 22 janvier 2016).
- [9] ADEME (2013), « Rapport annuel de la mise en œuvre des dispositions réglementaires relatives aux véhicules hors d'usage. Situation 2012 », contrat n°1002C0123, septembre 2013 : <http://www.ademe.fr/rapport-annuel-mise-oeuvre-dispositions-reglementaires-relatives-vehicules-hors-dusage-situation-2012> (consulté le 22 janvier 2016).
- [10] AUTRET (E.) & BRAMANT (M.), « Étude Brevets Métaux Stratégiques - Rapport final », ADEME INPI, 19 novembre 2014, 22 pages.

Mines et minéraux : un secteur clé mobilisé au service de l'industrie française de demain

Par Catherine TISSOT-COLLE

Co-présidente d'A3M (Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux)

Le secteur des mines et des métaux - qui occupe une place stratégique dans la chaîne de valeur de chacun des autres grands secteurs industriels français - doit faire face à une situation extrêmement difficile résultant de la combinaison de plusieurs facteurs : le renchérissement des coûts alors même que les cours mondiaux restent durablement dégradés, des « règles du jeu » souvent inéquitables face aux percées commerciales des pays à bas coûts et une pression réglementaire croissante exigeant d'y consacrer d'importants moyens notamment humains.

Loin de baisser les bras, le secteur produit aujourd'hui des efforts considérables pour maintenir sa compétitivité, et pouvoir ainsi saisir toutes les opportunités de servir les filières industrielles aval.

Indiscutablement stratégique de par la nature de ses clients industriels finaux - construction, énergies (notamment renouvelables), aéronautique, automobile, chimie, nouvelles technologies, etc. -, le secteur de l'acier et des métaux connaît en ce début d'année 2016 une situation économique extrêmement difficile marquée par la faiblesse persistante de la croissance de l'économie mondiale, une forte volatilité des prix par ailleurs en chute et d'inquiétantes surcapacités (en particulier chinoises).

Dans ce contexte, la compétitivité des entreprises repose essentiellement sur leur capacité à maîtriser leurs coûts et, au premier chef, leurs coûts de main-d'œuvre et d'énergie.

Nos entreprises françaises sont engagées dans des plans d'amélioration de leurs performances, des plans souvent drastiques. Elles recherchent, en ces temps troublés, le plus juste équilibre entre baisse immédiate de leur besoin de cash et maintien de leurs compétences et de leurs capacités à long terme nécessaires à leur rebond espéré en fin de cycle.

La France se situant à un niveau relativement élevé en matière de coût du travail, l'enjeu énergétique est chez nous également majeur et l'exposition des acteurs à la concurrence internationale exige la préservation des conditions d'une concurrence qui soit équitable (*level playing field*). En parallèle, le développement d'une R&D de qualité à forte dimension technologique (appliquée notamment aux procédés industriels) et l'évolution de la production

vers des produits différenciants à plus forte valeur ajoutée constituent pour les industriels français des atouts à valoriser et à amplifier.

Enfin, si le secteur est d'ores et déjà clairement engagé dans une logique d'économie circulaire, nous n'en sommes encore qu'au début du chemin et la rentabilité économique de cette voie reste un enjeu, tout particulièrement dans le contexte actuel de dépression massive des prix des matières premières.

Face à ces défis, l'Alliance des minerais, des minéraux et des métaux (A3M), qui rassemble les industriels des secteurs des métaux et de l'acier, concentre son action sur quatre priorités :

a - **Enjeu majeur de la politique industrielle mondiale, tout d'abord, le possible octroi du statut d'économie de marché (SEM) à la Chine par l'Union européenne** a fortement mobilisé la profession dès 2014 et cette mobilisation ne faiblit pas, tant à l'échelle nationale qu'euro-péenne. Une telle décision serait en effet lourde de menaces pour les entreprises et l'emploi. En effet, les mesures *antidumping* actuellement en vigueur à l'égard de la Chine sont essentielles pour de nombreux industriels, car elles visent à rétablir les conditions d'un échange équitable. L'octroi du SEM à la Chine rendrait extrêmement difficile le maintien de ces instruments de défense. Les pouvoirs publics français - et nous nous en réjouissons - s'avèrent réceptifs aux arguments des industriels.



Photo © Hamilton/REA

Audition du ministre chargé de l'Économie, Emmanuel Macron, par la commission du développement et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée nationale au sujet de la réforme du Code minier.

« Il s'agit, dans une perspective soulignée par plusieurs ministres, de relancer l'activité minière en France métropolitaine, de doter notre pays d'une version actualisée et modernisée de son Code minier, qui tienne compte, en particulier, des nouvelles attentes de la société civile à l'égard de notre industrie. »

Pour autant, la question est très sensible, et la plupart des gouvernements européens restent (à ce stade) très prudents, n'exprimant pas ouvertement leur position. Le 15 février dernier, à Bruxelles, plus de 5 000 citoyens de 17 États membres, chefs d'entreprise et salariés rassemblés, défilaient avec détermination pour défendre une même vision du *free and fair trade* et de la non automaticité de la décision d'octroi du statut d'économie de marché. Un manifeste a été à cette occasion remis aux plus hautes autorités européennes. En continuant l'intense travail de sensibilisation déjà entrepris, il nous est permis d'espérer que l'Union européenne se prononcera contre cette mesure.

b - S'agissant de l'énergie, ensuite, un sujet crucial pour nos entreprises, les demandes répétées de l'industrie, en 2015, en faveur d'une baisse des prix de l'énergie ont été entendues par le gouvernement français et plusieurs mesures adoptées récemment en ce sens restaurent partiellement la compétitivité des industries électro-intensives. Il s'agit notamment de la compensation des coûts liés aux émissions indirectes de GES (gaz à effet de serre) répercutés dans le prix de l'électricité et du plafonnement de la taxe intérieure sur la consommation finale.

En matière d'énergie et de climat, l'année 2015 s'est conclue par le succès de la COP 21 qui s'est tenue à

Paris. Elle a permis, au-delà de son volet diplomatique, la reconnaissance du rôle essentiel que jouent les acteurs de la société civile, au premier rang desquels les entreprises, dans la lutte contre le changement climatique. Notre secteur a déjà réalisé des efforts très importants allant dans le sens de la réduction de ses émissions de gaz à effet de serre. La sidérurgie, par exemple, a réduit ses émissions de CO₂ de 40 % au cours des 40 dernières années. Mais c'est aussi par les nouveaux produits et les nouvelles solutions qu'il propose que le secteur des métaux est incontournable pour la réussite de la transition énergétique.

Toutefois, à court terme, et plus que jamais, il nous faut rester mobilisés et vigilants suite à l'accord de Paris (qui a conclu la COP 21). En effet, la révision de la directive ETS (*Emissions Trading System*) est un sujet majeur de préoccupation pour notre secteur encore gros émetteur de carbone en raison de ses procédés industriels sans alternative technique et de sa forte exposition à la concurrence internationale. Dans la mesure où l'accord de Paris ne garantit pas un *level playing field* avec les pays concurrents, la directive ETS devrait, à notre sens, être révisée de manière à ne pas réduire encore davantage la compétitivité de nos entreprises, en particulier dans le contexte d'une forte hausse annoncée du prix du quota de CO₂.

c - Le troisième axe prioritaire concerne l'amont du secteur et les industries extractives, qui se sont fortement impliquées dans le processus de révision du Code minier français engagé par les pouvoirs publics depuis trois ans. Il s'agit, dans une perspective soulignée par plusieurs ministres, de relancer l'activité minière en France métropolitaine, de doter notre pays d'une version actualisée et modernisée de son Code minier qui tienne compte, en particulier, des nouvelles attentes de la société civile à l'égard de notre industrie. Consultée, associée aux travaux, notre profession est favorable à cette réforme qui doit permettre aux entreprises concernées de travailler sereinement, en toute transparence, avec des parties prenantes apaisées.

Malheureusement, force est de constater qu'aujourd'hui, ce projet a pris du retard et que les acteurs s'impatientent. Savoir établir des règles du jeu partagées (contraignantes ou volontaires) en matière de dialogue et de recours au sujet des projets d'exploration minière et des exploitations en cours est pour nous une clé incontournable du vivre ensemble entre les parties prenantes locales et les entreprises. Nous formons le vœu que ce processus avance et se conclue cette année.

d - Enfin, quatrième priorité, l'économie circulaire, que nous avons déjà évoquée brièvement. Disons-le clairement : la développer ne conduira pas à une disparition de l'extraction de matières premières, l'une et l'autre sont durablement complémentaires. La mine urbaine, la mine secondaire, le recyclage, et plus largement l'économie circulaire, tout en répondant aux attentes de notre société,

peuvent - et même doivent - constituer des opportunités pour les entreprises. D'ores et déjà, le recyclage fait partie intégrante des processus de production, puisque 55 % des besoins en matières premières de l'industrie métallurgique proviennent du traitement des déchets.

Pour aller plus loin dans le sens d'une utilisation plus efficiente des métaux, il faut à la fois :

- renforcer la compétitivité des industriels français, notamment en luttant contre les pratiques illégales (telles que les exportations illicites de déchets) ;
- lever les freins réglementaires, normatifs et fiscaux ;
- améliorer la performance des filières de recyclage et la qualité des déchets traités destinés à la métallurgie ;
- mettre en relation les acteurs.

Seule la mise en œuvre de cette feuille de route ambitieuse, mais réaliste, permettra au secteur des métaux de jouer pleinement son rôle d'acteur stratégique de l'économie circulaire.

Inquiètes et malmenées par la cyclicité des marchés et le poids croissant de la concurrence chinoise, les entreprises françaises du secteur des métaux n'en sont que plus innovantes, mobilisées et créatives. Elles représentent des atouts considérables pour le développement de l'économie et de l'emploi et sont aujourd'hui engagées dans la transition écologique. Il s'agit de ne pas baisser les bras, d'analyser nos forces et nos faiblesses avec lucidité et de nous mobiliser fortement, convaincus que nous sommes de notre contribution unique et stratégique à l'économie de la société française d'aujourd'hui et de demain.

Le renouveau minier français et les matières premières stratégiques

Par Rémi GALIN

Chef du bureau de la gestion et de la législation des ressources minérales non énergétiques, ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

L'intérêt manifesté par quelques investisseurs concrétise un renouveau minier français perceptible depuis ces dernières années. Notre pays n'a rien d'un eldorado minier, mais il possède un réel potentiel pour plusieurs substances stratégiques (la fluorine, le tungstène, l'antimoine et le germanium) pouvant contribuer à l'économie nationale. Plusieurs initiatives accompagnent ce renouveau. Sous la houlette du Comité des métaux stratégiques, le COMES, des réinterprétations de données anciennes auxquelles s'est attaché le BRGM précisent ce potentiel. La réforme du Code minier, la définition et la promotion d'un nouveau modèle minier plus responsable sont de nature à permettre l'émergence de projets miniers très profitables aux territoires concernés. Les ressources minières marines nationales offrent elles aussi des possibilités d'approvisionnement en métaux stratégiques à considérer dans un contexte (certes à plus long terme) de raréfaction des ressources terrestres mondiales. Comme pour les ressources terrestres, leur développement et leur succès reposent sur notre capacité à mobiliser les investissements des entreprises vers cette voie de sécurisation potentielle de leurs approvisionnements à long terme et sur la compatibilité environnementale des projets d'exploitation et des techniques susceptibles d'être mises en œuvre.

Les ressources du territoire national en minerais de métaux stratégiques

Un nombre limité d'exploitations minières françaises ont eu une visibilité pour le grand public. Il en va ainsi du charbon du Nord-Pas-de-Calais, de Lorraine, de Gardanne ou de Saint-Étienne, des mines de fer de Lorraine ou du gisement de gaz de Lacq, qui ont connu une notoriété importante. La fermeture d'un certain nombre de ces ensembles miniers (charbonnages, mines de fer, de potasse) a fait l'objet d'une importante couverture médiatique dans les années 1990 et 2000 et elle a concentré l'innovation et la recherche sur la gestion de l'« après-mine ».

Mais ces exemples ne rendent pas compte exhaustivement du potentiel minéral et du passé industriel d'un territoire qui doit sa richesse à une forte diversité géologique.

Aujourd'hui, l'importance économique et la richesse de la filière des roches et des minéraux industriels (talc, kaolin, andalousite, gypse, etc.) traduisent cette diversité.

Le territoire métropolitain a été un producteur de métaux depuis l'antiquité celte et romaine. Le développement de capacités métallurgiques d'extraction des produits utiles a progressivement permis de nouveaux usages de substances minérales, et celui des techniques d'identification

des minéraux présents dans la nature a permis l'exploitation de nouvelles mines.

De nombreuses substances ont ainsi été exploitées à des niveaux significatifs. Ainsi, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a estimé (fin 1999) que notre territoire avait produit 4,7 milliards de tonnes de charbon depuis 1714, 4 milliards de tonnes de minerai de fer sur la période 1750-1999, mais aussi 78 000 tonnes d'uranium métal (1946-1999), 2,3 millions de tonnes de zinc (1837-1999), près de 12 000 tonnes d'étain (1813-1986), 130 000 tonnes d'antimoine, 1 600 tonnes de cadmium, et même, 400 tonnes de germanium !

La France a été le 3^{ème} producteur européen de tungstène jusqu'à la fermeture de la mine de Salau (dans l'Ariège) en 1986. Elle a occupé le premier rang mondial des producteurs d'antimoine entre 1890 et 1908, assurant jusqu'à 25 % de la production mondiale. La fluorine a permis à la France d'atteindre le troisième rang européen au tournant du XX^{ème} siècle. Le gisement de Saint-Salvy, dans le Tarn, a été, quant à lui, un producteur majeur de germanium.

L'ensemble de ces anciennes exploitations et des indices superficiels connus témoignent du potentiel minier physique inhérent à la géologie de notre territoire. La variation

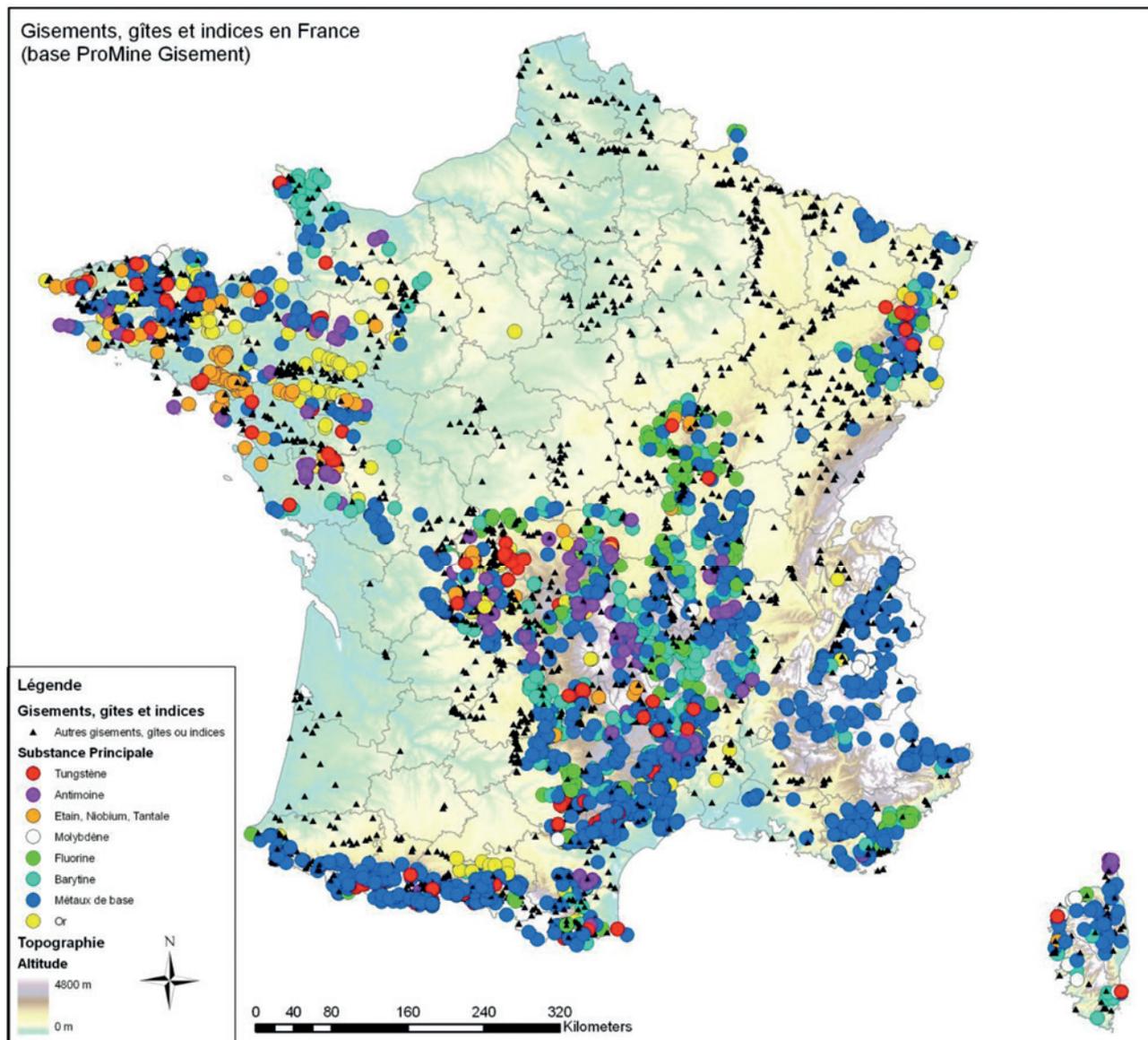


Figure 1 : Gisements, gîtes et indices en France (Source : ProMine Gisement).

des conditions économiques observée depuis la fermeture récente de certaines mines laisse penser qu'il existe un potentiel économiquement exploitable sous nos pieds (Voir la Figure 1 ci-dessus).

Ce potentiel doit être examiné à la lumière de la concurrence d'autres gisements à l'échelle mondiale et non à la seule aune des besoins de l'industrie nationale. Ainsi, par exemple, malgré la diversité géologique de notre territoire et la réalité de l'existence de quelques environnements géologiques favorables, voire d'indices connus ou d'anciennes mines, le potentiel minier de la France en ce qui concerne le cuivre ou le platine est faible, voire nul ; le potentiel de gisements de fer ou de plomb-zinc exploités dans le passé et capables d'entrer en compétition avec les gisements exploités dans le monde est lui aussi faible.

Pour d'autres substances, comme le tungstène, l'antimoine et l'or, ce potentiel mérite un examen. En effet, il en existe des ressources connues et inexploitées au tonnage métal important à très important, calculées sur la base d'une définition de teneur de coupure économique

d'exploitation ancienne très élevée (parce que fixée à une période où les cours étaient à un niveau plus bas qu'aujourd'hui). Ces évaluations de ressources résultent en fait de connaissances datant de l'époque de l'exploitation desdites mines et, en l'absence de prospection minière (depuis plus de vingt ans), on peut penser que leur ordre de grandeur - identique ou supérieur aux tonnages exploités historiques - représente un plancher. Enfin, la position historique significative de la France en tant que pays producteur et la présence de gisements très importants pour les trois substances précitées à l'échelle européenne, ou même mondiale, sont des signes encourageants.

En ce qui concerne le tungstène, il existe sur le territoire métropolitain trois gisements inexploités supérieurs à 10 000 tonnes : ils sont vraisemblablement d'un même ordre de grandeur que le gisement exploité actuellement à Mittersill, en Autriche.

Notre pays n'a donc rien d'un eldorado minier, mais il possède un réel potentiel pour plusieurs substances stratégiques pouvant contribuer à l'économie nationale. Le

tungstène et l'antimoine font partie des métaux stratégiques étudiés par le COMES et ont fait l'objet de fiches disponibles sur le site <http://www.mineralinfo.fr/>. Comme la fluorine, ils font partie de la liste des matériaux critiques établie par l'Union européenne.

La variété géologique de notre territoire nous permet d'espérer que d'autres métaux stratégiques (comme les terres rares, le niobium ou le tantale) sont présents dans un nombre limité d'environnements géologiques favorables du territoire métropolitain ou en Guyane, mais qui jusqu'à présent n'ont été que peu ou pas du tout explorés.

La France détient de réelles compétences dans le traitement des minerais qui pourraient être mises à profit pour rendre économiquement intéressante l'exploitation de gisements à minéralisation de plomb-zinc en fonction de leur teneur en argent ou en métaux stratégiques, tels que le germanium ou encore l'indium.

Un groupe de travail du COMES a proposé l'engagement d'une réflexion visant à nous doter des moyens nécessaires pour actualiser un programme des années 1980 dit « Inventaire minier national », en vue, pour les zones les plus pertinentes, d'identifier la présence éventuelle de métaux stratégiques. Ce programme portait en effet surtout sur les métaux de base, l'or et le charbon, mais une partie de ses données peuvent être réinterprétées et complétées. Ce travail réalisé par le BRGM a débuté en 2012 et des premiers rapports sont disponibles sur le site <http://www.mineralinfo.fr/>

La portée de ce travail reste néanmoins limitée en l'absence de nouvelles investigations. Celles-ci pourraient prendre la forme d'un programme d'acquisition aérienne de données stratégiques d'un coût estimé à une quinzaine de millions d'euros.

La rénovation du dialogue entre territoires et investisseurs miniers : le Code minier et la démarche « Mine durable »

L'enjeu est surtout d'orienter les investissements du secteur privé national ou international vers cette direction, dans un contexte où la recherche de conditions favorables à l'investissement dépend simultanément de conditions géologiques, juridiques et sociétales. La problématique de ces investissements de long terme (qui présentent comme pour toute recherche technologique amont un risque d'échec important) est en effet bien comprise par certains milieux financiers, mais elle mérite d'être mieux appréhendée en France, où règne encore une certaine méconnaissance de l'activité minière.

Cet objectif exige, sans pour autant sacrifier aux exigences environnementales inscrites dans le Code minier, l'instauration d'un consensus sur des règles claires, pérennes et partagées et d'un réel dialogue national et territorial dépassant les *a priori* ou des conflits d'usage potentiels ou redoutés.

Plusieurs initiatives ont été lancées pour contribuer à ce « renouveau minier » aujourd'hui perceptible, que traduisent

notamment les huit permis de recherche exclusifs attribués depuis 2013 et quelques-uns en cours d'instruction.

En 2012, le gouvernement a décidé de lancer une action de révision de la loi minière (connue sous le nom de Code minier), qui poursuit plusieurs objectifs :

- améliorer le nécessaire dialogue entre porteurs de projets miniers et acteurs du territoire concerné, et ce dès le stade de l'exploration (en dépit de la difficulté que représente tout discours sur un projet minier qui, dans la phase d'exploration, est par définition inconnu dans ses détails et est surtout très incertain, l'explorateur ayant statistiquement plus de chances de devoir abandonner son projet que de développer une exploitation minière) ;
- rénover les processus de décision en matière de titres miniers afin de mieux prendre en compte l'environnement ;
- assurer aux explorateurs et aux mineurs une meilleure sécurité de leurs investissements, en particulier grâce à des procédures améliorées.

En avril 2015, M. Macron, ministre en charge de l'Industrie, a lancé le processus de concertation pour définir un modèle français de la mine responsable.

Un Livre blanc et plusieurs référentiels ont été rédigés. Ils rassemblent l'état de l'art de l'exploration et de l'exploitation des substances minières non énergétiques pour ce qui concerne la France.

Il s'agit d'une contribution essentielle à la compréhension des enjeux de l'industrie minière et aux débats sur les projets miniers et les exploitations. En affichant les conditions concrètes de réalisation d'un projet minier soutenable, ce Livre blanc devrait permettre de développer dans nos territoires métropolitains et ultramarins une conscience du potentiel que représente la valorisation de leur sous-sol (tant en termes de valeur ajoutée pour le territoire concerné que par les pollutions évitées dans d'autres pays, dont les règles environnementales peuvent être moins contraignantes que celles en vigueur en France).

Le Livre blanc synthétise les référentiels en soulignant, pour chaque étape d'un projet, les bonnes pratiques à observer. Il établit le cahier des charges de la mine responsable pour chaque projet ou pour chaque exploitation. Une convention d'engagement volontaire de la profession minière servira de cadre à l'adhésion des opérateurs miniers qui voudront s'inscrire dans cette démarche.

L'ensemble est destiné non pas à se substituer à la réglementation en vigueur, mais à établir la confiance entre l'industrie minière et les territoires, sur la base d'exemples concrets.

Les ressources en métaux stratégiques des fonds marins de la zone économique exclusive française

Les zones économiques exclusives (ZEE) françaises sont les deuxièmes au monde en termes de superficie (11 millions de km²) et sur le plan minéral. Mais comme toutes les autres ZEE du monde, elles sont encore très peu explorées.

L'existence de ressources minières dans les fonds marins profonds de certains océans est connue depuis longtemps (sous la forme de nodules polymétalliques contenant surtout du fer et du manganèse), y compris dans la ZEE de la Polynésie française. Dans les années 1970, ils ont fait l'objet de nombreux travaux, y compris de l'Institut français pour l'exploitation de la mer (Ifremer), mais aucun projet minier n'a jamais abouti, et ce malgré le grand nombre de pays ayant entrepris de relever ce défi (États-Unis, Grande-Bretagne, Japon, URSS, France, etc.).

La connaissance de l'existence de gisements de sulfures riches en métaux de base liés à des systèmes hydrothermaux s'est développée à partir de premières connaissances acquises dans les années 1960 dans la Mer Rouge (où le BRGM a mené des recherches scientifiques) et s'est étendue à de nombreux océans, y compris dans la ZEE de Wallis-et-Futuna. Un gisement de ces sulfures est proche d'avoir fait une reconnaissance détaillée en Nouvelle-Guinée. Depuis une date plus récente (dans les années 1980), des encroûtements contenant du fer et du manganèse ont été identifiés et étudiés ; certains sont connus dans la ZEE de la Polynésie française.

La recherche scientifique de la dernière décennie a montré que ces types de minéralisation peuvent être des sources de certains métaux stratégiques présents comme des sous-produits potentiels. Ainsi, par exemple, les nodules polymétalliques renfermant du fer et du manganèse peuvent aussi contenir (souvent) des concentrations significatives de cobalt, de lithium, de molybdène, de terres rares, d'yttrium ou de zirconium. Les encroûtements renferment, quant à eux, du bismuth, du molybdène, du niobium, du platine, des terres rares, du tellure, du titane, du tungstène, de l'yttrium ou du zirconium. L'Ifremer a identifié des encroûtements contenant du cobalt et du platine dans la ZEE de Polynésie française. En 2010, des chercheurs de l'Université de Tokyo ont décelé des indices de la présence de terres rares dans cette même ZEE.

L'exploration et l'exploitation des fonds marins posent de nombreux défis scientifiques, techniques, environnementaux et économiques. Ces activités sont d'intérêt straté-

gique pour la France en raison de la grande étendue de ses ZEE et des compétences qu'ont développées plusieurs de ses acteurs, tels que l'Ifremer (en R&D), Technip (en ingénierie), DCNS (en construction navale) et beaucoup d'autres encore. Un programme préliminaire portant sur Wallis et Futuna a été discuté au COMES et a conduit à l'organisation de trois campagnes de reconnaissance effectuées entre 2010 et 2012.

Sur un plan plus stratégique, lors du Comité interministériel de la mer tenu le 2 décembre 2013, l'État a pris acte de ce formidable gisement de ressources minérales et des perspectives offertes par son développement économique en engageant un programme national de recherche et d'accès aux ressources minérales des grands fonds marins. Celui-ci associe notamment l'Ifremer, le CNRS, les universités, les industriels et les ministères concernés autour de l'acquisition des connaissances, de l'expertise scientifique des conséquences environnementales de la valorisation des ressources minérales profondes, du développement des technologies nécessaires à leur exploitation et du montage de partenariats public-privé.

Cette stratégie a été confirmée par le Comité interministériel de la mer du 22 octobre 2015. Elle poursuit un triple objectif : a) la valorisation des atouts naturels des grands fonds marins, b) la contribution à l'émergence d'une filière industrielle d'excellence capable de valoriser ces atouts tout en respectant les écosystèmes marins des grands fonds et c) la préservation d'un élément clé de l'indépendance stratégique de notre pays en matière de métaux stratégiques.

Conclusion

Les ressources terrestres et marines nationales en métaux stratégiques apparaissent suffisamment significatives pour intéresser des investisseurs. S'il revient à ceux-ci de prendre le risque financier, l'intérêt économique national et les possibilités de développement local de leur exploitation justifient les actions d'accompagnement mises en œuvre par les pouvoirs publics sur les plans technique, juridique et sociétal.

Les enjeux pour le groupe Delachaux de son approvisionnement en chrome

Par Philippe LIEBAERT

Responsable Recherche et Développement de DCX Chrome

Si la présence de chrome dans la nature est loin d'être marginale (on estime les réserves mondiales de chromite à plus de 7 milliards de tonnes), il n'en va pas de même pour certains produits finis, dont le chrome métal ultra pur (plus de 99,4 % de pureté). Ce métal fait partie des composants incontournables dans la fabrication de superalliages, alliages qui sont utilisés dans tous les contextes critiques (en termes de température, de corrosion). Nombreuses sont leurs applications notamment dans les domaines de l'aéronautique (tant civile que militaire), de l'énergie (turbines à gaz), du nucléaire et de la pétrochimie, pour ne citer que les principaux. La fabrication de ce métal est concentrée entre les mains de quelques acteurs seulement, dont 2 en Europe, les autres étant russes ou chinois. Les normes environnementales évoluant drastiquement en Europe, le risque est grand de voir un déséquilibre se créer entre la demande de ce métal stratégique (concentrée aux États-Unis, en Europe, au Japon) et une offre qui irait en se rétractant en Europe et deviendrait plus coûteuse vis-à-vis de concurrents moins contraints par des réglementations.

Un peu d'histoire...

La découverte en Sibérie, à Ekaterinburg, d'un minerai rouge orangé baptisé crocoïte (PbO , CrO_3) date de 1765. En 1795, le chimiste français Vauquelin isole le chrome métal contenu dans la crocoïte. Dans les années 1830, des gisements de chromite ($FeCr_2O_4$) furent découverts aux États-Unis. Au cours des années qui suivirent, les scientifiques réussirent à extraire le chrome présent dans ce minerai sous la forme d'oxyde, par réduction de cet oxyde au moyen de charbon porté à haute température. Les premières applications industrielles (au XIX^e siècle) concernent la fabrication de colorants pour le papier peint, le jaune de chrome et le vert de chrome. Le bichromate de potassium, quant à lui, sert de base au rouge turc utilisé pour la teinture de la laine et du coton.

À la fin du XIX^e siècle, des composés de sels de chrome montrèrent leur aptitude au tannage des peaux, une utilisation qui est toujours d'actualité. Le mélange de la chromite avec de l'argile donna de bonnes propriétés réfractaires utiles à la fabrication de fours électriques servant à la production d'acier selon le procédé Thomas.

La fabrication du chrome pur devint une réalité en 1898 quand l'Allemand Goldsmidt mit au point la réduction aluminothermique des oxydes de chrome. Cette avancée permit, au début du XX^e siècle, le développement

de l'industrie des ferrochromes, puis des nichromes (alliages nickel-chrome) et, enfin, des stellites (alliages cobalt-chrome), en 1914.

La chaîne de valeur du chrome

L'utilisation de la chromite est fonction de sa teneur en oxyde Cr_2O_3 et d'autres composants (notamment le fer, le magnésium et l'alumine).

97 % de la chromite sert à la fabrication directe du ferrochrome et des produits réfractaires de fonderie. Les 3 % restants servent à la filière de la chimie du chrome (voir la Figure 1 de la page suivante).

La chaîne de valeur de la chimie du chrome comporte différents étages, elle fluctue en fonction des besoins du marché. Dans cette chaîne complexe, l'oxyde de chrome métallurgique arrive en bout de chaîne (voir la Figure 2 de la page 83). C'est cet oxyde de chrome qui constitue la matière première de la fabrication du chrome-métal pur.

La production de l'oxyde représente 1 % des débouchés de la chromite extraite.

Citons quelques-unes des principales applications de ces différents composés issus de la chimie du chrome :

- dichromate de sodium : protection du bois et pigment,

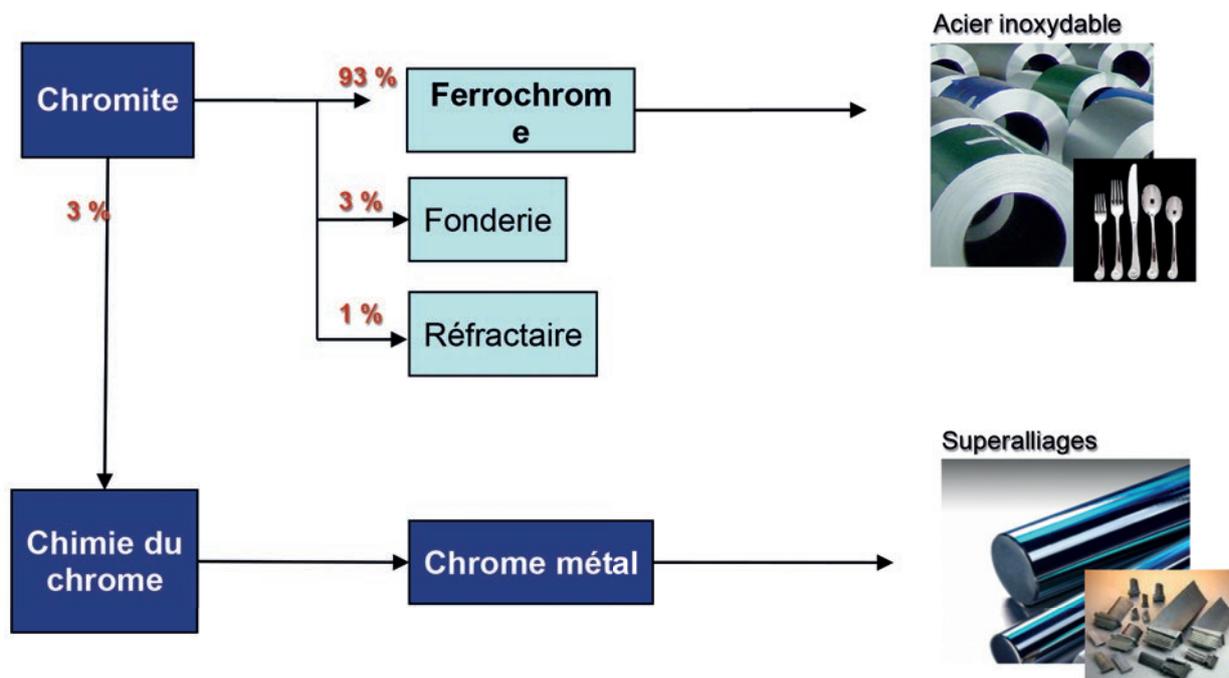


Figure1 : Utilisations de la chromite.

- dichromate de potassium : pyrotechnie, lithographie, pigment,
- acide chromique : chromage dur, pigments,
- sulfate de chrome : tannage du cuir.

La fabrication du chrome métal

Il existe trois grands procédés de fabrication du chrome métal :

- l'électrolyse de solutions contenant l'ion chrome Cr_3^+ (du ferrochrome ou de la chromite) ;
- électrolyse de l'ion Cr_6^+ (présent dans l'acide chromique CrO_3) ;
- la réduction aluminothermique de l'oxyde de chrome Cr_2O_3 .

Les problèmes environnementaux liés à la production de chrome électrolytique sont tels que la proportion de cette fabrication s'est réduite à 5 % de la production mondiale. La pureté obtenue la rend néanmoins indispensable pour certaines applications, notamment électroniques.

95 % de la production est donc réalisée par aluminothermie.

La réaction mise en jeu est : $Cr_2O_3 + 2Al \Rightarrow 2Cr + Al_2O_3$.

L'intérêt de cette réaction réside dans le fait qu'elle ne nécessite pas d'apport d'énergie. La réaction une fois démarrée grâce à un point chaud local est très exothermique et s'entretient tant qu'il reste des matières n'ayant pas réagi. Néanmoins, pour des questions d'homogénéité, l'apport d'un oxydant plus puissant (le CrO_3 provenant par exemple du bichromate de potassium) est nécessaire. À la fin de cette réaction, qui est réalisée dans un creuset réfractaire, on obtient du chrome métal recouvert par de l' Al_2O_3 (le corindon). Chaque opération permet d'obtenir

quelques tonnes de chrome (à noter que le corindon ainsi obtenu est valorisé dans les domaines des revêtements réfractaires et des abrasifs).

Le chrome métal dans le groupe Delachaux

Historiquement, le groupe Delachaux a été le principal concurrent du groupe Goldsmidt dès le début du XX^e siècle dans le secteur de la soudure aluminothermique des rails de tramway, puis de chemin de fer. C'est donc naturellement que le groupe Delachaux se lança lui aussi dans la production aluminothermique de chrome métal. Si l'on retrouve les premières traces de cette production au début des années 1930, c'est en 1955 que les choses démarrent vraiment, avec la contribution de Delachaux à la constitution du stock stratégique américain. En 1987, démarre la production de chrome dégazé sous vide, avec une pureté pouvant atteindre 99,9 %. Au fil du temps, la production a augmenté pour atteindre aujourd'hui les 10 000 tonnes par an, soit environ 25 % du marché mondial.

Les utilisations du chrome métal

Les caractéristiques principales du chrome métal sont sa température de fusion élevée, sa résistance à la corrosion et sa dureté. Toutes ces propriétés font que ce métal améliore les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion à chaud des alliages auxquels il est ajouté, notamment et principalement les superalliages base nickel ou cobalt. Les champs d'applications principaux de ces alliages sont les suivants.

Aéronautique civile et militaire

Les superalliages sont utilisés dans les parties chaudes de la chambre de combustion et de la turbine des tur-

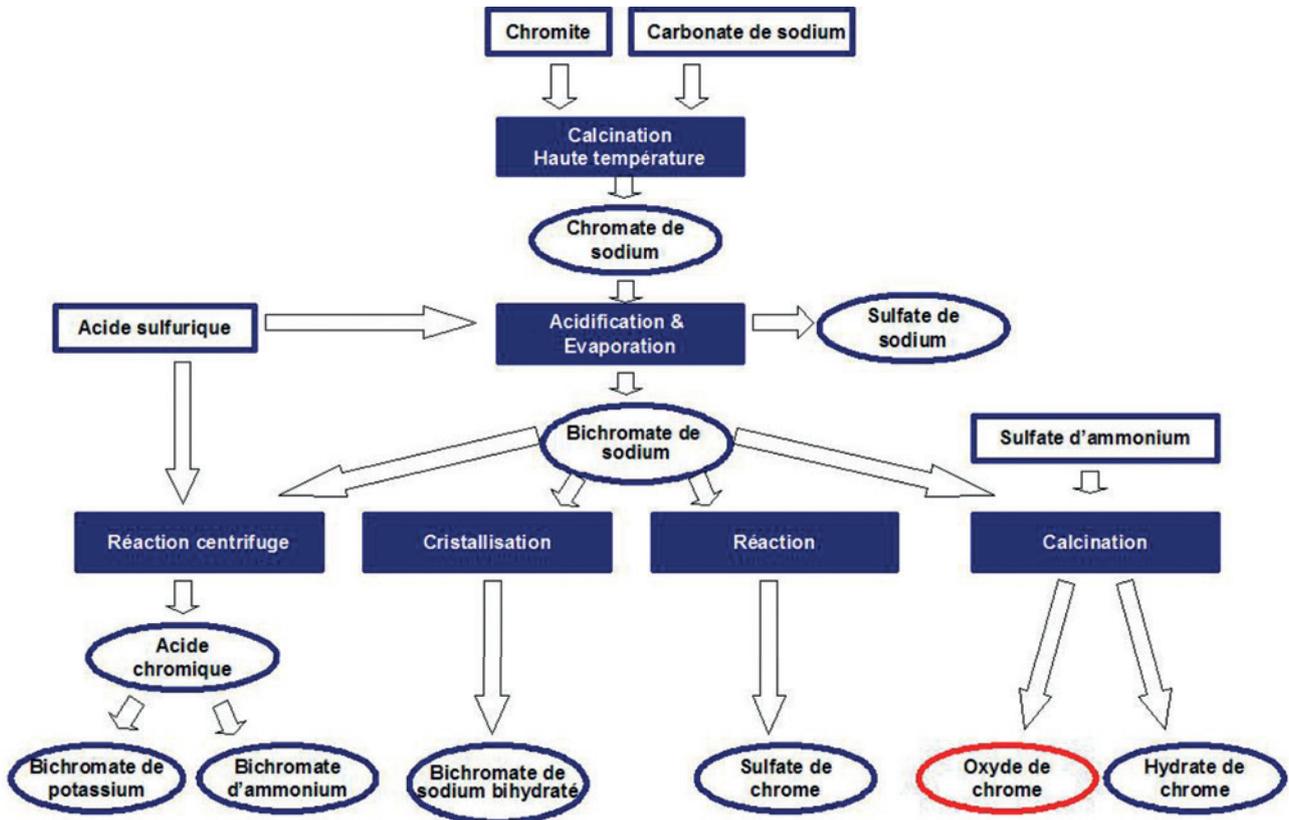


Figure 2 : La chaîne de valeur de la chimie du chrome.

boréacteurs (voir la Figure 3 ci-contre). Ces parties sont en effet soumises à de très hautes températures et à une forte corrosion due au carburant. Leur température en fonctionnement est même en hausse constante, puisque toutes les recherches vont dans le sens de la diminution de la consommation de carburant et de la réduction des émissions de CO_2 et de NO_x . À cela, une seule solution : l'augmentation du rendement des réacteurs, et donc de leur température de fonctionnement. Par ailleurs, les nouvelles générations de superalliages (*single crystal*) exigent une pureté beaucoup plus grande, et donc un raffinage plus poussé du chrome métal. La quantité de chrome métal dans un turboréacteur représente à peu près 10 % de son poids. En ce qui concerne l'aéronautique militaire, outre le fait que les réacteurs sont soumis à des sollicitations encore plus fortes, il faut aussi y ajouter toute la partie propulsion des missiles et les têtes d'ogives.

Turbines terrestres pour la production d'énergie

Leur fonctionnement en régime maximal soulève la même problématique que celle des turboréacteurs aéronautiques. On peut y ajouter une sollicitation plus importante en termes de corrosion, du fait de la diversité des gaz utilisés (gaz naturel, LPG, gaz issu de la gazéification du charbon, etc.). De plus, ce type de centrale vient de plus en plus en complément d'installations éoliennes ou solaires pour pallier au manque de vent ou de soleil. Cela exige une très grande flexibilité, avec des arrêts/démarrages fréquents, et ce sont lors de ces phases que la corrosion est la plus forte du fait d'un mauvais rendement de la turbine.

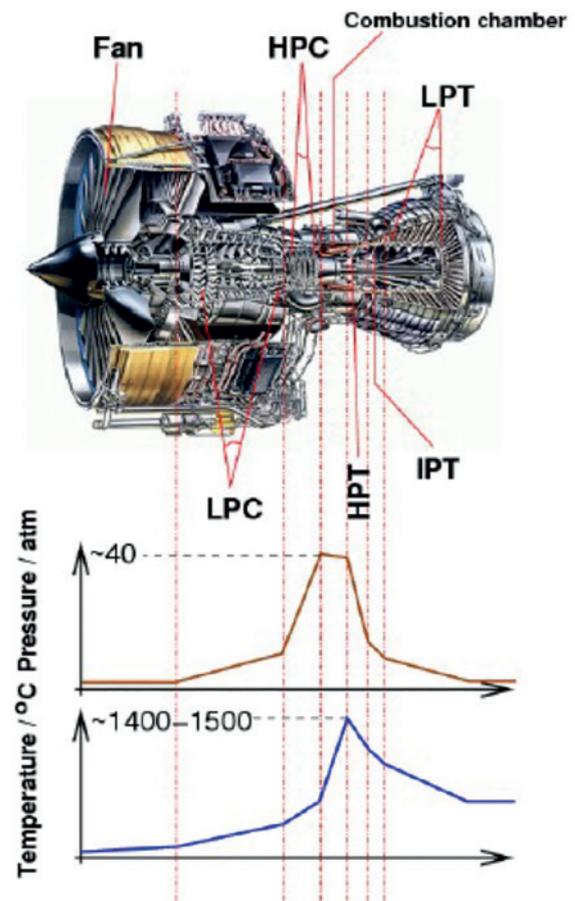


Figure 3 : Répartition des températures dans un turboréacteur.

Qualité	Teneur en chrome / caractéristiques	Applications
Airmelt (morceaux)	99% min. (DCX Chrome 99,4%)	Superalliages
Chrome sous-vide ATVG (morceaux)	99.6%	Superalliages qualité supérieure
Poudre de chrome	Standard & faible teneur en gaz	<ul style="list-style-type: none"> Industrie de l'aluminium Soudage Métallurgie des poudres (SOFC, contacteurs Cu-Cr, superalliages, cibles)
Double dégazé sous vide - DDB (briquettes)	99.8% min Cr, faible teneur en gaz (O, N)	Superalliages critiques
Double dégazé sous vide - DDB (briquettes) bas soufre	99.8% min Cr, faible teneur en gaz (O, N) DDB ULS (S <10ppm) DDB XLS (S <5ppm)	Superalliages critiques aéronautique

Figure 4 : Récapitulatif des différentes qualités de chrome métal.

Nucléaire

Les tubes des générateurs de vapeur sont l'unique interface entre les circuits primaires et secondaires dans les centrales à eau pressurisée. Ils sont soumis à de fortes pressions sous des températures élevées et l'on attend d'eux, bien sûr, une excellente fiabilité. Ils sont donc réalisés en alliage base nickel contenant un fort pourcentage de chrome. Ces alliages sont aussi utilisés dans les chaudières des bâtiments de surface et des sous-marins à propulsion nucléaire.

Pétrochimie et industrie chimique

La recherche pétrolière, qui s'effectue de plus en plus en *offshore* à grande profondeur et donc sous de fortes pressions et dans des ambiances chargées en hydrogène sulfuré (H₂S), consomme également une partie de ces superalliages. L'industrie chimique en utilise aussi, pour les réacteurs et les cuves de ses unités de désulfuration, de crackage...

Automobile

Les turbines de turbocompresseur sont en superalliages de type inconel, c'est également le cas des soupapes.

Piles à combustible

La poudre de chrome métal est utilisée pour la fabrication de plaques d'interconnexion CFY (Chrome Fer Yttrium) pour assurer la conduction électrique au sein des piles à combustible à oxyde solide (SOFC) fonctionnant à haute température et destinées à la production d'électricité.

Les acteurs du chrome métal

Exception faite du chrome électrolytique (où le nombre des producteurs se réduit à deux, un russe et un chinois), la fabrication du chrome métal se répartit entre sept acteurs. Ce nombre s'est réduit avec l'arrêt de l'activité de plusieurs petits producteurs en Chine, pour des raisons environnementales. Pour la haute pureté, il y a DCX Chrome,

le groupe Delachaux (en France), AMG (au Royaume-Uni), JFEM (au Japon), qui utilise un procédé par silicothermie, et Sing Horn (en Chine). Pour les qualités standard, s'y rajoute Novotroitsk (Russie), Kluchevsky (Russie) et Jinzhou Ferroalloy (Chine).

Dans ce panorama mondial, il faut ajouter qu'en amont de la filière, quatre pays (l'Afrique du Sud, le Zimbabwe, le Kazakhstan et l'Inde) concentrent 87 % de la production mondiale de chromite. En ce qui concerne la chimie du chrome, quatre pays (la Chine, le Kazakhstan, la Russie et les États-Unis) représentent 70 % de la production.

Aspect environnemental et législatif

Si le chrome métal proprement dit est inoffensif, certains composés du chrome servant à son élaboration, notamment le chrome hexavalent (Cr₆₊), sont classés CMR (cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques). L'utilisation de ces matières est donc soumise, d'une part, à l'échelle européenne, à la directive REACH et, d'autre part, en France, à la réglementation des installations classées, qui imposent des limites pour les rejets polluants atmosphériques et aqueux.

Par ailleurs, il existe des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP). En France, ces valeurs viennent d'être réduites drastiquement par voie de décret, passant de 50µg/m³ d'air à 1µg/m³. Il est à noter que cette législation n'est pas homogène à l'intérieur même de l'Europe, puisque chaque pays a ses propres valeurs de référence (par exemple, 50µg/m³ pour le Royaume-Uni et l'Allemagne). Les autres pays extracommunautaires impliqués dans la fabrication de chrome métal (Chine, Russie) n'ont, quant à eux, pas de réglementation connue en la matière.

Concernant DCX Chrome, tout a été mis en œuvre pour respecter les normes, et ce au prix de lourds investissements. Toutes les fumées sont captées, lavées, et l'eau de lavage est elle-même épurée pour qu'il n'y ait aucun rejet

dans l'environnement. Tout a été mis en œuvre au niveau de la captation de poussières pour assurer la protection des travailleurs. Mais la disparité des normes en vigueur à travers le monde pose un problème de compétitivité. En effet, cette performance environnementale qui fait qu'une industrie est « propre » n'est pas reconnue par les clients et elle n'est donc pas valorisable en tant que telle sur le marché concurrentiel actuel.

Comme on le voit, le chrome métal est présent dans de nombreuses applications, qui ont pour beaucoup un caractère stratégique. La Commission européenne vient d'ailleurs d'insérer le chrome dans sa base des matériaux critiques. Les fabricants de superalliages sont majoritaire-

ment européens, américains et japonais. Il en va de même en ce qui concerne les clients finaux, par exemple Airbus et Boeing, pour ne parler que du secteur de l'aéronautique.

Le chrome métal est, quant à lui, à 40 % européen, le reste étant russe ou chinois. Mais sa disponibilité dépend de l'approvisionnement dans la filière de la chimie du chrome, d'une part, et de règles législatives cohérentes et équitables, d'autre part. Il est important, dans les développements en cours, d'adopter une démarche globale impliquant tous les acteurs de la chaîne de valeur ainsi que les instances législatives afin de permettre à l'Europe de maintenir une position forte en matière d'approvisionnement en chrome.

Les enjeux européens de l'approvisionnement en titane

Par Patrick DELABORDE

Directeur du Développement commercial d'UKAD, Aubert et Duval - groupe ERAMET

La consommation mondiale de titane métal croît de manière importante. En Europe, la consommation est elle aussi en forte croissance, tirée qu'elle est par le marché de l'aéronautique civile. Les alliages de titane sont utilisés dans la fabrication de pièces critiques, là où il n'existe pas de produit de substitution. Au gré des restructurations des acteurs industriels, l'Europe est devenue dépendante de sociétés américaines et russes. Dans un contexte géopolitique tourmenté qui souligne la fragilité d'une telle situation, l'émergence d'une filière titane française est une réponse.

Le titane, un métal aux propriétés remarquables

Le titane présente des propriétés remarquables :

- d'une densité près de deux fois moins importante que celle des aciers (56 %), ses caractéristiques mécaniques sont comparables, voire supérieures à celles des aciers de construction,
- sa résistance à la corrosion est remarquable (eau de mer, milieux acides) et, de plus, il résiste à l'abrasion,
- le titane est biocompatible,
- ses propriétés élastiques sont elles aussi supérieures à celles de l'acier,
- il est amagnétique.

Ses excellentes propriétés en matière de résistance spécifique à un large éventail de températures en font un matériau particulièrement intéressant dans les domaines de l'aéronautique, du spatial et de la défense.

Sa résistance à la corrosion en fait un matériau largement utilisé notamment par les industries chimiques (industrie du chlore, de certains acides), par celles du pétrole et du gaz et les industries nécessitant des échangeurs de chaleur.

De ce fait, il est un matériau de choix pour les échangeurs des centrales nucléaires (en particulier pour celles implantées en bordure de mer), pour les usines de dessalement d'eau de mer, pour les terminaux gaziers...

On utilise le terme générique « titane », mais en fait nous devrions plutôt parler de titane allié ou d'alliages à base de titane, comme l'on parle d'acier (par rapport au fer) ou de superalliages à base de nickel ou de cobalt.

Les titanes non alliés (ou très faiblement alliés, avec un maximum de 1 % d'éléments d'addition) font partie des « titanes commercialement purs » (Ti CP) et sont essen-

tiellement utilisés pour des applications en chimie et dans le domaine de l'anticorrosion.

Dès lors que des applications industrielles nécessitent d'améliorer la résistance mécanique ou la résistance aux hautes températures, de nouveaux alliages de titane sont développés variant de quelques pourcents d'éléments d'addition à près de 25 %. Au-delà, on entre dans la catégorie des composés intermétalliques, tels que les aluminures de titane qui trouvent des applications dans l'aéronautique pour les aubages des turbines ou dans certains turbocompresseurs automobiles.

Les quatre grandes familles de marchés qui déterminent la consommation mondiale de titane

On distingue généralement quatre grandes familles de marchés consommateurs de titane :

- a) l'aéronautique civile, avec les applications structurales (c'est-à-dire des pièces et assemblages en titane entrant dans la constitution des fuselages, des ailes, des mats supports de réacteur, des trains d'atterrissage) et les applications moteur (principalement dans la partie compresseur) ;
- b) les applications militaires aéronautiques, mais aussi terrestres (allègement, blindage) et marines ;
- c) les applications industrielles qui regroupent plusieurs segments : la production d'énergie (centrales nucléaires et thermiques), les usines de dessalement d'eau de mer et les industries de *process* (chimie et plastiques, pétrole et gaz, échangeurs de chaleur industriels ou domestiques) ;
- d) les applications dans des biens de consommation relevant du médical (implants utilisés en traumatologie, en orthopédie), dans des articles de sport et de loisir, dans des articles de mode (en particulier, en lunetterie)...

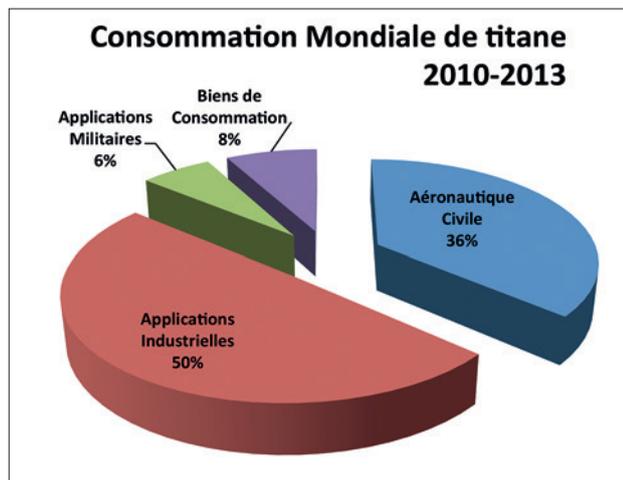


Figure 1.

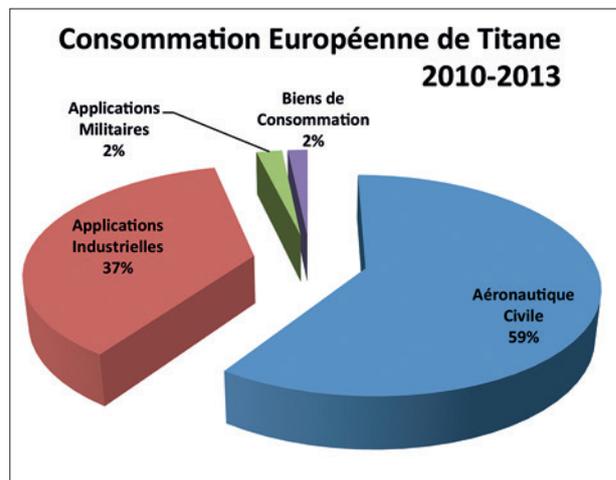


Figure 2.

Hormis quelques applications dans les sports motorisés ou pour la construction de véhicules de très haut de gamme, le titane est peu utilisé en automobile, et ce pour des raisons de coût.

Une estimation de la demande mondiale de titane et une évaluation par zone géographique ont été publiées dans le rapport public « Étude de veille sur le marché Titane 2012-2014 », rédigé par Pierre-François Louvigné. Le Tableau 1 ci-dessous met en évidence l'impact sur la consommation mondiale de deux projets de construction d'usines de dessalement au Moyen-Orient en 2011 et 2012.

Les consommations moyennes des quatre années 2010 à 2013 (voir la Figure 2 ci-dessus) montrent que ce sont les applications aéronautiques civiles qui consomment très majoritairement du titane en Europe : cette tendance se renforce du fait de la croissance du marché aéronautique et de l'atonie des marchés industriels ou de l'énergie.

Le marché aéronautique

Selon les projections les plus récentes diffusées par Boeing et Airbus, 34 000 avions moyen- et long-courriers vont être produits entre 2015 et 2034 pour satisfaire la demande, soit 1 700 avions par an !

Les cadences actuelles de production des deux avionneurs, qui atteignent des niveaux record (avec 1 397 livraisons en 2015) ne sont pas encore à ce niveau. Les carnets de commandes continuent à croître (ainsi, en 2015, le total

des commandes nettes (1 804 avions) était supérieur aux livraisons). Cela conduit inévitablement à des hausses de cadence pour les prochaines années, qui ont déjà été annoncées par les avionneurs.

Et le titane, dans tout cela ?

La nécessité de réduire les consommations de carburant tant pour des raisons de coût d'exploitation que pour répondre à la nécessité de réduire les émissions polluantes conduit à diminuer la masse des avions. Ainsi, des ruptures technologiques sont apparues sur les long-courriers de dernière génération, avec l'utilisation massive de composites pour les structures. En parallèle, la part de titane augmente en raison de son excellente compatibilité avec les composites carbonés (dilatation, électromagnétisme, corrosion) et, bien sûr, de sa résistance spécifique. Le titane atteint 15 % du poids des structures dans les A350 et les B787. L'utilisation de titane s'est aussi développée dans les trains d'atterrissage, des alliages de titane spécifiques permettant de réduire le poids de ces ensembles.

La recherche d'une optimisation du poids des avions en relation avec les remotorisations engagées sur les appareils A320 et B737 (puis, aujourd'hui, sur les B777 et A330) s'accompagne aussi d'une hausse de la consommation de titane dans la construction de ces avions.

Mais les évolutions technologiques dans le domaine des moteurs ne sont pas aussi favorables à l'essor du titane. Ainsi, certains modules des compresseurs abandonnent

x 1000 tonnes	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aéronautique commerciale	14-18	17-20	20-24	24-28	34-38	42-46	29-30	35-39	38-44	40-46	42-48	48-55
Applications industrielles	20-23	23-25	22-25	25-27	32-34	36-38	26-28	47-56	66-69	60-63	45-50	46-53
Applications militaires	8-10	9-12	9-12	11-13	10-12	10-11	8-9	7-8	7-8	6-7	6-7	8-9
Biens de consommation	6-7	7-8	7-8	9-10	11-13	11-13	7-9	8-10	9-12	8-10	6-9	8-10
Total	48-58	56-65	58-69	69-78	87-97	99-108	70-76	97-113	120-133	114-126	99-114	110-127

Tableau 1.

le titane et l'on assiste à l'apparition des composés intermétalliques à base de titane dans la partie turbine. La hausse de la consommation de titane sur ce marché est liée essentiellement aux augmentations des cadences constatées dans la production, et non à l'augmentation de la proportion de titane dans les matériaux consommés.

Les applications structure sont ainsi le principal contributeur à la hausse de la consommation de titane en aéronautique au travers de l'augmentation du poids de titane consommé par avion et surtout des hausses des cadences de production des avions.

La production de titane métal

La matière première

Le titane (Ti) est un élément chimique abondant. Il se classe au neuvième rang de tous les éléments chimiques présents dans la croûte terrestre et au quatrième rang des métaux (après le fer, l'aluminium et le magnésium).

Cependant, la production de titane métal reste limitée du fait de la complexité de sa mise en œuvre et des coûts de production élevés qui en résultent.

Dans la nature, on trouve du titane sous forme oxydée principalement dans deux espèces minérales les plus exploitées, l'ilménite et le rutile.

L'essentiel de cette matière première est utilisée sous la forme de dioxyde de titane (TiO₂) pour servir de pigment et d'agent de blanchiment dans de nombreuses industries : peinture, papier, plastique, cosmétique, industries alimentaires...

Moins de 7 % des ressources en titane (ilménite et rutile) sont utilisées pour la fabrication de titane métal.

La fabrication du titane métal

Bien que découvert à la fin du XVIII^e siècle, le titane n'a pu être produit industriellement qu'au milieu du XX^e siècle grâce à la mise au point du procédé Kroll. Il reste aujourd'hui encore le principal procédé de production d'extraction du titane à partir d'oxyde. C'est une succession de réactions chimiques qui permet d'aboutir à la formation de titane sous la forme d'un solide poreux faisant penser à des éponges, d'où le nom d'éponges de titane.

Ce procédé particulièrement complexe nécessite des installations lourdes, un pilotage précis et une gestion rigoureuse des aspects sécuritaires et environnementaux de la production.

En ajoutant certains éléments aux éponges de titane obtenues, une électrode consommable est constituée. Une première fusion est réalisée dans un four de refusion à arc sous vide, qui est souvent suivie d'une seconde refusion dans le même type d'équipement.

Les procédés de transformation permettant d'obtenir des pièces conduisent à la génération de chutes de matière aux différentes étapes du processus. Les morceaux de métal ou les copeaux d'usinage, après un tri adéquat, constituent une source de matière première. Des moyens



L'un des premiers lingots de titane produit au Kazakhstan, société UKTMP.

de fusion spécifiques ont été mis au point pour permettre la production de lingots à partir de ces déchets.

La fabrication de pièces en titane

Les lingots sont ensuite transformés à chaud par forgeage (laminage) pour obtenir des demi-produits : barres, brames, tôles, fils.

Les pièces de forme sont obtenues par matricage à partir de barres. Les pièces subissent des traitements thermiques avant d'être usinées aux formes et aux dimensions finales souhaitées.

Ces procédés sont identiques à ceux mis en œuvre pour la production de pièces issues d'autres matériaux métalliques.

La fabrication des pièces issues de tôles, barres ou pièces matricées conduit à la génération d'un poids de chutes important. Un ratio de 10 à 1 entre le poids de lingot mis en œuvre et le poids de la pièce finie est courant, malgré toutes les optimisations technologiques qui ont pu être apportées à chacune des étapes.

Les freins et les opportunités

Le titane, un matériau cher à la base + des pertes importantes de matières liées aux procédés de fabrication, l'équation conduit inévitablement à la production de pièces coûteuses.

De fait, la production des pièces en titane se limite aux applications qui permettent de retirer un avantage compétitif grâce aux caractéristiques remarquables des alliages contenant du titane.

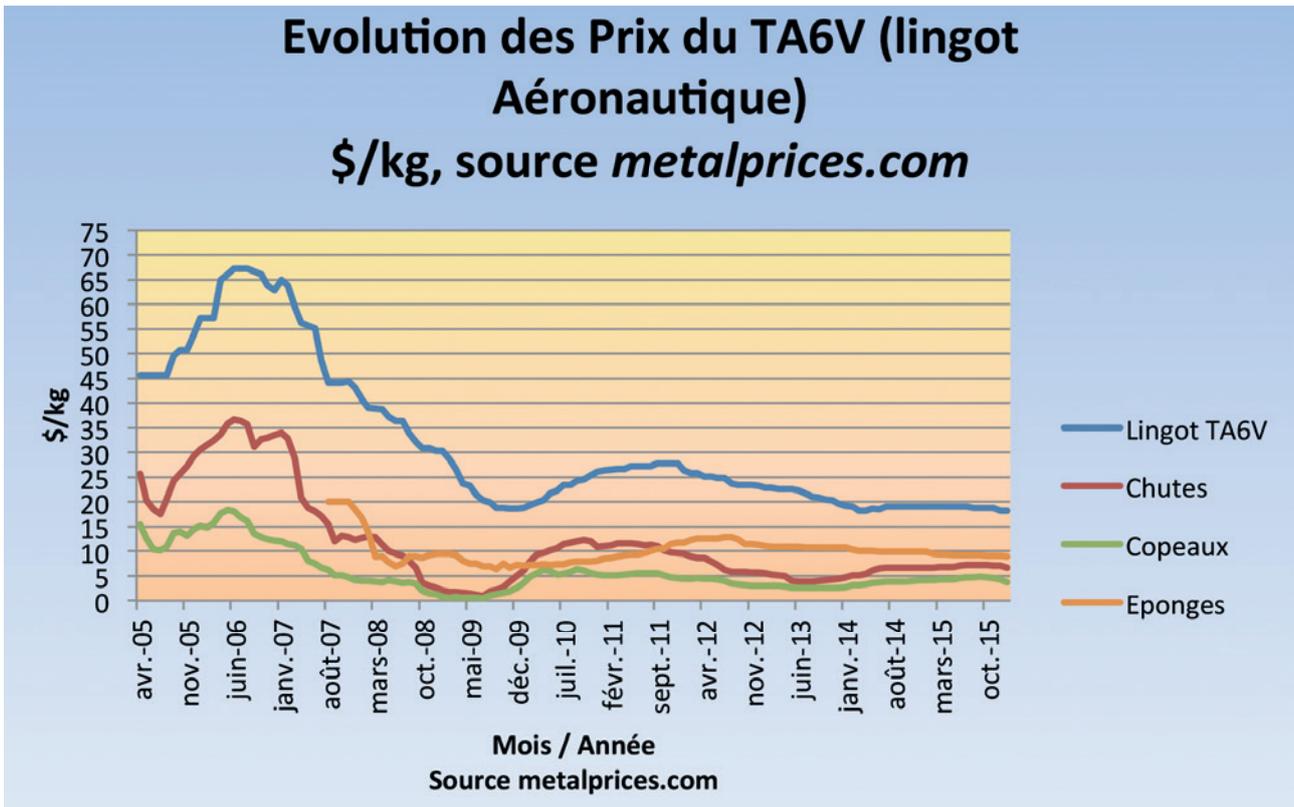


Figure 3

Aujourd'hui, les nouveaux procédés de fabrication additive (impression 3D) peuvent permettre d'apporter des solutions alternatives compétitives, au travers essentiellement de la limitation des pertes de matière. La production des poudres de titane nécessaires à une fabrication additive reste toutefois coûteuse.

Les limites en termes de dimensions et de contrôlabilité n'en font toutefois pas un procédé en mesure d'éliminer la voie conventionnelle par enlèvement de matière.

L'intérêt de l'Europe est de pouvoir disposer de sources de production européennes de titane destiné au marché aéronautique

Un enjeu fort en termes d'approvisionnement et d'indépendance

Jusqu'au début des années 1990, une multitude d'acteurs étaient présents à chacune des étapes de production, y compris en Europe. Mais l'évolution des exigences aéronautiques, les crises économiques et les stratégies industrielles ont conduit à une phase de concentration des élaborateurs occidentaux dans les années 1990 au sein de trois sociétés : Allegheny Technologies Inc. (ATI), Titanium Metals Corp. (Timet) et RTI International Metals (RTI).

L'activité du titane en Europe a ainsi été de fait contrôlée par ces acteurs américains et les développements en matière de production du titane ont lieu essentiellement aux États-Unis.

La société russe de production de titane VSMPO a profité de l'ouverture des marchés occidentaux pour prendre le *leadership* des marchés aéronautiques. VSMPO est une société qui intègre l'ensemble de la filière titane, depuis la production d'éponges jusqu'à celle de pièces finies.

Ensemble, ces quatre acteurs représentent 90 % des parts de marché dans l'aéronautique (source : ITA 2014, exposé AeroLytics).

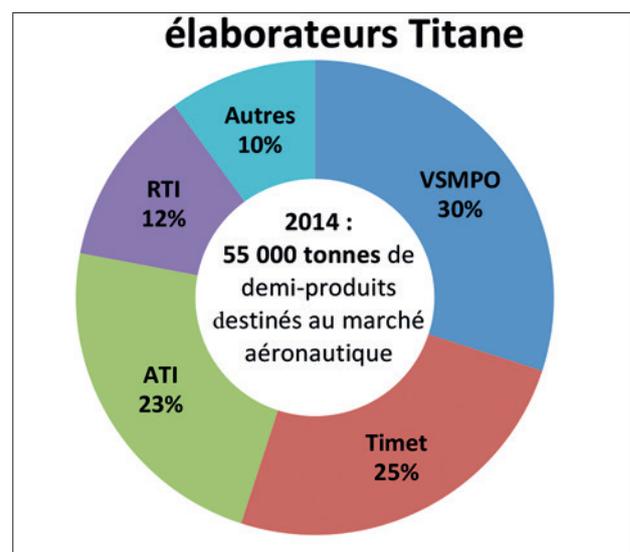


Figure 4.

Depuis quelques années, les acteurs américains sont entrés en phase d'intégration verticale soit à travers l'achat



Photo © Cabinet d'architecture JALICON

L'entreprise UKAD implantée sur le territoire de la commune de Saint-Georges-de-Mons (Puy-de-Dôme).

d'élaborateurs par des transformateurs (Timet et RTI ont rejoint respectivement les groupes PCC en 2013 et ALCOA en 2015), soit, à l'inverse, par l'achat de transformateurs/matriciers (comme ATI, qui a acquis le matricier Ladish en 2011).

VSMPO poursuit son développement en misant sur l'attractivité d'une zone économique spéciale pour attirer à elle les consommateurs ou des acteurs industriels complémentaires.

Quelques acteurs se partagent les 10 % restants (dont UKAD entré en production en 2012), une entité dédiée au forgeage de lingots de titane. UKAD est une *joint venture* entre UKTMP (producteur *World Class* d'éponges de titane au Kazakhstan et élaborateur de lingots) et Aubert & Duval, société du groupe Eramet dédiée à l'élaboration d'aciers et de superalliages, ainsi qu'au forgeage et au matriçage de pièces destinées aux marchés les plus exigeants.

Jusqu'au début des années 2000, le marché du titane est resté relativement stable en ce qui concerne son débouché aéronautique. Dans la seconde partie de la décennie, l'annonce des lancements des programmes A380, B787 et A350 a montré la faiblesse de l'offre par rapport à la demande, et cela a conduit à une hausse sensible du prix des lingots de qualité aéronautique et de l'ensemble des matières premières (éponges et chutes de titane), avant que celui-ci ne revienne aux niveaux précédents suite aux retards enregistrés dans la réalisation des programmes

précités et de la mise en place de capacités supplémentaires de production de titane.

Il n'en reste pas moins que l'industrie aéronautique européenne dépend à hauteur de 90 % des États-Unis et de la Russie pour ses besoins en titane. Ainsi, les tensions nées de la crise ukrainienne ont révélé la fragilité d'une telle situation.

Un enjeu fort en termes économique et environnemental

Les matières premières consommées par les élaborateurs américains pour la fabrication de lingots ont évolué pour atteindre 63 % de chutes et 37 % d'éponges en 2014 (source : USGS). Cette augmentation du recyclage traduit une volonté d'optimisation économique de l'ensemble de la chaîne.

L'aéronautique concentrant les moyens de production dans des usines ou des ateliers dédiés, il est ainsi plus facile de capter et de valoriser les chutes de ce métal noble.

La Chine a mis en place des capacités considérables de production d'éponges de titane pour répondre à ses besoins dans le cadre de son développement industriel. Ces éponges ne sont pas d'un niveau de qualité suffisant pour satisfaire les besoins aéronautiques. En parallèle, le Japon a développé ses capacités de production d'éponges de qualité aéronautique pour devenir ainsi le premier exportateur mondial de ce produit vers les États-Unis.

Capacités de production, pièces aéronautiques

	Elaboration / Demi-produits	Matriçage	Usinage	Assemblage
Amérique du Nord	45%	50%	50%	45%
Europe + Kazakhstan	10%	30%	35%	35%
Russie	30%	15%	5%	<1%
Asie	15%	5%	10%	15%
Autres	0%	0%	<1%	5%

Tableau 2.



EcoTitanium, l'usine dédiée à la production de lingots de titane de qualité aéronautique à partir de chutes recyclées, à Saint-Georges-de-Mons (Puy-de-Dôme).

Au plan environnemental, des études d'impact montrent que la filière recyclage du titane émet quatre fois moins de gaz à effet de serre que la filière primaire correspondante.

Un exemple de réponse de l'Europe à sa dépendance : la construction d'une entité dédiée à l'élaboration de lingots en alliages de titane à partir de chutes recyclées

L'Europe est devenue au fil du temps le premier exportateur de chutes de titane vers les États-Unis (source : USGS), avec 9 500 tonnes en 2014.

La comparaison des capacités installées sur la filière titane (source : Aerolytics), amendées en considérant qu'UKTMP fait partie de la zone Europe compte tenu de son partena-

riat avec Aubert & Duval dans le cadre d'UKAD, montre un net déficit des capacités de production de titane en Europe.

Dans ce contexte, UKAD, l'État Français (au travers de l'ADEME) et le Crédit Agricole Centre France se sont associés pour créer EcoTitanium, une usine dédiée à l'élaboration de lingots de titane de qualité aéronautique à partir de chutes recyclées. La première pierre de cette unité de production a été posée en présence du Premier ministre, le 27 avril 2015, à Saint-Georges-de-Mons (en Auvergne-Rhône-Alpes), à côté de l'usine UKAD et à proximité du site historique Aubert & Duval des Ancizes (Puy-de-Dôme). EcoTitanium a pour ambition d'engager la qualification de ses premiers lingots en 2017, elle deviendra ainsi un atout de premier ordre pour l'industrie aéronautique européenne.

Le lithium, un métal au cœur des enjeux industriels, économiques et environnementaux du XXI^e siècle

Par Hughes-Marie AULANIER

Chargé de mission Stratégie et Développement, groupe ERAMET

Métal alcalin (mou, blanc argenté), le lithium possède de nombreuses propriétés le destinant à un large champ d'applications. C'est le métal le plus léger sur Terre, il possède la plus grande chaleur massique, ainsi qu'un grand potentiel électrochimique. Enfin, il détient une densité énergétique deux fois supérieure à l'alternative la plus proche, le destinant idéalement aux stockages embarqués d'énergie.

En 2025, le marché des batteries lithium-ion devrait ainsi représenter plus de la moitié de la demande mondiale en lithium contre près d'un tiers actuellement, dans un marché mondial qui aura lui-même au minimum doublé en taille, d'après la plupart des analystes et des acteurs du marché.

Ce lithium sera principalement extrait des saumures du « Triangle du lithium », une vaste région à cheval sur le Chili, la Bolivie et l'Argentine.

Le marché du lithium

La demande

Les applications du lithium

Les principales caractéristiques du lithium sont :

- sa forte réactivité électrochimique,
- sa chaleur massique, la plus élevée de tous les solides,
- son faible coefficient d'expansion thermique (dilatation).

Ces propriétés uniques destinent le lithium à un vaste champ d'applications, dont les principales sont les suivantes :

- il est utilisé depuis des décennies pour la fabrication de verres et de céramiques. Le lithium en réduit la viscosité et abaisse le point de fusion (pour les verres) ou la température de cuisson (pour les céramiques). C'est un marché mature, qui représente le second débouché pour la production de lithium, soit environ 20 %. Il croît sensiblement au même rythme que le PIB mondial ;
- utilisé dans 70 à 80 % des graisses, le lithium y agit comme agent épaississant offrant une bonne résistance à l'eau et à la chaleur. Ce marché compte pour 9 % de la demande en lithium et connaît lui aussi une croissance équivalente à la croissance du PIB mondial ;
- un autre débouché est la métallurgie : il entre dans les opérations de coulée continue, mais aussi dans la fabri-

cation d'alliages légers aluminium-lithium utilisés dans l'aéronautique. Cela représente environ 9 % de la demande totale ;

- enfin, le lithium sert dans le traitement de l'air et dans le domaine pharmaceutique, en particulier pour le traitement de troubles psychiques bipolaires (à hauteur des 7 % de la demande).

Mais l'application majeure du lithium est désormais le stockage d'énergie sous la forme de batteries lithium-ion, un débouché qui connaît (et de loin) la croissance la plus rapide. Il a compté pour 28 % de la demande totale en lithium en 2014, avec une croissance annuelle estimée à environ 14 %. En 2025, le secteur des batteries devrait ainsi représenter plus de la moitié de la demande du marché mondial du lithium. Cela résulte directement de la forte croissance de la production de batteries par des grands acteurs du secteur, tels que LG Chem, Panasonic (en association avec le constructeur automobile Tesla), BYD ou Foxconn. La capacité de stockage, qui est de 35 GWh environ actuellement, devrait être multipliée par quatre et augmenter d'environ 100 GWh (!) d'ici à 2021, si l'on se réfère aux projets déjà engagés par ces grands acteurs (voir la figure 1 de la page 94).

Ces projets sont destinés à alimenter la croissance du marché des véhicules électriques. Un scénario relativement prudent (se basant sur une production annuelle d'environ 1,5 million de véhicules électriques en 2025, soit 1,7 % du



Wang Chuanfu, fondateur et président-directeur général de BYD Auto, octobre 2009.

« En 2025, le secteur des batteries devrait ainsi représenter plus de la moitié de la demande du marché mondial du lithium. Cela résulte directement de la forte croissance de la production de batteries par des grands acteurs du secteur, tels que LG Chem, Panasonic (en association avec le constructeur automobile Tesla), BYD ou Foxconn. »

marché automobile total) conduirait la demande en lithium de ce secteur des batteries à être multipliée par 4, passant de 50 000 à 200 000 tonnes de *lithium carbonate équivalent* (LCE) par an. Le foisonnement de nouveaux modèles de véhicules électriques innovants (tels ceux de Tesla) et leurs ventes (en forte hausse actuellement) crédibilisent cette hypothèse.

Ces estimations seront amenées à être réactualisées en fonction de l'évolution technologique des batteries qui seront commercialisées dans les prochaines années. Cependant, selon le *Department of Energy* américain et le *Fraunhofer Institute*, l'institut allemand faisant référence en la matière, le lithium restera l'élément clé de ces batteries, la technologie évoluant du lithium-ion vers le lithium-soufre (après 2020), puis vers le lithium-air (après 2030). En raison des propriétés physico-chimiques uniques du lithium, sa substitution par un autre métal n'est donc pas à l'ordre du jour.

En résumé, la demande en lithium par application en 2014 et sa projection en 2025 se répartit comme indiqué dans la Figure 2 en bas de la page suivante.

La demande actuelle et future

La demande globale en lithium était de 176 kilotonnes (kT) de *lithium carbonate équivalent* (LCE) en 2014. Ce marché a connu une croissance de 9 % par an entre 2010 et 2014, et l'on prévoit une poursuite de cette hausse à un rythme de 8 % par an en moyenne pour la prochaine décennie (une croissance fortement tirée par l'utilisation du lithium dans les batteries lithium-ion).

Sur la base d'hypothèses raisonnables, en particulier en termes de croissance du marché des véhicules électriques, un doublement de la demande totale en lithium est attendu d'ici à 2025, pour atteindre environ 400 kT de LCE à cet horizon (voir la Figure 3 de la page suivante).

L'offre

Les ressources

Dans la nature, on trouve le lithium sous deux formes :

- une forme dissoute dite saumurale (dans les aquifères de certains déserts de sel (en Chine, en Amérique latine et aux États-Unis)),
- une forme solide, appelée spodumène.

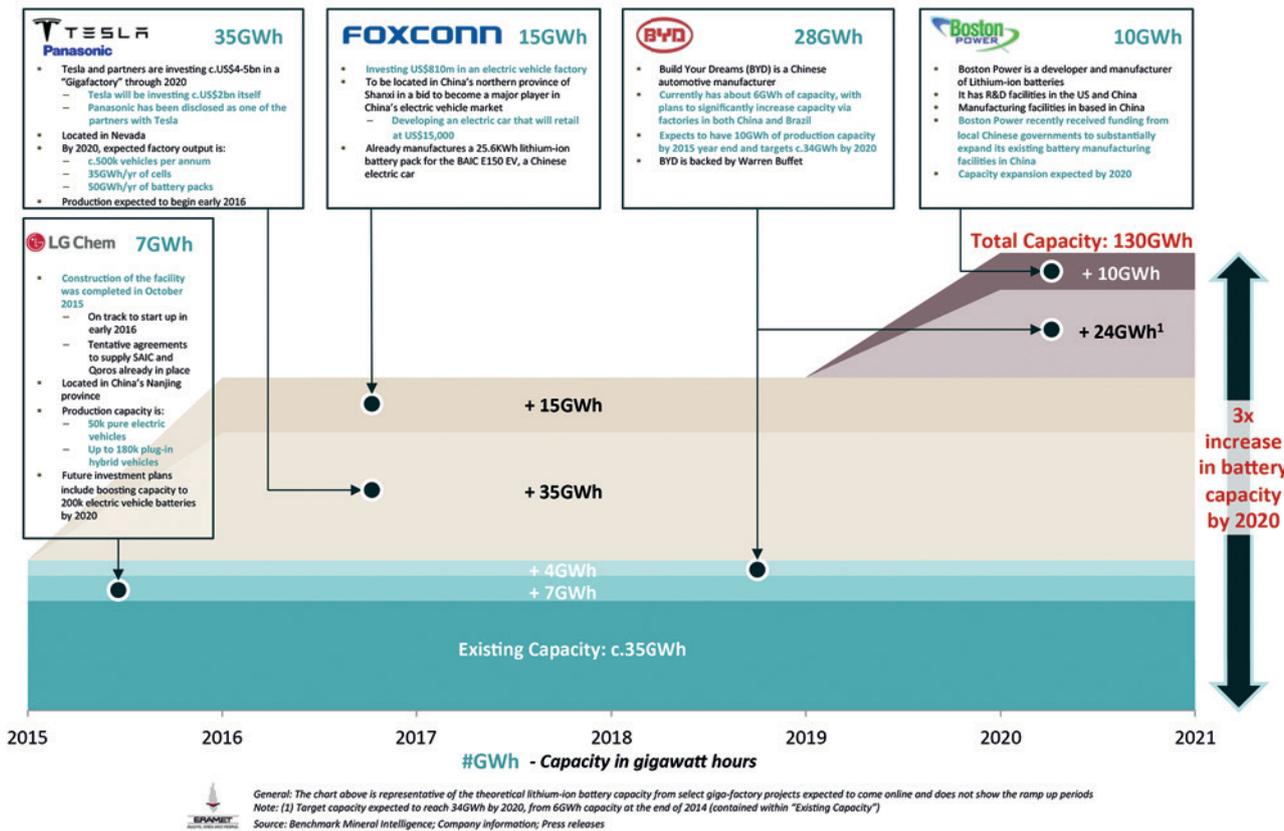


Figure 1 : Évolution de la capacité de production de batteries (en GWh).
Source : Données publiques des producteurs de batteries.

Selon les estimations (USGS, Roskill), les ressources saumurales représenteraient de 60 à 80 % des ressources totales en lithium. Elles se concentrent principalement dans le Triangle du Lithium, une région à cheval sur les territoires chilien, bolivien et argentin.

L'industrie du lithium étant relativement récente, il est difficile d'avoir une estimation précise de ses ressources totales présentes sur la planète. L'USGS estime cependant à 212 millions de tonnes LCE (ou à 40,7 millions de tonnes de lithium métal) les ressources globales sur la planète ⁽¹⁾, soit plus de 1 000 années de consommation au rythme de 2014, ou 500 ans au rythme estimé pour 2025. Les inquiétudes sur la capacité de produire suffisamment de

lithium pour alimenter les besoins futurs liés à un stockage d'énergie à plus grande échelle peuvent donc être tempérées.

La production actuelle et la production future

Quatre grands producteurs de lithium contrôlent aujourd'hui environ 85 % de la production totale de lithium dans le monde : Albemarle (États-Unis) et SQM (Chili) au Chili, FMC (États-Unis) en Argentine et Talison (Australie) en Australie. Cette concentration importante est ce-

(1) <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2016-lithi.pdf>

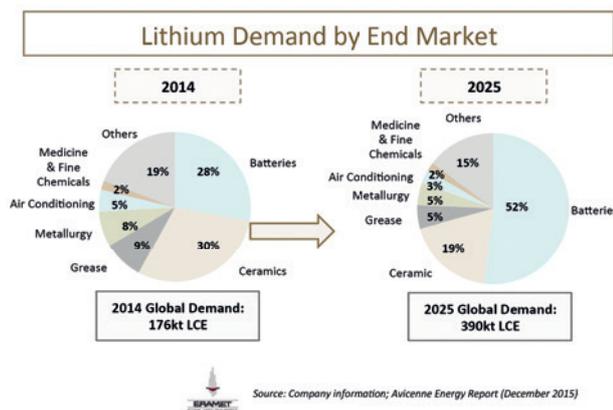


Figure 2 : Demande de lithium par les secteurs industriels finaux.
Source : Avicenne Energy.

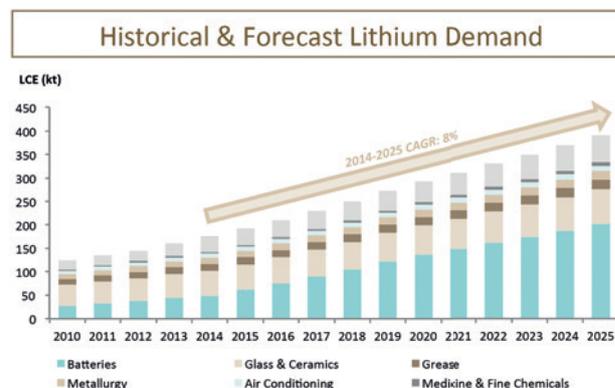


Figure 3 : Évolution de la demande mondiale de lithium (passée et projection) en fonction des principaux secteurs industriels consommateurs.
Source : Avicenne Energy.

pendant appelée à s'éroder dans les prochaines années, avec l'arrivée de nouveaux producteurs. Ainsi, en Argentine, un nouveau producteur, l'australien Orocobre, est en phase de démarrage et il devrait rejoindre dans quelques trimestres les quatre acteurs précités (voir la Figure 4 ci-dessous). D'autres projets devraient également voir le jour, tels ceux du français ERAMET ou de l'australien ADY, là encore en Argentine.

En effet, la forte croissance de la demande en lithium est concomitante avec d'importantes contraintes auxquelles se heurtent les producteurs actuels pour augmenter significativement leurs capacités de production dans les années à venir, et ce pour des raisons d'ordres géologique, technique ou réglementaire.

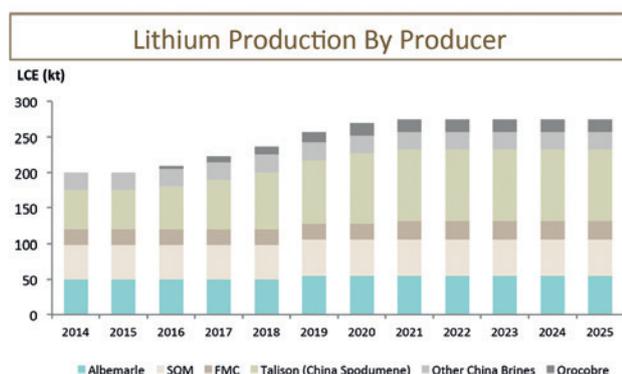


Figure 4 : Évolution estimée de la production des producteurs actuels de lithium (en milliers de tonnes LCE).
Source : Avicenne Energy.

Ces nouveaux producteurs seront probablement installés, pour la majorité d'entre eux, en Argentine.

La première raison est que la production de lithium à partir de saumures est beaucoup moins coûteuse que celle à partir de son minerai solide, le spodumène, ce qui explique l'installation des nouveaux exploitants dans le Triangle du Lithium, là où se trouvent les plus vastes salars exploitables riches en lithium.

La deuxième raison est qu'au sein de cette région, la Bolivie poursuit une politique de développement autonome, interdisant aux entreprises étrangères l'accès à la ressource et à sa transformation. Le Chili, quant à lui, a mis en place dans les années 1970 un cadre légal contraignant rendant le lithium non concessible. Les producteurs actuels (Albemarle et SQM) disposent d'une autorisation spéciale pour exploiter le salar chilien d'Atacama, mais tout nouveau développement est aujourd'hui légalement impossible. Le Chili réfléchit à la possibilité de faire évoluer son cadre juridique, mais les exigences environnementales et de transparence rendent ce dossier très sensible aux yeux de l'opinion publique chilienne, laissant augurer plusieurs années encore de *statu quo*. Les salars argentins apparaissent donc comme les candidats idéaux pour accueillir de nouveaux producteurs de lithium.

L'émergence de ces nouveaux acteurs ira probablement de pair avec l'introduction de nouvelles technologies de production du lithium. Le procédé conventionnel basé sur

l'évaporation, qui est utilisé sur le salar d'Atacama au Chili et par Orocobre en Argentine, est en effet perfectible, en particulier au plan environnemental (impact négatif sur la balance hydrique des aquifères, empreinte au sol trop importante, production de résidus en quantité conséquente, nécessité d'une amélioration du taux de récupération du lithium (de 50 % actuellement)...). À ces limites du procédé conventionnel se conjuguent des coûts de production et des investissements en forte hausse dès que la teneur en lithium diminue.

Ces insuffisances ont été constatées par les nouveaux producteurs potentiels les incitant à développer de nouvelles technologies de production. La plus prometteuse résiderait dans l'extraction directe du lithium à température ambiante (ce qui permettrait notamment d'atteindre un taux de récupération approchant les 90 %).

Les perspectives

L'équilibre de l'offre et de la demande de lithium à l'horizon 2025

La croissance dynamique de la demande d'ici à 2025 et les importantes contraintes auxquelles sont confrontés les producteurs actuels pour augmenter significativement leurs capacités de production laissent à craindre qu'en l'absence de l'entrée de nouveaux producteurs sur le marché, un déficit de l'offre apparaîtra dès 2018 (pouvant atteindre environ 25 kT de LCE en 2020 et 115 kT de LCE en 2025) (voir la Figure 5 ci-dessous).

L'entrée de nouveaux producteurs est donc attendue pour répondre à l'évolution attendue de la demande en lithium. Ils devraient être majoritairement basés en Argentine et utiliser de nouveaux procédés de production.

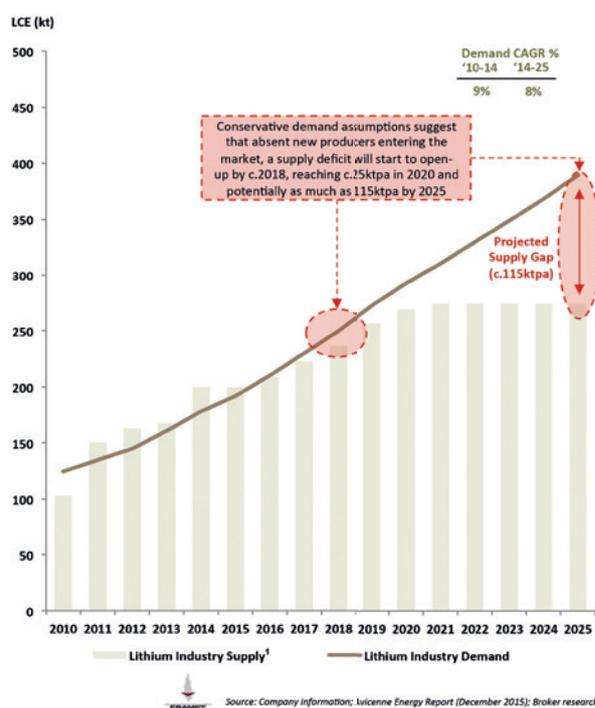


Figure 5 : Évolution de l'offre et de la demande en lithium (en milliers de tonnes LCE).
Source : Avicenne Energy.

Perspectives de prix

Le prix du carbonate de lithium connaît une croissance régulière depuis 2010, atteignant 6 000 dollars la tonne de LCE au début de l'année 2015. Une nouvelle forte hausse a été constatée dès la mi-2015, traduisant une tension importante sur le marché en raison d'une demande très dynamique et, par voie de conséquence, une forte sollicitation des producteurs. De plus, Talison, producteur australien de lithium sous forme rocheuse (spodumène), a décidé, sous l'impulsion de ses actionnaires Tianqui (un groupe chinois) et Albemarle (le leader mondial du lithium), de limiter ses ventes externes à ses seuls clients chinois pour alimenter préférentiellement les usines de transformation d'Albemarle. Le prix du lithium hors de Chine a ainsi bondi à 7 500-8 000 dollars la tonne de LCE fin 2015, et il a explosé, atteignant 10 000 et même jusqu'à 17 000 dollars la tonne LCE en Chine, les clients n'arrivant plus à trouver suffisamment de lithium (voir la Figure 6 ci-contre).

À moyen terme, les prix devraient se stabiliser entre 7 000 et 10 000 dollars par tonne LCE, reflétant ainsi une tension offre-demande suscitant l'arrivée de nouveaux producteurs.

Le recyclage, une alternative à la production de lithium primaire ?

Aujourd'hui, le lithium n'est pas recyclé. Des unités de recyclage de batteries lithium-ion de tailles hétérogènes ont été construites en Europe. Cependant, le lithium n'est pas forcément valorisé du fait d'un retour sur investissement insuffisant lié à la complexité de sa récupération.

L'obligation (tout au moins au niveau européen) de recycler le lithium contenu dans les batteries des véhicules électriques permettrait néanmoins de prolonger sensiblement l'accès à la ressource lithifère naturelle.

Conclusion

Le lithium est actuellement le seul métal à connaître un marché dynamique, avec des perspectives de demande

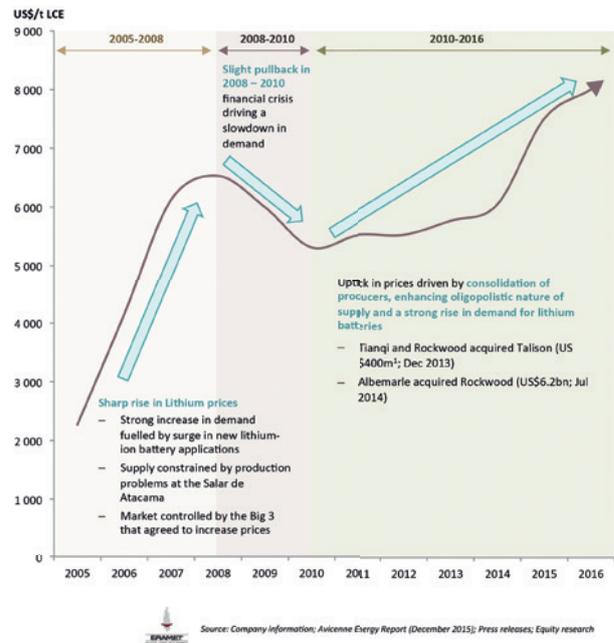


Figure 6 : Évolution des prix du carbonate de lithium (en dollars par tonne de LCE).

Source : Roskill, presse spécialisée.

et de prix favorables. Cela s'explique par l'application principale du lithium dans le domaine du stockage de l'énergie, sujet clé de la transition énergétique.

La croissance de la production de lithium impliquera l'émergence de nouveaux acteurs, probablement majoritairement installés en Argentine et utilisant de nouveaux procédés plus vertueux d'un point de vue environnemental.

De la stratégie d'Orange à la mise en place de méthodes d'évaluation pour le secteur des technologies de l'information et de la communication

Par Philippe TUZZOLINO

Directeur Environnement du groupe Orange

Orange déploie des solutions et des plans d'action ambitieux pour accompagner la transition écologique et énergétique dans les domaines du changement climatique, de la gestion des ressources et des déchets, en mettant en place des processus d'économie circulaire. C'est ainsi que de nombreux métiers de l'entreprise sont mobilisés pour réduire notre consommation d'énergie et nos émissions de gaz à effet de serre, et pour optimiser la fin de vie de nos équipements et promouvoir leur recyclage ou encore rechercher des solutions plus écoresponsables pour nos clients. Dans une démarche volontaire et dans le cadre de ses engagements de Responsabilité sociale d'entreprise (RSE), Orange S.A. s'engage à assurer la traçabilité et la transparence des ressources rares et des matériaux considérés comme critiques. Si le groupe n'exerce aucune activité de fabrication, il élabore pour certains équipements des cahiers des charges à l'attention de certains de ses fournisseurs. Compte tenu de sa position, notre groupe s'engage à anticiper les éventuels risques en matière d'approvisionnement et de réputation en mettant en pratique une démarche de responsabilité sociale.

Face aux multiples enjeux soulevés par les ressources rares, une question fondamentale se pose au groupe Orange : quelle stratégie et quelles mesures adopter pour garantir durablement l'intégrité de son modèle économique et social contre les risques inhérents aux matières premières de manière générale, et aux ressources rares en particulier ?

Afin de répondre à cette question, le groupe Orange a mis sur pied, en mars 2013, un groupe de travail consacré aux ressources rares. Celui-ci intègre des représentants de l'ensemble des parties prenantes internes concernées par ce sujet : la direction des achats, la direction juridique, la direction RSE, le *marketing* groupe, les *Oranges Labs* de recherche, les Réseaux, produits et services, ainsi qu'Orange France et Orange Consulting.

Fédérer les parties prenantes internes

Ce groupe de travail se réunit en comité stratégique tous les trimestres, un comité de suivi (plus restreint) se réunissant, quant à lui, tous les semestres. Ces instances sont chargées de collecter et d'analyser toutes les données

du groupe sur le sujet et de définir des processus et des actions adaptés des situations de crise affectant une ou plusieurs de ses filières d'approvisionnement.

Au titre de sa première mission, le groupe de travail a dressé un état des lieux précis de la place des métaux et des minéraux rares dans les activités du groupe et mesurer le degré de criticité de chacun d'eux. Une étude de risque et d'impact coordonnée par le groupe de travail sur les ressources rares et critiques nous a permis d'identifier trois catégories de matériaux devant faire l'objet d'un suivi spécifique : a) 12 ressources considérées comme prioritaires (or, argent, étain, lithium, cuivre, cobalt, antimoine, silicium, germanium, bismuth, graphite et nickel), b) les terres rares et les platinoïdes et, enfin, c) les matériaux issus de zones de conflit (l'étain, le tungstène, le tantale et l'or, et leurs dérivés chimiques).

Les composants électroniques faisant appel pour leur production à des ressources rares ou critiques sont omniprésents non seulement dans les terminaux et les équipements vendus aux clients d'Orange, mais aussi dans toutes les infrastructures réseaux et services informatiques (SI) du groupe. Leur présence va même crois-

sant au fur et à mesure que l'on modernise et renouvelle les équipements du groupe pour en optimiser le fonctionnement et l'efficacité énergétique. En effet, systèmes de climatisation en *free cooling*, appareils de mesure et de suivi des consommations, équipements réseau passifs, serveurs nouvelle génération, générateurs solaires ou éoliens... : tous ces équipements à la pointe des technologies font appel aux propriétés bien particulières dont les matériaux rares ont l'exclusivité !

Savoir exactement ce que le groupe Orange achète

Face à cette problématique, il est essentiel que nous sachions exactement ce que nous achetons à nos fournisseurs : quel est le poids, la qualité et le coût de chacun des matériaux utilisés dans chaque équipement ? Et que représente notre volume d'achat par rapport aux ressources mondiales disponibles ? Les études de risque et d'impact menées sous l'égide du groupe de travail précité passent au crible aussi bien la stratégie d'achat du groupe que l'utilisation faite des équipements et la gestion de leur fin de vie. Grâce à ce travail, nous alimentons une base de données régulièrement mise à jour sur tous les matériaux critiques pour nos activités.

Cette base de données constitue pour nous le socle fondamental sur lequel reposent nos analyses de nos possibilités de substituer des ressources à risque, de développer et d'optimiser le recyclage des équipements et de mieux piloter les stratégies d'achat du groupe en fonction des informations dont nous disposons.

Des clauses dédiées dans les contrats et cahiers des charges

De fait, les matériaux rares et critiques font désormais l'objet de mentions explicites dans les cahiers des charges et dans le code de conduite transmis aux fournisseurs du

groupe, ainsi que dans nos contrats d'approvisionnement et d'achat. Il s'agit pour nous de les inciter à communiquer de façon transparente sur la présence de ces ressources dans leurs produits, sur l'origine de celles-ci, et d'en promouvoir le recyclage (ou la substitution, pour les plus critiques).

Le groupe Orange met ainsi à la disposition de ses fournisseurs des outils leur permettant d'analyser leur propre exposition aux risques sur les matériaux critiques, et relaie auprès d'eux des outils mis au point par les grandes organisations du secteur, comme l'Union internationale des Télécommunications (UIT) ou la Global e-Sustainability Initiative (GESI). Ils sont notamment incités à prendre connaissance des publications de la GESI sur la *supply chain* responsable.

Enfin, dans le cadre de la *Joint Audit Cooperation* (JAC) lancée par Orange en partenariat avec d'autres grands opérateurs dans le but de promouvoir la RSE chez leurs fournisseurs communs, les audits de terrain incluent désormais des questions spécifiques sur les matériaux issus de zones de conflit.

Agir avec les industriels et les pouvoirs publics

Au-delà des actions menées en interne et avec d'autres opérateurs télécoms, le groupe Orange est également partie prenante dans des réflexions plus larges associant les pouvoirs publics et les industriels d'autres secteurs eux aussi dépendants de ressources rares. À l'image des États-Unis et du Japon, l'Union européenne a commencé à élaborer une stratégie communautaire visant à sécuriser dans la durée la disponibilité des matières premières nécessaires à la compétitivité de ses industries à forte dimension technologique.

L'analyse du cycle de vie au service d'une politique responsable de consommation des métaux stratégiques chez Orange

Par Mikko Samuli VAIJA
Analyste Cycle de vie, Orange Labs

Dans le cadre de sa politique environnementale, le groupe Orange mène, depuis 2007, des évaluations des impacts environnementaux de ses produits. Cette stratégie recouvre à la fois les produits vendus directement par Orange, tels que les téléphones mobiles ou les tablettes fabriqués par des industriels tiers, et les produits développés par Orange (Livebox et décodeurs TV, par exemple). Les analyses de cycle de vie (ACV), menées selon les principes des normes ISO 14040-14044, constituent l'outil principal pour la réalisation de ce travail.

Pour les téléphones mobiles, l'ACV a permis le développement d'une méthode d'affichage environnemental (ORANGE, 2015) prenant en compte trois impacts environnementaux : le changement climatique (noté « limitation du CO₂ »), l'épuisement des ressources naturelles (noté « préservation des ressources naturelles ») et l'écoconception du produit (noté « conception écoresponsable »).

Les principes de cette méthode ont été intégrés notamment dans le référentiel de bonnes pratiques édité par le groupe de travail sectoriel - GT2 (ADEME, 2015). En ce qui concerne l'épuisement des ressources naturelles, la méthode initiale de l'affichage environnemental Orange considérait trois métaux (l'or, l'argent et l'étain) pour lesquels les réserves sont signalées comme critiques, notamment dans l'ACV menée pour l'ADEME (JANIN, 2008). La réalisation de plusieurs ACV en interne, notamment pour la Commission européenne (ANDRAE et VAIJA, 2014), a conduit à inscrire dans cette liste l'indium et le tantale.

Analyse de cycle de vie, épuisement des ressources naturelles et contenus en matériaux

La méthode d'ACV a pour but de fournir des résultats sur les impacts environnementaux inhérents au cycle de vie d'un produit, d'un réseau ou d'un service. Pour l'épuisement des ressources naturelles, cet impact environnemental peut être traduit en surplus d'énergie nécessaire pour l'extraction (modèle Impact 2002+, par exemple), en kilogrammes d'élément équivalent (l'antimoine, par

exemple, dans le modèle CML2002) ou encore en fraction de réserve par personne (modèle EPS2000, par exemple). Le choix du modèle influera également sur les résultats en fonction de la prise en compte ou non de certains éléments (KLINGLMAIR, SALA et BRANDAO, 2013).

Suite à la publication de recommandations par la Commission européenne (Joint Research Center, 2012), Orange a décidé d'appliquer la méthode CML2002 (VAN OERS, de KONING, GUINNE et HUPPES, 2002). Ce modèle inclut 74 flux élémentaires ⁽¹⁾ différents, dont le germanium, l'indium, les platinoïdes ou les terres rares, tous considérés comme critiques par la Commission européenne (European Commission, 2014). Le modèle CML2002 prend également en compte les réserves de ressources énergétiques fossiles comme le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Pour chacun des flux, un facteur de caractérisation (noté *ADPi*) est calculé selon l'équation :

$$ADPi = \frac{\frac{DRi}{(Ri)^2}}{\frac{DRantimoine}{(Rantimoine)^2}}$$

Dans laquelle *DRi* représente le taux d'extraction de l'élément *i* exprimé en kg/année et *Ri* les réserves de l'élé-

(1) Dénomination en ACV des intrants/sortants dans l'inventaire du cycle de vie (ICV). Dans le cas de CML2002, les flux sont équivalents à des ressources naturelles prélevées dans le milieu naturel.

ment i exprimées en kg. $DR_{antimoine}$ et $R_{antimoine}$ étant les équivalents de R_i et DR_i pour l'antimoine. Plus le facteur de caractérisation ADP_i est grand, plus l'élément i est considéré comme rare. Ainsi, le facteur ADP du germanium est égal à $1,95E+4$, alors que celui du fer n'est que de $1,66E-6$.

Le modèle CML2002 comporte deux méthodes principales pour calculer les réserves de ressources :

- *Ultimate reserves* : calcul en fonction de l'abondance des éléments dans la croûte terrestre,
- *Reserve base* : calcul en fonction des quantités qui se conforment à des critères physiques et chimiques minimaux liés à l'industrie minière (par exemple, la richesse du minerai) à un moment donné.

Chacune de ces méthodes est donc intrinsèquement liée à un horizon temporel. Ainsi, pour l'or, les réserves disponibles se montent à environ $3,49E+1$ années d'extraction avec la méthode *Reserve base*, contre $3,04E+07$ années en choisissant la méthode *Ultimate reserves*.

La distribution des ressources dans la croûte terrestre est également un élément à prendre en considération pour le choix de la méthode. Pour les ressources rares (*minor elements* - comme l'argent, le platine, l'indium et le cuivre), une grande partie des réserves présentes dans la croûte terrestre est très diffuse. La Figure 1 ci-dessous présente cette distribution telle que l'a définie B. Skinner.

Pour une exploitation au-delà de la limite d'exploitabilité du minerai (*mineralogical barrier*), les coûts d'exploitation (notamment ceux liés aux dépenses d'énergie) augmentent de façon exponentielle. Les réserves de ressources stratégiques disponibles pour l'industrie apparaissent donc comme beaucoup plus limitées que celles accessibles avec la méthode d'estimation *Ultimate reserves*.

La combinaison « échelle de temps + distribution des ressources rares » a ainsi conduit Orange à faire le choix

de la méthode *Reserve base*. Celle-ci est également recommandée dans la note technique du JRC (Joint Research Center, 2012).

Lors de la réalisation d'une analyse de cycle de vie (hormis le choix du couple méthode CML2002/méthode *Reserve base*), les données utilisées vont grandement influencer les résultats. En effet, les logiciels d'ACV (tels que Simapro, EIME ou Gabi) reposent sur des bases de données (Ecoinvent, par exemple) qui contiennent des milliers de modèles (également appelés modules). Ces derniers peuvent servir à calculer les impacts environnementaux de la production d'un kilogramme d'acier inoxydable, d'un trajet d'un kilomètre en voiture, ou encore la consommation d'un kilowattheure d'électricité sur le réseau domestique français.

Les modules contenus dans les bases d'ACV sont développés à partir de données industrielles pour un composant donné ou une moyenne de composants disponibles sur le marché à une date donnée. De ce fait, les matériaux pris en compte dans ces modules sont rarement exhaustifs, surtout pour des composants de secteurs fortement innovants

Known inputs from technosphere (materials/fuels)	
Name	
Electronic component factory {GLO} market for Alloc Def, U	
Silver {GLO} market for Alloc Def, U	
Copper {GLO} market for Alloc Def, U	
Lead {GLO} market for Alloc Def, U	
Tin {GLO} market for Alloc Def, U	
Zinc {GLO} market for Alloc Def, U	
Epoxy resin, liquid {GLO} market for Alloc Def, U	
Gold {GLO} market for Alloc Def, U	

Figure 2 : Exemples de matériaux pris en compte pour la production d'un circuit intégré (Ecoinvent - V3.0.25, 2010).

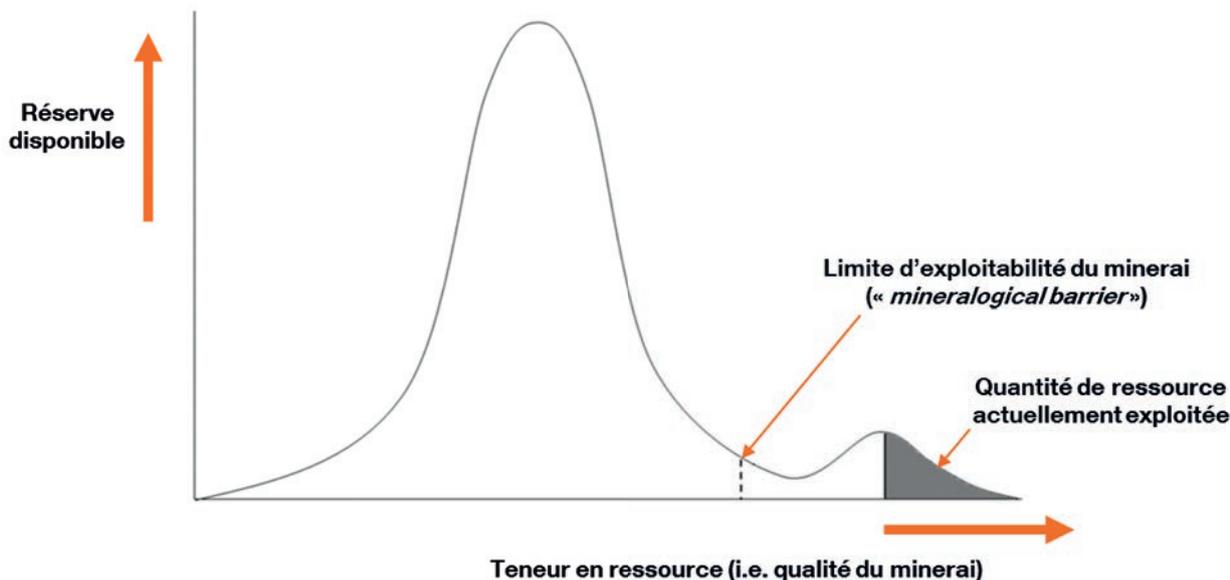


Figure 1 : Distribution des réserves de ressources rares (SKINNER, 2001).

Sub-assembly	Sub-assembly mass (mg)	Item	Item material	Material CAS Number	Item mass (mg)
Silicon Die	2,074	Silicon Die	Silicon (Si)	7440-21-3	2,002
Silicon Die		metallization	Aluminium (Al)	7429-90-5	0,016
Silicon Die		metallization	Tungsten (W)	7440-33-7	0,013
Silicon Die		passivation	Silicon Nitride (SiN)	68034-42-4	0,003
Silicon Die		passivation	Silicon Oxide(SiO ₂)	7631-86-9	0,027
Silicon Die		passivation	Gamma-butyrolactone	96-48-0	0,009
Silicon Die		passivation	Polyhydroxyamide	55295-98-2	0,004
Lead-frame	15,987	alloy	Copper (Cu)	7440-50-8	15,332
Lead-frame		alloy	Iron (Fe)	7439-89-6	0,37
Lead-frame		alloy	Phosphorus (P)	7723-14-0	0,005
Lead-frame		alloy	Zinc (Zn)	7440-66-6	0,019
Lead-frame		metallization	Nickel (Ni)	7440-02-0	0,255
Lead-frame		metallization	Palladium (Pd)	7440-05-3	0,005
Lead-frame		metallization	Gold (Au)	7440-57-5	0,001
Bonding wire	0,164	wire	Gold (Au)	7440-57-5	0,164

Tableau 1 : Extrait d'une déclaration de matériaux (L6924D013TR – STMicroelectronics).

comme celui de la microélectronique. Ainsi, le composant modélisé dans la Figure 2 de la page précédente n'est plus représentatif du marché. En effet, la mise en place de la directive RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) a contraint les industriels à réduire fortement la concentration en plomb de leurs composants. La crème à braser de type étain-plomb a, par exemple, été remplacée par un alliage étain-argent-cuivre dans la majorité des produits.

L'envolée des cours des matières premières a également joué sur la composition des circuits intégrés, avec le remplacement de l'or par du cuivre ou de l'aluminium dans les fils de câblage (*wire bonding*). De ce fait, l'utilisation directe de modules issus de bases de données ACV n'est pas possible pour évaluer finement le contenu en matériaux d'un produit.

La prise en compte de données fournisseurs

Afin de pallier au manque de précision des logiciels d'ACV, Orange a eu directement recours à des données fournisseurs pour reconstituer le contenu des composants électroniques de plusieurs types de téléphones portables et de cartes réseaux. Depuis la mise en place de la directive RoHS, ces fiches dites de déclaration de matériaux (également appelées *Materials Declaration* ou *Materials Declaration Sheet* en anglais) sont notamment régies par les standards de la famille IPC-175X (IPC, 2015) et IEC 62474 (IEC, 2015).

Le Tableau 1 ci-dessus présente (par ordre de poids décroissants en milligrammes) les 15 premiers éléments (sur un total de 25) contenus dans un composant STMicroelectronics dédié à la gestion des cellules Li-ions (STMicroelectronics, 2015). Ce document permet ainsi d'évaluer rapidement la quantité de ressources rares, comme le palladium (0,005 mg) ou l'or (0,165 mg), que celles-ci renferment. Il est à noter que ce composant contient aussi d'autres ressources rares (comme l'argent), mais que celles-ci ne figurent pas dans les lignes présentées dans le Tableau 1.

Dans le cas des produits électroniques complexes comme les *smartphones* ou les cartes réseaux, l'architecture nécessite de recueillir un grand nombre de ces fiches pour obtenir une complétude satisfaisante des données. La Figure 3 de la page suivante présente quelques exemples de sous-ensembles à identifier.

Un *smartphone* haut de gamme peut ainsi compter plus d'une centaine de circuits intégrés, avec un mélange de composants très simples, comme les régulateurs de tension LDO (*Low-dropout regulators*) d'une taille d'un millimètre carré, et de processeurs applicatifs dotés de 6 (voire 8) cœurs. Ces composants sont cependant facilement identifiables, de par la présence sur chacun d'eux d'un numéro de série et du logo du constructeur.

Le problème du recueil de données pour un *smartphone* réside plus dans les composants passifs (condensateurs, inductances et résistances), ainsi que dans les éléments électromécaniques (comme les embases pour cartes SIM/micro-SD ou les connecteurs micro-USB/audio). En effet, il est rare que ces éléments soient marqués, principalement du fait de leur taille (un composant passif de classe 01005 mesure 0,4 x 0,2 mm). S'il est ainsi possible de reconnaître les différents types de composants (voir la Figure 4 de la page suivante), il est en revanche quasi impossible d'en retrouver la référence exacte ou le fabricant.

Pour ces composants, lorsque de grandes disparités de composition étaient avérées, Orange a choisi de recueillir des déclarations matières chez plusieurs fabricants et de créer deux composants de référence : un premier, conçu sur une base de métaux nobles (par exemple, les condensateurs céramiques dotés d'électrodes internes en alliage argent-palladium), et, un second, conçu sur une base de métaux plus communs (comme le cuivre ou le nickel pour les condensateurs céramiques), le but recherché étant de pouvoir donner pour un produit complet une estimation de son contenu en ressources rares. Ainsi, 61 composants ont été listés dans l'outil créé à cet effet.

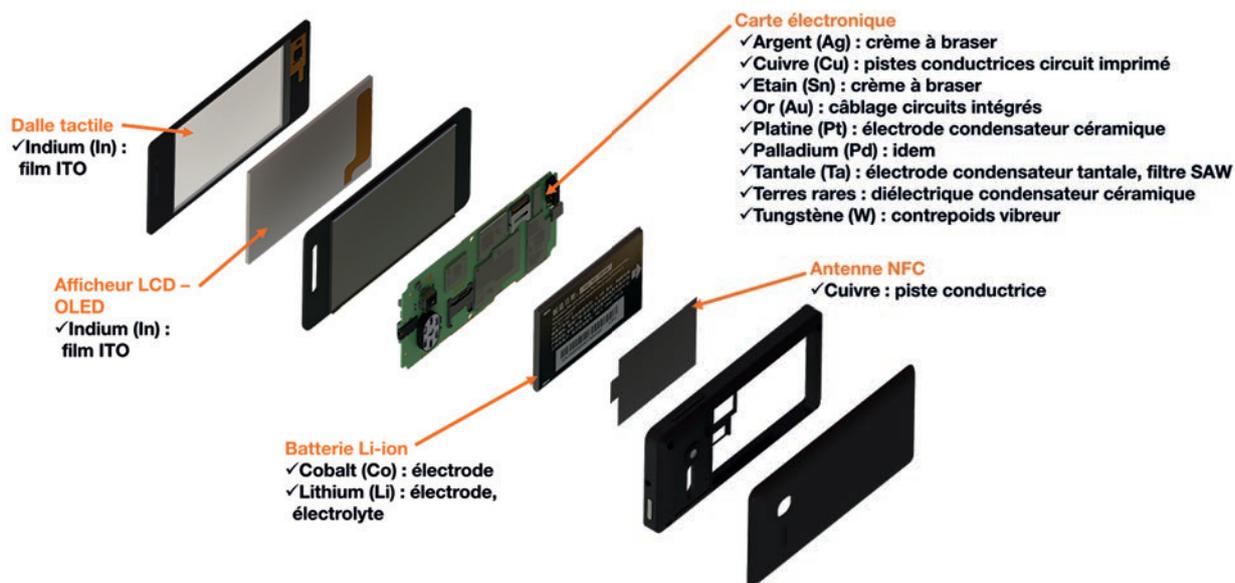


Figure 3 : Exemples de ressources rares contenues dans un *smartphone* et de leurs usages (VAIJA, 2015).

Le besoin de disposer d'appareils de mesure complémentaires

Les produits électroniques étudiés par Orange comportent également des éléments mécaniques dont il est intéressant d'évaluer la composition. Si les pièces de grandes dimensions sont le plus souvent marquées (par exemple, dans les *smartphones* haut de gamme, le châssis est parfois réalisé en alliage de magnésium AZ91), il est difficile d'évaluer la nature des traitements de surface (par exemple, un dépôt de type ENIG - *Electroless Nickel Immersion Gold* - sur les circuits imprimés) et de déterminer la composition d'éléments comme les broches de contact des puces électroniques.

Afin de pallier ce problème, Orange s'est équipé d'un spectromètre de fluorescence X (ou XRF, pour *X-ray*

fluorescence). Cet appareil permet d'obtenir la composition d'une pièce sous la forme d'un spectre. La Figure 5 de la page suivante présente les résultats obtenus pour des lames de contact conçues à partir d'un alliage de fer-nickel (identifiés par les 3 premiers pics en partant de la gauche) recouvert par deux traitements de surface (en cuivre et en argent : les deux pics le plus à droite, dans cette même Figure).

L'usage de cet appareil nécessite cependant un démontage complet du produit étudié pour pouvoir analyser chaque élément individuellement. De plus, l'appareil n'est pas en mesure de différencier les éléments déposés lors d'un traitement de surface de ceux qui constituent la pièce elle-même. Ainsi, par exemple, pour les lames de contact présentées dans la Figure 5, il revient à l'analyste de comprendre que l'argent ne représente qu'une fine couche en surface.

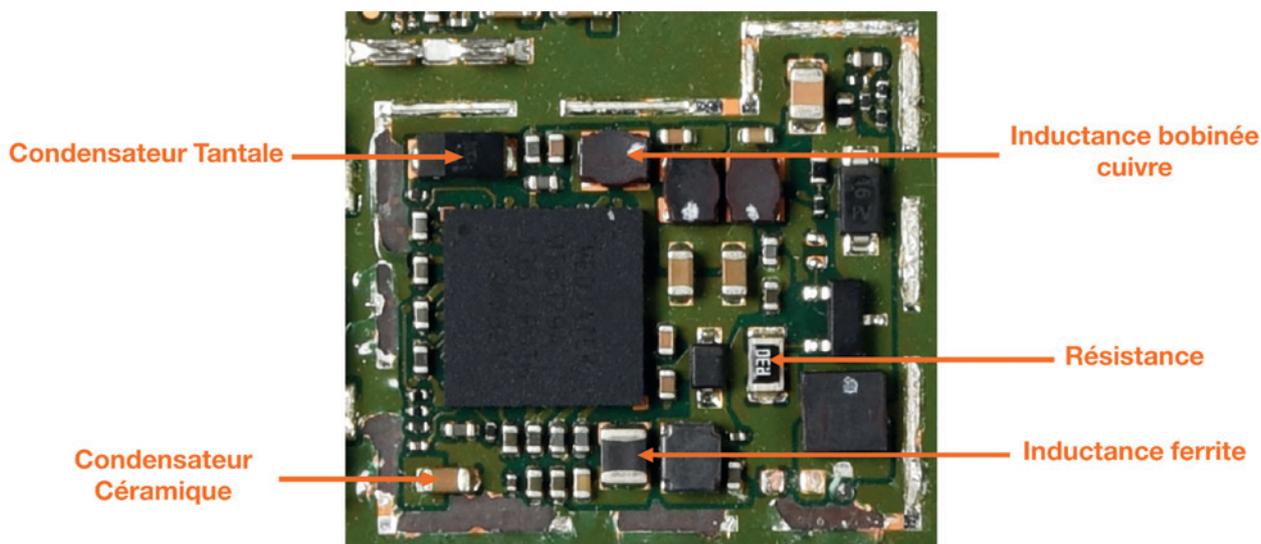


Figure 4 : Exemples de composants passifs sur une carte électronique de *smartphone* (LATARGEZ et VAIJA, 2015).

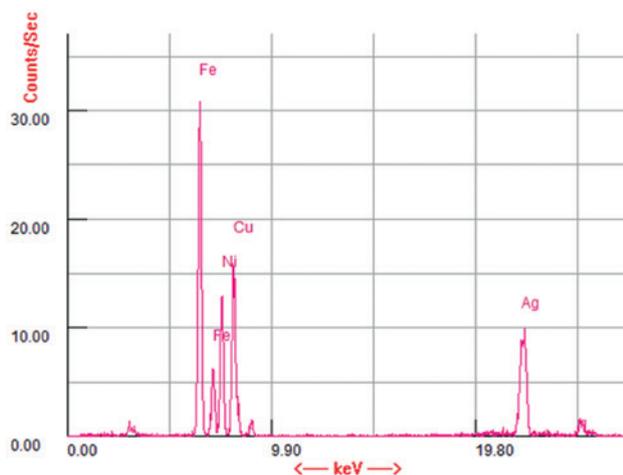


Figure 5 : Résultat d'analyse XRF pour des lames de contact d'un smartphone.

La synthèse des données recueillies

La combinaison des déclarations de matériaux (pour les composants électroniques) et les résultats obtenus par l'analyse XRF de ceux-ci permet d'obtenir une meilleure connaissance du contenu en ressources rares des produits. Dans le cadre de l'affichage environnemental des téléphones mobiles, l'obtention de données sur leur contenu potentiel en indium et en tantale a permis de confirmer la liste des ressources critiques à suivre. En effet, pour les deux téléphones mobiles analysés (voir les résultats de la Figure 6 ci-dessous), l'indium est le premier contributeur à l'impact sur l'épuisement des ressources naturelles (en appliquant la méthode détaillée précédemment et selon CML2002 - *Reserve Base*). Pour les produits équipés de condensateurs tantale (comme le smartphone haut de gamme, dans cet exemple), la contribution du tantale est également significative. Le téléphone mobile d'entrée de gamme n'étant pas équipé de ce type de composant, la quantité de tantale qu'il renferme est très peu significative. En effet, seule la céramique en tantalate de lithium (Li-TaO₃) des filtres piézoélectriques (ou filtres SAW, pour *Surface Acoustic Wave*) en contient quelques milligrammes, contre près de 100 mg pour les condensateurs au tantale des smartphones.

Évolutions méthodologiques

La méthode présentée précédemment a pour vocation d'évoluer sur deux axes.

La première évolution réside dans la prise en compte des nouvelles technologies implémentées par les industriels. Si la substitution dans les fils de câblage de l'or par du cuivre peut être évaluée composant par composant en accédant à la déclaration de matériaux, l'évaluation est plus problématique pour d'autres innovations.

Ainsi, la production d'un écran basé sur une matrice active de diodes électroluminescentes organiques (ou AMOLED) a recours à des ressources rares. Par exemple, les matériaux pour le dopage rouge nécessitent de l'iridium (contenu dans le *Tris(1-phenyl-isoquinoline)iridium(III)*) et ceux servant au transport des électrons peuvent être basés sur des produits contenant de l'indium (comme le *Tris(8-hydroxy-quinolinato)indium*). Mais étant donné les forts intérêts stratégiques en jeu sur le marché des écrans de ce type, il n'a (pour l'instant) pas été possible d'obtenir de déclaration de matériaux pour ces équipements.

Le remplacement de l'indium dans les écrans est également d'actualité, comme cela a été souligné au cours du *SID Display Week* qui s'est tenu à San Jose (en Californie) en juin 2015 (PERRET, 2015).

Plusieurs technologies, comme les nanofils d'argent ou les nanotubes de carbone, sont actuellement étudiées pour remplacer les fils ITO (oxyde d'indium-étain) dans les afficheurs LCD et OLED, ainsi que dans les dalles tactiles. Toute la difficulté, pour Orange, sera de suivre cette évolution technologique et de mettre en place des partenariats industriels pour lui permettre d'évaluer les quantités de ressources rares embarquées dans ces innovations technologiques.

La seconde évolution se situe au niveau de la méthode d'évaluation CML2002. En effet, celle-ci n'intègre pas un point clé, les stocks de métaux d'origine anthropique. Ainsi, selon les données de l'USGS de 2012, les banques centrales détenaient 30 100 tonnes d'or, soit une quantité correspondant à plus de 10 ans d'extraction. Se présentant de surcroît sous la forme de lingots de matière pure, l'or des réserves bancaires peut être directement utilisé pour la production, notamment des éléments électroniques. La méthode AADP - *anthropogenic stock extended abiotic depletion potential* (SCHNEIDER, BERGER et FINKBEINER, 2011) modifie la formule de calcul des facteurs ADP (voir l'Équation de la page 99) en y intégrant les stocks anthropogènes : le facteur R_i représente alors la somme des réserves de l'élément i et de ses stocks anthropogènes (il en va de même pour $R_{\text{antimoine}}$).

Smartphone haut de gamme		Téléphone mobile d'entrée de gamme	
Element	Contribution épuisement des ressources - Méthode CML2002 - <i>Reserve base</i>	Element	Contribution épuisement des ressources - Méthode CML2002 - <i>Reserve base</i>
indium (In)	41,76 %	indium (In)	31,67 %
argent (Ag)	20,97 %	argent (Ag)	28,87 %
or (Au)	18,06 %	or (Au)	17,26 %
tantale (Ta)	8,00 %	étain (Sn)	7,25 %
étain (Sn)	4,04 %	palladium (Pd)	5,66 %

Figure 6 : Liste des 5 éléments les plus contributeurs à l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles (VAIJA, 2015).

Bibliographie

ADEME (2015), *Étiquetage environnemental* (<http://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/reconnaitre-produit-plus-respectueux-lenvironnement/dossier/affichage-environnemental/affichage-environnemental-contexte-reglementaire-objectifs>).

ANDRAE (A. S.) & VAIJA (M. S.), *To Which Degree Does Sector Specific Standardization Make Life Cycle Assessments Comparable? - The Case of Global Warming Potential of Smartphones*, 2014.

Ecoinvent - V3.0.25, *Integrated circuit logic type {GLO} - production - Alloc Déf, U*, 2010.

European Commission, *Report on critical raw materials for the EU - Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials*, 2014.

IEC (2015), *IEC 62474, Material Declaration for Products of and for the Electrotechnical Industry* (International Electrotechnical Commission : <http://std.iec.ch/iec62474/iec62474.nsf/MainFrameset>).

IPC (2015), *Data Exchange Standards* (IPC - Association Connecting Electronics Industries : <http://www.ipc.org/ContentPage.aspx?pageid=Materials-Declaration>).

JANIN (M.), *Analyse du cycle de vie d'un téléphone portable*, 2008.

Joint Research Center, *Characterisation factors of the ILCD - Recommended Life Cycle Impact Assessment methods*, European Commission, 2012.

KLINGLMAIR (M.), SALA (S.) & BRANDAO (M.), "Assessing resource depletion in LCA: a review of methods", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013.

LATARGEZ (P.) & VAIJA (M.), *Composants passifs montés en surface sur carte électronique de smartphone*, 2015.

ORANGE (2015), *Orange France - Étiquetage environnemental* (http://orange-en-france.orange.fr/developpement_durable/etiquetage_ecologique.html).

PERRET (P.), *SID Display Week - Ecoterm report*, 2015.

SCHNEIDER (L.), BERGER (M.) & FINKBEINER (M.), "The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterization to model the depletion of abiotic resources", *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011.

SKINNER (B.), *Exploring the resource base*, 2001.

STMicroelectronics. (2015), *L6924D Single Cell Li Ion battery Charger - PDF format material declaration* (http://www.st.com/stonline/stappl/productcatalog/jsp/unzipFiles.jsp?zipLink=http://www.st.com//stonline/md/dm00088309/L6924D013TR_md.zip&fileType=pdf&fileName=L6924D013TR).

VAIJA (M. S.), *Ressources rares et TIC : méthodes d'évaluation*, Orange, 2015.

VAN OERS (L.), DE KONING (A.), GUINNE (J.) & HUPPES (J.), *Abiotic Resource Depletion in LCA - Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook*, 2002.

La gestion des matières premières stratégiques chez Renault

Par Philippe SCHULZ

Expert leader Environnement, énergie et matières premières, Renault

Pour sécuriser leurs approvisionnements en matières premières minérales, les entreprises doivent introduire dans leur organisation de véritables ruptures en termes d'analyse stratégique et de développements techniques et industriels. Dès 2009, Renault a mis en place une expertise visant à identifier et à gérer ses risques en matière d'approvisionnement en matières premières et ainsi réduire sa vulnérabilité face à des tensions sur ses marchés d'approvisionnement ou à l'exposition financière en résultant. La conclusion de partenariats de R&D innovants, l'analyse de ses filières d'approvisionnement en coordination avec ses fournisseurs et, enfin, ses stratégies techniques en matière de substitution et de recyclage sont autant d'actions au cœur de la démarche engagée par Renault d'optimisation de sa gestion de ses matières premières stratégiques.

Les enjeux matières pour Renault dans un monde en mutation

En 2015, Renault a vendu dans le monde plus de 2,8 millions de véhicules composés à plus de 85 % de métaux et de plastiques. Ainsi, au sein des usines du groupe et chez nos fournisseurs de composants, ce sont près de 2,8 millions de tonnes d'acier, 330 000 tonnes de fonte et 310 000 tonnes d'aluminium qui ont été achetées. Ces estimations incluent les chutes de tôles et les copeaux métalliques générés lors du processus de fabrication tant chez nos fournisseurs de pièces qu'au sein des usines Renault. La production des véhicules du groupe Renault a également mobilisé environ 500 000 tonnes de matières plastiques en 2015 (déchets de fabrication inclus).

Pour Renault, les enjeux matières sont donc considérables. Ils ne se limitent pas aux seules « grandes commodités » de l'industrie automobile.

Réduire la consommation de nos matières premières constitue pour nous un enjeu majeur à la fois écologique et économique. L'extraction des matériaux bruts et leur transformation génèrent des impacts négatifs sur les écosystèmes et en réduisent la disponibilité pour les générations futures. Dans le même temps, la hausse tendancielle des cours des matières premières observée depuis le début du siècle (même si elle s'est ralentie depuis 2012) et leur volatilité impactent la rentabilité du groupe.

Au-delà de ces contraintes économiques, nous sommes exposés à un fort risque de pénurie de matières premières dans un monde où les tensions sur l'approvisionnement ne sont plus à démontrer : la mise en œuvre par certains États d'une gestion patrimoniale de leurs ressources

géologiques et énergétiques, les impacts de crises et de grèves ponctuelles, une concentration des acteurs de la production et de la transformation des matières premières, une augmentation brutale de la demande des économies émergentes, l'apparition de nouveaux besoins et de nouveaux produits, des investissements miniers insuffisants, ou bien encore des catastrophes naturelles ou d'origine humaine.

Ainsi, des inondations, en Thaïlande, ou encore le tsunami qui a frappé le Japon (en 2011), ont gravement déstabilisé les chaînes d'approvisionnement du secteur automobile à l'échelle mondiale. Le monde dans lequel l'accès aux matières premières était aisé est désormais révolu.

À ces risques qui perturbent les dynamiques de l'offre et de la demande et qui pèsent sur la sécurisation des approvisionnements s'ajoute le défi environnemental de la préservation des ressources rares et précieuses qui nous entourent : l'air, l'eau et les sols.

Comment réduire ces risques pour un groupe industriel comme le nôtre aux activités mondiales ?

Après la prise de conscience, le premier acte consiste à objectiver le problème et à se doter d'outils permettant d'identifier les matières premières critiques, ainsi que les goulots d'étranglement que peuvent devenir les filières de transformation et les chaînes d'approvisionnement. Renault a ainsi développé à partir de 2009 une méthodologie spécifique d'évaluation de ses risques d'approvisionnement en matières premières critiques.

Après cette indispensable phase d'analyse, le deuxième acte consiste à proposer des stratégies techniques (réduction des usages, substitution et recyclage) accompa-

gnées de stratégies d'achat visant à lever les risques pesant sur les matières les plus stratégiques et à préserver ainsi la compétitivité du groupe en cas de crise.

Matières premières critiques et automobile

Le concept de criticité des matières premières a été développé en 2008 par Thomas Graedel, professeur d'écologie industrielle à l'Université de Yale. Il propose une matrice (voir la Figure 1 ci-contre) permettant de représenter les différents éléments minéraux en fonction des risques portant à la fois sur leur approvisionnement et sur l'impact d'une éventuelle pénurie.

Pour un groupe industriel, il s'agit de transformer ce modèle théorique en modèle applicable. Plusieurs éléments (voir le Tableau 1 ci-dessous) ont été analysés et pris en compte pour développer une compréhension systémique des matières premières afin d'évaluer les incidences économiques d'une rupture d'approvisionnement.

Partant de cette analyse macroéconomique, une analyse de criticité plus proche de celle initiée par l'équipe de chercheurs dirigée par Thomas Graedel a été développée à l'aide d'une matrice bidimensionnelle.

Sur l'axe des abscisses, Renault a retenu des facteurs de risques pesant sur les prix et/ou l'approvisionnement. Il s'agit :

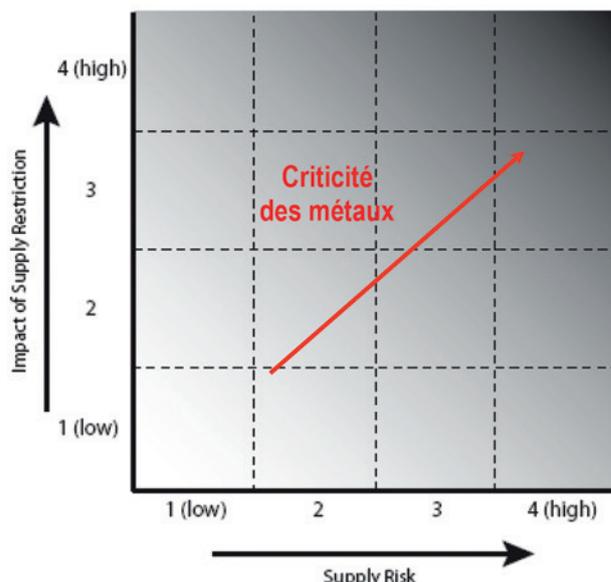


Figure 1 : Matrice de criticité selon Graedel et al.

- du degré de concentration des acteurs des filières de production, ainsi que d'un indicateur de gouvernance traduisant la stabilité économique et géopolitique des pays producteurs fondé sur des indicateurs reconnus internationalement (Banque mondiale...);

CARACTÉRISTIQUES LIÉES À LA MATIÈRE	
Extraction et transformation	Connaissance de la matière première au matériau utilisé par le constructeur automobile ou ses fournisseurs
PARAMÈTRES MACROÉCONOMIQUES	
État des réserves	Ressources et réserves par pays, historique des volumes produits et perspectives
Principaux acteurs	Production & transformation - par pays
Évolution des prix	Prix historiques, analyse et perspectives
Évolution de la production mondiale	Évolution de la production mondiale. Calcul des taux d'accroissement annuels moyens. Effets des stocks
Production par pays ou régions	Identification des principaux pays producteurs par famille de métaux. Cas des monopoles
Évolution de la demande mondiale	Évolution par région et par secteur industriel
Demande par pays ou régions	Analyse des inducteurs de demande et des risques associés
Demande par secteurs & équilibre offre/demande	Poids du secteur des transports en général et de l'automobile en particulier sur la demande. Analyse intersectorielle de l'équilibre entre offre et demande
Production secondaire et recyclage	Existence des filières et volumes concernés
Le cas de l'automobile	Estimation de la demande automobile par rapport à la demande totale.

Tableau 1 : Éléments permettant une analyse d'impact sur les matières premières.

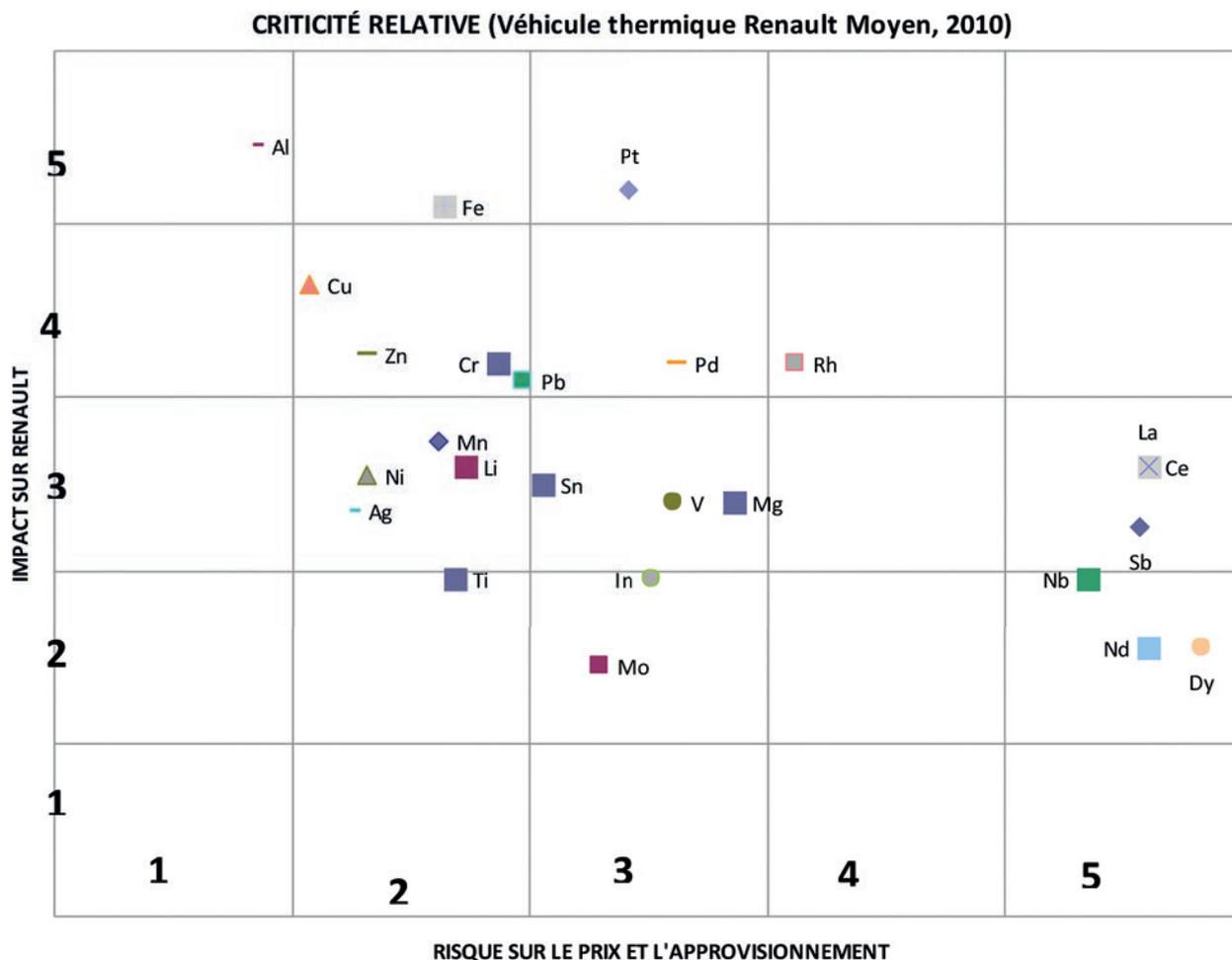


Figure 2 : Exemple de matrice de criticité (véhicule thermique Renault, 2010).

- d'un indice de performance environnementale visant à évaluer et à comparer entre elles l'efficacité des politiques environnementales ;
- du contenu en matières premières des produits recyclés ;
- de la présence de coproduits (un coproduit est un élément dont l'extraction dépend de celle, plus viable économiquement, d'une autre ressource minérale ; l'approvisionnement en un coproduit donné est donc plus risqué, sa demande étant moins élastique que celle de l'élément principal).
- la volatilité historique mesurée, quant à elle, l'ampleur (calculée sur les trois années précédentes) des variations de prix d'un métal donné.

Sur l'axe des ordonnées, les paramètres retenus quantifient les impacts portant spécifiquement sur l'activité du constructeur :

- l'importance technique de la matière dans les véhicules produits, à dire d'expert ;
- le coût d'achat, qui traduit l'impact financier direct de cette matière sur le groupe industriel ;
- le niveau de substituabilité de l'élément concerné ;
- un différentiel de prix futur (consensus de banques) traduisant l'évolution future de l'impact financier en corrélation avec celle du prix de l'élément concerné.

Après avoir rassemblé et intégré ces données dans un modèle paramétrable comportant les quantités de matières utilisées, il est possible d'obtenir une représentation graphique (voir la Figure 2 ci-dessus) et d'effectuer une rétro-analyse risque par risque.

Comment cette analyse de criticité par élément reboucle-t-elle avec les composants présents dans les véhicules ?

Considérons le cas précis des terres rares présentes dans les aimants permanents utilisés par l'industrie automobile. Une automobile moderne contient plus d'une dizaine de ces aimants dédiés à diverses fonctions (voir la Figure 3 de la page suivante).

Les aimants utilisés dans l'industrie automobile appartiennent à plusieurs familles présentant des compositions chimiques très différentes, et leur choix s'effectue essentiellement en tenant compte de leurs caractéristiques magnétiques et de considérations d'encombrement.

Ainsi, les aimants de formulation AlNiCo (alliage d'aluminium, de nickel et de cobalt), qui bien que présentant une bonne tenue à la température, sont peu utilisés en raison de performances magnétiques médiocres.

Le coût élevé des aimants au samarium-cobalt (SmCo) limitait jusqu'à présent leur utilisation dans l'industrie

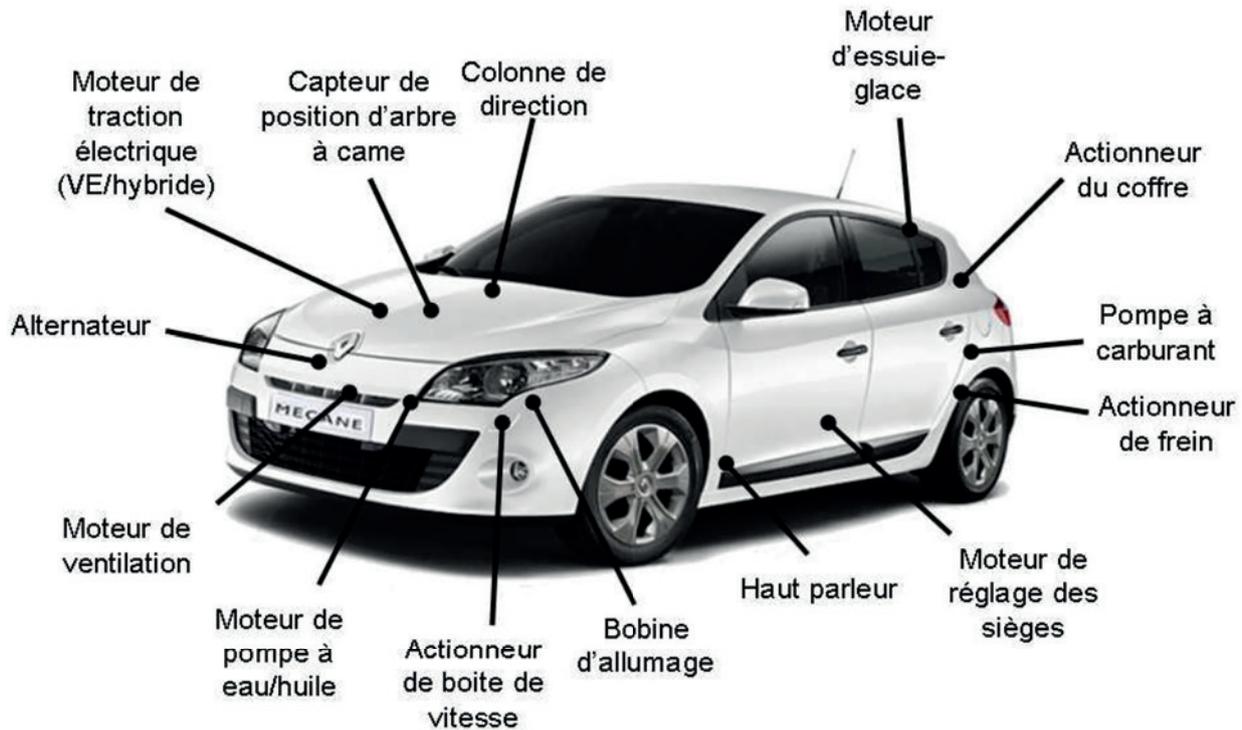


Figure 3 : Aimants permanents présents dans un véhicule standard (Mégane Renault, 2011).

automobile, alors que les aimants au néodyme-fer-bore (NdFeB) fritté offraient le meilleur compromis performance/prix. Cependant, la crise des terres rares survenue en 2011 a totalement rebattu les cartes, et a exigé des constructeurs, en liaison avec leurs fournisseurs, de repenser la composition de chacun des aimants permanents présents dans leurs véhicules afin d'aboutir à une optimisation technico-économique et, surtout, d'éviter une éventuelle rupture d'approvisionnement.

Ainsi, la connaissance de la technologie utilisée pour la fabrication des aimants est intimement liée à la connaissance des éléments chimiques présents dans chacun de leurs types. Si certains de ces éléments sont critiques, des stratégies de réduction de leur usage peuvent alors être développées en fonction des critères de performance et de volume du composant concerné dans chaque type de véhicule.

Outre les stratégies de substitution technologique ou de réduction d'usage, une nouvelle voie est en train de se développer, l'utilisation de matériaux industriels recyclés (voire le développement de boucles courtes permettant la réinjection dans un nouveau cycle de production industrielle des matières premières issues de produits en fin de vie).

L'utilisation de matières recyclées - Les principes d'une économie circulaire

Les réglementations de l'Union européenne imposaient que soient atteints en 2015 des taux de recyclage pour un véhicule en fin de vie d'au moins 85 % en poids et de 95 % en termes de valorisation (recyclage et valorisation

thermique). Pour sa part, Renault a été, dès 2008, le premier constructeur (avec la Mégane) à avoir homologué un véhicule respectant ces taux de recyclage.

Renault et ses fournisseurs sont engagés depuis plus de quinze ans dans une stratégie d'utilisation de matières recyclées dans ce produit exigeant en termes de spécifications techniques qu'est l'automobile. Ce sont notamment les matières plastiques, qui ont été les premières matières à être recyclées dans l'automobile. La démarche permet d'économiser du pétrole, mais aussi l'énergie requise pour le raffinage du pétrole et la polymérisation des monomères obtenus. Ce sont ainsi près de 20 000 tonnes de polypropylène recyclé que Renault réintroduit chaque année dans ses véhicules. C'est plus d'une centaine de pièces en plastique recyclé qui entrent dans la fabrication du nouvel Espace. Renault est aujourd'hui reconnu comme précurseur et leader dans ce domaine. La part de matières plastiques recyclées y est estimée à 13 % (en moyenne) de celles utilisées en 2015.

Parmi les matières métalliques utilisées dans les usines Renault situées en Europe, on estime que la part des matières recyclées dans les aciers est en moyenne de 15 % pour les aciers plats, et est proche de 100 % pour les aciers longs et les fontes. Pour l'aluminium, le taux du recyclé est très variable puisqu'il dépend des procédés retenus pour fabriquer les pièces : il est proche de 0 % pour les jantes en aluminium, alors qu'il atteint presque 100 % pour les pièces de fonderie en aluminium. En ce qui concerne les pièces d'aluminium embouties en interne, ce taux va passer en 2016 de 20 % environ à près de 40 % suite à la mise en place, en lien avec notre fournisseur, d'une boucle courte de recyclage.

Renault s'est engagé à aller encore plus loin, jusqu'à la prise en charge et au traitement de véhicules en fin de vie.

En France, en 2015, environ 70 000 véhicules en fin de vie ont été traités par INDRA, une *joint-venture* que Renault a mise en place avec Sita/Suez Environnement autour de trois activités : la collecte et la gestion des véhicules hors d'usage, la mise en place d'un réseau de démolisseurs et d'une chaîne de traitement des véhicules pour récupérer des pièces et de la matière.

Aujourd'hui, pièces et matériaux résultant d'un recyclage sont encore peu réutilisés dans l'industrie automobile. Mais ce gisement existe et demande à être développé. Avec 350 000 véhicules en fin de vie traités annuellement, on pourrait (en théorie) récupérer 100 000 tonnes d'aciers plats (couvrant ainsi près de 100 % des besoins d'une usine de carrosserie-montage), plus de 20 000 tonnes de polypropylène recyclé (soit la consommation mondiale actuelle de Renault), 18 000 tonnes d'aluminium ou encore 2 500 tonnes de cuivre qui permettraient d'alimenter les fonderies du groupe.

De même, Renault collecte et traite des pots catalytiques de véhicules hors d'usage. Les métaux platinoïdes ainsi

recyclés sont vendus à un fournisseur de l'industrie automobile pour entrer à nouveau dans la fabrication de pots catalytiques. Cette notion de boucle matières est partie intégrante d'une stratégie d'économie circulaire compétitive qui permet de réduire la dépendance du groupe Renault vis-à-vis des seuls approvisionnements extérieurs.

Ainsi, grâce à une meilleure connaissance des matières premières et à l'utilisation de matières secondaires recyclées dans les véhicules qu'elle produit, l'industrie automobile s'ouvre de nouvelles frontières techniques et de nouveaux axes de progrès devant lui permettre de sécuriser ses approvisionnements tout en respectant mieux l'environnement et en optimisant la gestion des ressources naturelles pour l'avenir.

Bibliographie

GRAEDEL (Thomas), *Minerals, Critical minerals and the US Economy*, National Research Council of the National Academies, 2009.

DEGAUQUE (Jacques), « Matériaux à propriétés magnétiques dures : matériaux industriels », in *Techniques de l'Ingénieur* (réf. M 4601), 2001.

Strategic metals, the stakes worldwide?

Foreword

Emmanuel Macron

Introduction

Alain Liger

1) The general framework and state strategies

Economic development and the growing uses of metals

Patrice Christmann, Direction de la Stratégie et de la Recherche, BRGM

Since the origin of human societies two and a half million years ago, mineral resources have been continually tapped as innovations have made it possible or necessary to do so. The real “metal age” started after World War II owing to the combined effects of an abundant supply of cheap energy and the discoveries in chemistry and physics that led to using ever larger quantities of nearly all metals. Nowadays, metals and other minerals are indispensable to several sectors in the economy. They are central to the energy sector: 10% of the world’s energy supply is spent on producing them, and they are indispensable for developing renewable energy sources. The major challenge in this 21st century is to redesign our lifestyles and models of growth, in which the consumption of metals plays a part, so that the impact does not exceed the ecosystem’s resilience. Life on Earth depends on this.

A determinant: China’s industrial strategy

Joël Ruet, researcher at the CNRS (Centre d’Économie de Paris-Nord, CEPN, University Paris 13) and associate researcher i3-CRG (École Polytechnique, CNRS, University of Paris-Saclay)

Far from being just a market for Western firms or a vast operation of dumping for ripe technologies that are losing wind financially, “technological China” - the advanced part of the Chinese industry’s ecosystem - has a “constructed” comparative advantage in terms of technology and technogovernance. In order to assess this ecosystem’s current and future resilience, we need to understand how it has been patiently built in line with a coherent vision “from mines to technological prescripts”.

The EU’s raw materials strategy

Gwenole Cozigou, director of Industrial Transformation and Advanced Value Chains, European Commission

Most European industries, the core of the EU’s economic rank in the world, depend on imports. Access to raw

materials used to be relatively easy but is now uncertain. Coping with this situation calls for a long-term strategy, whence the EU’s “Raw materials initiative”. The latter has entailed a series of programs spanning innovation (the European Innovation Partnership on Raw Materials), research and development (The EU’s R&D project, Horizon 2020, has raw materials as a theme) and education/innovation/entrepreneurship (the launching of a Knowledge and Innovation Community on raw materials). Significant budgetary support must be set aside for this: more than one billion euros from 2014 till 2020.

The French Strategic Metals Committee (COMES), a place devoted to dialog with industry

Alain Liger, honorary engineer from École des Mines, former secretary-general of COMES (Comité pour les Métaux Stratégiques)

In 2010, an analysis of the economic risk of the reliance of industry upon outside mineral sources led the French Government to set up a mineral strategy ; the Committee for strategic metals - COMES - was subsequently created at the beginning of 2011.

Within the COMES, a strategic dialogue takes place between the representatives of the many industry branches that are concerned by minerals and the various Ministries in charge; technical experts from Government agencies also participate in the debates. Members of the COMES work-groups discuss issues concerning industry needs and exposure, e.g. primary or secondary resources, circular economy targets or strategic metals substitution. The COMES debates inspired new Government actions such as creating a digital tool to help small and medium enterprises diagnose the strategic metals risks they are exposed to, and setting a French language Internet portal describing mineral issues and data.

Strategic actions for ensuring Japan’s supply of nonferrous metals

Jean-Claude Guillaneau, director of Géoressources, BRGM

Although the recent price levels of extractive raw materials hardly motivate industrialized countries to assign priority to this branch of the economy, actions have been carried out in recent years. An EU report has identified three pillars: 1) secure for member states industries an access to raw materials on international markets at conditions identical to their competitors’; 2) define, within the EU, the framework conditions for a sustainable supply of raw materials from European sources; and c) boost global efficiency in using and recycling resources so as to reduce the consumption of basic raw materials and, as a consequence, the Union’s dependence on imports. This report has led in

France to the creation of the Strategic Metals Committee (Comité pour les Métaux Stratégiques, COMES) and the idea of “responsible mining”. Other lands, such as South Korea or Japan, are trying to make their supply of metals secure. In 2004, JOGMEC was set up in Japan with the assignment to ensure the supply of hydrocarbons and metals to the archipelago. Among its many strategic actions: the formation of stockpiles; advances in science (bioleaching in Latin America or remote detection in Botswana); the monitoring of mining operations around the world and of metal prices; an examination of equity investments and of contracts for waste removal in mining operations; and the pursuit of strategies in close association with Japanese mining companies (such as Mitsubishi, Mitsui or Sumitomo).

2) A priority: The circular economy

The scarcity of metals and strategic dependency

François Valérian, Conseil Général de l'Économie, associate professor of finance at Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM)

In 2015, the French General Economic Council published a book on the circular economy and competition for resources (L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources) to demonstrate the need for a convergence between the environmental concern about the scarcity of resources and the need to improve France's and Europe's competitive edge in comparison with other regions of the world. The methods of analysis developed therein are applied to the problem of the scarcity of metals, which symbolizes a form of strategic dependency created by technological progress.

The physical limits of recycling in supplying metals

Jean-François Labbé, BRGM

The circular economy tries to optimize efficiency in using and recycling nonrenewable mineral resources. However this concept is often mistakenly interpreted as a closed, self-sufficient economy, where recycled materials would be used and natural resources as such would no longer be needed. On the planetary scale, recycling alone cannot satisfy demand given the increasing consumption of nearly all metals - since the start of the industrial era. Besides, the rate of growth in mining necessary to satisfy demand will have to equal at least the rate of growth in consumption - even were recycling to reach the ideal of 100%.

Recycling smart cards: A glimpse at the state of the art

Christian Thomas, founder of TND

Smart cards contain from 10 to 500 grams of gold per ton (g/t) and from 7 to 100 g/t of palladium, not to mention silver, copper, tin, tantalum and other metals, some of which figure on the list of strategic materials. A point of comparison: open pit gold mines are worked at concentrations less than 1 g/t. In 2013, 51,1 million tons of

electric and electronic equipment were sold on the planet; and wastes estimated at 10,8 million tons will have to be collected. Thanks to regulations, Europe, Japan, South Korea and China are the most efficient recyclers. The United States should be able to catch up since adoption by 25 states of regulations for recycling electric and electronic wastes. In 2013, the manufacturing of new integrated circuit cards amounted to two million tons; and the wastes from these smart cards have been estimated at half a million tons per year, with an annual growth rate of 5%. What do these chip cards contain? How to improve our handling of them once they are thrown out?

Strategic metal recycling: adaptive metallurgical processing infrastructure and technology are essential for a Circular Economy

Markus A. Reuter, Director Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology, and **Antoinette Van Schaik**, Director/owner/founder Material Recycling and Sustainability (MARAS) B.V.

Recycling forms the heart of the Circular Economy (CE) system. Ultimately all products will have to be recycled at their End-of-Life (EoL). Maximizing the recovery of materials and also especially strategic elements from EoL products requires a deep understanding of the fundamental limits and the dynamics of the evolving system, thus an adaptive processing and metallurgical infrastructure is critical to recover all metals and materials. Paramount is the quantification of the “mineralogy”, the complex and interlinked composition of products, to trace and quantify specifically all the losses of materials, metals, alloys, etc. due to thermodynamic and other non-linear interactions. We named this product centric recycling. The recycling potential and performance must be quantified and demonstrated for products, collection systems, waste separation and recovery technologies, and material supply. Emphasis is also placed on informing the consumer through iRE i.e. informing Resource Efficiency in an easy-to-understand way. System Integrated Metal Processing (SIMP) using big-data, multi-sensors, simulation models, metallurgy, etc. links all stakeholders through Circular Economy Engineering (CEE), an important enabler to maximize Resource Efficiency and thus iRE.

Strategic metals: The French urban mine

Alain Geldron, national expert on raw materials, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)

If recycling dates back to ancient origins, urban mining and its place in strategic metals supply is a relatively recent practice. France has significant potential in terms of deposit, sometimes difficult to assess, and stakeholders to develop efficient solutions. However the collection of materials and many used goods is for various waste as electrical and electronic equipment and batteries and accumulators, insufficiently effective. Technological innovation is present in France on this sector as evidenced by the projects submitted and those adopted in the various calls for proposals.

3) French industry and its response to risks

Mines and minerals, a key sector for French industry tomorrow

Catherine Tissot-Colle, co-president of Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M)

Mining and metals holds a strategic position in the chain of value in every major French industry. This sector is facing a dire situation owing to a combination of factors: rising costs at a time when world prices have fallen, and will remain low; unfair “rules of the game” given the commercial breakthrough of low-cost countries and the growing regulatory pressure, which necessitates substantial, in particular human, means. Far from giving up, this sector is trying to remain competitive so as to seize opportunities for serving companies downstream in the production process.

The French mining industry's revival and strategic raw materials

Rémi Galin, department head, Gestion et Législation des Ressources Minérales Non Énergétiques, Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy

The interest shown by investors is evidence of the French mining industry's (recently perceptible) revival. Although mining is no El Dorado in France, it has a real potential for providing the national economy with several strategic raw materials: fluorine, tungsten, antimony and germanium. Under the leadership of the Strategic Metals Committee (COMES), data for assessing this potential have been re-interpreted with the support of BRGM. Reforming the mining code and defining a new, more responsible business model should stimulate the emergence of very profitable mining operations in certain locations. France's offshore mining resources, which have a potential for producing strategic metals, are worthy of consideration in a context where worldwide resources on shore will, in the long term, be in short supply. Successfully developing offshore sites (and onshore, for that matter) depends both on mustering investments from firms to secure their supply lines in the years to come and on making mining operations and techniques environmentally friendly.

The stakes for Delachaux Group in the chromium supply

Philippe Liebaert, head of R&D at DCX Chrome

The chromium found in nature is far from marginal: worldwide reserves of chromite are estimated at more than seven billion tons. Not as much can be said about certain finished products such as ultra pure (more than 99,4%) chromium metal, an indispensable constituent in super-alloys. Functional under critical conditions (in terms of temperature and corrosion), these alloys have many uses especially in aviation (both civilian and military), energy (gas turbines), nuclear power and petrochemistry. There are few players in this field: two in Europe, the others being Russian or Chinese. Environmental regulations have

changed drastically in Europe, and demand (concentrated in the United States, Europe and Japan) for this strategic metal risks being out of balance with supply, which will continue contracting in Europe where prices will be higher than those of competitors who are not subject to such tight regulations.

The European stakes in the titanium supply

Patrick Delaborde, director of sales, UKAD, Aubert et Duval - ERAMET Group

World consumption of titanium is growing fast - in Europe too, where it has been stimulated by civil aviation. Titanium alloys are used to make critical parts, and there is no substitute for it. Owing to the restructuring of its industry, Europe now depends on American and Russian firms. Given the turbulent, fragile geopolitical context, the emergence of a French titanium industry is a solution.

Lithium, a key stake for industry, the economy and the environment in the 21st century

Hughes-Marie Aulanier, project coordinator, Stratégie et Développement, ERAMET Group

Lithium, a soft, silvery white, alkaline metal, has several properties allowing for a wide range of applications. This lightest metal on earth has the highest specific heat and a good electrochemical potential. Its energy density - twice as high as the nearest alternative - makes it ideal for the on-board storage of energy. In 2025, the market for lithium-ion batteries will probably account for more than half of worldwide demand for lithium, as compared with a third at present; and the world market will, according to analysts and market experts, at least double in size. This metal will mainly be extracted in the “Lithium triangle”, a vast area stretching over parts of Chile, Bolivia and Argentina.

From Orange's strategy to methods of evaluation in information and communications technology

Philippe Tuzzolino, director of Environment, Orange Group

Orange is deploying ambitious solutions and action plans that, based on processes related to a circular economy, focus on the environmental and energy transition, climate change, and resource and waste management. Several specialists in Orange Group have been mobilized to reduce our consumption of energy and emissions of greenhouse gases and to optimize the end of life of our appliances and machines through recycling and research on ecoresponsible solutions for our customers. As part of its corporate responsibility program, Orange has voluntarily made commitments about accountability and the tracking of scarce resources and critical materials. Though not involved in manufacturing, Orange does draw up specifications for certain products from suppliers. Orange is committed to anticipating risks on the supply side and to maintaining its reputation by applying methods of corporate social responsibility.

Life-course analysis in the service of Orange's responsible policy on the consumption of strategic metals

Mikko Samuli Vajja, life-cycle analyst, Orange Labs

As part of its environmental policy, Orange has, since 2007, been assessing the environmental impact of its products: both those it sells (for example, cell phones or tablets made by third-party firms) and those it has developed (such as Livebox or television decoders). The major tool for doing this is the life-course analysis in compliance with ISO standards 14040-14044.

Managing strategic raw materials at Renault

Philippe Schulz, expert leader Environnement, Énergie et Matières Premières, Renault

Metals are vital to the automotive industry. Not only has the quantity of metals increased over 100 years of history with a fleet of almost 800 million vehicles worldwide, but so too have the number and variety of metal used. In a typical car of the 70's, a maximum of 20 to 25 different

metals would have been used. Now it is about 60. Even rare ones. Used at trace levels, but an absolute must for their physical or chemical properties in all parts of modern vehicles. As an example, Rare Earths elements - a family of 17 chemical elements with 8 being typically used for automotive applications- might be present in about 2000 different parts of the Renault vehicles, even if the average amount by car is lower than 200g per vehicle for the whole Rare Earths family. Renault developed therefore an internal methodology to assess the criticality of the different metals and get a clear and objective view on the risky materials and the reasons behind. Risks might be external (to Renault), like availability, production concentration, country production governance, or internal ones, like the quantity used or the substitution capability.

This article gives a comprehensive view on the Renault approach to secure raw material supply through criticality analysis, substitution and recycling roadmap and innovative partnerships in R&D.

Issue editor: Alain Liger

Die strategischen Metalle, eine globale Herausforderung ?

Vorwort

Emmanuel Macron

Einführung

Alain Liger

1 - Der Stand der Dinge und die Strategien der Staaten

Die Entwicklung der Wirtschaft und die zunehmende Nutzung von Metallen

Patrice Christmann, Direktion der Strategie und Forschung, BRGM

Seit den Ursprüngen der menschlichen Gesellschaften vor 2,5 Millionen Jahren hat die Nutzung mineralischer Rohstoffe unter dem Einfluss innovativer Entwicklungen, die ihre Verwendung möglich oder notwendig machten, ständig zugenommen. Das eigentliche Zeitalter der Metalle begann jedoch erst nach dem Zweiten Weltkrieg durch eine Konstellation von billigen und reichlichen Energiequellen sowie von Entdeckungen in Chemie und Physik, die zur Nutzung der Quasitotalität der Metalle in immer größeren Mengen führte. Heute sind Metalle und andere Rohstoffe mineralischen Ursprungs in vielen Wirtschaftssektoren unentbehrlich. Sie stehen im Zentrum der energetischen Herausforderungen : der zu ihrer Produktion notwendige Energieverbrauch stellt 10 % der weltweiten Energie dar, aber auch für die Entwicklung der erneuerbaren Energien sind sie unerlässlich. Die wichtigste Herausforderung des 21. Jh.s wird es sein, unsere Wachstumsmodi und unsere Lebensweisen, die ohne Metalle undenkbar sind, zu überdenken, damit ihre Auswirkungen nicht die Resilienzkapazitäten des weltweiten Ökosystems übersteigen, von dem das Leben auf der Erde abhängt.

Ein determinierender Faktor : die industrielle Strategie Chinas

Joël Ruet, Forscher am CNRS, Centre d'économie de Paris-Nord (CEPN), Université Paris 13, und assoziierter Forscher, i3-CRG, École polytechnique, CNRS, Université Paris-Saclay

Das „technologische China“ oder dieser fortgeschrittene Teil des chinesischen industriellen Ökosystems, der keineswegs nur ein Markt für westliche Firmen oder ein großes Dumping-Unternehmen für ausgereifte Technologien ist, dessen Finanzkraft allmählich nachlässt, besitzt einen wahren „konstruierten komparativen Vorteil“ hinsichtlich der Technologie und der Techno-governance. Es geht darum zu begreifen, wie dieses wahrhaftige Ökosystem im Rahmen einer kohärenten Vision, die „vom Bergbau bis zum Produktberater“ reicht, geduldig aufgebaut

wurde, um seine aktuellen und zukünftigen Resilienzen einzuschätzen.

Die europäische Rohstoffstrategie

Gwenole Cozigou, Direktor der industriellen Verarbeitung und weiterentwickelten Wertketten, Europäische Kommission

Die Sicherheit der Versorgung mit Rohstoffen, die nicht energetischer und nicht landwirtschaftlicher Natur sind, ist ein wichtiges Thema für Europa, dessen Industrien, die eine zentrale Bedeutung für seinen wirtschaftlichen Rang in der Welt haben, größtenteils durch Importe versorgt werden. Wenn in der Vergangenheit der Zugang zu Rohstoffen relativ leicht war, so ist die gegenwärtige Situation eher von Unsicherheiten geprägt. Diese Herausforderungen können nur mit langfristigen Strategien bewältigt werden. Dies ist das Ziel der europäischen Rohstoffstrategie, die den Titel „Rohstoffinitiative“ trägt. Sie besteht in einer Reihe von spezifischen Zielsetzungen, die der Innovation (mit der europäischen Partnerschaft zur Innovation hinsichtlich der Rohstoffe), der Forschung und Entwicklung (mit der Behandlung der Rohstofffrage im europäischen Programm Horizont 2020) sowie der dreiteiligen Thematik Bildung/Forschung-Innovation/Unternehmertum (mit der Gründung einer Gemeinschaft für Innovation und das Wissen über die Rohstoffe) gewidmet sind. Dieses Programm erfordert erhebliche finanzielle Anstrengungen von mehr als einer Milliarde Euro gemeinschaftlicher Finanzierung in der Periode 2014-2020.

Das Komitee für strategische Metalle (COMES), ein Ort für den Dialog über die Industrie

Alain Liger, ehrenamtlicher ingénieur général des Mines, ehemaliger Generalsekretär des COMES

Im Bewusstsein des Risikos der Abhängigkeit von ausländischen Ressourcen beschloss die französische Regierung 2010 eine neue Strategie für die Versorgung der nationalen Wirtschaft mit mineralischen Rohstoffen. Der erste Schritt war die Schaffung des COMES (Komitee für strategische Metalle) Anfang 2011.

Dieses Komitee ist eine Organisation, in der ein Dialog geführt wird, an dem zum einen die Vertreter zahlreicher Industriesektoren, die mineralische Rohstoffe benötigen, und zum anderen die nicht weniger zahlreichen Ministerien teilnehmen, die mittelbar von dieser Thematik betroffen sind. Die Teilnehmer dieser Arbeitsgruppen debattieren über die Bedarfslagen der Industrie und über Versorgungsschwierigkeiten bezüglich der Primärressourcen und Sekundärressourcen, sowie über die Ziele der Kreislaufwirtschaft oder über Ersatzmöglichkeiten für gewisse strategische Metalle.

Diese Debatten haben den Behörden Impulse verliehen und zur Schaffung eines digitalen Programms geführt, das den kleinen Betrieben die Möglichkeit gibt, eine Diagnose über ihre Rohstoffversorgungsrisiken aufzustellen. Zudem wurde ein Portal auf Französisch eingerichtet, um die Analysen und die Informationen über die mineralischen Rohstoffe zu verbreiten.

Die Aktionsweisen der japanischen Versorgungsstrategie hinsichtlich der strategischen Nichteisenmetalle

Jean-Claude Guillaneau, Direktor der Georessourcen, BRGM

Die Kurse der Extraktivstoffe in der jüngsten Vergangenheit reizen die Industrieländer kaum dazu an, diesen Bereich zu ihren nationalen Prioritäten zu erklären. Und dennoch wurden im Laufe der letzten Jahre Initiativen ergriffen, wie die Bekanntgabe der EU, die drei Pfeiler definiert : a) Die Garantie, den Mitgliedstaaten den Zugang zu Rohstoffen auf den internationalen Märkten zu Bedingungen zu gewähren, die identisch mit denjenigen ihrer industriellen Konkurrenten sind ; b) die Bestimmung der Rahmenbedingungen in der EU, die geeignet sind, eine nachhaltige Rohstoffversorgung durch die europäischen Versorgungsquellen zu fördern, und c) die Dynamisierung der globalen Effizienz der Ressourcen und die Förderung der Wiederverwertung, um den Verbrauch von primären Rohstoffen der EU und folglich deren Abhängigkeit von Importen zu reduzieren. Diese Bekanntgabe hat in Frankreich zur Schaffung des Komitees für strategische Metalle, COMES, und zur aktuellen Debatte über den „verantwortlichen Bergbau“ beigetragen.

In anderen Ländern wurden Initiativen ergriffen (wie in Korea oder in Japan), um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Das japanische Beispiel nahm 2004 in der Schaffung einer spezifischen Organisation, der JOG-MEC, Gestalt an. Diese Struktur hat die Aufgabe, die Versorgung der japanischen Inselgruppe mit Mineralöl und Metallen sicherzustellen. Sie nutzt vielfältige Strategien aus : die Bildung strategischer Vorräte, wissenschaftliche Entwicklungen (die Bioauslaugung in Lateinamerika oder die Fernerkundung in Botswana), die Beobachtung der Metallkurse und der weltweiten Extraktionsprojekte und schließlich die Analyse der Beteiligungen oder der Verträge zur Abfallbeseitigung im Zusammenhang mit Extraktionsprojekten ; es sind Strategien, die in enger Zusammenarbeit mit japanischen Bergbaugesellschaften (wie Mitsubishi, Mitsui oder Sumitomo) durchgeführt werden.

2 - Eine Priorität : die Kreislaufwirtschaft

Seltene Metalle und strategische Abhängigkeit

François Valérian, Conseil général de l'économie, assoziiertes Professor der Finanzwirtschaft , CNAM

2015 veröffentlichte der Conseil général de l'économie eine Untersuchung mit dem Titel „L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources“ (Die Kreislaufwirtschaft oder der Wettbewerb um die Ressourcen),

in der die Notwendigkeit einer Synthese zwischen den ökologischen Besorgnissen hinsichtlich der Verknappung der Ressourcen und dem Imperativ, die französische und europäische Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu den anderen Regionen der Welt zu verbessern, dargelegt wird. Der vorliegende Artikel wendet die Analysemethoden dieser Untersuchung auf den Fall der seltenen Metalle an, der emblematisch für eine strategische Abhängigkeit ist, die von den technologischen Fortschritten begünstigt wurde.

Die physischen Grenzen des Beitrags des Recyclings zur Versorgung mit Metallen

Jean-François Labbé, BRGM

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft, das darauf abzielt, die Wiederverwertung und die Effizienz der Nutzung nicht erneuerbarer mineralischer Ressourcen zu optimieren, wird oft zu Unrecht als ein Konzept einer geschlossenen, sich selbst genügenden Wirtschaft interpretiert, die sich mit verwerteten Abfallstoffen versorgen würde und keine primären natürlichen Rohstoffe mehr benötigte. Doch solange weltweit der Verbrauch eines bestimmten Metalls zunimmt - was für die meisten Metalle seit Beginn der industriellen Ära quasi kontinuierlich der Fall ist - wird es unmöglich sein, den Bedarf allein durch Wiederverwertung zu decken. Und die Wachstumsrate der Fördermenge der Bergbauindustrie, die zur Deckung dieses Bedarfs notwendig ist, wird mathematisch mindestens der Wachstumsrate des Verbrauchs entsprechen müssen, und dies sogar mit einer idealen Wiederverwertungsrate von 100 %.

Das Recycling der elektronischen Karten : ein Überblick über den Stand der Dinge

Christian Thomas, Gründer der Gesellschaft TND (Gesellschaft für innovierende Technologien der metallurgischen Extraktion)

Die elektronischen Karten enthalten 10 bis 500 Gramm Gold pro Tonne (g/t), 7 bis 100 g/t Palladium, Silber, Kupfer, Zinn, Tantal, etc. Einige dieser Metalle sind in der Liste der strategischen Stoffe aufgeführt (zur Information : im Tagebau werden Goldminen mit einem Gehalt von weniger als 1 g/t betrieben.

2013 wurden weltweit 51,1 Millionen Tonnen (Mt) elektrischer und elektronischer Geräte verkauft. Die entsprechenden Abfälle werden auf 10,8 Mt geschätzt. Europa, Japan, Korea und China sind auf diesem Gebiet aufgrund ihrer gesetzlichen Bestimmungen die wirksamsten geographischen Zonen auf diesem Gebiet. Seitdem in 25 Staaten der USA verpflichtende Vorschriften zum Recycling von elektrischen und elektronischen Geräten eingeführt wurden, könnte der nordamerikanische Kontinent seinen Rückstand aufholen. Die Herstellung von neuen elektronischen Karten wurde 2013 auf 2 Mt geschätzt. Die jährliche Produktion von entsorgten Karten wird auf 500 000 Tonnen geschätzt und sie verzeichnet ein Wachstum von 5 % pro Jahr. Was enthalten diese Karten und wie kann die Weiterverarbeitung nach der Entsorgung verbessert werden ?

Strategic metal recycling : adaptive metallurgical processing infrastructure and technology are essential for a Circular Economy

Markus A. Reuter, Director Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology, and Antoinette Van Schaik, Director/owner/founder Material Recycling and Sustainability (MARAS) B.V.

Recycling forms the heart of the Circular Economy (CE) system. Ultimately all products will have to be recycled at their End-of-Life (EoL). Maximizing the recovery of materials and also especially strategic elements from EoL products requires a deep understanding of the fundamental limits and the dynamics of the evolving system, thus an adaptive processing and metallurgical infrastructure is critical to recover all metals and materials. Paramount is the quantification of the "mineralogy", the complex and interlinked composition of products, to trace and quantify specifically all the losses of materials, metals, alloys, etc. due to thermodynamic and other non-linear interactions. We named this product centric recycling. The recycling potential and performance must be quantified and demonstrated for products, collection systems, waste separation and recovery technologies, and material supply. Emphasis is also placed on informing the consumer through iRE i.e. informing Resource Efficiency in an easy-to-understand way. System Integrated Metal Processing (SIMP) using big-data, multi-sensors, simulation models, metallurgy, etc. links all stakeholders through Circular Economy Engineering (CEE), an important enabler to maximize Resource Efficiency and thus iRE.

Strategische Metalle : urbane Wertstoffpotenziale in Frankreich

Alain Geldron, nationaler Experte für Rohstoffe, ADEME

Die Ursprünge des Recyclings liegen weit zurück, doch das urbane Wiederverwertungspotential und seine Platz in der Versorgung mit strategischen Metallen wurde erst in der jüngsten Vergangenheit entdeckt. Auf diesem Gebiet verfügt Frankreich über ein nicht zu unterschätzendes Potenzial an urbanen Wertstoffen, das zuweilen schwer einzuschätzen ist, und an Akteuren, die in der Lage sind, leistungsfähige Lösungen zu entwickeln. Doch die Entsorgung der Wertstoffe und gebrauchten Geräte ist für verschiedene Abfälle, wie elektrische und elektronische Ausrüstungsteile, Batterien und Akkumulatoren noch unzureichend entwickelt. Wie es zahlreiche Projekte, die bereits patentiert sind, und andere, die im Rahmen einer Projektanweisung geplant sind, beweisen, ist in Frankreich die technologische Innovation in diesem Sektor sehr gut vorangekommen.

3 - Die französische Industrie und ihre Antwort auf das Risiko

Bergbauwirtschaft und mineralische Rohstoffe : ein Schlüsselsektor im Dienst der französischen Industrie von morgen

Catherine Tissot-Colle, Mitpräsidentin von A3M (Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux)

Die Bergbau- und Metallindustrie, die einen strategischen Platz in der Wertschöpfungskette jedes anderen franzö-

sischen Industriesektors einnimmt, hat eine äußerst schwierige Situation zu bewältigen, die aus einer Konstellation verschiedener Faktoren resultiert : die steigenden Kosten, während die Kurse weltweit verfallen, ungleiche „Spielregeln“ angesichts der kommerziellen Vorstöße der Niedrigkostenländer und ein zunehmender Reglementierungsdruck, der beträchtliche Mittel und einen stärkeren Einsatz von Arbeitskräften erfordert. Der Sektor will sich jedoch nicht geschlagen geben und unternimmt beträchtliche Anstrengungen, um seine Wettbewerbsfähigkeit aufrechtzuerhalten und um somit alle Möglichkeiten auszuschöpfen, den Industriesektoren zu dienen, die seine Abnehmer sind.

Die Erneuerung der französischen Bergbauwirtschaft und die strategischen Rohstoffe

Rémi Galin, Chef der Abteilung Verwaltung und Gesetzgebung der nichtenergetischen mineralischen Ressourcen, französisches Ministerium für Umwelt, Nachhaltigkeit und Energie

Das Interesse einiger Investoren ist ein konkretes Zeichen für die seit einigen Jahren wahrnehmbare Erneuerung der französischen Bergbauwirtschaft. Frankreich kann nicht wirklich als ein Eldorado des Bergbaus bezeichnet werden, aber es verfügt über ein wahres Potenzial für mehrere strategische Substanzen (Fluorit, Wolfram, Antimon und Germanium), die für die nationale Wirtschaft wichtig sein können. Mehrere Initiativen begleiten diese neue Entwicklung. Unter der Leitung des *Comité des métaux stratégiques* (COMES) wurde dieses Potenzial dank den über frühere Daten gewonnenen Erkenntnissen des BRGM klar dargelegt. Die Reform des *Code minier*, die Bestimmung und Förderung einer neuen Bergbauordnung, die erhöhten Verantwortungsstandards gerecht wird, sind dazu angetan, neue Bergbauprojekte in die Wege zu leiten, die ein großer Gewinn für die betroffenen Regionen sein werden. Die französischen mineralischen Ressourcen im Meeresboden bieten ebenfalls ein Versorgungspotenzial an strategischen Metallen, das (natürlich langfristig) in einen Kontext der Verknappung der weltweiten terrestrischen Ressourcen eingeordnet werden muss. Für ihren Abbau und ihren Erfolg sind ebenso wie für die terrestrischen Ressourcen die französischen Kapazitäten der Mobilisierung von Investitionen nötig, um langfristig die potenzielle Versorgung sicherzustellen, sowie die Vereinbarkeit mit der Umweltgesetzgebung hinsichtlich der Extraktionprojekte und der entsprechenden Fördertechniken.

Die Herausforderungen für die Delachaux-Gruppe hinsichtlich der Versorgung mit Chrom

Philippe Liebaert, Verantwortlicher für Forschung und Entwicklung von DCX Chrome

Das Vorkommen von Chrom in der Natur ist keineswegs marginal (die weltweiten Reserven von Chromit werden auf mehr als 7 Milliarden Tonnen geschätzt), doch das gleiche gilt nicht für gewisse Endprodukte wie Chrom Metall ultra pur (mehr als 99,4 % Reinheit). Dieses Metall gehört zu den unumgänglichen Bestandteilen in der Herstellung von Superlegierungen, Legierungen, die in allen kritischen Kontexten benutzt werden (Temperatur, Korro-

sion). Zahlreich sind ihre Verwendungen auf den Gebieten der Luftfahrtindustrie (der zivilen wie der militärischen), der Energiewirtschaft (Gasturbinen), der Kerntechnik und der Petrochemie, um nur einige der wichtigsten zu nennen. Die Herstellung dieses Metalls ist in den Händen nur weniger Akteure konzentriert, davon 2 in Europa, die anderen in Russland und China. Da sich die Umweltnormen in Europa drastisch verändern, besteht das große Risiko eines Ungleichgewichts zwischen der Nachfrage nach diesem strategischen Metall (vor allem in den USA, in Europa und Japan) und dem Angebot in Europa, das sich verringern und gegenüber den Konkurrenten, die geringeren Reglementierungszwängen unterliegen, teurer werden könnte.

Die Bedeutung der Versorgung Europas mit Titan

Patrick Delaborde, Direktor der kommerziellen Entwicklung von UKAD, Aubert und Duval, ERAMET-Gruppe

Der weltweite Verbrauch von Titan nimmt beträchtlich zu. Auch in Europa ist ein starkes Wachstum des Verbrauchs zu verzeichnen, da die zivile Luftfahrtindustrie die Abnahme antreibt. Titanlegierungen werden in der Herstellung entscheidender Teile benutzt, für die kein Ersatzprodukt existiert. Im Zuge der Umstrukturierungen der industriellen Akteure ist Europa von amerikanischen und russischen Gesellschaften abhängig geworden. In einem komplizierten geopolitischen Kontext, der die Fragilität einer solchen Situation noch steigert, ist die Entwicklung eines französischen Titansektors eine angemessene Reaktion.

Lithium, ein Metall von zentraler Bedeutung für die Industrie, die Wirtschaft und die Umwelt im 21. Jh.

Hughes-Marie Aulanier, Beauftragter für Strategie und Entwicklung, ERAMET-Gruppe

Lithium, ein alkalihaltiges, weiches, silberweißes Metall, besitzt viele Eigenschaften, die es für ein breites Feld von Verwendungen geeignet machen. Es ist das leichteste Metall auf der Erde, besitzt die größte spezifische Wärme sowie ein großes elektrochemisches Potenzial. Zudem ist seine energetische Dichte zwei mal höher als diejenige eines verwandten alternativen Metalls, was es idealerweise zur Verwendung in Batterien bestimmt.

Im Jahr 2025 müsste der Markt der Lithium-Ion-Akkumulatoren mehr als die Hälfte der weltweiten Nachfrage nach Lithium darstellen, während es gegenwärtig etwa ein Drittel ist, und zwar auf einem Weltmarkt, der sich nach den meisten Analysten und Akteuren mindestens auf das Doppelte vergrößert haben wird.

Dieses Lithium wird hauptsächlich aus den Salzseen des "Lithium-Dreiecks" extrahiert werden, einer ausgedehnten Region im Grenzgebiet zwischen Chile, Bolivien und Argentinien.

Die Strategie von Orange und die Einführung von Bewertungsmethoden für den Sektor der Informations- und Kommunikationstechnologien

Philippe Tuzzolino, Umwelt-Direktor der Orange-Gruppe

Orange entwickelt Lösungen und ehrgeizige Aktionspläne, um die ökologische und energetische Wende im

Zusammenhang mit dem Klimawandel und den neuen Anforderungen an das Ressourcen- und Abfallmanagement zu begleiten, und realisiert aus diesem Grund Projekte auf der Grundlage der Kreislaufwirtschaft. So werden zahlreiche Tätigkeitsbereiche des Unternehmens mobilisiert, um den Energieverbrauch und den Ausstoß an Treibhausgasen zu reduzieren und um die Entsorgung von Ausrüstungen zu optimieren und deren Wiederverwertung zu fördern. Zudem möchte Orange ihren Kunden Lösungen anbieten, die einem höheren Maß an Verantwortung für die Umwelt gerecht werden. Im Rahmen ihrer Selbstverpflichtung und ihrer Politik der Responsabilité sociale d'entreprise (Verantwortung des Unternehmens gegenüber der Gesellschaft) setzt sich Orange S.A. für die Verfolgbarkeit und Transparenz der seltenen Ressourcen und der als entscheidend betrachteten Stoffe ein. Die Gruppe übt zwar keine Herstellungstätigkeit aus, erarbeitet aber für gewisse Ausrüstungen die Lastenhefte für gewisse Lieferfirmen. Im Bewusstsein ihrer Position verpflichtet sich die Gruppe dazu, eventuelle Risiken hinsichtlich der Versorgung und des Ansehens zu antizipieren, indem sie eine Politik der Verantwortung gegenüber der Gesellschaft praktiziert.

Die Lebenszyklusanalyse im Dienst einer Politik des verantwortlichen Verbrauchs strategischer Metalle bei Orange

Mikko Samuli Vaija, Analyst Cycle de vie, Orange Labs

Im Rahmen ihrer Umweltpolitik führt die Gesellschaft Orange seit 2007 Bewertungen der Umweltauswirkungen ihrer Produkte durch. Diese Strategie betrifft sowohl die von Orange vertriebenen Produkte, wie Mobiltelefone oder Tablets, die von Drittindustrien hergestellt werden, als auch die Produkte, die von Orange entwickelt werden (Livebox und TV Decoder, zum Beispiel). Die Lebenszyklusanalysen, die nach den Prinzipien der Normen ISO 14040-14044 durchgeführt werden, sind für diese Arbeit von entscheidender Bedeutung.

Das Management der strategischen Rohstoffe bei Renault

Philippe Schulz, Experte (leader) und Verantwortlicher für Umwelt, Energie und Rohstoffe, Renault

Um ihre Versorgung mit mineralischen Rohstoffen sicherzustellen, müssen die Unternehmen hinsichtlich der strategischen Analyse und der technischen und industriellen Entwicklung grundlegende Neuorientierungen vornehmen. Schon im Jahr 2009 hat Renault ein Gutachten in Auftrag gegeben, das die Risiken hinsichtlich der Rohstoffversorgung identifizieren und durch Gegenmaßnahmen die Verwundbarkeit reduzieren soll, die durch Spannungen auf den Versorgungsmärkten und durch daraus resultierende finanzielle Schwierigkeiten entstehen könnte. Der Abschluss von innovierenden Partnerschaften für Forschung und Entwicklung, die Analyse seiner Versorgungssektoren in Abstimmung mit seinen Lieferanten sowie die technischen Strategien auf dem Gebiet der Ersatz- und Wiederverwertungsmöglichkeiten, dies alles sind zentrale Leitlinien im Engagement der Gesellschaft Renault zur Optimierung ihres Managements auf dem Gebiet der strategischen Rohstoffe.

Koordinierung der Beiträge von Alain Liger

Los metales estratégicos, ¿un desafío mundial?

Prólogo

Emmanuel Macron

Introducción

Alain Liger

1 - Marco General y estrategias de los Estados

Desarrollo económico y aumento de los usos de los metales

Patrice Christmann, Dirección de la estrategia e investigación, BRGM

Desde el origen de las sociedades humanas, hace 2,5 millones de años, el uso de los recursos minerales no ha dejado de aumentar al ritmo de las innovaciones que permiten o requieren su utilización. No obstante, la verdadera Edad de los metales sólo ha comenzado después de la Segunda Guerra Mundial gracias a los efectos combinados de la disponibilidad de una energía abundante y barata, y a los descubrimientos realizados en química y física que han permitido el uso, en cantidades cada vez más importantes, de la casi totalidad de los metales. Actualmente, los metales y otras materias primas de origen mineral son indispensables en muchos sectores de la economía. Están en el centro de los problemas energéticos: si el consumo energético necesario para su producción representa el 10% de la energía mundial, son también indispensables para el desarrollo de las energías renovables. El principal desafío del siglo XXI será reconsiderar nuestras pautas de crecimiento y modo de vida, entre ellos el uso de los metales, para que su impacto no supere la capacidad de resiliencia del ecosistema mundial, del cual depende la vida terrestre.

La estrategia industrial de China, un factor determinante

Joël Ruet, investigador del CNRS en el Centro de economía de París Norte (CEPN), Universidad de París 13 e Investigador Asociado i3-CRG, Escuela Politécnica, CNRS, Universidad París-Saclay

La «China tecnológica» o esa parte avanzada del ecosistema industrial chino, lejos de ser sólo un mercado para las empresas occidentales o una gran empresa de *dumping* para tecnologías maduras cuya economía se debilita poco a poco, posee una verdadera «ventaja comparativa construida» en los sectores de la tecnología y la tecno-gobernabilidad. En el artículo se examina de qué manera este auténtico ecosistema ha sido construido paulatinamente mediante una visión coherente «de la mina al prescriptor tecnológico», para evaluar su resiliencia actual y futura.

La estrategia europea de las materias primas

Gwenole Cozigou, Director de transformación industrial y cadenas de valor avanzadas en la Comisión Europea

La garantía del abastecimiento de materias primas no energéticas y no agrícolas es un tema de importancia para Europa, cuyas industrias, que constituyen la esencia de su posición económica en el mundo, se alimentan mayoritariamente a través de las importaciones. Si, en el pasado, el acceso a las materias primas era relativamente fácil, la situación actual es más incierta. Enfrentar estos retos requiere el desarrollo de una estrategia a largo plazo. Tal es el objetivo de la estrategia europea de materias primas llamada «Iniciativa de materias primas». Esta estrategia se materializa a través de una serie de acciones más específicas para la innovación (con la Asociación europea de innovación en materias primas), investigación y desarrollo (con un tema dedicado a las materias primas en el programa de investigación y desarrollo europeo Horizonte 2020) y, por último, con la terna Educación/Investigación-Innovación/Emprendimiento (con el lanzamiento de una comunidad de la innovación y del conocimiento (KIC) sobre las materias primas). Este conjunto corresponde a un esfuerzo económico importante, de más de mil millones de euros de financiación comunitaria para el periodo 2014-2020.

El Comité para los metales estratégicos (COMES), un lugar de diálogo dedicado a la industria

Alain Liger, ingeniero general de Minas honorario, ex-secretario general del COMES

En 2010, al descubrir el riesgo para la economía francesa que representaba la dependencia de la industria de fuentes externas, el gobierno francés ha puesto en marcha una nueva estrategia mineral. Uno de sus primeros actos fue la creación del Comité para los metales estratégicos (COMES), a comienzos de 2011.

El COMES es una organización donde dialogan, por una parte, los representantes de los diversos sectores industriales que necesitan materias primas minerales y, por otra parte, los no menos numerosos ministerios encargados de los problemas subyacentes. Los miembros de estos grupos de trabajo analizan temas relacionados con las necesidades de la industria y el riesgo de abastecimiento; dichos debates se refieren a los recursos primarios y secundarios, al igual que los objetivos de la economía circular o la sustitución de algunos metales estratégicos.

Los debates de los grupos de trabajo del COMES han inspirado ciertas acciones del Gobierno, como la creación de una herramienta digital que permita a las PYME efectuar un diagnóstico sobre su exposición al riesgo de abastecimiento de diversas materias primas o la creación de un portal en francés para la difusión de los análisis y datos sobre las materias primas minerales.

Los modos de acción de la estrategia japonesa de abastecimiento de metales estratégicos no ferrosos

Jean-Claude Guillaneau, Director de Géoresources, BRGM

El contexto reciente de los precios de las materias extractivas no incita a los países industrializados a tomar en cuenta este campo entre sus prioridades nacionales. Sin embargo, algunas iniciativas han sido adoptadas en los últimos años, como la comunicación de la Unión Europea, que define tres ejes: a) garantizar a las industrias de los países miembros el acceso a las materias primas en los mercados internacionales en condiciones idénticas a las de sus competidores industriales; b) determinar dentro de la UE las condiciones marco que apoyen el suministro sostenible de materias primas procedentes de fuentes europeas y, por último, c) impulsar la eficiencia global de los recursos y promover el reciclaje con el fin de reducir el consumo de materias primas de la Unión Europea y, por lo tanto, su dependencia con respecto a las importaciones. En Francia, esta comunicación ha contribuido a la creación del COMES y posteriormente a la reflexión actual sobre la «mina responsable». En otros países, se han adoptado iniciativas (como en Corea o Japón) con el fin de garantizar el abastecimiento. El ejemplo japonés se materializa, en 2004, a través de la creación de una organización específica, el JOGMEC. Esta estructura tiene por objetivo garantizar el abastecimiento del archipiélago japonés en hidrocarburos y metales. Para ello, emplea estrategias múltiples como constitución de reservas estratégicas, desarrollos científicos (la biolixiviación en América Latina o la teledetección en Botsuana), vigilancia de la evolución de los precios de los metales y los proyectos de explotación en todo el mundo y, por último, estudio de las participaciones o contratos de recolección de residuos en los proyectos mineros; estrategias llevadas a cabo en estrecha colaboración con las compañías mineras japonesas (como Mitsubishi, Mitsui o Sumitomo).

2 - La economía circular, una prioridad

Metales raros y dependencia estratégica

François Valérian, Consejo General de la Economía, profesor asociado de finanzas en el CNAM

El Consejo General de la Economía ha publicado en 2015 un libro titulado *L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources* (La economía circular o la competencia por los recursos), en el que se intenta demostrar la necesidad de una síntesis entre las preocupaciones ambientales de escasez de recursos y la necesidad de una mejor competitividad francesa y europea frente a otras regiones del mundo. El presente artículo aplica los métodos de análisis desarrollados por este libro en el caso de los metales raros, emblemáticos en la dependencia estratégica que se ha creado a través de avances tecnológicos.

Los límites físicos de la contribución del reciclaje en el abastecimiento de metales

Jean-François Labbé, BRGM

El concepto de economía circular, cuyo objetivo es op-

timizar el reciclaje y la eficiencia del uso de los recursos minerales no renovables, suele ser interpretado erróneamente como un concepto de economía cerrada, autosuficiente, que se alimenta de materiales reciclados y no necesita recursos naturales básicos. Sin embargo, en todo el mundo mientras el consumo de un metal determinado aumente, lo que sucede de manera casi continua con la gran mayoría de metales desde el comienzo de la era industrial, seguirá siendo imposible satisfacer la demanda únicamente mediante el reciclaje. Matemáticamente, la tasa de crecimiento de la producción minera necesaria para satisfacer esta demanda tendrá que ser al menos igual a la tasa de crecimiento del consumo, incluso con una tasa de reciclaje ideal de 100%.

Panorama actual del reciclaje de las tarjetas electrónicas

Christian Thomas, fundador de TND (empresa que desarrolla tecnologías de extracción metalúrgicas innovadoras)

Las tarjetas electrónicas contienen de 10 a 500 gramos de oro por tonelada (g/t), de 7 a 100 g/t de paladio, plata, cobre, estaño, tantalio, etc. Algunos de estos metales forman parte de la lista de materias estratégicas (las minas de oro a cielo abierto se explotan con contenidos inferiores a 1g/t).

En 2013, 51,1 millones de toneladas (Mt) de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) han sido vendidas en el planeta. La recolección de sus desechos (RAEE) se estima en 10,8 Mt. Europa, Japón, Corea y China son las zonas geográficas más eficaces en este campo debido a su reglamentación. La puesta en marcha en 25 estados de los Estados Unidos de normas restrictivas sobre el reciclaje de los RAEE deberá permitir que el continente norteamericano se ponga al día en la materia. En 2013, la fabricación de tarjetas electrónicas nuevas se estima en 2 Mt. La producción anual de residuos de tarjetas se estima en 500000 toneladas, con un crecimiento del 5% anual. ¿Qué contienen estas tarjetas y cómo mejorar su tratamiento tras desecharlas? El artículo tratará de responder estas preguntas.

Strategic metal recycling: adaptive metallurgical processing infrastructure and technology are essential for a Circular Economy

Markus A. Reuter, Director Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology, and Antoinette Van Schaik, Director/owner/founder Material Recycling and Sustainability (MARAS) B.V.

Recycling forms the heart of the Circular Economy (CE) system. Ultimately all products will have to be recycled at their End-of-Life (EoL). Maximizing the recovery of materials and also especially strategic elements from EoL products requires a deep understanding of the fundamental limits and the dynamics of the evolving system, thus an adaptive processing and metallurgical infrastructure is critical to recover all metals and materials. Paramount is the quantification of the «mineralogy», the complex and interlinked composition of products, to trace and quantify specifically all the losses of materials, metals, alloys, etc. due

to thermodynamic and other non-linear interactions. We named this product centric recycling. The recycling potential and performance must be quantified and demonstrated for products, collection systems, waste separation and recovery technologies, and material supply. Emphasis is also placed on informing the consumer through iRE i.e. informing Resource Efficiency in an easy-to-understand way. System Integrated Metal Processing (SIMP) using big-data, multi-sensors, simulation models, metallurgy, etc. links all stakeholders through Circular Economy Engineering (CEE), an important enabler to maximize Resource Efficiency and thus iRE.

Metales estratégicos, la mina urbana francesa

Alain Geldron, experto nacional en materias primas en la ADEME (Agencia del medioambiente y la gestión energética)

Si el reciclaje tiene orígenes lejanos, la mina urbana y su posición dentro de la cadena de abastecimiento de metales estratégicos provienen de prácticas relativamente recientes. En esta materia, Francia dispone de un potencial considerable en términos de yacimientos, a veces difícil de evaluar, y de actores capaces de desarrollar soluciones eficaces. Sin embargo, la recolección de materias y bienes usados sigue siendo poco eficaz para distintos desechos como los aparatos eléctricos y electrónicos usados, las pilas y las baterías. En Francia, la innovación tecnológica está muy presente en este sector, como lo demuestran los numerosos proyectos que han sido objeto de un registro de patentes así como los que aparecen en el contexto de distintas convocatorias de proyectos.

3 - La industria francesa y su respuesta al riesgo

Minas y minerales, un sector clave al servicio de la industria francesa del futuro

Catherine Tissot-Colle, co-presidenta de A3M (Alianza de minerales y metales)

El sector de las minas y metales, que ocupa un lugar estratégico en la cadena de valor de los otros grandes sectores industriales franceses, debe hacer frente a una situación extremadamente difícil debido a la combinación de varios factores: un encarecimiento de los costes, aun cuando los precios mundiales siguen siendo muy bajos; «reglas del juego» a menudo injustas frente a los avances comerciales de los países de bajos coste y una presión normativa creciente que necesita importantes recursos, sobre todo a nivel humano.

Lejos de darse por vencido, el sector se esfuerza por mantener su competitividad y, poder así, aprovechar todas las oportunidades de servir a los sectores industriales.

La renovación minera francesa y las materias primas estratégicas

Rémi Galin, director de la Oficina de gestión y legislación de los recursos minerales no energéticos, Ministerio francés de Ecología, Desarrollo sostenible y Energía

El interés manifestado por algunos inversores encarna

un renacimiento minero francés que se ha hecho perceptible en los últimos años. Francia no es el paraíso minero, pero posee un potencial para varias sustancias estratégicas (fluorina, tungsteno, antimonio y germanio) que pueden contribuir a la economía nacional. Varias iniciativas apoyan esta renovación. Gracias a la ayuda del Comité de metales estratégicos (COMES) la reinterpretación de datos antiguos realizada por el BRGM demuestra este potencial. La reforma del Código Minero, así como la definición y la promoción de un nuevo modelo minero más responsable permitirán el surgimiento de proyectos mineros muy benéficos para estos territorios.

Los recursos mineros marinos ofrecen también posibilidades de abastecimiento de metales estratégicos que se deben considerar en un contexto (aunque a más largo plazo) de escasez de recursos terrestres mundiales. Al igual que para los recursos terrestres, su desarrollo y éxito dependen de nuestra capacidad para movilizar la inversión de las empresas hacia esta forma de garantía potencial del abastecimiento a largo plazo y la compatibilidad medioambiental de los proyectos de explotación y de las técnicas que puedan ser utilizadas.

Los desafíos para el grupo Delachaux para su abastecimiento de cromo

Philippe Liebaert, responsable de Investigación y Desarrollo de DCX Chrome

Aunque el cromo esté muy presente en la naturaleza (las reservas mundiales de cromita se calculan en más de 7 mil millones de toneladas), no ocurre lo mismo con algunos productos acabados como el cromo metal ultra puro (más de 99,4% de pureza). Este metal forma parte de los componentes indispensables para la fabricación de superaleaciones, aleaciones que son utilizadas en los medios extremos (en términos de temperatura y corrosión). Sus aplicaciones son numerosas, en particular en los ámbitos de la aeronáutica (tanto civil como militar), energía (turbinas de gas), energía nuclear y petroquímica, por citar sólo algunas de las principales. La fabricación de este metal está en manos de pocos actores, 2 en Europa y el resto en Rusia o China. Ya que las normas ambientales cambian drásticamente en Europa, se corre el riesgo de crear un desequilibrio entre la demanda de este metal estratégico (concentrada en los Estados Unidos, Europa, Japón) y una oferta que disminuiría en Europa y sería más costosa, frente a competidores con normativas menos restrictivas.

Los retos europeos para el abastecimiento de titanio

Patrick Delaborde, Director de Desarrollo Comercial de UKAD, Aubert et Duval - Grupo ERAMET

El consumo mundial de titanio metal cree de manera importante. En Europa, el consumo también aumenta considerablemente, impulsado por el mercado de la aeronáutica civil. Las aleaciones de titanio se utilizan en la fabricación de piezas importantes, para las que no existe ningún producto de sustitución. Al compás de las reestructuraciones de los actores industriales, Europa depende de empresas estadounidenses y rusas. En un contexto geopolítico

inestable, que pone de relieve la fragilidad de dicha situación, la aparición de una cadena de titanio francesa es una gran respuesta.

El litio, un metal en el centro de los retos industriales, económicos y ambientales del siglo XXI

Hughes-Marie Aulanier, responsable de la Estrategia y Desarrollo, grupo ERAMET

El litio, metal alcalino (blando y blanco plateado) tiene muchas propiedades que le permiten ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones. Es el metal terrestre más ligero, tiene el mayor nivel de calor másico, así como un gran potencial electroquímico. Por último, tiene una densidad energética dos veces superior a la alternativa más cercana, lo que le hace ideal para los sistemas de almacenamiento de energía.

En 2025, el mercado de las baterías de ion de litio representará más de la mitad de la demanda mundial de litio frente a casi un tercio en la actualidad, en un mercado mundial que habrá como mínimo duplicado su tamaño, según la mayoría de los analistas y operadores del mercado.

El litio será principalmente extraído en las salmueras del «triángulo del litio», una vasta región entre Chile, Bolivia y Argentina.

La estrategia de Orange para establecer métodos de evaluación para el sector de las tecnologías de la información y comunicación

Philippe Tuzzolino, Director encargado del Medioambiente del Grupo Orange

Orange realiza soluciones y planes de acción ambiciosos para apoyar la transición ecológica y energética en los ámbitos del cambio climático, la gestión de recursos y residuos, estableciendo procesos de economía circular. De esta manera, muchos de los departamentos de la empresa se esfuerzan por reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, optimizar el fin de vida de los equipos y promover su reciclaje o buscar soluciones más eco-responsables para los clientes. Voluntariamente y dentro del marco de su compromiso de responsabilidad social empresarial (RSE), Orange S.A. se compromete a garantizar la trazabilidad y transparencia de los recursos escasos y los materiales considerados

como críticos. Aunque el grupo no ejerce ninguna actividad de fabricación, sí elabora para algunos equipos los pliegos de condiciones destinados a algunos de sus proveedores. Teniendo en cuenta su posición, el Grupo se compromete a anticipar los posibles riesgos en materia de abastecimiento y reputación, poniendo en práctica un enfoque de responsabilidad social.

El análisis del ciclo de vida al servicio de una política responsable de consumo de metales estratégicos en Orange

Mikko Samuli Vaija, Analista de ciclos de vida, Orange Labs

En el marco de su política medioambiental, Orange lleva a cabo, desde 2007, evaluaciones del impacto ambiental de sus productos. Esta estrategia incluye tanto los productos vendidos directamente por Orange, tales como los teléfonos móviles o tabletas fabricadas por otras empresas, como los productos desarrollados por Orange (*Livebox* y decodificadores de TV, por ejemplo). Los análisis de ciclo de vida (ACV), realizados según los principios de las normas ISO 14040-14044, constituyen la herramienta principal para la realización de este artículo.

La gestión de las materias primas estratégicas en Renault

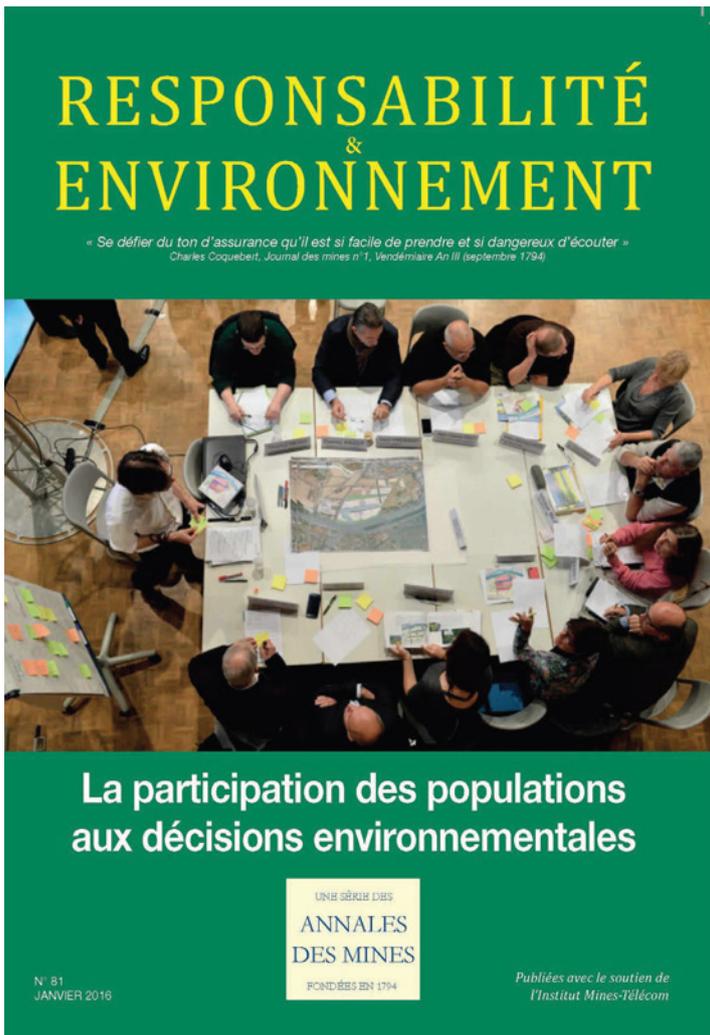
Philippe Schulz, experto líder del Medioambiente, energía y materias primas, Renault

Para garantizar sus suministros de materias primas minerales, las empresas deben introducir en su organización verdaderas rupturas en términos de análisis estratégico y avances técnicos e industriales. Desde 2009, Renault ha puesto en marcha un estudio para identificar y gestionar los riesgos en materia de abastecimiento de materias primas y, reducir así, su vulnerabilidad frente a las tensiones en los mercados de abastecimiento o a la exposición financiera resultante. La creación de alianzas de I+D innovadoras, el análisis de sus cadenas de abastecimiento en coordinación con sus proveedores y, finalmente, las estrategias técnicas en materia de desarrollo alternativo y reciclaje son algunas de las acciones que forman parte de la iniciativa lanzada por Renault para optimizar su gestión de materias primas estratégicas.

El dossier ha sido coordinado por Alain Liger

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

La participation des populations aux décisions environnementales



Avant-propos - **Alain RICHARD**

Introduction - **Philippe LEDENVIC**

La réglementation et son évolution au cours du temps

La réglementation en France depuis la loi Bouchardeau

Philippe LEDENVIC

Ce que la convention d'Aarhus et la directive Inspire ont changé

Bruno VERLON

L'histoire chaotique de l'information environnementale en France

Thierry LAVOUX

Les principaux intervenants

L'évolution du rôle du commissaire enquêteur - **Brigitte CHALOPIN**

Débats publics : démocratiser et légitimer les décisions

Christian LEYRIT

L'Autorité environnementale et la participation du public à l'élaboration de ses décisions - **Michel BADRÉ**

Vers une participation continue du public à la réalisation des projets

Claude CHARDONNET

Renouveler les approches et les pratiques d'évaluation environnementale

Yves PRÉVOST

L'évaluation environnementale stratégique de l'implantation de la filière des gaz de schiste au Québec a-t-elle été une démarche réellement innovante ? - **Gilles CÔTÉ**

Quelles évolutions dans l'avenir ?

La concertation : d'une exigence démocratique à un impératif managérial pour l'action publique - **Bertrand PANCHER**

Oser l'innovation démocratique pour accélérer la transition écologique - **Florence DENIER-PASQUIER**

Révolution numérique pour la concertation environnementale

Gilles BERHAULT

La participation du public aux prises de décision : une mutation incontournable - **Corinne LEPAGE**

HORS DOSSIER

Actes du colloque « Contrôle, régulation et développement »

organisé le 7 Octobre 2015 par l'Amicale de l'association des ingénieurs des Mines (AIM), sous la présidence de Pierre-Franck CHEVET et Philippe DUCROCQ

Avant-propos - **Philippe DUCROCQ**

Le climat, l'économie et le rôle de l'État

Amine HAMOUCHE

Opinion publique et développement

Guillaume ALABERGÈRE

Un besoin de sincérité

Xavier PLOQUIN

L'accompagnement des projets : un véritable exercice de funambule !

Pierre-Édouard GILLE

Dans une forêt de risques résiduels, redonner du sens à la norme

Matthieu MANGION

Janvier 2016

Le dossier est coordonné par **Philippe LEDENVIC**

Pour plus d'information, nous invitons le lecteur à se reporter sur notre site :

<http://www.anales.org>

AULANIER Hughes-Marie

Ingénieur civil des Mines de Nancy (N08) et ancien élève de Sciences Po Paris, Hughes-Marie Aulanier est chargé de mission Stratégie et développement au sein du groupe ERAMET. Il est en charge des études de marché, des finances et de la recherche de partenariats dans le cadre du Projet Lithium d'ERAMET.

CHRISTMANN Patrice



D.R

Patrice Christmann est docteur en géosciences appliquées et est diplômé d'ESCP-Europe. Expert sénior « Matières premières minérales » à la direction de la Stratégie et de la recherche du BRGM, il justifie d'une expérience professionnelle de plus de 40 ans dans le domaine des géosciences, dont 39 ans au service du BRGM. Dans ce cadre, il a travaillé pendant trois ans en

qualité d'expert national détaché auprès de la Commission européenne et cinq ans en tant que Secrétaire général d'EuroGeoSurveys, l'association des services géologiques européens. Ses domaines de spécialité sont les politiques et l'économie des matières premières minérales. Il est membre du groupe de travail « Approvisionnement en matières premières » de la Commission européenne, membre du Comité pour les métaux stratégiques (COMES) et membre, depuis 2011, du Groupe international pour les ressources des Nations unies.

COZIGOU Gwenole



D.R

Gwenole Cozigou est directeur en charge de la Transformation industrielle et des chaînes de valeur avancées à la direction générale pour le Marché intérieur, l'industrie, l'entrepreneuriat et les PME.

Économiste de formation, il est fonctionnaire à la Commission européenne depuis 1985, où il intervient dans les domaines de la Politique industrielle et des relations extérieures.

Ancien directeur-adjoint du cabinet du Commissaire Liikainen 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 occupe les fonctions de directeur à la DG GROWTH (DG pour le Marché intérieur, l'industrie, l'entrepreneuriat et les PME), où il a à connaître

des questions de compétitivité et d'application de la législation du marché intérieur de l'Union européenne dans divers secteurs industriels.

Les principales responsabilités qu'il exerce aujourd'hui couvrent : l'économie circulaire, la politique européenne pour l'énergie, les industries à forte intensité énergétique, la construction, l'industrie automobile, les matières premières et les industries d'ingénierie.

DELABORDE Patrick



D.R

Ingénieur diplômé de l'École centrale de Lille (1984), Patrick Delaborde a débuté sa carrière à la Snecma au sein du département Forge, en charge de la qualité. Il a notamment travaillé à la mise au point d'un procédé de forgeage de précision de grandes pièces en titane, puis il a évolué au sein de l'entreprise en occupant différents postes, toujours sur le site

de Genevilliers. En 1998, il rejoint la société Aubert et Duval pour prendre la direction de l'usine d'Imphy (Tecphy), puis du département Transformation du site des Ancizes. En 2010, il prend en charge le développement des activités Titane du groupe, au sein duquel il occupe aujourd'hui les fonctions de directeur du Développement commercial des nouvelles entités UKAD et EcoTitanium.

GALIN Rémi



D.R

Diplômé de l'École des Mines d'Alès (1981), Rémi Galin, après une première expérience au sein d'une entreprise de travaux routiers, rejoint le ministère de l'Industrie en 1983, en tant que 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 intègre la direction régionale de l'industrie et de l'environnement d'Île-de-France, où il est en charge du développement économique des petites et moyennes industries de l'Essonne. En 1996, il est nommé adjoint au chef de la division sous-sol toujours au sein de la DRIRE Île-de-France, où il est plus particulièrement en charge du contrôle des exploitations de carrières, des hydrocarbures, de la géothermie profonde et des stockages souterrains de gaz. En 2002, il est nommé chef de l'unité territoriale de l'Essonne, où il dirige le contrôle des installations classées pour la protection de l'environnement. Depuis 2012, il est chef du bureau de la gestion et de la législation des ressources minérales au ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie au sein de la direction de l'eau et de la biodiversité.

GELDRON Alain



D.R

Ingénieur de l'École supérieure de l'énergie et des matériaux (Polytech Orléans) et Docteur en Ressources naturelles minérales de l'Université d'Orléans, Alain Geldron exerce en qualité d'expert national Matières premières à l'ADEME.

Il participe depuis plus de trente ans à la définition de la politique française de gestion des déchets (responsabilité élargie des producteurs, recyclage, élaboration du premier plan de prévention des déchets), ainsi qu'à l'élaboration des politiques en matière de préservation de la qualité de l'air et de maîtrise de l'énergie. Depuis 2013, il travaille, au sein de l'ADEME, à une meilleure prise en compte des problématiques liées aux matières premières, notamment minérales. Il participe, en tant que référent, au pilotage et à l'animation de la mise en œuvre du concept d'économie circulaire ; à ce titre, il intervient dans des conférences, assure des formations, réalise des études et contribue à la définition de politiques d'action.

GUILLANEAU Jean-Claude

Jean-Claude Guillaneau est, depuis 2012, le directeur des Géoressources au BRGM, une direction qui regroupe les équipes en charge de la géologie, des ressources minérales et de la géothermie.

Après des études en France et au Canada, il entre en 1986 au BRGM, où il réalise toute sa carrière occupant notamment la fonction de chef du département Procédés et, pendant près de 10 ans, celle de directeur international. Il est membre du réseau des CCEF (Conseillers du commerce extérieur de la France), administrateur de la SIM et de la CSIM, vice-président du groupe de travail « Ressources » du COMES et président de la société CFG Services.

LABBÉ Jean-François

Ingénieur de l'École polytechnique et ingénieur civil de l'École des Mines de Paris, Jean-François Labbé est un spécialiste des sciences de la Terre. Il est entré au BRGM en 1980.

Durant une vingtaine d'années, il a assuré la conduite de plusieurs projets d'exploration minière dans différents pays (Arabie Saoudite, Yémen, Congo-Brazzaville, Gabon, Ghana, Indonésie (à Java et en Papouasie indonésienne, alors appelée Irian Jaya, où il a vécu quatre ans) et en Guadeloupe. Bénéficiant de financements divers (étatiques, institutionnels ou privés), ce travail de prospection a porté sur différents métaux (or, cuivre, plomb, zinc, tungstène, étain, etc.). Il a par la suite supervisé ou suivi des travaux du même type dans plusieurs autres pays, principalement en Afrique.

Entre 2001 et 2005, il a été détaché à la Coopération française pour exercer en qualité d'assistant technique auprès

du ministère des Mines de Guinée (Conakry). Puis, entre 2006 et 2009, il a dirigé un projet d'exploration minière de bauxite en Guinée pour le compte d'un important investisseur japonais, un projet qui jusqu'à la certification des ressources exigera plusieurs campagnes de forages qui seront menées dans un climat de confiance et bénéficieront de relations harmonieuses avec les communautés villageoises et avec l'administration guinéenne, tant au niveau national que régional.

Depuis 2010, il a rejoint l'unité du BRGM en charge de l'économie minière. Il y a participé, réalisé ou supervisé plusieurs études de marché et analyses de criticité portant sur divers métaux ou éléments rares (béryllium, cobalt, graphite naturel, lithium, platinoïdes, sélénium, tellure, terres rares, tungstène, des études accessibles en ligne sur : www.mineralinfo.fr/page/metaux-strategiques), des études et analyses qui ont été réalisées pour le compte de services ministériels en charge du développement durable, dans le cadre des travaux du COMES. À la demande d'autres services, il a réalisé ou aidé à la réalisation de panoramas de marchés d'autres métaux que ceux précités (bauxite/alumine/aluminium, chrome, cuivre, indium, nickel). Par ailleurs, il collabore avec le groupe de travail de la Commission européenne sur la criticité des matières premières.

Il mène en parallèle des réflexions sur les limites de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux et sur la stratégie de communication en matière d'acceptabilité sociale de l'exploitation minière.

Il assure aujourd'hui la direction, à temps partiel, d'un projet d'exploration minière au Burkina Faso (2015-2016).

LIEBAERT Philippe



D.R

Philippe Liebaert occupe les fonctions de responsable Recherche et développement de DCX Chrome (groupe Delachaux), qui produit du chrome métal ultra-pur en recourant au procédé aluminothermique.

Auparavant, il a été responsable Recherche et développement de Railtech International (groupe Delachaux), le leader mondial de

la soudure aluminothermique de rails.

Ingénieur ENSIMEV, il est le président de l'association des anciens élèves de cette école d'ingénieur, devenue aujourd'hui l'Ensiame.

Docteur en Génie mécanique - orientation Matériaux de l'Université de Valenciennes, il a réalisé une thèse pour Arcelor Mittal traitant de la forgeabilité des aciers en coulée continue.

LIGER Alain

Ancien élève de Mines ParisTech et ingénieur général des Mines, Alain Liger a été pendant vingt ans en charge de fonctions opérationnelles et a exercé des responsabilités stratégiques d'exploration-développement au sein des groupes miniers BRGM et Billiton PLC. Depuis 2002, il



D.R

a été successivement directeur régional de DRIRE (ministère de l'Industrie) et de DREAL (ministère du Développement durable). De 2013 à 2016, Alain Liger a été membre du Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies et Secrétaire général du COMES, le Comité pour les métaux stratégiques. En 2015, il a présidé le comité de pilotage de l'initiative « Mine responsable ».

REUTER Markus A.



D.R

Director Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology.

<http://fi.linkedin.com/pub/markus-reuter/11/195/90>

Education: Honorary Doctorate (Dr.h.c.) University of Liège (BE); DEng. & PhD Stellenbosch University (ZA); Dr.habil. RWTH Aachen (D).

Industry: Director: Technology Management Outotec Finland (Chief Technologist Ausmelt) 2006-2015. Mintek & Anglo American Corporation. Academic: Professor TU Delft (NL) 1996-2005. Honorary & adjunct professorships since 2005 @ TU Bergakademie Freiberg (DE); Aalto University (FIN); Central South University (CHN) & Melbourne University (AUS).

Publications: Main author "Metrics of Material and Metal Ecology" (Elsevier); Co-editor "Handbook of Recycling" (Elsevier) (1st Publication Prize 2014 International Solid Waste Association) & Lead author-UNEP report (2013): "Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure" (400,000 downloads): https://www.researchgate.net/profile/Markus_Reuter3?ev=prf_highl

Recent awards: TMS Distinguished Lecture 2016: 2015-2016 SME Henry Krumb Lecturer: Outotec Technology Award 2013

RUET Joël

Joël Ruet est chercheur CNRS au Centre d'économie de Paris-Nord (CEPN), Université Paris 13, et est chercheur associé i3-CRG, École polytechnique, CNRS, Université Paris-Saclay.

Spécialiste de l'économie de l'émergence, il est ancien élève de l'École des mines de Paris, docteur en économie industrielle du CERNA, Centre d'économie industrielle des mines de Paris, et a été post-doc à la London School of New Delhi, et a encadré des travaux de formation par la recherche à l'École nationale des Ponts et Chaussées.

Sa carrière universitaire l'a mené à l'étranger : ainsi, il a dirigé le Centre de sciences humaines à New Delhi et a été chercheur au Centre d'étude français sur la Chine contemporaine de Hong Kong.

Ses engagements personnels l'ont amené au fil des ans à être visiting Fellow au CCWE (Centre for China in the Wor-

ld Economy), à l'Université de Tsinghua, Beijing, auprès d'un membre du conseil monétaire chinois, et à conseiller des personnalités politiques en France et en Afrique de l'Ouest. De même, il a siégé ou siège encore au sein de conseils d'orientation ou de structures de pilotage de plusieurs *think tanks*.

Il intervient aussi régulièrement dans les médias francophones ou anglophones et a été chroniqueur « Émergents » au journal *Le Monde*, de 2008 à 2014, une chronique qu'il continue d'assurer et qui est en ligne à l'adresse URL suivante : <http://chroniquesemergence.blog.lemonde.fr/>

On peut le suivre *via* son compte twitter : @JoelRuet

Les travaux à la base de l'article paru dans ce numéro de *Responsabilité et environnement* ont été réalisés avec l'appui de l'Institut de la Mobilité Durable, et l'auteur remercie à titre personnel Kang Rongping, Jimmy Wang, Edouard Lanckriet et Fanny Costes.

SCHULZ Philippe



D.R

Ingénieur diplômé de l'École supérieure de chimie industrielle de Lyon (1988) et de l'Institut de génie chimique de l'Université de Karlsruhe (1989) et également titulaire d'une thèse de doctorat de l'Université de la Ruhr à Bochum (1992), Philippe Schulz a rejoint le groupe Elf Aquitaine en 1991, où il va exercer diverses responsabilités dans le domaine

de la R&D (catalyse, combustion et développement de nouveaux carburants).

En 1999, il rejoint la direction Stratégie, étude, marketing d'Elf France, puis intègre, en 2000, suite à la fusion entre Elf et TotalFina, l'équipe chargée de créer la nouvelle direction Développement durable et environnement du groupe Total.

En septembre 2004, Philippe Schulz rejoint Renault en tant que responsable du programme « Véhicule à pile à combustible » à la direction de la Recherche du groupe, puis, en juillet 2006, il devient le responsable Énergie et environnement de la direction Plan Environnement.

Depuis juillet 2010, il est Expert leader Environnement, énergie et matières premières à la direction de la Stratégie et du business développement du groupe Renault.

Philippe Schulz est l'auteur d'une cinquantaine de publications et est titulaire de plusieurs brevets.

THOMAS Christian

Ancien élève de l'École polytechnique et de l'École des Mines de Paris, Christian Thomas a débuté sa carrière en 1976 dans l'industrie minière. Il a été successivement, ingénieur du fond, responsable ingénierie, de la planification minière, de la prospection ; des fonctions qu'il exerce en France, en Nouvelle Calédonie, au Maroc, au Brésil et au Portugal.

En 1988, il rejoint la société Penarroya, où il s'occupe des métaux spéciaux (indium, germanium, gallium). Il est

chargé de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement, d'améliorer les technologies d'extraction métallurgiques et de développer de nouvelles applications.

En 1994, il prend la direction de PENOX, une société spécialisée dans la chimie du plomb et de l'antimoine, puis il dirigera la Business unit plomb du groupe Metaleurop.

En 2003, il quitte ce groupe pour fonder trois ans plus tard la *start-up* Terra nova qui assure le recyclage des cartes électroniques usagées. En 2014, il fonde la société TND qui développe des technologies d'extraction métallurgiques innovantes.

TISSOT-COLLE Catherine



D.R

Entrée chez ERAMET en 2001, Catherine Tissot-Colle est membre du comité exécutif et est directrice de la Communication et du développement durable du groupe, depuis janvier 2007. Diplômée en droit, Catherine Tissot-Colle a notamment occupé différentes fonctions au sein de COGEMA (AREVA) pendant douze ans.

Impliquée dans les activités de différentes organisations professionnelles, elle est présidente de la FEDEM (Fédération française des métaux non ferreux) depuis 2008 et co-présidente d'A3M (Alliance des minerais, minéraux et métaux) depuis 2014.

Depuis mai 2013, elle anime, en tant que vice-présidente, le Comité stratégique de filière Industries extractives et première transformation (CSF IEPT) mis en place dans le cadre du Conseil national de l'industrie (CNI).

Elle est également présidente de la commission RSE du MEDEF depuis janvier 2014 et est membre des conseils d'administration de l'UIMM (Union des industries et métiers de la métallurgie) et du GFI (Groupement français de l'industrie).

Elle est vice-présidente de la section Environnement du Conseil économique social et environnemental (CESE), où elle siège au titre du groupe des entreprises depuis novembre 2010.

TUZZOLINO Philippe



D.R

Philippe Tuzzolino est le directeur Environnement du groupe France Télécom. Ingénieur Télécom de formation, il est en charge, depuis 2006, des questions d'Environnement et d'adaptation au Changement climatique au sein du groupe Orange. Il définit les politiques à mettre en œuvre en la matière et assure un suivi de la consommation d'énergie

du groupe et du respect des objectifs de réduction de l'empreinte globale de celui-ci (au titre de ses activités, Orange est présent dans 220 pays). Au titre de ses fonctions de responsable de la réduction de l'empreinte car-

bone du groupe, il fait partie des pilotes testant les méthodologies de réduction de la consommation d'énergie et de l'empreinte carbone du secteur des TIC élaborées par la DG CONNECT de la Commission européenne. Il est également très impliqué dans les travaux du groupe d'étude UIT-T « Environnement et changement climatique », et a été amené à participer à ce titre aux travaux de la COP 21 qui s'est tenue à Paris en décembre de l'année dernière. Avant son entrée dans le groupe Orange, Philippe Tuzzolino a exercé à la direction générale de La Poste et au ministère de la Défense français, où il a été en charge de la conduite de plusieurs projets d'innovations stratégiques.

VAIJA Mikko Samuli



D.R

Titulaire d'un master 2 en Production industrielle et management intégré ainsi que d'un master spécialisé en Écoconception et management environnemental, Mikko Samuli Vajja a débuté sa carrière chez Orange en 2011, après avoir travaillé pendant un an en tant que contractuel au laboratoire G-SCOP de Grenoble.

De par son profil universitaire centré sur l'analyse de cycle de vie, Mikko Samuli Vajja a réalisé des dizaines d'études portant sur des produits électroniques grand public (des téléphones portables ou des décodeurs TV) et professionnels (allant de l'analyse de simples étiquettes RFID jusqu'à la conclusion de partenariats industriels concernant des équipements réseaux de type BTS ou RBS). Ces travaux ont ainsi débouché sur de nombreuses améliorations de l'affichage environnemental d'Orange. Depuis 2013, Mikko Samuli Vajja s'implique très fortement dans la promotion au sein du groupe Orange de l'écoconception dans le développement de nouveaux produits. Il a de plus participé aux travaux menés par l'Union internationale des Télécommunications, et plus particulièrement travaillé sur les questions 18/5 (méthodes d'analyses de cycle de vie) et 16/5 (affichage environnemental pour la téléphonie mobile).

VALÉRIAN François

En fonction au Conseil général de l'économie, François Valérian est polytechnicien, ingénieur en chef des mines et docteur en histoire. Il a été banquier d'affaires et associé du cabinet Accenture. Il est professeur associé de finance au Conservatoire national des arts et métiers et est responsable de l'enseignement de supervision financière à Mines ParisTech. Il enseigne aussi à l'Institut d'études politiques et à l'Université Paris Dauphine. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages portant sur des sujets historiques, économiques ou financiers.

VAN SCHAİK Antoinette



D.R

Director/owner/founder Material Recycling and Sustainability (MARAS) B.V. (since 2005).

Education: Dr. (PhD) (2004) & MSc (Ir) (1997) Delft University of Technology, The Netherlands.

Industry: Car recycling industry (1997).

Academic: Postdoc (2004 - mid 2008), PhD and researcher (industry projects) (2000-2004) &

researcher and (assistant) project manager (1997-2000) at Delft University of Technology, The Netherlands.

Expertise: Recycling, resources and waste (water) systems (modelling, simulation, industry trials, monitoring and optimisation, development of Recycling Label, Design for Recycling, etc.).

Publications: Co-author of the UNEP Report “Metal Recycling: Opportunities Limits Infrastructure” (400,000 downloads); > 100 publications, 2 books / 5 chapters in books & encyclopaedias.

https://www.researchgate.net/profile/Antoinette_Schaik

Awards: ‘Knowledge Sharing Award 2006’ within the SuperLightCar project by Volkswagen AG (2006); ‘Best Paper Award’ at Delft University of Technology (2002).

GÉRER & COMPRENDRE



- Anatomie d'une cyber-attaque contre une entreprise : comprendre et prévenir les attaques par déni de service
- La stratification dans le monde académique comme ordre statutaire : une proposition webérienne
- L'auditeur nouveau est arrivé !

ANNALES
DES MINES

N° 123 - MARS 2016

Publiées avec le soutien
de l'Institut Mines Télécom

n° 123 - Mars 2016

Editorial - Pascal LEFEBVRE

Réalités méconnues

Anatomie d'une cyber-attaque contre une entreprise : comprendre et prévenir les attaques par déni de service

Albert DE MEREUIL et Annabel-Mauve BONNEFOUS

L'auditeur nouveau est arrivé ! - **Sébastien ROCHER**

« L'innovation n'est pas un long fleuve tranquille »

Analyse sociotechnique de la trajectoire d'une innovation grand public : le bâton de randonnée automatique

Julie HALLÉ, Bénédicte VIGNAL et Bastien SOULÉ

L'épreuve des faits

La stratification dans le monde académique comme ordre statutaire : une proposition webérienne

Sébastien DUBOIS

Les leviers de performance d'une stratégie collective : une analyse des filières vitivinicoles en Val de Loire, en Champagne et en Languedoc-Roussillon

Élodie LOUBARESSE et Florent PESTRE

Autres temps, autres lieux

L'affaire Rochette (1908-1914) : des relations entre comptabilité et scandale financier

Oussama OURIEMMI et Marie-Claire LOISON

Mosaïque

Manager et innover dans les services

À propos du livre de Marianne Abramovici, Sylvie Chevrier et Muriel Jougleux, *Management des services : conception, production et évaluation de la performance des services*, Presses universitaires de Grenoble, collection « Management et innovation », octobre 2015

Damien COLLARD

À quoi rêvent les algorithmes ?

À propos du livre de Dominique Cardon, *À quoi rêvent les algorithmes*, Paris, Éditions du Seuil et La République des idées, 2015, 106 p.

Paul HALLÉ

Une enseignante en management nous livre ses secrets en matière de pédagogie

À propos du livre de Sylvie Cordesse Marot, *Enseigner le management par des situations-problèmes* (préface de Michel Berry et postface de Jacqueline Costa-Lascoux), Chronique Sociale, 2015

Michel VILLETTE

L'État recomposé

À propos du livre de Patrick Le Galès et Nadège Vezinat, *L'État recomposé*, Paris, PUF, collection « La Vie des idées », 2014

Jean-Marc WELLER

Pour plus d'information, nous invitons le lecteur à se reporter sur notre site :

<http://www.anales.org>