

CYCLOPE

sous la direction de Philippe Chalmin et Yves Jégourel

2020

Les Marchés Mondiaux

MATIÈRES PREMIÈRES - MONNAIES
SERVICES - AGRICULTURE - ÉNERGIE
FINANCE - INDUSTRIE - COMMODITÉS

*Allegoria ed effetti
del Cattivo Governo*

Ambrogio Lorenzetti

CYCLOPE

2020

Les Marchés mondiaux

Allegoria ed effetti
del Cattivo Governo

Le grand désordre du monde

La crise de 2020

Sous la direction de Philippe CHALMIN

et Yves JÉGOUREL

 **ECONOMICA**

49, rue Héricart, 75015 Paris

Cercle CYCLOPE

*En période d'instabilité des marchés,
vous avez besoin d'un outil de synthèse et d'analyse !*

Jamais le monde n'a été aussi instable, qu'il s'agisse des marchés des changes, des produits financiers et bien sûr des matières premières. Jamais il n'a été aussi nécessaire d'assurer une veille stratégique sur des marchés aussi différents que ceux du pétrole et du café, du cuivre et du coton, du minerai de fer et du soja.

C'est ce que propose à ses membres le Cercle Cyclope depuis 1989. L'originalité du Cercle Cyclope est d'offrir une analyse comparative de l'ensemble des marchés de commodités, qu'elles soient agricoles, énergétiques, minières ou industrielles... Il existe en effet de nombreuses sociétés d'étude spécialisées sur un produit ou une famille de produits. Mais le Cercle Cyclope, à l'image du Rapport publié depuis 1986, est la seule organisation privée au monde à couvrir un champ aussi vaste et à pouvoir réaliser des analyses comparatives de marchés souvent fort éloignés les uns des autres mais sur lesquels on retrouve aussi les mêmes acteurs. Cyclope offre une vision transversale s'appuyant sur plus de trois décennies d'expérience.

LES MARCHÉS TRAITÉS

À ses adhérents, le **Cercle Cyclope** propose un suivi de la plupart des grands marchés internationaux de commodités :

- produits alimentaires : céréales, oléoprotéagineux, sucre, café, cacao, viande, produits laitiers,
- matières premières agricoles : caoutchouc, coton, laine, bois,
- minerais et métaux : cuivre, plomb, zinc, aluminium, nickel, étain, métaux précieux, fer, acier, alliages et petits métaux...
- pétrole, charbon, gaz naturel,
- frets maritimes,
- produits industriels : pâtes et papiers, chimie de base...
- ainsi que des analyses sur les marchés dérivés et les opérateurs, notamment le négoce international, sur les politiques publiques qu'il s'agisse d'énergie ou d'agriculture...

LES SERVICES

1. Le Cercle

Son objet est de réunir de manière régulière (douze fois par an) les intervenants sur les marchés internationaux : banquiers, assureurs, brokers, gérants, négociants, producteurs et consommateurs se retrouvent pour échanger de manière informelle autour d'un déjeuner. Six déjeuners ont lieu à **Paris**. Six déjeuners ont lieu à **Genève**.

2. Le Cercle des Experts

Fort de son réseau de spécialistes reconnus internationalement, Cyclope est à même de couvrir un très vaste domaine de recherche. Les Experts Cyclope peuvent être consultés pour des questions ponctuelles, mais aussi réaliser des études *ad hoc* ou être délégués pour des conférences.

2. La Synthèse

Le Cercle publie une synthèse mensuelle de marchés (onze numéros par an) reprenant des graphiques (moyennes mensuelles sur huit ans et cours quotidiens) assortis d'analyses et de commentaires, ainsi que des statistiques les plus récentes sur les principaux marchés de commodités. Chaque mois, c'est un document de référence de plus de 150 pages.

Cyclope est une société d'études spécialisée dans l'analyse des marchés mondiaux des matières premières : elle tire son nom du « Rapport Cyclope » publié chaque année depuis 1985.

Cyclope est dirigé par **Philippe CHALMIN**, professeur à Paris-Dauphine, consultant auprès d'organismes internationaux (OCDE, CEE, CNUCED). L'équipe de Cyclope est constituée d'une soixantaine de spécialistes dans le monde entier.

Conditions d'adhésion

Il existe deux formules d'adhésion au Cercle Cyclope :

1. **L'adhésion au Cercle Cyclope comprend :**
 - Les réunions du Cercle (six déjeuners par an parmi les douze organisés)
 - Le rapport Cyclope publié annuellement
 - L'accès au Cercle des Experts
 - L'accès au réseau international Cyclope (membres, collaborateurs et partenaires)
 - L'abonnement à la synthèse mensuelle

Cette adhésion peut être imputée en abonnements ou frais d'études. Elle est fixée à **3 800 euros HT**.

2. **L'abonnement à la synthèse mensuelle, est fixée à 1 430 euros HT.**

Pour recevoir le dernier numéro ou prendre contact pour votre adhésion, vous pouvez vous rendre sur le site de Cyclope

www.cercle-cyclope.com

Cercle Cyclope – 8 avenue Hoche – 75008 PARIS – contact@cercle-cyclope.com

Sommaire

Avant-propos	I
Les collaborateurs de CyclOpe 2020	K
Les entreprises qui ont soutenu CyclOpe en 2020	P
La crise de 2020.....	I
Introduction	III
• Une pandémie à nulle autre pareille	V
• Mesurer la crise.....	VIII
• Au-delà de la crise de 2020	XII
• La crise de l'autre côté du monde	XIV
– Chine : une nécessaire relecture de la crise.....	XV
– L'Amérique latine au bord de l'abîme.....	XVIII
– Afrique : une catastrophe annoncée	XX
• Les bourses et la médecine monétaire	XXI
– Un krach boursier d'un genre nouveau.....	XXI
– Les banques centrales entre Saint-Augustin et Plaute.....	XXV
• Vent de tempête sur les marchés mondiaux	XXVII
– Un contre-choc énergétique.....	XXVII
– Une crise alimentaire ?	XXXII
- Des grains qui restent abondants.....	XXXII
- La crainte de manquer de riz	XXXIV
- Les fruits et légumes confrontés au manque de main-d'œuvre	XXXIV
- Les viandes, d'une pandémie à l'autre	XXXVI
– La chaîne de valeur du coton dévastée	XXXVIII
– Les métaux plient, mais ne rompent pas.....	XL
– Les semi-conducteurs peu affectés.....	XLIII
– L'extrême fragilité du marché du sport.....	XLV
• Une nouvelle donne climatique ?	XLVI
• Carnets de crise : 21 mars-9 mai 2020.....	XLIX

Première partie : Le grand désordre du monde	1
I Le grand désordre du monde	3
II Géopolitique mondiale : l'allégorie du mauvais gouvernement.....	39
III Des bonnes et surtout des mauvaises gouvernances	45
– Chine : le grand pharaon Xi, maître absolu chez lui, fait face aux « plaies de Chine », aux défis extérieurs	46
– Inde : offensive autoritaire sur fond de chute de croissance ..	57
– Amérique du Sud : croissance en berne et frustrations.....	69
– Russie : Poutine for ever ?	80
– Afrique du Nord et Moyen-Orient : une décennie pour rien, un effet domino sans fin	85
– Afrique subsaharienne : la décennie de l'afro-réalisme	94
IV Tempêtes commerciales et climatiques.....	107
– Le temps des conflits commerciaux.....	109
– Changements climatiques : le monde en flammes, la COP en panne, l'Europe en mouvement	121
– Climat : 2019 marque la fin d'une décennie affectée par un réchauffement constant.....	137
 Deuxième partie : Les marchés.....	 143
Les marchés mondiaux en 2019, perspectives 2020	145
I Les marchés financiers.....	161
II Grains et agriculture tempérée	215
III Produits tropicaux	349
IV Produits aquatiques.....	451
V Minerais et métaux	471
VI Énergie.....	653
VII Grands marchés industriels.....	745
VIII Services.....	789

Les collaborateurs de CyclOpe 2020

Philippe CHALMIN
Coordination générale

Professeur d'histoire économique
à l'université Paris-Dauphine PSL,
Président de l'Observatoire
de la formation des Prix et des
Marges des Produits Alimentaires

La crise de 2020,
Au fil de l'année...,
Le grand désordre du monde,
Guerres commerciales
Agriculture, Marchés
dérivés, Thé, Art

Yves JÉGOUREL

Maître de conférences à l'Université
de Bordeaux, Senior Fellow au
Policy Center for the New South (Rabat)

Coordination minerais
et métaux,
Métaux, Engrais, Vanille

Sébastien ABIS

Directeur du Club DEMETER
et chercheur associé à Institut
de relations internationales
et stratégiques (IRIS)

Méditerranée-
Moyen-Orient

Patrick AIGRAIN

Chef du service évaluation, prospective
et analyses transversales de FranceAgriMer,
Coordinateur du comité de pilotage
statistique de l'Organisation internationale
de la Vigne et du Vin (OIV)

Vin

Stéphanie AYRAULT

Journaliste agricole

Jute

Jean BAKOUMA

Directeur adjoint
Production et consommation
durables au World Wildlife Fund (WWF)

Bois tempérés

Jean-Joseph BOILLOT

Chercheur associé à l'IRIS
Coprésident du Euro-India Economic
& Business Group (EIEBG)

Inde

Laurence BOISSEAU

Journaliste, *Les Échos*

Minerais et métaux

Pascal BONIFACE

Directeur de Institut de relations
et stratégiques (IRIS)

Géopolitique mondiale

Antoine BOUBAULT

Chercheur-ingénieur
en écologie industrielle au
Bureau de recherches géologiques
et minières (BRGM)

Petits métaux,
Métaux électriques »

Benoît de CARBONNIÈRES	Directeur général - Forrest Industry Groupe Forrest International République démocratique du Congo	Platinoïdes, Diamants
Jean-Yves CARFANTAN	Directeur d'AgroBrasConsult, Brésil (São Paulo)	Amérique du Sud
Éric CHAMPARNAUD	Associé - C-Ways	Industrie, Automobile
Bénédicte CHATEL	Directrice associée de Commodafrica	Cacao, Café
Alfredo COELHO	Professeur à Bordeaux Sciences Agro Chercheur associé Unité mixte de recherche Marchés, organisations, institutions et stratégies d'acteurs (UMR Moisa, Montpellier)	Vin
Sylvie CORNOT-GANDOLPHE	Présidente SCG Consulting	Charbon vapeur, Charbon à coke
Jean-Philippe DAUVIN	Chef économiste honoraire STMicronics	Semi-conducteurs
Pierre-Marie DECORET	Chargé d'études économiques, Groupe Avril	Oléoprotéagineux
Jean-François Di MEGLIO	Président d'Asia Centre, Centre d'expertise et d'études sur l'Asie	Chine
Myriam ENNIFAR	Chargée d'études filière lait FranceAgriMer	Lait et produits laitiers
Gérald ESTUR	Consultant	Coton
Patrice GEOFFRON	Professeur à l'Université Paris-Dauphine-PSL, Directeur du Centre de Géopolitique de l'Energie et des Matières Premières (CGEMP)	Énergie
Alessandro GIRAUDO	Professeur d'économie et de finance internationale - ISG, Paris	Changes et taux
Carole GOMEZ	Chercheuse à l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Sport
Anne GUILLAUME-GENTIL	Directrice associée de Commodafrica	Afrique
Gérard HORNY	Chroniqueur sur slate.fr	Marchés boursiers
Amandine HOURT	Chargée d'études économiques, FranceAgriMer	Sisal et fibres dures

Ralph ICHTER	Président Euroconsultants, (Washington)	Politique agricole et commerciale américaine
Dominique JACOMET	Professeur à l'Institut français de la mode (IFM)	Textiles
Muryel JACQUE	Journaliste, <i>Les Echos</i>	Or
Helga JOSUPEIT	Chercheur, marché des produits de la mer (Rome, Italie)	Produits aquatiques
Félix KANE	Consultant Agriculture et filières agricoles - AND International	Fruits et légumes tempérés, Pommes de terre, Fruits secs
Alain KARSENTY	Économiste au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)	Bois tropicaux Bois tropicaux
Elisabeth LACOSTE	Directeur de la Confédération internationale des betteraviers européens, CIBE (Bruxelles)	Sucre, Éthanol
Gaétan LEFEBVRE	Géologue-économiste au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)	Petits métaux, Métaux « électriques »
Mathieu LEGUERINEL	Géologue-économiste au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)	Petits métaux, Métaux « électriques »
Jean-Paul LEHMANN	Membre de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN)	Uranium
Julien LEMOND	Weather Data Manager GEOSYS (Toulouse)	Climat : 2019
Denis LOEILLET	Responsable de l'Observatoire des marchés du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad-Persyst UR 26) et rédacteur en chef de la revue <i>FruiTrop</i> (Montpellier)	Agrumes, Bananes, Ananas, Fruits tropicaux
Bernard LOMBARD	<i>Trade & Industrial Policy Director</i> <i>Confederation of European</i> <i>Paper Industries (CEPI)</i> (Bruxelles)	Pâtes et papiers, Papiers et cartons à recycler
François LUGUENOT	Analyste de marchés de matières premières agricoles	Céréales

Patricio MENDEZ DEL VILLAR	Économiste au Centre de coopération internationale en recherche agronomique (Cirad), Éditeur de l'Observatoire Osiriz/InfoArroz (Montpellier)	Riz
Gildas MINVIELLE	Directeur de l'Observatoire économique Institut français de la mode (IFM)	Textiles
Étienne MONTAIGNE	Professeur émérite d'économie Supagro, (Montpellier), coéditeur des ouvrages Bacchus	Vin
Emmanuel NEE	Directeur du département ingrédients de Touton SA	Vanille
Marc NICOLLE	Journaliste à <i>Agra Presse</i>	Pommes et concentrés de jus de pommes
Clément NOUAIL	Doctorant, Université de Bordeaux	Acier, Ferrailles, Plomb
Evariste NYOUKI	Responsable Recherche économique de ENGIE Global Markets	Gaz naturel
Olivia PARODI	Chargée d'études économiques FranceAgrimer	Laine
Guillaume PERRET	Directeur, Perret Associates (Londres)	Dérivés de charbon, Fret, Minerai de fer et Acier, Certificats CO ₂
Francis PERRIN	Senior Fellow au Policy Center for the New South (Rabat) et directeur de recherche à Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Pétrole, Produits pétroliers
Christian de PERTHUIS	Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine PSL, Fondateur de la chaire Économie du climat	Changement climatique
Simon QUEMIN	Docteur en économie, de l'Université Paris-Dauphine PSL, Chercheur postdoctoral au Grantham Research Institute (<i>London School of Economics</i>) et à la chaire Économie du climat	Marchés du carbone
François ROCHE	Directeur des Ateliers de la Volga et du Don, Conseiller éditorial de <i>La Tribune</i> Éditeur, Éditions François Bourin	Russie

Jérôme SAINTE-BEUVE	Correspondant de la filière hévéa au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) Directeur adjoint de l'Ingénierie des agro-polymères et technologies émergentes (UMR IATE)	Caoutchouc
Dolio SFASCIA	Collaborateur Cercle CyclOpe	Poivre et autres épices
Jean-Paul SIMIER	Économiste, spécialiste des marchés agricoles et agroalimentaires	Viandes
Marie-Christine SIMONET	Journaliste indépendante	Fret maritime
Boris SOLIER	Maître de conférences à l'Université de Montpellier, Directeur du Master économie de l'énergie, Responsable du pôle « Transition énergétiques » de la chaire Économie du climat, Université Paris-Dauphine	Électricité, Nucléaire
Raphaël TROTIGNON	Responsable de l'initiative de recherche « Prix et Marchés du Carbone » chaire Économie du climat Université Paris-Dauphine	Marchés du carbone
François VELLAS	Professeur à l'Université de Toulouse Directeur du master économie du tourisme international	Transport aérien
Tancrède VOITURIEZ	Chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad, Nigeria)	Produits tropicaux Huile de palme

Béatrice BEYER	Mise en page des versions française et anglaise	
Dominique DALLE-MOLLE	Graphiques	
Geoffrey FINCH	Coordination de la version anglaise	
Martine GRANGÉ Nadège GRANGÉ	Coordination et adaptation	
Claire MABILLE	Couverture	
Isabelle TANGUY	Secrétariat et presse	

Métaux « électriques »

Classés dans le chapitre « petits métaux » des précédentes versions du rapport CyclOpe, le lithium, le cobalt et le graphite « méritaient » une analyse dédiée tant leur rôle dans la transition environnementale de notre monde est important. Qualifiés ici d'« électriques » dans une référence peut-être trop simple, ils jouent en effet un rôle majeur dans le stockage d'énergie sous forme d'électricité au sein de batteries rechargeables des technologies appelées « Lithium-ion » et sont, en cela, tout à fait essentiels pour nombre d'industries et d'économies. Alors que leurs cours avaient en moyenne flambé au cours des années passées, ils sont revenus à des niveaux bien plus raisonnables en 2019. Ce constat doit cependant être appréhendé avec prudence, car, dans l'univers complexe des matières premières industrielles, la « disponibilité » d'une ressource – et donc le cours qui en découle – doit s'apprécier tout au long de la chaîne de valeur. Au stade de l'extraction, l'accès à une ressource dépend certes de facteurs géologiques – et donc géopolitiques et environnementaux –, mais on ne saurait oublier qu'en aval, aux différents stades de la transformation, les déterminants technologiques, politiques, économiques et financiers sont fondamentaux. Parce qu'ils sont essentiels à cette transition environnementale, ces métaux nous rappellent par ailleurs que la décarbonation de notre monde impose de repenser notre compréhension des politiques minières, le recyclage ne pouvant être à lui seul une solution aux problèmes d'approvisionnement en ressources. Elles doivent être ambitieuses, respectueuses de l'Homme et de l'environnement, et être fondées sur des principes communs, partagés internationalement.

Les métaux des batteries lithium-ion

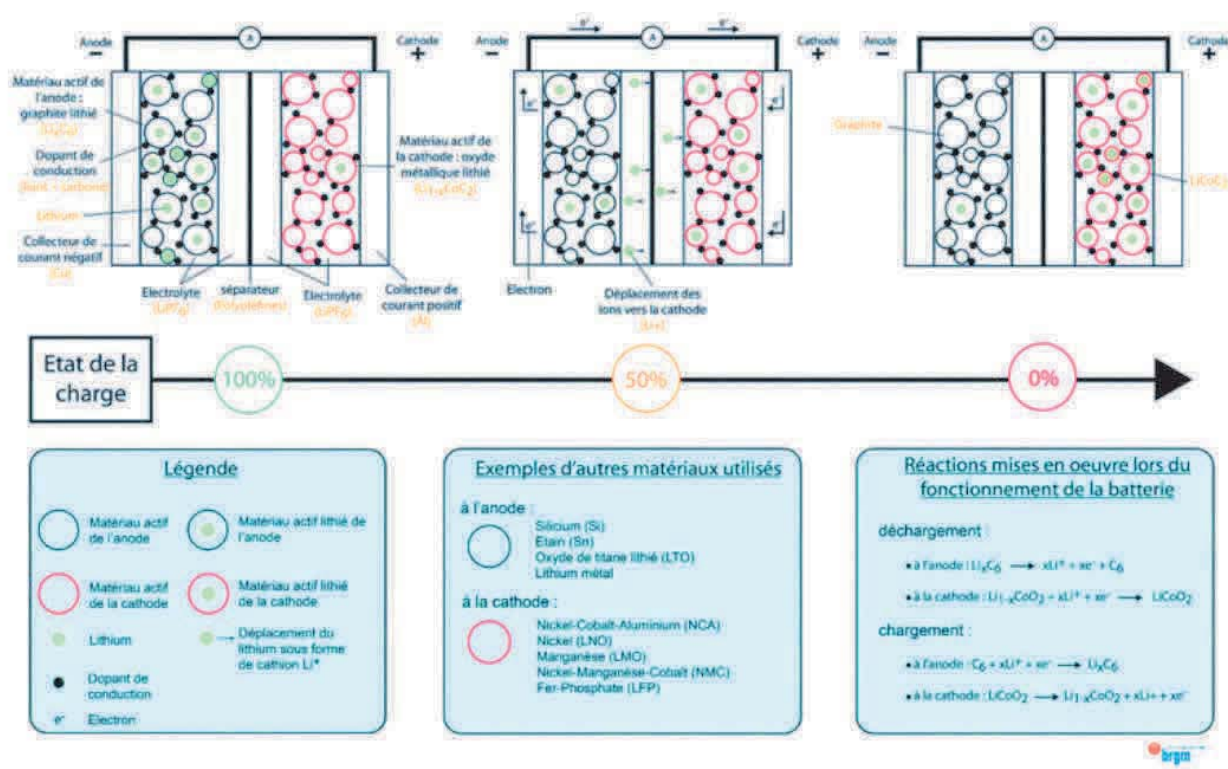
Les batteries Li-ion, commercialisées pour la première fois à l'échelle industrielle en 1991 par le groupe japonais Sony présentent des ca-

ractéristiques très intéressantes en matière de capacité d'accumulation d'énergie par unité de masse par rapport aux technologies précédentes et concurrentes. Les améliorations de leurs coûts de fabrication ont également fortement joué dans

leur expansion à grande échelle, d'abord dans les appareils électroniques portables, puis de manière croissante au sein des véhicules électrifiés. Ainsi, pour beaucoup de constructeurs automobiles, les technologies Li-ion semblent aujourd'hui l'un des meilleurs compromis pour les batteries de véhicules électriques en termes de puissance d'énergie embarquée, de légèreté, de fiabilité, de durée de vie, et de coût de fabrication. Si les ventes de véhicules électrifiés étaient de l'ordre de 2 millions en 2019, soit 2 % à 3 % des ventes mondiales de véhicules légers, beaucoup de scénarii prévoient une augmentation exponentielle de ces dernières, comprises en 2030 entre 20 millions par an et 38 millions par an dans les deux scénarii principaux de l'Agence internationale de l'énergie (scénarii *New Policies Scenarios* et *EV30@30*). Plusieurs sources bibliographiques, dont l'antenne spécialisée *Bloomberg New Energy Finance*, estiment que la demande totale de stockage électrique sera multipliée par dix entre 2018 et 2030 pour atteindre environ 1 800 GWh/an à l'échelle mondiale. Sur ce total, près de

90 %, soit 1 550 GWh (Gigawatt heures) par an, devraient être assurés par les batteries contenues dans les véhicules électrifiés, à la fois hybrides (PHEV) et tout électriques (BEV). Au sein de ces derniers, les technologies Li-ion devraient rester majoritaires pendant près de dix ans avant une éventuelle rupture technologique. Ceci s'explique assez simplement : la fabrication à grande échelle des batteries pour véhicules électrifiés requiert la construction d'usines de très grande taille (appelées « *Gigafactories* »), capables d'assurer la production quotidienne de centaines de kilomètres d'électrodes et des milliers d'accumulateurs élémentaires, équivalents à des GWh de consommation d'énergie électrique par an. Représentant chacune un investissement de plusieurs milliards d'euros, ces usines nécessiteront une rentabilisation sur une dizaine voire une quinzaine d'années. Ceci exigeant une production continue et un haut degré de standardisation, il semble probable que tous les efforts soient mis en œuvre pour que les chimies d'électrodes qui seront utilisées à l'horizon 2030 demeurent proches, ou du moins com-

Principe de fonctionnement d'une batterie lithium-ion lors de la décharge, exemple d'une LCO (lithium cobalt oxyde)



patibles avec les moyens de production des batteries Li-ion actuelles.

Toutes les batteries Li-ion sont composées d'un électrolyte liquide à base de lithium, faisant l'interface entre une anode, principalement composée de graphite lithié, et d'une cathode, comme illustré sur le schéma ci-dessous. Or, il existe plusieurs variantes de compositions chimiques pour les matériaux d'anode et de cathode. Le principal impact, à la fois sur les performances, les coûts et les quantités de matières utilisées, a été porté jusqu'ici par le choix des métaux à la cathode. Il s'agit principalement du lithium, du cobalt, du nickel et du manganèse.

Représentant, en 2007, 82 % des cathodes de batteries Li-ion, les premières générations de cathodes privilégiaient des matériaux à base de cobaltate de lithium (LiCoO_2 ou son abréviation « LCO », telle que présentée ci-dessous). L'évolution de la chimie des cathodes a par la suite privilégié le développement des formulations dites « NMC » (Nickel-Manganèse-Cobalt), offrant de plus grandes capacités énergétiques tout en limitant progressivement l'usage du cobalt dans la cathode. La formulation NMC « 111 » (encore appelée NMC « 333 ») dans laquelle les teneurs atomiques en nickel, cobalt et manganèse sont identiques (1/3 Ni, 1/3 Mn et 1/3 Co) a été récemment détrônée au profit de la formulation NMC « 622 » (60 % Ni, 20 % Mn et 20 % Co), actuellement commercialisée. Des travaux sont en cours dans le but d'améliorer le comportement de la génération suivante – appelée NMC « 811 » (80 % Ni, 10 % Mn et 10 % Co) – présentant à ce jour l'inconvénient d'une durée de vie en cyclage plus faible, mais l'avantage de contenir encore moins de cobalt et plus de nickel, toujours en raison des tensions sur le cobalt et de ses prix élevés.

Le consultant Benchmark Mineral Intelligence rapporte qu'en 2015, les capacités de production de batteries étaient de 57 GWh (trois usines), tandis qu'elles sont désormais de 455 GWh au deuxième trimestre 2019 (70 usines). Les capacités pourraient même atteindre 2,2 TWh d'ici 2029 et resteraient largement dominées par la Chine avec 70 % des parts de marché (contre 73 % en 2019). Les besoins en métaux à usage des batteries sont donc très importants et évidemment en croissance soutenue. Par exemple, une usine

produisant 30 GWh de batteries consomme environ 33 000 tonnes de graphite, 25 000 tonnes de lithium, 19 000 tonnes de nickel et 6 000 tonnes de cobalt, chacun sous forme de « matériaux actifs de qualité batterie ». Le marché des matériaux actifs de batteries a été évalué à \$ 7,45 milliards en 2017 et pourrait représenter \$ 26 milliards en 2025.

La disponibilité de ces matériaux en quantités et qualités suffisantes conditionne donc directement le développement du marché des véhicules électrifiés. Les impacts sur les marchés sont visibles, bien que montrant certains paradoxes. Pour le lithium et le cobalt, les conséquences d'une telle demande ont été le doublement de la production mondiale en dix ans et une modification importante des circuits industriels. Néanmoins, l'explosion rapide des prix a également conduit à une saturation ponctuelle des marchés et à un effondrement simultané des prix dès 2018, poursuivi en 2019. Les baisses respectives ont été de – 55 %, – 25 %, – 22 % et – 23 %, pour le cobalt métal, le carbonate de lithium, l'hydroxyde de lithium et le graphite entre 2018 et 2019. Le prix moyen du sulfate de nickel a quant à lui augmenté de 1 % sur un an. Les marchés du nickel, du manganèse et du graphite connaissent des dynamiques différentes, les tonnages mondiaux étant de l'ordre de dix fois supérieurs à ceux du lithium et du cobalt (1 Mt pour les premiers contre 100 000 tonnes en moyenne pour ces derniers), et majoritairement orientés vers les marchés de l'aciérie et de la sidérurgie (plus de 80 % des usages). Toutefois, le rôle croissant des débouchés pour le marché des batteries Li-ion demande des restructurations pour réorienter une partie de la production vers des intermédiaires « de qualité batterie ». Les enjeux sont, ici, majeurs. Le marché du graphite est détaillé dans ce chapitre, ceux du nickel et du manganèse se retrouvent respectivement dans les sections « Les grands métaux non ferreux » et « Petits métaux ».

Cobalt (Co)

En 2019, la production minière mondiale du cobalt a été de 140 000 tonnes selon les données préliminaires de l'USGS. Presque la totalité de cette production provient de l'extraction et de la métallurgie du cuivre (72 %) et du nickel (25 %). Le cobalt joue un rôle fondamental pour le stoc-

kage d'énergie, sa consommation au sein des batteries rechargeables en particulier de type Li-ion représentant désormais plus de 50 % de ses usages. Le cobalt entre dans la composition de trois types de cathodes de batteries Li-ion. La présence de cobalt permet d'accroître leur densité d'énergie, mais aussi d'augmenter leur stabilité et leur longévité. Le tableau suivant résume les possibilités d'utilisation du cobalt dans ces différentes cathodes.

Toutefois, le cobalt est le plus cher des métaux de cathodes (paramètre exacerbé par des prix extrêmement hauts en 2017 et 2018) et présente des caractéristiques d'approvisionnement parfois problématiques qui conduisent un certain nombre de fabricants de batteries et de constructeurs automobiles à chercher à développer une substitution efficace. C'est une tendance forte de l'année 2019. Début février 2020, l'entreprise Tesla a par exemple annoncé opter pour un retour aux technologies de batteries LFP (Lithium Phosphates de Fer) pour ses modèles produits prochainement en Chine (de bas de gamme) afin d'éviter la dépendance au cobalt.

De telles démarches ont contribué à la chute des prix observée en 2019. En effet, après avoir atteint, selon la référence *spot*, un plus haut historique à \$ 94 800/t sur le *London Metal Exchange* (LME), les prix se sont effondrés à partir de juin 2018, en raison notamment d'une surproduction d'intermédiaires sur le marché chinois et de plusieurs initiatives de substitutions. En 2019, le prix du cobalt métal sur le marché européen (qualité *alloy grade cut cathode* 99 %) a été en moyenne de \$ 37,1/kg contre \$ 81,7/kg en 2018, soit une chute de 55 %. Sur le LME, il s'échangeait à moins de \$ 30 000/t durant l'été 2019 avant d'évoluer entre \$ 32 000/t et \$ 37 000/t sur le reste

de l'année puis, après avoir fléchi sur le premier trimestre 2020, de franchir à nouveau le seuil de \$ 30 000/t. Si l'on peut y voir une certaine stabilisation logique, plusieurs facteurs pèsent encore sur l'évolution à court terme des prix du cobalt. Le principal est l'émergence de deux marchés distincts : celui du cobalt métal et celui de ses intermédiaires, hydroxydes de cobalt et sulfates de cobalt, prisés pour la fabrication des batteries Li-ion. En effet, la fixation des prix a pour référence historique le cobalt métal, sur le LME notamment. Ainsi, la vente des intermédiaires était réalisée jusque-là sur la base d'un pourcentage du prix du cobalt métal (discount). Or, les intermédiaires représentant désormais les volumes d'échanges les plus importants pour des qualités croissantes, ce schéma n'est plus adapté. Il est remis en question à la fois par les producteurs et les consommateurs du fait du manque de transparence de fixation des prix et l'absence de standards pour une qualité donnée d'intermédiaires. À ce jour, le différentiel de prix entre les deux différents types de produits est encore très important. Or, la cotation des sulfates étant liée à celle du cobalt métal, la baisse de l'un ou l'autre a pour effet d'inciter les producteurs à contrôler les quantités mises sur le marché pour tenter d'influencer les cours. La mise en place rapide d'une cotation distincte serait ainsi nécessaire afin de limiter les risques de spéculation, ce que le LME tente de mettre en place.

Le cobalt est un élément ferromagnétique qui possède notamment le point de Curie le plus élevé à 1 111 °C – température à laquelle un élément perd son aimantation spontanée – et un point de fusion à 1 495 °C. Les autres marchés du cobalt sont, par ordre d'importance : les superalliages (16 %), les carbures cémentés et outils diamantés (7 %), les catalyseurs au cobalt (5 %), les

Typologie de la cathode	Chimie	Abréviation	% Co	Caractéristiques et usages préférentiels
Oxyde de Lithium-Cobalt	LiCoO ₂	LCO	60% en masse	Grande capacité. <i>Electronique portable (ordinateurs, téléphones, etc.)</i>
Oxyde de Nickel-Manganèse-Cobalt	LiNiMnCoO ₂	NMC	6 à 21% en masse (en fonction de la configuration)	Moindre capacité mais meilleures puissance et durée de vie que les LCO. <i>Outils portables, vélos et véhicules électriques (ex : Renault Zoé)</i>
Oxyde de Nickel-Cobalt-Aluminium	LiNiCoAlO ₂	NCA	9% en masse	Plus grande densité d'énergie et meilleure stabilité thermique. <i>Stockage d'énergie, véhicules électriques (ex : Tesla Model S)</i>

pigments (5 %), les aimants permanents samarium-cobalt (3 %), et diverses autres, dont l'usage pour agents séchants et pneumatiques. Dans les superalliages, le cobalt peut être utilisé jusqu'à 3 % de la masse totale, souvent allié au nickel en plus de plusieurs autres métaux, majoritairement des métaux réfractaires (Mo, Nb, Ta, Re, W). Les superalliages sont principalement utilisés dans les parties chaudes des turboréacteurs en aéronautique et dans les turbines à gaz pour la production d'électricité. Ce marché pourrait nécessiter à lui seul quelques dizaines de milliers de tonnes de cobalt par an à l'horizon 2025. En 2018, Airbus estimait un besoin de 37 390 nouveaux avions entre 2018 et 2037, dû au doublement de la flotte mondiale de passagers durant cette période. Parmi les principaux usages du cobalt se trouvent aussi les carbures cimentés, qui sont des matériaux très durs, très résistants et réfractaires. Les carbures cimentés les plus fréquents sont ceux au tungstène (WC), au titane (TiC) et au tantale (TaC). Le cobalt est utilisé pour cimenter les éléments abrasifs (carbures ou diamants). Ces carbures sont utilisés principalement dans les industries mécaniques, de découpe et de forage mondiales. La hausse du secteur des batteries Li-ion et de la construction aéronautique devrait continuer à tirer la croissance de la demande en cobalt à des taux de l'ordre de 8,8 % par an jusqu'en 2025.

En 2019, la production minière mondiale de cobalt s'est élevée à 140 000 tonnes, selon les données préliminaires de l'USGS, en légère baisse par rapport à 2018. Presque la totalité de cette production (97 %) provient de la récupération de cobalt comme élément valorisant lors de l'extraction métallurgique du cuivre et du nickel. Il existe quatre types de contextes géologiques principaux à l'origine de la production minière de cobalt :

- les gisements stratiformes cuprifères d'origine sédimentaire (la *Copperbelt* en République démocratique du Congo – RDC – et en Zambie), qui correspondent à 72 % de la production mondiale en 2018 ;

- les latérites nickélifères (Nouvelle-Calédonie, Indonésie, Philippines, Madagascar, etc.), qui représentent 17 % de la production, toujours en 2018 ;

- les amas sulfurés à nickel-cuivre (Canada, Russie, Australie, Chine, etc.) pour 7 % du total ;

- le gisement de Bou Azzer au Maroc, d'origine hydrothermale, qui est – à ce jour – le seul gisement exploité pour le cobalt en produit principal, avec une production de 2 100 tonnes en 2019.

Un dernier type de gisement potentiel consiste en des encroûtements polymétalliques déposés sur les fonds marins, notamment dans le Pacifique. Ces derniers pourraient d'ici plusieurs décennies être considérés pour l'exploitation, cependant le coût et les contraintes techniques d'une telle exploitation rendent cette possibilité très peu probable à court et moyen terme.

La répartition de la production mondiale de cobalt est à analyser au regard des entreprises productrices plutôt qu'en termes de pays producteurs. Ainsi, le principal acteur individuel de ce marché est Glencore, multinationale suisse spécialisée dans le négoce de matières premières. Très active dans le domaine minier, ses actifs sur le cobalt équivalent en 2019 à plus de 30 % de la production primaire mondiale. En RDC, Glencore contrôle la mine de Mutanda, représentant à elle seule près de 15 % à 20 % de la production minière de cobalt. À cela s'ajoutent les mines de Kamoto et KOV ayant repris la production en 2018 avec une capacité de 11 000 tonnes de Co (cobalt). S'ajoutent également ses opérations minières à Sudbury (Canada) et Murrin Murrin (Australie), soit une capacité totale de près de 46 000 tonnes de Co contenu. Or, seule une faible part de cette production de cobalt est raffinée par Glencore (7 000 tonnes en 2017 selon le consultant Darton Commodities). La plupart de la production, en particulier celle des mines en RDC est vendue sous forme d'hydroxydes de cobalt, ces produits intermédiaires à haute valeur ajoutée particulièrement recherchés par les fabricants de précurseurs de batteries.

Ainsi, ces dernières années, Glencore a multiplié les contrats auprès de divers acteurs de la fabrication de batteries. En 2018, un accord avec le groupe chinois G.E.M – fournisseur du fabricant de batteries C.A.T.L – portait sur 61 200 tonnes d'hydroxydes de cobalt (soit environ 20 000 tonnes de cobalt contenu) sur cinq ans. Un autre a été signé en 2019 avec le coréen SK Innovation pour une capacité pouvant atteindre 30 000 tonnes de Co jusqu'en 2025. Enfin, début février 2020, c'était au tour de Samsung SDI Co. Ltd d'annoncer la signature d'un accord de cinq ans pour

21 000 tonnes de cobalt contenu, de 2020 à 2024. Des discussions ont également été signalées avec Tesla. Par ces contrats, Glencore s'est assuré un rôle de maillon indispensable de la chaîne industrielle des productions de batteries Li-ion, rendant par la même occasion une partie du cobalt produit indisponible au marché libre. Or, début août 2019, Glencore a annoncé la fermeture de Mutanda pour une durée de dix-huit mois, privant le marché d'environ 15 000 tonnes à 20 000 tonnes de cobalt. Le groupe justifiait cette fermeture par la perte de rentabilité économique observée du fait de la forte chute des prix du cobalt en 2019, la compagnie invoquant un manque à gagner de \$ 350 millions sur le premier semestre 2019. L'effet sur les prix a été sensible en fin d'année 2019.

La croissance d'acteurs et d'intérêts chinois dans l'exploitation du cobalt en RDC est également un enjeu important. La Chine est devenue, au début des années 2000, le premier producteur métallurgique de cobalt mondial, bien que n'étant que le 12^e producteur minier de cobalt. En 2018, 73 000 tonnes de cobalt raffiné ont été produites en Chine, soit 64 % du total, estimé à 114 000 tonnes de Co par Darton Commodities.

Plusieurs compagnies chinoises, en particulier Zheijang Huayou Cobalt, et le groupe Jinchuan sont devenus des acteurs incontournables par des investissements progressifs conséquents en RDC. L'étape la plus spectaculaire a été menée par la société China Molybdenum Co. Ltd en 2016, avec l'achat de la Tenke Fungurume, la deuxième plus grosse mine de cobalt au monde pour \$ 4 milliards. Avec cet achat, l'entreprise s'est assuré le contrôle de près de 15 % de la production primaire de cobalt. Le 15 janvier 2020, la société minière publique chinoise CNMC a, quant à elle, annoncé la mise en service de la mine de cuivre et de cobalt de Deziwa en RDC, avec cent cinquante jours d'avance. La fonderie de cuivre de Lualaba (LCS) a également été lancée en tant que première fonderie pyrométallurgique de cuivre à grande échelle modernisée du pays. Situé à côté de la mine Mutanda de Glencore, le projet Dewiza est financé par CNMC en contrepartie d'une participation de 51 % dans le projet, tandis que la Gécamines, détenue par l'État congolais, détient les 49 % restants et reprendra la pleine propriété une fois le remboursement du prêt à la CNMC. Avec un investissement total de \$ 880 millions, la première

Cobalt
(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production minière	123 000	126 000	111 000	120 100	148 000	140 000
Afrique du Sud	3 000	3 000	2 300	2 300	2 300	2 400
Australie	5 980	6 000	5 500	5 030	4 880	5 100
Brésil	2 600					
Canada	6 570	6 900	4 250	3 870	3 520	3 000
Chine	7 200	7 700		3 100	2 000	2 000
Cuba	3 700	4 300	4 200	5 000	3 500	3 500
États-Unis	120	760	690	640	490	500
Madagascar	3 100	3 700	3 800	3 500	3 300	3 300
Maroc				2 200	2 100	2 100
Nouvelle-Calédonie	4 040	3 680	3 390		2 100	1 600
Papousie Nouvelle-Guinée			2 190	3 310	3 280	3 100
Philippines	4 600	4 300	4 100	4 600	4 600	4 600
Rép. Dém. du Congo	63 000	63 000	64 000	73 000	104 000	100 000
Russie	6 300	6 200	5 500	5 900	6 100	6 100
Zambie	5 500	4 600	3 000			
Autres pays	7 080	11 600	7 600	7 650	5 540	5 700

Prix du cobalt
Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

phase du projet vise 80 000 tonnes de cathodes de cuivre et 8 000 tonnes par an de cobalt contenu. La première production de cobalt devrait être effective au deuxième trimestre 2020.

Les questions de traçabilité, d'exploitation artisanale et de travail des enfants sont également une caractéristique fondamentale du marché du cobalt. La question de traçabilité désigne le fait que 10 % à 20 % de la production de cobalt de RDC sont d'origine difficilement traçable. Le gouvernement de RDC estime ainsi que 5 000 tonnes à 25 000 tonnes de minerai seraient produites annuellement par des mineurs artisans et captées par des « négociants ». Ces activités et leur ampleur sont toutefois très dépendantes des prix du cobalt et peuvent varier fortement.

Pour tenter d'apporter des réponses à ce phénomène, plusieurs démarches distinctes se sont structurées en 2019 :

- d'une part, des obligations d'audits prévues dans les clauses des contrats d'approvisionnement. Tel fut le cas entre Glencore et Samsung : les deux sociétés ayant convenu que les opérations de Glencore en RDC feront l'objet d'un audit indépendant annuel sur la base des normes définies par l'Initiative minière responsable (*Responsible Mining Initiative*) ;

- d'autre part, la structuration d'une entreprise d'État appelée « Entreprise générale du cobalt » créée en 2019 par le gouvernement congolais, dépendant de l'entreprise Gécamines et autorisée à gérer et vendre les stocks de cobalt extrait de manière artisanale. Toutefois, le flou demeure sur la structuration officielle de cette filière ;

- enfin, BMW a choisi de garantir l'approvisionnement en cobalt éthique et annonçait, en avril 2019, utiliser des sources marocaine et australienne.

L'origine de la domination de la RDC sur l'exploitation mondiale de cobalt tient en premier lieu à des facteurs géologiques. La zone de la *Copperbelt* fait référence à un contexte géologique unique. Cette « ceinture » rocheuse hébergeant des gisements de cuivre et de cobalt s'étend sur une région de plus de 500 km de long, à la fois en RDC, dans les provinces du Lualaba et Haut-Katanga (Kolwezi, Lubumbashi), et en Zambie. Ce sont des gisements d'origine sédimentaire. Le cobalt et le cuivre provenant des sédiments ont été

concentrés par des processus diagénétiques dans un environnement proche du rivage ou d'une lagune saline. Les minéralisations primaires sulfurées (portées par des minéraux tels que chalcopyrrite, carrollite, linnéite, chalcocite, etc.) ont subi les effets de conditions d'érosion particulières. Cette altération supergène ainsi que l'action de processus métamorphiques ont conduit à des remobilisations et des reconcentrations des métaux, lessivant les sulfures pour former des minéraux oxydés particulièrement enrichis. Pour le cobalt, c'est en particulier l'hétérogénite, minéral spécifique à ce contexte, qui permet d'atteindre des concentrations naturelles de cobalt dans les minerais de 0,4 % Co à 0,8 % Co, ce qui est, par exemple, cinq fois supérieur à celles des minerais de nickel latéritique. Les zones concernées étant de très grande envergure, l'exploitation du cuivre et du cobalt est naturellement facilitée dans la zone de la *Copperbelt*, y compris sous forme artisanale, car les minéraux oxydés sont portés par des roches relativement tendres.

L'importance des gisements intrasédimentaires de la *Copperbelt* dans le panorama mondial est soulignée par leur proportion dans les réserves mondiales. Les réserves mondiales de cobalt sont relativement abondantes, estimées par l'*United States Geological Survey* (USGS) – l'Institut d'études géologiques des États-Unis – à 7 Mt Co. Toutefois, les gisements de Mutanda, Kamoto et Tenke-Fungurume, tous trois situés en RDC, contiennent individuellement des ressources de plus de 2 Mt de cobalt contenu et représentent à eux seuls 60 % des réserves et 66 % des ressources mondiales documentées. À titre de comparaison, les principaux gisements associés à des dépôts de type nickel latéritique (Murrin Murrin, Ambatovi, Goro, par exemple) ou de type magmatique sulfuré (Voisey's Bay, Sudbury) ont des ressources de l'ordre de 0,2 Mt à 0,3 Mt de Co, avec des teneurs généralement beaucoup plus basses (0,01 % à 0,1 %).

Les autres ressources potentielles résident en grande partie dans les nombreux *tailings* (déchets miniers) issus de l'exploitation des gisements de cuivre, dont les plus riches sont également situés dans la région de la *Copperbelt*. Ces derniers affichent des concentrations en Co de l'ordre de 0,3 %, supérieurs à certains gisements en terre. À

court terme, ils apparaissent comme les meilleurs relais de la croissance de la production mondiale. Le principal en activité est le Groupement du Terril de Lubumbashi avec une capacité de 5 500 tonnes de Co et un accord avec Glencore. La compagnie kazakhe Eurasian Resource Group (ERG) s'est également engagée dans cette voie avec son projet Kolweisi Tailings (RTR Metalkol) d'une capacité de 10 000 tonnes à 15 000 tonnes de Co, en partie financé par la Chine pour un investissement global d'environ \$ 2,2 milliards. Début 2020, ERG a annoncé évaluer la possibilité de construire une usine de précurseurs de batteries lithium-ion adossée à cette production. Aucun détail financier ni calendrier n'a pour autant été divulgué à ce stade.

Du côté du recyclage, les circuits se développent, notamment ceux concernant les batteries Li-ion en fin de vie. D'autres sont spécifiques à certains usages sous forme métal (superalliages), mais ils ne semblent pas présenter une capacité suffisante pour répondre à l'ensemble des besoins. Enfin, de nombreux usages de composés chimiques du cobalt sont dispersifs ce qui empêche toute récupération. Plusieurs projets se développent dans le reste du monde. C'est notamment le cas en Australie avec la compagnie Cobalt Blue et son projet Broken Hill, dont une usine pilote est attendue pour mi-2020. En Amérique du Nord, deux projets pourraient également présenter des alternatives crédibles : la relance de la raffinerie de cobalt de l'entreprise First Cobalt, d'une capacité annuelle de 25 000 tonnes de sulfates de cobalt, ainsi que le projet d'exploration dans l'Idaho mené par Jervois Mining ayant mis à jour les ressources mesurées et indiquées avec une augmentation de plus de 20 % à 5,24 Mt de minerai titrant 0,44 % de cobalt.

Graphite naturel et synthétique (C)

En 2019, la production mondiale de graphite naturel aurait été de 1,1 Mt, sur la base des données de l'USGS. L'ordre de grandeur du marché est compris entre \$ 700 millions et \$ 800 millions. Parallèlement au marché du graphite naturel, celui du graphite artificiel ou synthétique prend également une importance grandissante, en particulier pour les débouchés à destination des matériaux de batterie. Ce dernier est produit à partir d'un précurseur carboné, et sa production annuelle se

situe entre 1 Mt et 1,5 Mt. Du fait de sa structure cristalline particulière, le graphite naturel possède des propriétés des métaux et des non-métaux. Il est de couleur noire, avec un éclat submétallique et est tendre et gras au toucher. En raison de ses propriétés exceptionnelles, il est utilisé dans de nombreuses applications : réfractaires, lubrifiants, revêtements et piles et batteries.

Le marché du graphite est opaque et cloisonné, si bien que les données chiffrées concernant l'offre et la demande, ainsi que celles liées aux échanges commerciaux, restent très approximatives et variables en fonction des sources, en particulier dans le secteur très confidentiel du graphite synthétique. La consommation mondiale de graphite est estimée à environ 2,5 Mt. Celle de graphite synthétique atteindrait entre 1,5 Mt et 1,6 Mt (GrafTech, Roskill), tandis que celle de graphite naturel approcherait 1 Mt. L'Asie consomme environ les deux tiers du graphite naturel produit dans le monde, suivie de l'Europe (13 %), de l'Amérique du Nord (8,5 %) et de l'Amérique du Sud (8,5 %). À l'échelle globale, le secteur de la sidérurgie consommerait environ 60 % du graphite artificiel et naturel avec la fabrication d'électrodes, de réfractaires et la recarburation des aciers. Il est cependant difficile de connaître les parts respectives du graphite naturel et synthétique pour chaque application. En 2014, selon Roskill, environ la moitié du graphite naturel mondial était destinée à la fabrication de réfractaires et moins de 10 % à celle de batteries. Cependant, cette part augmente progressivement.

Plus de la moitié de la demande de graphite du secteur des batteries et piles émane de l'Asie où se concentre la production des piles et accumulateurs. Plusieurs types de piles et batteries contiennent de faibles quantités de graphite naturel ou synthétique dans l'électrolyte ou dans le matériau d'électrodes (piles alcalines, plomb-acide, Ni-MH, etc.). Les anodes des batteries Li-ion peuvent, quant à elles, contenir des quantités considérables de graphite qui sont d'ailleurs bien plus importantes que celles de lithium (de dix à vingt fois suivant la cathode utilisée) : 5 grammes dans une batterie de smartphone, 90 grammes pour un ordinateur portable, une dizaine de kilogrammes en moyenne pour une voiture hybride (HEV), ou encore 70 kg dans un véhicule tout électrique. L'enjeu est donc de taille

et le marché de la mobilité électrique est l'un des marchés sur lesquels reposent les projections de croissance les plus optimistes de la demande mondiale en graphite au cours des prochaines années.

Le graphite sphérique a été développé dans le but d'améliorer le rendement des anodes dans les batteries Li-ion. En effet, la structure fortement anisotropique du graphique naturel en paillettes rend le processus de fabrication compliqué et coûteux. Une plus grande surface favorisant une meilleure conductivité et un meilleur rendement, les particules sphériques améliorent la performance de l'anode. La Chine produit quasiment 100 % du graphite sphérique non revêtu mondial qui est essentiellement fabriqué à partir de paillettes de graphite naturel provenant de la province du Heilongjiang, au nord-est de la Chine. Une partie de cette production – qui est concentrée dans la province du Shandong – est consommée dans le pays par les producteurs d'anodes de batteries Li-ion. Le

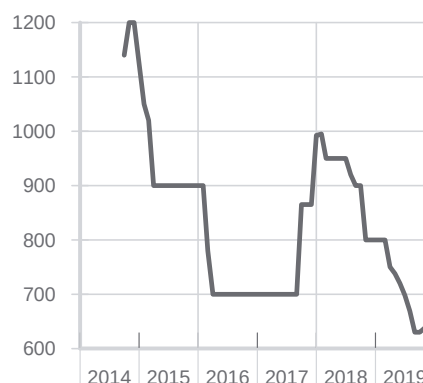
reste est vendu à des fabricants de batteries et des négociants japonais ou sud-coréens qui procèdent ensuite au revêtement des particules utilisées dans la fabrication des anodes. La Chine produit également 90 % du graphite sphérique revêtu mondial, en raison d'une main-d'œuvre peu onéreuse et de restrictions environnementales assez souples, du moins jusqu'à récemment. Hors Chine, plusieurs compagnies juniors projettent de produire du graphite sphérique (revêtu ou non), comme Hexagon Resources ou Syrah aux États-Unis, et ce, afin de ne plus simplement exporter leurs concentrés en Chine.

Si les capacités des usines de fabrication de batteries Li-ion étaient de 294 GWh en 2018, elles pourraient atteindre 1 235 GWh en 2023 et 2 027 GWh en 2028, stimulant de ce fait la demande en anodes. Le consultant Benchmark Minerals Intelligence estime que la consommation en matériaux d'anodes, dont le graphite est le

Graphite naturel
(en tonnes de métal raffiné)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	970	972	1000	1100	996	1100
Allemagne					800	800
Autriche					1 000	1 000
Brésil	80 000	95 000	90 000	95 000	96 000	
Canada	30 000	30 000	40 000	40 000	40 000	
Chine	780 000	780 000	625 000	693 000	700 000	
Corée du Nord	30 000	6 000	5 500	6 000	6 000	
Inde	170 000	149 000	35 000	35 000	35 000	
Madagascar	5 000	8 000	9 000	46 900	47 000	
Mexique	22 000	4 000	9 000	9 000	9 000	
Mozambique		70	70	300	104 000	100 000
Namibie		9	10	2 220	3 460	3 500
Norvège		8 000	8 000	15 500	16 000	16 000
Pakistan			14 000	14 000	14 000	14 000
Russie	15 000	19 000	17 000	25 200	25 000	
Sri Lanka	4 000	4 000	3 500	4 000	4 000	
Tanzanie				150	150	
Turquie	32 000	4 000	2 300	2 000	2 000	
Ukraine	5 000	15 000	20 000	20 000	20 000	
Vietnam			5 000	5 000	5 000	
Zimbabwe		7 000	6 000	1 580	2 000	2 000
Autres pays			2 000	1 900	200	200

Prix du graphite
Marché libre européen
(en dollar/stonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

principal, pourrait être multipliée par dix en dix ans, passant de 181 000 tonnes en 2018 à 1,9 Mt en 2028. La sidérurgie demeure toutefois l'usage largement majoritaire du graphite, en particulier synthétique, avec 60 % des usages destinés à la production d'électrodes pour les fours électriques des installations sidérurgiques. Les électrodes sont utilisées dans de nombreuses industries dont 61 % pour la fabrication d'acier selon la société Ark of China, 26 % pour celle du silicium, 8 % pour celle du phosphore et 5 % pour d'autres secteurs comme l'aluminium ou le corindon. Ces secteurs ont consommé environ 1,6 Mt d'électrodes, principalement pour les fours à arc électriques (*Electric Arc Furnace* – EAF) où il n'existe pas d'autres substituts actuellement. Les électrodes sont généralement au nombre de trois en courant alternatif et unique en courant continu. La fabrication d'une tonne d'acier consommerait environ 2,5 kg d'électrodes, selon les chiffres de l'Association européenne du carbone et du graphite (ECGA). La longueur des électrodes varie entre 1 mètre et 3,6 mètres pour un diamètre compris entre 35 centimètres et 80 centimètres (www.sglgroup.com) et il est nécessaire de les remplacer toutes les cinq à huit heures, ce qui explique bien la forte demande en graphite de ce secteur. Selon les chiffres de Worldsteel – l'Association mondiale de l'acier –, la production d'acier a été en hausse quasi continue depuis 2005 pour atteindre 1,81 Gt en 2018, que ce soit par le procédé convertisseur à oxygène (1,28 Gt en 2018) ou celui par fours à arc électriques (0,52 Gt en 2018). Après une baisse de la part des EAF au profit des convertisseurs à oxygène entre 2006 et 2015, il semble que l'inverse se produit depuis 2016, où la part de la production d'acier par EAF est passée de 25 % à 30 % au niveau mondial et de 7 % à 12 % en Chine (voir le chapitre sur l'acier). Cette hausse en Chine devrait se poursuivre selon la société Ark of China qui rapporte la construction de cinquante-six nouveaux fours en 2018, soit un apport de capacités compris entre 60 Mt et 70 Mt. La part des EAF pourrait passer de 14 % en 2020 à plus de 30 % en 2030, tirant inévitablement la demande en électrodes de graphite vers le haut.

L'industrie des réfractaires absorbe environ 40 % de la production mondiale de graphite naturel. La fabrication de briques de fours et creusets

utilise principalement des paillettes de graphite de haute pureté (>85 % C) de moyenne à grande taille (150 µm à 300 µm), dont la morphologie contribue à améliorer la cohésion des briques. Selon Roskill, il faut actuellement environ 5 kg de réfractaires pour fabriquer une tonne d'acier. Des stocks de réfractaires importants ainsi qu'une production mondiale d'acier atone entravent la demande de ce type de graphite. Le graphite synthétique, beaucoup plus cher, ne peut pas remplacer le graphite naturel. Enfin, le graphite naturel entre dans la composition des revêtements de creusets de fonderie et divers ustensiles de coulée de métaux et est utilisé dans l'industrie du verre et du ciment. Pour tous ces usages, le graphite amorphe est privilégié, du fait de son faible coût, bien qu'il puisse être remplacé par du graphite en fines paillettes, ainsi que par du graphite synthétique primaire et surtout secondaire (issu du recyclage de cathodes).

Alors que la production d'électrodes destinées en grande partie au secteur de la sidérurgie est relativement bien répartie à l'échelle mondiale, la grande majorité des anodes pour batteries Li-ion est fabriquée et consommée en Chine. L'agence Fasmart estime ainsi qu'il y a plus de cinquante fabricants d'anodes en Chine qui contrôlent les trois quarts de la production mondiale, dont Hitachi Chemical (capacité annuelle de production d'anodes de 100 000 tonnes), BTR (18 000 tonnes), Kimwan Carbon (30 000 tonnes) ou encore Jiangxi Zichen Technology (10 000 tonnes).

En 2019, la production mondiale de graphite serait de l'ordre de 2,2 Mt (50 % naturel, 50 % synthétique). Le graphite naturel résulte du métamorphisme de composés carbonés organiques (charbons, bitumes) contenus dans les roches. On en distingue trois types :

- Le graphite en paillettes de 1 mm à 5 cm résulte d'un métamorphisme régional intense ; il forme des lentilles ou est disséminé dans des paragneiss, quartzites, marbres et micaschistes. De grande pureté en carbone (85 % – 99 % C), les concentrés attirent les meilleures valeurs marchandes.

- Le graphite amorphe ou microcristallin est un graphite cryptocristallin, produit par un métamorphisme de contact modéré à partir de veines ou de couches de charbon et de schistes bitumineux ; il

se présente sous forme de particules fines disséminées, inférieures à 70 μm . C'est le graphite le moins riche en carbone (60 % – 90 %).

- Le graphite en veine (ou graphite en masse) – le plus rare – se formerait par précipitation à partir de fluides carbonés en remplissage de fissures et veines de 1 mm à 1 m de puissance dans des roches métamorphiques de faciès granulite, essentiellement. C'est un graphite très pur, avec une teneur en carbone parfois supérieure à 90 %.

La Chine est non seulement le plus gros consommateur de graphite, mais également le premier producteur et exportateur mondial de graphite naturel, notamment sous forme de paillettes (flakes). Le pays possède environ cent cinquante mines de graphite situées principalement au nord du pays, dans les provinces de Heilongjiang et de Shandong et en Mongolie intérieure. La production chinoise est très difficile à quantifier avec précision et les estimations varient amplement d'une source à l'autre. Par exemple, la production chinoise en 2017 était estimée à 625 000 tonnes par l'USGS, à 670 000 tonnes par le *Federal Ministry of Sustainability and Tourism* (BMNT) – le ministère du Développement durable et du Tourisme autrichien –, à 730 000 tonnes par l'entreprise Hensen Quigdao et à 900 000 tonnes par le *British Geological Survey*, l'Institut d'études géologiques britannique. Cette production serait bien en deçà des capacités de production du pays qui se situeraient entre 1,2 Mt et 1,6 Mt, soit un taux d'utilisation compris entre 40 % et 60 %. La province d'Heilongjiang produit quasiment les trois quarts du graphite naturel chinois. En raison du climat hivernal très rigoureux – la province marque la frontière avec la Russie –, la plupart des mines ferment durant cette période. Au sein de cette province, les deux districts qui produisent le plus de graphite sont ceux de Jixi (52 % du graphite produit en 2017) et de Luobei (20 %). Bien que la Chine possède de grandes quantités de graphite naturel, le gouvernement chinois n'accorde que peu de licences d'exploitation dans le but de préserver les ressources pour les générations futures (substance stratégique). C'est notamment le cas dans la province de Shanxi ou en Mongolie intérieure.

Sur 60 000 tonnes de graphite naturel importé par la Chine en 2018, 93 % provenaient d'Afrique

dont 70 % de la mine de Balama, au Mozambique, qui est exploitée par la compagnie australienne Syrah. Plus de la moitié du graphite importé est utilisée dans la fabrication des anodes qui équipent les batteries Li-ion. Les fabricants d'anodes privilégient le graphite africain, car il est plus stable (la teneur et la forme des paillettes sont plus homogènes que le graphite naturel chinois). Le graphite importé est également utilisé dans l'industrie des réfractaires.

En 2019, la reprise de la production dans le district de Luobei après la trêve hivernale a renforcé la compétition entre le graphite chinois et le minerai très bon marché mozambicain et a dès lors entraîné une baisse du prix de vente. Contrainte à diminuer ses prix au-dessous de son coût de production, la compagnie Syrah a annoncé une réduction de son offre au quatrième trimestre 2019. Pour diversifier leur approvisionnement, les industriels chinois s'intéressent de près aux mines et projets miniers à Madagascar, en Tanzanie, au Malawi et en Guinée. Plusieurs facteurs expliquent l'appétit des industriels chinois pour le graphite africain : la proximité géographique et l'accès à des infrastructures portuaires, des coûts de production généralement inférieurs, des contraintes environnementales plus souples, des taxes très faibles sur les importations de minerais africains, etc.

Le graphite synthétique est issu du traitement à haute température d'un précurseur carboné amorphe. Ce précurseur dérive du pétrole, du charbon ou de matières organiques diverses et il s'agit typiquement de coke de pétrole (8 Mt, soit un tiers de la production mondiale annuelle, seraient utilisées dans ce but chaque année). À l'issue de sa transformation, le graphique synthétique se présente sous forme d'électrodes, de poudre ou en granulés. Mais de fortes tensions sur la production de *needle coke*, le produit intermédiaire, ont affecté les prix du graphite synthétique. Il existe une dizaine de fabricants de *needle coke* au monde, dont trois en Chine. Les autres fabricants sont situés aux États-Unis (Phillips 66, Seadrift) ou au Japon (C-Chem, Petrocokes, Mitsubishi Chemical, etc.). Les capacités mondiales sont estimées à 1,6 Mt et la Chine y contribuerait pour un volume compris entre 600 000 tonnes et 1 Mt. En plus d'être un producteur majeur, la Chine est également un grand consommateur et doit en im-

porter toujours plus pour satisfaire sa demande intérieure, et en particulier du *needle coke* de haute qualité. Comme pour la plupart des secteurs polluants, les mesures antipollution prises par le gouvernement chinois ont affecté la production de ce précurseur avec la fermeture de plusieurs usines. La baisse de production intérieure (majoritairement de faible qualité) et la demande croissante (3 % à 5 % par an) ont incité les fabricants d'anodes chinois à s'approvisionner aux États-Unis. Sans surprise, les tensions résultant d'une offre limitée et d'une demande en hausse ont fait monter les cours du coke de pétrole. Le *needle coke* est ainsi passé de \$ 1 400/t en 2016 à \$ 3 500/t au deuxième trimestre 2019 selon les analystes de Fastmarket.

Les réserves mondiales de graphite sont d'environ 300 Mt selon l'USGS et sont situées majoritairement en Turquie (90 Mt), en Chine (73 Mt) et en Australie (72 Mt). N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Compte tenu de la grande variété des produits graphiteux échangés, il est difficile de donner un prix de référence. Néanmoins, le prix pour une tonne de paillettes moyennes de graphite naturel, ayant une teneur comprise entre 94 % et 97 % de carbone, était de \$ 709/t en 2019, contre \$ 921/t en 2018. Le prix du graphite synthétique oscille lui entre \$ 7 000/t et \$ 20 000/t.

Naturellement, la compétition entre le graphite naturel et synthétique permet aux utilisateurs de jouer sur les prix. Si les sociétés « juniors » détenant des permis d'exploration ou d'exploitation de graphite naturel clament généralement que le graphite naturel est bien moins onéreux pour le consommateur que le graphite synthétique, la réalité est en définitive plus compliquée. En effet, bien que la production de graphite naturel en paillettes soit assez peu coûteuse, ces paillettes doivent ensuite subir une purification (elles contiennent de nombreuses impuretés) qui est consommatrice d'énergie et donc relativement cher. À l'inverse, la production de graphite synthétique est coûteuse du fait du prix des précurseurs, dont le *needle coke*, mais le produit est déjà pur. Les prix du graphite synthétique dépendent de la teneur en carbone du matériau source (coke de pétrole, de charbon,

etc.), de la nature du graphite (primaire ou issu du recyclage), du type de procédé et notamment du chauffage. La normalisation de la production permet donc une certaine constance des prix. *A contrario*, le prix du graphite naturel varie plus facilement selon la teneur, les impuretés, les types de contrats, etc. Les prix sont d'ailleurs assez difficiles à obtenir, car la plupart des échanges se font par contrats de gré à gré, entre un producteur et un utilisateur, selon des termes et des spécificités bien définis. Par conséquent, il n'y a que très peu de graphite disponible sur le marché au comptant (*spot*). Les cours élevés du *needle coke* et la demande croissante devraient continuer de tirer les prix du graphite synthétique vers le haut à court et moyen termes. Néanmoins, les prix élevés ont déjà incité les fabricants à augmenter les capacités de production non seulement en Chine, mais également au Japon, en Inde ou en Europe, ce qui, à moyen et long termes, devrait contribuer à diminuer les tensions sur ce marché. Les fabricants d'anodes pour batteries Li-ion s'accordent à dire que les écarts de prix entre les deux sortes de graphite sont finalement minimes. En Chine, de nombreuses compagnies telles que Kaijin, Hensen New Energy, Sanxin Industrial ou Datong Xincheng privilégient l'usage du graphite synthétique en raison notamment de sa plus haute pureté et de sa disponibilité. Néanmoins, ces compagnies ont affirmé pouvoir passer de l'un à l'autre selon les besoins du client et les prix. À l'inverse, le Japon ou la Corée du Sud privilégient l'usage du graphite naturel. Actuellement, les anodes proviennent pour moitié du graphite synthétique et pour moitié du graphite naturel.

Les deux années de guerre commerciale entre Washington et Pékin se sont fort logiquement matérialisées par des hausses des droits de douane et le graphite en a été l'objet. Le 1^{er} juin 2019, Pékin a en effet introduit une taxe de 10 % sur les importations de graphite en paillettes et synthétique et de 25 % sur les importations de graphite sphérique provenant des États-Unis. Ces hausses répondaient à l'instauration, le 1^{er} mai de cette même année, d'une taxe par Washington variant de 10 % à 25 % sur de nombreux produits graphiteux provenant de Chine. Les États-Unis ne produisent actuellement pas de graphite naturel et sont donc fortement dépendants de leurs importations. Roskill rapporte que 45 % du graphite naturel en paillettes importé

provenait de Chine en 2018, soit 3 000 tonnes. Bien que les États-Unis soient un producteur important de graphite synthétique, ils doivent également en importer de grandes quantités pour satisfaire leur demande interne. Quant à la Chine, elle importe également du graphite américain, mais en moindre quantité : moins de 2 000 tonnes d'électrodes et 10 000 tonnes d'autres produits en graphite, soit 24 % de ses importations totales en 2018. Malgré la mise en place de ces tarifs douaniers, les effets sur les prix ne sont pas encore visibles, du fait des surcapacités de l'offre face à la demande. Néanmoins, si le marché s'équilibre – Syrah a déjà prévu de réduire sa production – et si les tensions économiques perdurent, les prix pourraient être impactés à moyen terme.

Lithium (Li)

En 2019, la production minière mondiale de lithium (hors États-Unis) était estimée à 77 000 tonnes par l'USGS, exprimée en lithium contenu. L'année a été marquée par des prix en baisse pour la deuxième année consécutive, ce qui a contraint plusieurs opérateurs à suspendre leur production, en particulier en Australie.

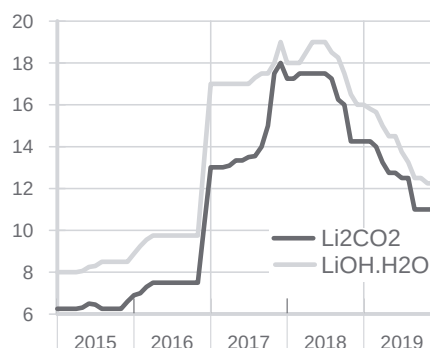
Selon l'USGS, la quasi-totalité de la production mondiale se répartit entre quatre pays seule-

ment : l'Australie (55 %), le Chili (23 %), la Chine (9,7 %) et l'Argentine (8,3 %). En quelques années, l'Australie est en effet devenue le premier producteur minier de lithium. Or, le modèle de développement des compagnies australiennes reposait sur une exportation massive de lithium faiblement transformé vers la Chine pour une purification ultérieure. Cette structuration a ainsi conduit à une concentration de plusieurs étapes de la chaîne de valeur en Chine, en particulier celles de la conversion des concentrés de spodumène australiens et de carbonates de lithium (importés d'Argentine et du Chili) en composés à destination de la fabrication des batteries Li-ion (hydroxydes de lithium). Selon le cabinet McKinsey, cette concentration en Chine des capacités de conversion mondiales s'élevait à 80 % en 2019. Or, les usines de conversion chinoises se sont avérées vieillissantes – voire en situation de déficit technologique – pour s'adapter aux nouvelles sources de lithium à traiter. Un important stock de lithium de « qualité technique » s'est ainsi accumulé aux portes des usines de conversion chinoises. Cette surproduction et un décollage moins rapide qu'espéré de la production mondiale de véhicules électriques ont pesé sur l'équilibre offre-demande avec, pour conséquence naturelle, une chute des cours. Le prix annuel du carbonate

Lithium
(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	33 800	33 500	40 100	68 500	95 000	77 000
Argentine	3 200	3 600	5 800	5 700	6 400	6 400
Australie	13 300	14 100	14 000	40 000	58 800	42 000
Brésil	160	200	200	200	300	300
Canada					2 400	200
Chili	11 500	10 500	14 300	14 200	17 000	18 000
Chine	2 300	2 000	2 300	6 800	7 100	7 500
États-Unis	2 150	2 000	2 100	1 420		
Portugal	300	200	400	800	800	1 200
Zimbabwe	900	900	1 000	800	1 600	1 600

Prix du lithium
Grands contrats livrés
Europe ou États-Unis
(en dollars/kg)



(Sources : USGS Mineral Commodity Summaries, World Mining Data pour les données des États-Unis, 2013 à 2016 : estimations)

de lithium pour des contrats *spot* livrables à partir des États-Unis est ainsi passé d'une moyenne de \$ 16,7/kg en 2018 à \$ 12,5/kg en 2019, soit une chute de 25 % et, pour les hydroxydes de lithium, de 22,3 % dont les prix sont passés de \$ 18 /kg à \$ 14/kg. Certains analystes y voient une correction naturelle par rapport à l'explosion des prix observée en 2017. En effet, les prix historiques du carbonate de lithium avaient toujours été, avant décembre 2016, inférieurs à \$ 10/kg. Toutefois, le contexte actuel illustre deux différences majeures par rapport à cette époque :

- d'une part, avant 2016, la production mondiale ne dépassait pas 35 000 tonnes de Li. Elle a depuis plus que doublé, avec une croissance comprise entre 8 % et 10 % par an en moyenne et devrait atteindre 150 000 tonnes de Li en 2025, illustrant une très forte demande de long terme ainsi qu'une maturité plus grande du marché ;

- d'autre part, les niveaux de pureté élémentaires à la sortie des usines de conversion métallurgique ont également grandement augmenté, entraînant logiquement des hausses de coûts de production et donc des prix de vente.

Ce changement est en grande partie lié aux évolutions des secteurs d'usages du lithium, et en particulier de la croissance majeure du secteur des batteries, qui s'élevait à 57 % en 2018 et pourrait représenter jusqu'à 85 % de la demande totale à l'horizon 2030. Jusqu'ici, les usages « hors batteries » du lithium étaient relativement diversifiés. Parmi ces derniers, les verres et céramiques étaient le plus important (27 % en 2018), suivis par les graisses lubrifiantes au lithium (7 %), le traitement et le conditionnement de l'air (3 %), les fondants de moulage pour la production d'acier par coulée continue (4 %), la production de produits pharmaceutiques et de polymères (1 %), la métallurgie de l'aluminium (1 %) ou encore d'autres usages comprenant la production de ciment, la pyrotechnie, ou le traitement de l'eau. Parmi ces usages, hormis ceux dits « de spécialité », les degrés de pureté des composés de lithium demeurent relativement faibles. En d'autres termes, les impuretés y sont tolérées.

À l'inverse, pour les composés de lithium utilisés comme précurseurs pour la fabrication des batteries Li-ion, la notion de pureté est cruciale. Ceci s'explique par les enjeux de réactivité à l'échelle

micrométrique des matériaux actifs intégrés dans ces batteries. Le degré de pureté des composés est fondamental pour assurer les performances, la longévité, mais aussi la sécurité des batteries. Ainsi, la croissance de la demande pour ces composés a radicalement changé la manière de produire du lithium, et ce, afin d'obtenir des niveaux très faibles en impuretés dès la sortie de l'usine de conversion métallurgique.

Début 2020, un décalage est toujours observé entre les stocks de lithium globaux disponibles sur le marché, majoritairement de « qualité technique » et la demande effective en lithium de « qualité batterie ». Ce surplus est estimé respectivement à 5 % et 8 % en 2019 par les cabinets d'analyse Canaccord Genuity et Bernstein. Cette situation devrait perdurer en 2020. Pour autant, la demande mondiale en lithium de « qualité batterie » demeure très robuste à moyen terme, tirant le marché global.

Du côté de l'offre, le contexte de l'année 2019 est à la fois source d'instabilité et opportunité pour les cinq principaux producteurs de lithium (Albemarle, SQM, Livent, Tianqi et Ganfeng) désireux d'assurer la continuité de leur domination sur la production mondiale. On assiste ainsi à la mise en place de stratégies de diversification des risques à plusieurs niveaux. Sans surprise, l'un des principaux axes de cette stratégie est l'intégration verticale, passant par la production directe d'hydroxyde de lithium destinée à la chaîne de valeur des batteries Li-ion, à proximité des sites miniers. Tianqi et Albemarle ont ainsi annoncé la construction des usines de Kwinana et Kemerton en Australie-Occidentale, dans lesquelles elles espèrent produire respectivement jusqu'à 24 000 tonnes de LiOH (soit environ 4 000 tonnes de Li) et 50 000 tonnes de LiOH (8 250 tonnes de Li). Privilégiant quant à elle la Chine, la société Ganfeng a également annoncé la construction d'une nouvelle ligne d'une capacité de 25 000 tonnes de LiOH à Ningdu Heyuan (province du Jiangxi) pour le second semestre 2020. Cependant le contexte de prix bas a conduit ces *majors* – comme il est convenu de les appeler – à reporter certains de ces investissements. L'acteur le plus en difficulté à court terme semble être Tianqi. La chute des prix du lithium a eu pour effet d'entamer largement les bénéfices de la compagnie qui, en novembre 2019, a échoué

à rembourser une partie de la dette contractée pour l'acquisition en 2018 de 23,77 % des parts de son concurrent chilien SQM. La dette totale est équivalente à \$ 2,2 milliards et le principal créancier est China Citic Bank. Si certains analystes évoquent déjà la possibilité de reventes de certains actifs pour pallier ce revers, l'autre issue serait un soutien du gouvernement chinois, hypothèse la plus vraisemblable.

Les réserves mondiales sont estimées à 17 Mt de Li par l'USGS, tandis que les ressources mondiales s'établiraient à 73 Mt, soit des niveaux confortables, augmentés ces dernières années par l'intensité des recherches en exploration minière. Toutefois, le développement industriel des gisements avec des procédés appropriés reste un important défi. Ainsi, les nombreux prétendants à l'ouverture de nouvelles mines de lithium feront l'objet d'une rude sélection, à laquelle seuls les projets les plus robustes survivront. L'Australie demeure très dynamique en termes d'exploration et d'exploitation du lithium. Toutefois, afin de faire évoluer le modèle actuel marqué par une forte dépendance à la Chine, le pays a lancé en 2019 un « Plan stratégique pour les minéraux critiques », visant notamment davantage de construction d'usines de transformation en Australie. Il s'agit également de relocaliser certaines étapes de la chaîne de valeur des batteries Li-ion afin de bénéficier de la valeur ajoutée créée. L'Afrique semble également bien positionnée pour jouer un rôle significatif dans la production future avec quatre projets à l'étape de faisabilité. C'est en particulier le projet Manono en République démocratique du Congo, développé par la compagnie australienne AVZ Minerals Ltd., qui présente les meilleures chances de réussite à court terme, après la finalisation du rapport définitif de faisabilité attendu au premier semestre 2020. En Amérique du Sud, un grand nombre de projets se développent aussi, en particulier en Argentine. Le pays reste, en 2019, l'emplacement privilégié pour l'exploration de lithium avec un budget de \$ 70 millions. Le projet le plus prometteur semble être celui de Cauchari-Olaroz détenu par Ganfeng à 51 % et Lithium Americas à 49 % et dont les premières étapes de construction ont commencé. D'autres projets pourraient être retardés par le contexte géopolitico-économique à l'instar du projet Centena-

rio-Ratonos d'Eramet, mis en suspens début 2020. Au Chili, au-delà des producteurs actuels, seul le projet Salar de Maricunga se distingue. Il est mené par un groupement d'entreprises impliquant également le gouvernement, via l'entreprise d'État Codelco. Malgré d'importantes ressources nationales grâce au Salar d'Uyuni (21 Mt de Li contenu), la Bolivie ne possède pas de production de lithium actuellement, bien que certains intérêts – notamment chinois et allemands – tentent de s'y implanter. Dans le contexte de l'exploitation des salars sud-américains, la prise en compte de l'impact socio-environnemental par les exploitants, et en particulier la gestion des ressources en eau dans ces régions désertiques, deviennent des paramètres cruciaux pour la pérennité de ces projets. En Amérique du Nord, les projets d'extraction de lithium se multiplient de la même façon, marqués par une grande diversité de sources potentielles, dont les argiles lithinifères à hectorite. Le pays a augmenté son budget d'exploration de 60 % en 2019, motivé par la volonté d'indépendance vis-à-vis de la Chine concernant l'approvisionnement en métaux stratégiques. L'USGS estime les ressources des États-Unis à 6,8 Mt de Li contenu, dépassant ainsi celles de l'Australie. Toutefois, seuls trois projets à ce jour sont en phase de construction et de nombreux jalons restent à franchir pour la plupart des projets avant d'atteindre la production de lithium de « qualité batterie ». Enfin, en Europe, sept projets ont franchi l'étape de faisabilité. Toutefois, aucune production significative ne semble réaliste à l'horizon 2025 et les retards accumulés par les projets européens bénéficient jusqu'ici aux *majors* chinoise. Ainsi, Volkswagen et BMW ont d'ores et déjà sécurisé leurs approvisionnements de lithium par des contrats avec la société Ganfeng Lithium jusqu'à 2025. Il en va de même pour la société suédoise Northvolt, construisant une usine de batteries Li-ion de 32 GWh dans le nord de la Suède et qui a choisi, en septembre 2019, Tianqi Lithium pour son approvisionnement en hydroxydes de lithium de 2020 à 2025.

En conclusion, il apparaît que le marché continuera d'être dominé par les *majors* qui sont les mieux armés pour adapter leurs réponses à un marché encore immature et changeant. La consolidation, la diversification et le partage du risque semblent, par ailleurs, être des leviers indispen-

sables pour les sociétés développant des projets de lithium pour permettre le développement de technologies innovantes. Enfin, force est de constater que la prise en compte de la qualité environnementale des projets est en passe de devenir un paramètre différenciant. Il faut par ailleurs souligner que l'évolution de la cotation du lithium à l'échelle internationale représente un fort enjeu. Le lithium n'ayant pas de cotation officielle, la majorité des contrats s'effectue à ce jour en dehors des places de marchés mondiaux. Pour y remédier, le LME a annoncé réfléchir à la mise en place de contrats répondant à cette problématique. La principale difficulté est de tomber d'accord sur les qualités exigées des intermédiaires. Représentant des acteurs aux poids et aux intérêts variés, un comité a été créé fin 2019 et son l'avenir jouera un rôle important sur l'évolution des prix. Il apparaît enfin que les substitutions au lithium sont

aujourd'hui peu nombreuses, en particulier dans le domaine du stockage de l'énergie. Malgré une recherche internationale très active, notamment pour le développement de nouvelles technologies de stockage de l'électricité – des batteries au magnésium ou au sodium, par exemple – ainsi que dans le domaine des nanotechnologies, le temps moyen nécessaire pour passer du concept en laboratoire à une éventuelle production industrielle est de dix à quinze ans, signifiant que les formes de batteries au lithium devraient rester largement dominantes jusqu'en 2030. Au-delà, le futur des technologies du stockage d'énergie est extrêmement ouvert. Du côté du recyclage, les circuits se développent. Ils sont néanmoins spécifiques à certains usages et ne présentent pas une capacité suffisante pour répondre à l'ensemble des besoins à ce jour.

Petits métaux

Les métaux – ou assimilés – traités dans ce chapitre appartiennent à des groupes différents du tableau périodique des éléments, ayant des types d'applications très diversifiés, souvent liés aux domaines de l'énergie, des technologies de l'information et de la communication (TIC), ou des transports. Pour un certain nombre d'entre eux, le terme de « petits métaux » fait avant tout référence à une taille de marché réduite, c'est-à-dire inférieure au million de tonnes (Mt). Ils se distinguent davantage par des propriétés spécifiques qui, généralement, ne nécessitent un usage qu'en très faibles quantités. Néanmoins, fonctionnant comme des « vitamines » au sein de nombreuses technologies, ils sont indispensables et améliorent grandement les performances atteintes.

Les petits métaux traités dans ce chapitre peuvent ainsi appartenir aux grands groupes suivants :

- les éléments semi-conducteurs (notamment Si, Ga, Ge, As, Se, In, Te), à la base de l'électronique moderne et de ses applications, y compris dans le domaine du photovoltaïque ;
- les métaux réfractaires (Nb, Mo, Ta, W, Re), caractérisés par des points de fusion très élevés et une grande résistance à l'usure et à la corrosion. Cela en fait des matériaux de choix pour la conception notamment de superalliages, nécessaires à la conception de pièces mécaniques primordiales dans les parties chaudes des réacteurs d'avion ou des turbines à gaz ;
- les terres rares (les lanthanides et l'yttrium), dont la structure électronique particulière est à l'origine de nombreuses propriétés uniques, notamment dans les domaines de la luminescence et du magnétisme.

Les statistiques de production présentées ici comportent une première estimation des productions 2019, telles que publiées par l'*United States Geological Survey* (USGS), le Service géologique des États-Unis, dans son analyse annuelle de l'industrie minière mondiale « Mineral Commodity Summaries ». Ces données sont à considérer comme des estimations provisoires, susceptibles de révisions impor-

Variations 2018-2017 de la production et des réserves des petits métaux étudiés dans ce chapitre

Élément	Unité de masse	Production exprimée en unité de masse contenue de	Production 2018	Production 2019	Variation de la production 2019-2018 (en %)	Réserves 2018	Réserves 2019	Variation des réserves 2019-2018 (en %)
Antimoine	kt	Sb	147	160	8.84 %	1 500	1 500	0.00%
Béryllium	t	Be	240	260	8.33 %	N/A	N/A	N/A
Bismuth	t	Bi	19 200	19 000	-1.04 %	N/A	N/A	N/A
Cadmium	t	Cd	25 100	25 000	-0.40 %	N/A	N/A	N/A
Chrome	kt	Chromite	43 100	44 000	2.09 %	560 000	570 000	1.79 %
Cobalt	t	Co	148 000	140 000	-5.41 %	6 900 000	7 000 000	1.45 %
Gallium	t	Ga	413	320	-22.52 %	N/A	N/A	N/A
Germanium	t	Ge	130	130	0.00 %	N/A	N/A	N/A
Graphite naturel	kt	Graphite	1 120	1 100	-1.79 %	300 000	300 000	0.00 %
Hafnium	t	Hf	70-80	70-80	N/A	N/A	N/A	N/A
Indium	t	In	741	760	2.56 %	N/A	N/A	N/A
Lithium	kt	Li	95	77	-18.95 %	14 000	17 000	21.43 %
Magnésium	kt	Mg	996	1 100	10.44 %	N/A	N/A	N/A
Manganèse	kt	Mn	18 900	19 000	0.53 %	760 000	810 000	6.58 %
Molybdène	kt	Mo	297.00	290	-2.36 %	17 000	18 000	5.88 %
Niobium	kt	Nb	68.2	74	8.50 %	>9100	>13 000	42.86 %
Rhénium	t	Re	49	49	0.82 %	2 400	2 400	0.00 %
Scandium	t	Sc	<15	<15	N/A	N/A	N/A	N/A
Sélénium	t	Se	2 810	2 800	-0.36 %	99 000	99 000	0.00 %
Silicium	kt	Si	7 400	7 000	-5.41 %	N/A	N/A	N/A
Tantale	t	Ta	1 890	1 800	-4.76 %	>110 000	>90 000	-18.18 %
Tellure	t	Te	460	470	2.17 %	31 000	31 000	0.00 %
Terres rares	kt	Oxydes de terres rare	190	210	10.53 %	120 000	120 000	0.00 %
Titane métal	kt	Ti	205	225	9.76 %	N/A	N/A	N/A
Tungstène	kt	W	81	85	4.81 %	3 300	3 200	-3.03 %
Vanadium	kt	V	71	73	2.53 %	20 000	22 000	10.00 %
Zirconium	kt	Concentrés de zircon	1 480	1 400	-5.41 %	73 000	62 000	-15.07 %

(Data source: USGS 2020 - Mineral Commodity Summaries)

tantes au cours des années à venir. Elles sont aussi à considérer avec beaucoup de prudence, car les marchés de nombreux petits métaux sont opaques.

En 2019, la quasi-totalité des petits métaux a connu des chutes de prix remarquables, comprises entre – 3 % pour le magnésium métal (99,9 % Europe) et 45 % pour le pentoxyde de vanadium.

Le tableau ci-dessus permet de comparer la première estimation de la production 2019 des métaux étudiés dans ce chapitre avec celle de 2018, de même que celles des réserves géologiques lorsqu'elles sont disponibles de chacune des deux années, selon les données publiées par l'USGS.

Le tableau de la page suivante synthétise diverses informations complémentaires relatives aux petits métaux de ce chapitre :

- (Colonne A) : cette colonne indique le nom de l'élément chimique ;
- (Colonne B) : cette colonne indique le premier pays producteur de la matière première, soit au stade de la production minière (Sb, Be, Bi, Cr, Co, Li, Mn, Mo, Nb, Ta, Terres rares, V, W, Zr) soit au stade la production du métal (métallurgie/raffinage) : Cd, Ga, Ge, Hf, In, Mg, Re, Sc, Se, Si, Te, Ti. En effet, l'extraction minière d'un minerai et l'extraction métallurgique du métal/des métaux contenu(s) peuvent avoir des localisations géographiques très différentes ;
- (Colonne C) : cette colonne indique la part du premier producteur dans la production mondiale en 2019 ;
- (Colonne D) : cette colonne indique la part du premier producteur dans la production mondiale en 2018 afin d'illustrer la variation des parts de marché de ce dernier ;
- (Colonne E) : celle-ci indique si le métal est, ou non, un sous-produit de la production d'un autre métal. Nombre des métaux couverts dans ce chapitre sont en effet des sous-produits qui ne sont récupérés que lors de l'extraction métallurgique du métal porteur. L'évolution des marchés de ces derniers a alors un impact important sur leur production ;
- (Colonne F) : l'USGS ne pouvant pas publier les données de production des États-Unis lorsqu'il n'existe qu'un nombre très limité de producteurs américains (mention : W pour « withheld »), d'autres sources de données ont été utilisées pour évaluer cette production. Il s'agit en général des données publiées en 2019 de l'annuaire statistique World Mining Data (WMD).

En conclusion de cette introduction, il convient de souligner que les matières premières minérales sont un domaine d'intenses spéculations où il peut être difficile de distinguer les développements à caractère spéculatif de ceux liés aux besoins structurels de l'économie mondiale.

¹ Symboles chimiques : voir l'équivalence avec le nom de l'élément dans la colonne B du tableau 1.

Données complémentaires

A	B	C	C	D	E
Matière première	Premier producteur mondial	Part de la production mondiale du premier producteur en 2019	Part de la production mondiale du premier producteur en 2018	Sous-produit	Notes
Antimoine	Chine	63 %	72 %	Partiellement : plomb, or, zinc	
Béryllium	USA	65 %	73 %	Non	
Bismuth	Chine	73 %	80 %	Essentiellement : plomb, tungstène	
Cadmium	Chine	33 %	32 %	Essentiellement : zinc	W. Prod. US: 400 t. en 2017 (WMD)
Chromite (minerai de chrome)	Afrique du Sud	39 %	48 %	Rarement : platinoïdes	Données de production estimées
Cobalt (production minière)	République dém. du Congo	70 %	66 %	Essentiellement : cuivre, nickel	
Gallium	Chine	96 %	88 %	Exclusivement : aluminium	Données 2017 (WMD)
Germanium	Chine	65 %	65 %	Exclusivement : zinc, charbon	W. Prod. US : 2 t. en 2017 (WMD)
Graphite naturel	Chine	62 %	62 %	Non	
Hafnium	France	43 %	43 %	Exclusivement : zirconium	Données 2012 (MMTA)
Indium	Chine	40 %	40 %	Exclusivement : zinc, cuivre, plomb, étain	
Lithium	Australie	54 %	60 %	Rarement : potasse	W. Prod. US : 1420 t. en 2017 (WMD)
Magnésium	Chine	85 %	80 %	Non	
Manganèse	Afrique du Sud	29 %	30 %	Non	
Molybdène	Chine	45 %	44 %	Partiellement : cuivre	
Niobium	Brésil	88 %	88 %	Non	
Rhénium	Chili	55 %	55 %	Exclusivement : molybdène	
Scandium	Chine	66 %	66 %	Exclusivement : Terres Rares, fer, uranium	Données de production métallurgiques estimées
Sélénium	Chine	34 %	34 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc	
Silicium	Chine	64 %	60 %	Non	Silicium métal + ferrosilicium
Tantale	République dém. du Congo	41 %	38 % (Rwanda)	Partiellement : niobium, lithium, étain, Terres Rares	
Tellure	Chine	62 %	61 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc, bismuth	
Terres rares	Chine	62 %	71 %	Non	
Titane (éponge)	Chine	37 %	35 %	Non	
Tungstène	Chine	83 %	83 %	Non	
Vanadium	Chine	54 %	55 %	Essentiellement : acier, titane	
Zirconium	Australie	38 %	33 %	Non	

MMTA : Minor Metals Trade Association

W : donnée étasunienne confidentielle

WMD : World Mining Data 2019, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus

WMD : World Mining Data 2019, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus

(Data sources : USGS 2020, WMD 2019, MMTA)

Antimoine (Sb)

En 2019, la production mondiale d'antimoine métal est estimée par l'USGS à 160 000 tonnes. L'antimoine pur est un semi-métal gris argenté, cassant, mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité. Sous forme d'oxyde (Sb_2O_3 ou Sb_2O_5), associé avec des halogènes, c'est un ignifugeant et un stabilisateur à la chaleur, dans les plastiques, le caoutchouc, les textiles et les peintures. En alliage avec le plomb, il est très utilisé pour la fabrication de batteries automobiles. Le marché de l'antimoine est de l'ordre de \$ 1,1 milliard, une statistique en forte hausse par rapport aux chiffres de 2018.

En 2010, la consommation d'antimoine avait pourtant atteint un pic à 192 000 tonnes. Depuis, les quantités d'antimoine ajoutées dans les produits diminuent régulièrement si bien que la demande globale baisse également. Deux usages représentent 84 % de la demande mondiale. Le premier est la production de retardateurs de flamme (53 % de la demande mondiale), à partir de trioxyde d'antimoine ou ATO (à ne pas confondre avec l'« *antimony-tin-oxide* », i.e l'oxyde d'étain-antimoine). Combiné avec des ions halogénures (chlore ou brome), l'ATO renforce les propriétés ignifugeantes des plastiques, textiles et peintures. Cet usage est en progression, mais pourrait être limité par des normes sanitaires plus strictes. En effet, l'antimoine est suspecté d'être cancérigène et toxique pour l'homme. En 2019, l'Öko-Institut allemand s'est prononcé en défaveur d'une restriction de l'ATO dans les équipements électriques et électroniques dans le cadre de la directive européenne *Restriction of Hazardous Substances* (RoHS). À l'inverse, la ville d'Anchorage en Alaska a décidé de bannir les retardateurs de flamme de certains produits de consommation.

Le deuxième usage de l'antimoine est la production de plomb antimonié (31 % de la demande mondiale). Ce dernier est utilisé quasi exclusivement pour la fabrication des batteries au plomb pour l'automobile. L'antimoine permet d'augmenter la dureté, la résistance à la fatigue et à la corrosion du plomb. Cet usage subit deux tendances antagonistes : reconnus pour leur fiabilité et leur faible coût, les pays à plus faible développement économique accentuent la demande en batteries

au plomb ; au contraire, les pays à fort développement économique utilisent de plus en plus de batteries sans plomb antimonié. Par ailleurs, ceux-ci se tournent vers les véhicules électriques qui ne nécessitent pas de batteries de démarrage au plomb, ce qui devrait à moyen terme réduire la demande en antimoine dans ce secteur. Le consultant Roskill prévoit que la filière métallurgique de l'antimoine devienne « autosuffisante » grâce au recyclage bien établi et généralisé des batteries au plomb antimonié, combiné une possible diminution de la demande. Argus Media prévoit au contraire que la demande en batteries au plomb va continuer à augmenter sur la période 2020-2025.

Le reste de la demande se répartit dans diverses applications, notamment dans les industries du verre (antimoniate de sodium), des émaux et céramiques, mais également des munitions au plomb, du caoutchouc (vulcanisation des caoutchoucs rouges), ainsi que de la catalyse pour la production de fibres de polyester et du polytéréphthalate d'éthylène (PET), largement utilisés pour la production des bouteilles en plastique – 90 % de la production du polyester mondial utilise des procédés de catalyse à l'antimoine –. Une application émergente est celle de l'oxyde d'antimoine-étain qui peut être utilisé comme matériau conducteur transparent pour les écrans tactiles, ainsi qu'en microélectronique.

Parmi plus de cent minéraux antimonifères, la stibine (Sb_2S_3) est le minerai principal à partir duquel est extrait l'antimoine. Cependant, la majeure partie de l'antimoine est récupérée en tant que co-produit ou sous-produit du traitement de minerais de plomb-zinc. Il peut également être associé à la production d'or.

Selon l'USGS et comme évoqué précédemment, la production mondiale d'antimoine primaire en 2019 est estimée à 160 000 tonnes de Sb contenu, en augmentation de 9 % par rapport à 2018. Il existe néanmoins une grande incertitude sur les données de production, en raison du dynamisme des échanges à chaque stade de transformation de l'antimoine (concentré, métal, ATO) et des statistiques hétérogènes à fort risque de double-comptage. Le Sb métal et l'ATO pouvant être transformés dans l'une ou l'autre forme, la difficulté est de distinguer les consommations finales d'antimoine dans chaque filière. Toujours

selon l'USGS, la Chine a été le premier producteur mondial en 2019, à 100 000 tonnes Sb, suivie par la Russie et le Tadjikistan, avec respectivement 30 000 tonnes et 16 000 tonnes. Depuis 2010, la Chine fait face à des difficultés sur le plan minier, avec des réserves en baisse, des teneurs faibles, ainsi qu'un fort impact environnemental. Le gouvernement a fermé de nombreuses mines et a adopté des normes environnementales plus strictes. La production minière chinoise a décliné de 7,5 % par an en moyenne sur la période 2012-2018, reflétant principalement une baisse de la demande. Le pays a importé de plus en plus de concentrés d'antimoine à bas coût en provenance du Tadjikistan, de Russie, d'Australie, de Birmanie, de Bolivie, et du Canada, afin d'assurer sa production d'antimoine métal et d'ATO. Le pays est devenu importateur net de concentrés d'anti-

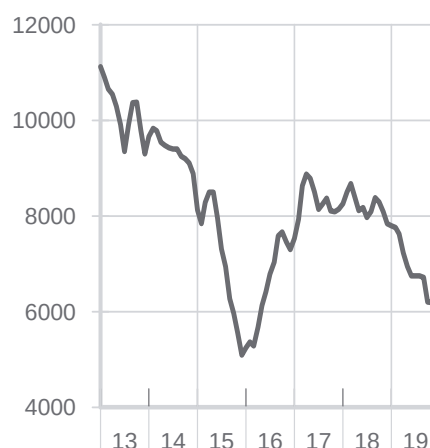
moine en 2018, bien que sa production minière ait aussi augmenté de 20 %. En 2019, les exportations illégales d'antimoine ont été réduites, ce qui s'est répercuté en une hausse des statistiques d'exportations officielles (légal). Une nouvelle augmentation de la production minière, de + 13 % en 2019 selon Argus Media, a permis à la Chine de réduire ses importations et d'augmenter sa production d'antimoine métal de 13 % (à 83 000 tonnes) et d'oxyde d'antimoine de 4 % (à 91 000 tonnes).

Les longues années de réduction des surplus ont donné l'occasion à certains acteurs non chinois de reprendre leur place sur le marché de l'antimoine. La compagnie russe Polyus, une des dix plus grosses productrices d'or au monde, a annoncé qu'elle avait commencé à récupérer l'antimoine de ses résidus miniers en 2018. En 2019,

Antimoine
(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	161 000	141 000	148 000	137 000	147 000	160 000
Afrique du Sud	1 600		1 200			
Australie	5 800	3 700	5 000	3 120	2 170	2 000
Birmanie	3 300	3 000	3 000	1 000	2 640	3 000
Bolivie	5 500	4 200	2 670	2 700	3 110	3 000
Chine	120 000	110 000	108 000	98 000	89 600	100 000
Équateur					50	50
Guatemala			25	25	25	25
Honduras					12	10
Iran			200	300	600	600
Kazakhstan			573	700	300	300
kyrgyzstan					370	400
Laos			242	340	300	300
Mexique			196	243	260	300
Pakistan			114	60	28	30
Russie	9 000	9 000	8 000	14 400	30 000	30 000
Tadjikistan	4 700	8 000	14 000	14 000	15 200	16 000
Turquie	4 500	2 500	4 000	2 000	2 400	3 000
Vietnam			643	380	240	240
Autres pays	6 200	1 000				

Prix de l'antimoine
Marché libre européen
(en dollars/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

L'affaire du *Fanya Metal Exchange* (Bourse aux petits métaux de Fanya, Yunnan, Chine)

La bourse chinoise de Fanya, située à Kunming – capitale de la province du Yunnan –, a été inaugurée en 2011 avec l'appui des autorités locales et nationales. Elle a constitué une première mondiale puisqu'elle permettait la cotation en continu de quatorze petits métaux (antimoine, argent, bismuth, cobalt, dysprosium, gallium, germanium, rhodium, sélénium, tellure, terbium, tungstène sous forme de métal et de paratungstate d'ammonium, vanadium). Cette bourse offrait pour la première fois, aux seuls investisseurs chinois, des contrats d'options basés sur des stocks physiques et une cotation en continu, avec l'objectif d'avoir un meilleur contrôle sur le prix des « petits métaux ». Ses promoteurs offraient à la souscription la possibilité d'achat et de vente de métaux à tout moment et la promesse de rendements de plus de 13 % par an. Or, ce système reposait sur une forme sophistiquée de schéma de Ponzi, où la place boursière participait elle aussi aux activités de trading. Les difficultés sont apparues en 2014, quand la bourse a dû créer un fonds « tampon » pour faire face à la fois aux coûts de financement de ses stocks et aux engagements auprès de ses investisseurs impossibles à honorer. Les difficultés s'annonçant, la bourse de Fanya a été contrainte de suspendre ses activités en avril 2015, puis de fermer définitivement en août 2015. Le dirigeant de la bourse et dix-huit autres personnes ont été arrêtés en 2016, et les stocks de métaux ont été saisis par les autorités locales. Par la suite, plus de 220 000 investisseurs chinois ont cherché à obtenir le remboursement de leurs investissements, représentant une somme de \$ 6,6 milliards. En mars 2019, un tribunal local a infligé des amendes de ¥ 1 milliard (\$ 150 millions) au *Fanya Metal Exchange*, ainsi qu'à quatre sociétés liées à cette bourse, pour des montants de respectivement de ¥ 500 millions, ¥ 50 millions et ¥ 5 millions aux motifs de « levée de fonds illégale » et de « détournement de fonds ». L'ancien président de la bourse, Shan Jiuliang, a été condamné à dix-huit ans de prison.

Les quantités rapportées à la fermeture de la bourse étaient de : 18 660 tonnes d'antimoine, 19 228 tonnes de bismuth, 22 tonnes de cobalt électrolytique, 3 639 tonnes d'indium, 197 tonnes de gallium métal, 92 tonnes de germanium, 431 tonnes de tungstène et 29 651 tonnes d'APT (paratungstate d'ammonium), 3 tonnes d'argent, 35 tonnes de pentoxyde de vanadium, 337 tonnes de sélénium, 149 tonnes de dysprosium et 4 tonnes de terbium.

Ces stocks, par l'opacité qui les entourait et par leur importance (représentant parfois plus d'une année de consommation d'une substance donnée), ont pesé sur les prix des petits métaux concernés durant quelques années. C'est au cours de l'année 2019 que l'ensemble des substances ont progressivement été mises aux enchères par le tribunal populaire de Kunming.

Le 28 janvier 2019, à la surprise générale, le tribunal de Kunming a pris la décision de vendre deux lots d'indium métal (pour des quantités de 7,6 tonnes et 27,04 tonnes, respectivement) aux enchères sur la plateforme chinoise Alibaba. Cette première tentative de vente a cependant suscité la méfiance des potentiels acquéreurs, qui ont préféré décliner l'offre en attendant des prix plus favorables pour de telles quantités d'indium. Ces dernières ont finalement été acquises en avril 2019 par la compagnie China National Corporation. En septembre 2019, le groupe d'État China Minmetals s'est porté acquéreur des stocks de terres rares et d'antimoine, puis en janvier 2020 du stock d'APT et, en octobre 2019, Sanqian New Energy Materials achetait le stock de cobalt (21 tonnes).

Enfin, de nombreux lots restants ont été achetés à partir d'octobre par une seule et même compagnie créée quelques semaines plus tôt et n'ayant apparemment aucun lien avec les métaux, Kunming Rongke New Materials. Bien que ces métaux aient été achetés à des prix défiant toute concurrence, Kunming Rongke a dépensé plus de \$ 620 millions pour acquérir la quasi-totalité des stocks de tellure, de gallium, de germanium, de sélénium, de bismuth et d'indium restants de la bourse de Fanya. Or, quelques mois plus tard, la société chinoise Vital Materials, qui fournit des métaux et des composants pour de nombreuses industries dont l'électronique, les énergies renouvelables et la pharmacie a admis avoir été derrière les achats effectués par Kunming Rongke New Materials. Vital a annoncé vouloir disposer d'une « mine de surface » afin d'approvisionner les fabricants de nouvelles technologies (5G, capteurs, *Internet of Things* (IoT), etc.) et d'avoir un meilleur contrôle des prix par la gestion de stocks.

Substance	Date de la vente	Masse (t)	Prix (¥/kg HT)	Prix (\$/kg HT) (1 \$ = 6,8589 ¥)	Acheteur
Indium	Janvier, Avril 2019	34,6	1 080	157	China National Corporation
Oxyde de dysprosium	Septembre 2019	148,8	1 488,8	217	China Minmetals
Oxyde de terbium	Septembre 2019	4,05	3 159,6	461	China Minmetals
Antimoine	Septembre 2019	18 661	29,259	4	China Minmetals
Tungstène (APT)	Septembre 2019	28 336	115,34	17	China Molybdenum
Rhodium	?	0,046	1 161 304	169 313	Shanghai Xuyi
Cobalt	Octobre 2019	21	281	41	Sanqian New Energy Materials
Argent	?	3,219	4 302,58	627	Shanghai Xuyi
Gallium	Octobre 2019	191,3	904	132	Vital Materials
Germanium	Octobre 2019	92,3	6 010	876	Vital Materials
Sélénium	Octobre 2019	337,8	91,6	13	Vital Materials
Tellure	Octobre 2019	170	305,6	45	Vital Materials
Bismuth	Novembre 2019	19 228,5	31,52	5	Vital Materials
Tungstène (barres)	Janvier 2020	413,95	152,70	22	China Minmetals
Indium	Janvier 2020	3 609	790	115	Vital Materials

(Sources : BRGM, chiffres Argus et Reuters)

elle a produit environ 20 000 tonnes de concentrés d'antimoine en partie vendus en Chine. Au Sultanat d'Oman, la mise en service possible du « four à antimoine », détenu en partie par Tri-Star Resources, est un autre exemple de développement hors Chine sur le marché de l'antimoine transformé. Ce four pourrait raffiner annuellement jusqu'à 20 000 tonnes d'antimoine métal et de trioxyde à partir de 2021, à condition qu'il sécurise ses apports de matière première en provenance de Turquie (Goynuk) et/ou du Canada, et que les surplus sur le marché de l'antimoine chinois se réduisent. La compagnie United States Antimony a, quant

à elle, redémarré deux fours de production au Mexique. Mandalay Resources a de nouvelles réserves en Australie sur son site de Costerfield, ce qui laisse quelques opportunités pour le développement de l'offre.

En dépit du rééquilibrage géographique qui est à l'œuvre depuis plus de quinze ans, la Chine dispose toujours d'un tiers des réserves mondiales d'antimoine prouvées à ce jour (1,5 Mt d'antimoine contenu en 2019, selon l'USGS). Si la Chine a tendance à importer davantage de concentrés, elle cherche à maintenir un certain contrôle sur le secteur minier, en positionnant des acteurs chinois

comme China Nonferrous Gold et Tibet Huayu Mining sur de nouveaux projets en dehors de la Chine.

Les stocks de concentrés, métal et oxyde sont méconnus. Cependant, l'antimoine fait partie des stocks de substances qui ont été découverts lors de la fermeture judiciaire de la bourse de Fanya (voir l'encadré consacré à ce sujet en page 579). En septembre 2019, ces stocks de 18 661 tonnes ont été rachetés aux enchères par un unique participant : la société d'État China Minmetals Rare Earth. Selon Seeking Alpha, le département américain de la Défense serait également intéressé par la constitution de stocks stratégiques d'antimoine. En 2019, ces stocks stratégiques seraient passés de 73,5 tonnes à 1 173 tonnes selon l'USGS.

L'antimoine contenu dans les batteries au plomb et autres alliages est bien recyclé puisqu'il suit la même chaîne de traitement que le métal hôte. Cela n'est pas le cas des autres usages (ignifugeants), qui ont tendance à être dispersifs. L'agence d'information Fastmarkets estime qu'en moyenne, un taux de 20 % d'antimoine secondaire est intégré dans la production de nouveaux produits antimoniés.

L'antimoine des batteries au plomb peut être substitué par des alliages plomb-calcium-étain. L'oxyde d'aluminium hydraté peut être utilisé comme retardateur de flamme.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le prix moyen annuel 2019 de l'antimoine métal a été de \$ 6 893/t, en nette baisse (– 16 %) par rapport à 2018. Cette baisse a été causée, d'une part, par un stockage massif des consommateurs en 2018 en partie due aux menaces de taxes dans la guerre commerciale sino-américaine et, d'autre part, par des surplus d'approvisionnement en Chine en 2019, ainsi que par les incertitudes sur le devenir des stocks importants de la bourse de Fanya.

La demande future en antimoine devrait suivre une tendance haussière, poussée par des normes de sécurité incendie plus strictes, avec une faible substituabilité pour les retardateurs de flamme. Elle pourrait cependant être freinée par la réduction de la quantité d'antimoine dans les produits, l'abandon progressif des batteries au plomb antimonié, et par les éventuelles réglementations

sanitaires et commerciales à venir. À plus long terme, les propriétés semi-conductrices de l'antimoine pourraient offrir de nouveaux débouchés à ce métal dans le domaine de l'électronique, ainsi que dans celui du raffinage électrolytique de métaux rares. Enfin, des cellules photovoltaïques multijonctions, dont l'une des couches contient de l'antimoine, pourraient permettre d'atteindre un taux de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique de 50 %. Ces applications ne sont néanmoins pour l'instant qu'au stade de la recherche.

Béryllium (Be)

En 2019, la production mondiale de béryllium s'est élevée à 260 tonnes selon l'USGS. Son coût élevé et ses difficultés de mises en œuvre industrielles – dues à une toxicité élevée – en font un métal réservé à des usages très spécifiques, en particulier comme alliage « cuivre-béryllium (CuBe) » en connectique pour l'aéronautique, le spatial ou la défense, ainsi que sous forme de métal pur dans l'industrie nucléaire et en médecine.

Les propriétés uniques du béryllium comprennent la légèreté, la rigidité et la très forte résistance à la corrosion, une très bonne transparence aux rayons X, ainsi que celle de réflexion des neutrons. Certaines formes sont privilégiées en fonction des secteurs d'usages. La principale est l'alliage cuivre-béryllium (contenant environ 2 % Be) qui représente environ 80 % des quantités consommées. Cet alliage hérite du béryllium sa très grande résistance à l'usure et à l'oxydation. Sa principale application est en connectique pour des usages nécessitant un très haut niveau de fiabilité, dans des secteurs tels que l'aéronautique, le spatial et la défense (connecteurs et contacteurs électriques pour télescopes, gyroscopes, systèmes de guidage, etc.).

Une plus faible part de la consommation est sous forme de béryllium métal pur (15 % des usages), en particulier pour les applications dans les secteurs de la santé (équipements des rayons X, outillage pour l'entretien des installations d'IRM, etc.) et du nucléaire civil et militaire où sa capacité de réflexion des neutrons est recherchée. De la même manière, les recherches sur la fusion nucléaire consomment de grandes quantités de béryllium métal ultra-pur – plus de 200 tonnes sont envisagées pour la

construction du réacteur de fusion atomique contrôlée du projet ITER à Cadarache. Enfin, 5 % de la consommation du Be est sous forme d'oxyde et de céramiques, par exemple utilisés dans le secteur de la construction (substrats isolants, blindages, etc.).

Les États-Unis demeurent le premier producteur mondial de béryllium avec 170 tonnes, soit 65 % du total mondial. Le pays domine le marché du béryllium depuis de nombreuses années. La production y est aujourd'hui assurée par une seule entreprise : Materion. Ce groupe présente un fort degré d'intégration verticale, ses activités allant de l'exploitation du gisement de bertrandite de Topaz Mountain, dans l'Utah, jusqu'à la production de béryllium ultrapur et de divers alliages. Les autres productions minières se situent en Chine (de l'ordre de 50 à 70 tonnes) et, pour une faible part, à partir du béryl extrait à Madagascar et au Brésil (de l'ordre de quelques tonnes), ainsi qu'au Nigeria et au Mozambique. Il faut noter que les gisements de béryl sont également exploités pour les gemmes (l'émeraude est un béryl, c'est-à-dire un silico-aluminate de béryllium dans lequel une partie des ions Al^{3+} est substituée par des ions Cr^{3+} ou V^{3+}).

La production métallurgique et de raffinage de béryllium pour l'industrie est plus diversifiée, avec notamment l'acteur japonais NGK Insula-

tors Ltd qui est le deuxième producteur mondial d'alliages CuBe et qui possède entre autres une filiale en France. Au Kazakhstan, les stocks d'Ulba Metallurgical Plant JSC donnent également lieu à une production importante d'alliages au béryllium (CuBe, AlBe, NiBe).

Les seules réserves démontrées de béryllium mondiales sont celles de la mine de Spor Mountain, aux États-Unis, avec une actualisation 2019 à 20 000 tonnes de Be contenu. Les ressources mondiales (non normées) sont estimées par l'USGS à plus de 100 000 tonnes de Be contenu, dont 60 % aux États-Unis.

Le béryllium n'est utilisé que dans des applications très spécifiques où il est difficilement substituable sans perte significative de performance ou de fiabilité. Le coût élevé du béryllium et les risques liés à son usinage limitent ses usages aux domaines de très haute technologie, où il est incontournable. La recherche de substituts est un exercice difficile étant donné les propriétés uniques de ce métal. Les filières de recyclage sont également peu développées avec, en fin de vie, entre 1 % et 7 % de Be recyclé. Néanmoins, l'entreprise Materion a développé une filière de recyclage du Be pur et du CuBe, 40 % de l'alliage produit étant recyclé selon les données USGS.

Béryllium
(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	Production mondiale de minerai					
	290	230	220	214	240	260
États-Unis	270	205	155	150	165	170
Brésil			5	3	3	3
Chine	20	20	50	50	48	70
Madagascar			6	6	6	1
Mozambique	2				16	15
Nigeria			6	4	4	1
Rwanda			1	1	1	1
Autres pays	1	6				

(Source : Mineral Commodity Summaries)

La production de béryllium et de certains de ses composés est soumise à des règles très strictes du fait des risques sanitaires encourus en cas d'inhalation de poussières de béryllium (susceptibles de provoquer une maladie pulmonaire grave, la béryllose). En France, la valeur limite d'exposition professionnelle est fixée à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air pour huit heures de travail. Aux États-Unis, cette limite a été abaissée à $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en janvier 2017.

Les prix du béryllium sont peu soumis à des mouvements spéculatifs. N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. L'association de producteurs BeST donne des fourchettes de prix en fonction des qualités recherchées :

- Be métal pur de qualité aéronautique : \$ 350 à \$ 1 900/kg ;
- alliage AlBe (39 % Be) pour composant aéronautique : \$ 250 à \$ 650/kg ;
- alliage CuBe (2 % Be) : \$ 25 à \$ 65/kg.

L'USGS publie également des moyennes annuelles du prix du béryllium, correspondant à la valeur du béryllium contenu dans les échanges douaniers pour un alliage CuBe à 4 % Be. Cette moyenne est en hausse en 2019 à \$ 660/kg Be, contre \$ 590/kg en 2018.

La croissance de la demande est largement tirée par les besoins en connectique d'alliages CuBe. Aux États-Unis, en mai 2018, le département de l'Intérieur en coordination avec d'autres agences fédérales a publié une liste de trente-cinq minéraux critiques, dont le béryllium. Dans ce cadre, la *Defense Logistics Agency* a eu pour mission de constituer un stock de défense nationale s'élevant à 47 tonnes de Be métal. Selon l'USGS, l'inventaire de ce stock au 30 septembre 2019 était de : 67 tonnes Be métal, 7 tonnes sous forme de poudre métallique et une tonne sous forme de minéral (béryl).

En termes d'exploration, peu de projets sont identifiés pour renouveler le gisement de Spor Mountain, hormis aux États-Unis avec le gisement de terres rares de Round Top (Texas) permettant d'envisager une possibilité de production de Be en sous-produit des terres rares. La perspective d'une éventuelle mise en production est néanmoins éloignée.

Bismuth (Bi)

En 2019, la production mondiale de bismuth raffiné a été de 19 000 tonnes selon les données préliminaires de l'USGS. Le bismuth est essentiellement un sous-produit de l'extraction et de la métallurgie du plomb et du tungstène. C'est un métal malléable, à basse température de fusion (271°C) et semi-conducteur. Ses principaux débouchés concernent deux secteurs bien distincts : d'une part, sous forme d'alliages à bas point de fusion (11°C à 300°C), il est utilisé en métallurgie et en électronique (soudures en remplacement du plomb) ; d'autre part, sous forme chimique, il a d'importantes applications dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique, ainsi que pour la dépollution de l'eau et la production de pigments.

L'un des principaux avantages du bismuth dans ses usages est qu'il est considéré comme le moins toxique des métaux lourds pour l'homme, ce qui explique son utilisation dans de nombreux produits pour ses propriétés antibactériennes, notamment pour le traitement de l'eau, en cosmétique et dans l'industrie pharmaceutique. Cependant, ses usages à l'échelle mondiale varient beaucoup selon les pays en fonction de leur structure industrielle et des réglementations nationales. À titre d'exemple, aux États-Unis, l'essentiel du bismuth est utilisé pour produire des alliages de laiton et de bronze. À l'échelle mondiale, les chiffres les plus récents (2013) donnent la répartition suivante : 57 % pour la chimie et la pharmacie, 26 % pour la composition d'alliages, 9 % pour les additifs métallurgiques et 8 % pour des usages divers.

Le bismuth n'existe que très rarement sous forme de petites concentrations économiquement exploitables dans la croûte terrestre. C'est pourquoi l'essentiel de la production actuelle provient de la métallurgie du plomb ou du tungstène. Les chiffres de production mondiale sont ainsi généralement constatés au stade de la séparation métallurgique. Une complexité supplémentaire vient du degré de purification lors du raffinage du bismuth où l'on distingue le *technical grade* à 99,99 % Bi métal, du *pharmaceutical grade* à 99,999 % Bi, destiné exclusivement aux utilisations humaines.

En 2019, la production mondiale de Bi raffiné estimée par l'USGS a été, comme évoquée précédemment, de 19 000 tonnes (cette quantité

est toutefois exprimée en poids total et non en Bi contenu). L'hétérogénéité des statistiques relatives au bismuth peut également s'expliquer par les confusions entre les différentes qualités de produits aux différents stades de la chaîne de valeur. Ainsi, si la Chine domine très largement les premières étapes de production en sous-produits de ses mines de tungstène et de plomb, le raffinage dépasse rarement un degré de pureté de 99,8 % Bi. Ces produits sont exportés vers d'autres intermédiaires en Asie du Sud-Est, en Europe ou en Amérique du Nord pour un raffinage ultérieur. C'est pourquoi le Japon ou le Canada apparaissent dans le classement des producteurs de bismuth raffiné (de qualités *technical grade* et *pharmaceutical grade*) sans pour autant avoir de production minière sur leur sol. Selon les chiffres de l'USGS, la Chine est toujours de loin le premier producteur mondial de bismuth avec 74 % de la production mondiale. La structuration de cette industrie en Chine s'est faite à partir de 2007 par le regroupement de six producteurs de la région du Hunan en un seul consortium de taille internationale : Hunan Jinwang Bismuth International.

En 2019, d'importants surplus de l'offre mondiale ont pesé sur les prix du bismuth, qui ont continué leur chute entamée en 2015 et particulièrement marquée depuis 2018. Le prix moyen (Bi 99,99 % Europe) a été de \$ 6,94/kg sur l'année contre \$ 10,13/kg en 2018, soit une baisse de 31,5 %. Aux États-Unis, les prix du bismuth ont

atteint à la fin de l'année 2019 leur plus bas niveau depuis février 2004. N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, ces prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs.

Déjà marquée par d'importantes surcapacités liées au statut de sous-produit du bismuth, l'offre en provenance de Chine a souffert de l'arrivée sur le marché des stocks de bismuth immobilisés après la chute du *Fanya Metal Exchange* en 2015. Ces stocks, équivalents à plus d'un an de production mondiale (19 228 tonnes) ont été mis aux enchères en novembre et entièrement acquis par le groupe chinois Vital Materials (voir encadré sur la bourse de *Fanya Metal Exchange*).

La compagnie Masan Resources exploite la mine de tungstène de Nui Phao, au Vietnam, avec une capacité de production de 2 000 tonnes de concentrés de bismuth par an. Le bismuth est récupéré en sous-produit du tungstène, d'abord sous forme de concentrés pouvant être transformés en « ciment de bismuth » contenant 90 % Bi. Ces derniers sont vendus tels quels aux consommateurs ou transformés en briquettes métalliques à plus forte valeur ajoutée pour des clients tels que 5 N Plus.

5 N Plus est une compagnie canadienne, leader mondial de la purification et la distribution de produits à base de bismuth, ainsi que dans la production et la vente d'alliages à bas point de fusion, bien que n'exploitant aucune mine. Sa produc-

Bismuth

(en tonnes)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale de minerai						
	13 600	10 300	17 100	16 900	19 200	19 000
Bulgarie				50	50	50
Canada	3	3	25	25	25	25
Chine	7 600	7 500	14 000	13 500	14 000	14 000
Corée du Sud					900	900
Japon			428	525	571	540
Kazakhstan			140	270	290	270
Laos			2 000	2 000	3 010	3 000
Mexique	948	700	539	513	333	400
Vietnam	4 950	2 000				
Russie	40	40	4			

Prix du bismuth Marché libre européen

(en dollars/lb)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

tion de bismuth ultrapur, d'alliages et de produits chimiques dérivés du bismuth est réalisée à partir de concentrés, d'oxydes, de pièces ou lingots de bismuth importés, notamment *via* sa filiale belge. Le bismuth vendu par 5 N Plus est destiné à des applications pharmaceutiques, électroniques et industrielles. L'entreprise est intégrée verticalement et dispose de capacités de recyclage en boucle fermée.

En 2018, l'USGS a cessé sa publication d'une estimation des réserves mondiales de Bi, auparavant uniquement fondée sur les réserves connues des gisements primaires de plomb contenant du bismuth. Cette absence de référence mondiale sur l'état des réserves s'explique par le manque de données nécessaires pour une telle estimation.

Le taux de recyclage du bismuth à partir des produits en fin de vie est inférieur à 1 %, une situation peu susceptible d'évoluer vu le caractère dispersif de ses principaux usages (pigments, produits pharmaceutiques, etc.). Si le recyclage des soudures est théoriquement possible, il est en pratique quasi inexistant, car le bismuth n'est pas le principal métal d'intérêt à être récupéré dans ces produits. Il peut être substitué par d'autres produits pour ses usages pharmaceutiques, en fonction de critères de prix et de qualité.

Certaines perspectives pourraient transformer le marché du bismuth, restant toutefois un domaine de niches et peu propice aux crises. Du côté de la demande, les potentialités dans les domaines des semi-conducteurs et les réglementations sur l'interdiction définitive du plomb dans plusieurs industries pourraient prendre de l'ampleur et avoir un effet positif sur la demande mondiale en bismuth. Ce phénomène s'observe également par une utilisation croissante dans les soudures de nombreux produits électriques et électroniques. Le développement des nitrates de bismuth comme dépolluants des eaux est un autre secteur en croissance.

Du côté de l'offre minière, seul un projet majeur peut être mentionné : celui de Fortune Minerals, avec le projet NiCo situé dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. Le projet envisage une mine d'or-cuivre-bismuth-cobalt, actuellement au stade de la faisabilité. Les réserves probables et prouvées sont de l'ordre de 40 000 tonnes de bismuth pour une durée de vie de vingt ans.

Cadmium (Cd)

Le cadmium est un métal tendre à basse température de fusion (321 °C) et d'ébullition (767 °C). C'est un métal toxique pour l'environnement et la santé humaine, ce qui en restreint fortement l'utilisation. La valeur de son marché est d'environ \$ 66 millions. Le cadmium est essentiellement un sous-produit de la métallurgie du zinc. Les gisements sédimentaires de phosphates et de charbon représentent également une ressource importante, peu valorisée à ce jour.

Le principal usage du cadmium est la production d'accumulateurs rechargeables au nickel-cadmium (batteries NiCd). On distingue souvent les batteries NiCd « du commerce » et celles de l'industrie. Les premières, longtemps utilisées dans les équipements électriques portables, sont de moins en moins utilisées du fait du développement rapide des batteries NiMH et lithium-ion (Li-ion), aux performances nettement supérieures, et à des prix en baisse constante. En 2018, les batteries NiCd représentaient moins de 2 % de la capacité du marché mondial des batteries rechargeables (environ 550 GWh). Les batteries NiCd industrielles sont toujours utilisées, souvent en tant que batteries de secours, en raison de leur grande fiabilité et de leur résistance aux fortes décharges. Un autre usage important, mais lui aussi décroissant, est la production de pigments jaunes, oranges ou rouges, très utilisés pour le revêtement des engins de chantier par exemple, car ils protègent l'acier de la corrosion. Datant de février 2017, un amendement du règlement REACH limitant très fortement la teneur en cadmium des peintures entraîne cependant la substitution des pigments au cadmium par des pigments à base de vanadate de bismuth ou sulfure de cérium, présentant peu ou pas de risques de toxicité. Les usages restants du cadmium comprennent les alliages à bas point de fusion et les applications dans le domaine de l'énergie et de l'électronique utilisant les propriétés semi-conductrices de plusieurs de ses composés. Le plus populaire est le tellure de cadmium (CdTe) pour les cellules photovoltaïques à couches minces, nécessitant environ 80 kg de Cd par MW de capacité de production installée. Cet usage a un fort potentiel de développement bien que le silicium domine largement le marché des

cellules photovoltaïques en 2019 (voir la section consacrée au tellure). Dans les panneaux photovoltaïques, le CdTe est encapsulé et ne présente pas de risques sanitaires.

Selon l'USGS, la production mondiale de Cd en 2019 était de 25 000 tonnes (sans la production américaine, tenue confidentielle depuis 2018), un niveau stable par rapport à 2018 (25 100 tonnes). La Chine, premier métallurgiste du zinc, demeure aussi le premier producteur mondial de cadmium, avec 33 % de la production mondiale, une place qu'elle occupe depuis 2008. Au cours de la période 2007-2017, la croissance annuelle moyenne de la production de Cd a suivi celle du zinc, à 2 %. Les autres producteurs majeurs sont la Corée du Sud, le Japon et le Canada. La Chine a placé une taxe de 25 % sur les importations de cadmium brut en provenance des États-Unis.

Il n'existe pas d'estimation des réserves en cadmium, celui-ci n'étant récupéré qu'en sous-produit. L'USGS indique que les minerais de zinc ont une teneur typique de 0,03 % de cadmium. La teneur en cadmium dans les gisements de phosphates peut atteindre plusieurs centaines de grammes par tonne.

Le cadmium des batteries NiCd peut être recyclé. La société Retriev Technologies, basée dans l'Ohio (États-Unis), produit des lingots de cadmium secondaire à partir du recyclage des batteries NiCd par pyrométallurgie. Le cadmium peut être substitué dans la plupart des usages, cependant à un coût plus élevé.

Le prix annuel moyen du cadmium de pureté 99,95 % en 2019 a été de \$ 2,63/kg, en baisse de 8,2 % par rapport à 2018.

Le cadmium est un métal dont l'ingestion est dangereuse pour la santé. Beaucoup de plantes, notamment les légumes à feuilles, accumulent le cadmium. Ce métal pouvant être présent dans la composante phosphorique des engrais, il en résulte des préoccupations de santé publique, objet de nombreuses publications. En 2017, les institutions européennes ont initié la révision de la Réglementation européenne relative aux engrais datant de 2003. La réglementation révisée, qui a été adoptée fin 2018, a fixé une teneur maximale en cadmium admissible à 60 mg Cd/kg d'engrais phosphatés (P_2O_5), avec une évolution possible vers 40 mg Cd/kg puis 20 mg Cd/kg. Cette réglementation – qui entrera en vigueur d'ici 2022 –

Cadmium
(en tonnes de métal raffiné)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale						
	22 700	23 200	23 900	25 400	25 100	25 000
Australie	350	380				
Bulgarie	350	360				
Canada	1 310	1 160	2 310	1 800	1 680	1 600
Chine	7 000	7 600	8 200	8 200	8 200	8 200
Corée du Sud	4 010	4 200	3 600	5 600	5 000	5 000
États-Unis	550	500	400	400		
Inde	380					
Japon	1 830	1 960	1 990	2 140	1 980	1 900
Kazakhstan	1 200	1 500	1 500	1 500	1 500	1 400
Mexique	1 410	1 300	1 190	1 160	1 360	1 400
Pays-Bas	640	640	630	600	1 100	1 100
Pérou	769	760	820	797	765	770
Pologne	628	630				
Russie	1 200	1 300	1 300	1 200	1 200	1 000
Autres pays	1 350	1 410	2 400	2 370	2 310	2 300

Prix du cadmium
Marché libre européen
(en dollars/kg)



(Sources : Mineral Commodity Summaries ; World Mining Data pour les données des États-Unis, 2013 à 2016 estimations)

pourrait, à terme, forcer les producteurs d'engrais à « décadmier » l'acide phosphorique servant à la production des engrais, ce qui ferait apparaître un stock considérable de cadmium dans les pays producteurs de phosphates. Certains producteurs d'engrais phosphatés à faibles teneurs de cadmium comme le Russe PhosAgro espèrent bénéficier de cette réglementation pour gagner des parts de marché en Europe, au détriment des producteurs d'Afrique du Nord. À ce jour, de nombreux déchets cadmiés sont rejetés dans la nature sans traitement, au vu de leur faible valeur économique. Le développement du photovoltaïque à couches minces à CdTe et les normes environnementales pourraient ouvrir de nouvelles perspectives dans ce marché potentiellement excédentaire.

Chrome (Cr)

En 2019, la production mondiale de chromite, le minerai de chrome, a atteint 44 Mt selon l'USGS, en hausse de 2,1 % par rapport à 2018 (43,1 Mt). Le chrome est ainsi, en volume, le quatrième métal le plus produit et consommé au monde après le fer, l'aluminium et le cuivre. La chromite est le principal minéral porteur du chrome, contenant entre 40 % et 60 % de chrome sous forme d'oxyde de chrome (Cr_2O_3). Par ses caractéristiques de résistance au ternissement et à la corrosion, l'usage principal du chrome est de loin la fabrication des aciers inoxydables. Cet usage ne nécessite pas la production de chrome métal, mais d'un alliage, le ferrochrome, nettement plus facile à produire.

La demande mondiale en chromite se situe autour des 30-35 Mt annuellement, mais après une croissance annuelle comprise entre 5 % et 10 % sur les dernières années, la demande en chrome devrait afficher une hausse plus raisonnable, entre 2 % et 3 % par an. Plus de 90 % de la chromite est destinée à la production de ferrochrome dont 85 % vont servir à la production des aciers inoxydables et 15 % pour d'autres aciers et alliages au chrome. Pour justifier son appellation, l'acier inoxydable doit contenir au minimum 10,5 % de chrome. Le chrome en composés chimiques et sous forme de métal ne compte que pour environ 3 % de la demande en chromite et cette dernière forme est utilisée pour plus de moitié dans les superalliages pour l'aéronautique (parties chaudes des réacteurs

d'avion) et pour la production d'énergie (turbines à gaz).

La Chine est non seulement devenue le premier producteur mondial d'aciers inoxydables, mais également le plus gros consommateur de chromite, avec environ 40 % de la demande, assurée par des importations massives étant donné les faibles ressources de son sous-sol. La montée en puissance de l'Indonésie à partir de 2017 dans la production intégrée d'aciers inoxydables (usines accolées de production de chrome et de fontes nickélifères (*Nickel Pig Iron* ou NPI), ainsi que la croissance solide de l'urbanisation mondiale devraient conduire à une poursuite de la croissance de la demande mondiale en aciers inoxydables à un rythme moyen estimé par Roskill à 3 % par an d'ici à 2030.

Les autres secteurs d'utilisation de la chromite devraient également afficher une légère croissance sur les prochaines années, hormis ceux des réfractaires, des pigments et des produits chimiques à base de chrome hexavalent, en perte de vitesse en partie à cause de restrictions réglementaires liées aux impacts potentiels de ces produits sur la santé humaine et sur l'environnement.

Selon les données de l'USGS, la production de chromite reste largement dominée par l'Afrique du Sud avec 17 Mt (soit 39 %). Les autres pays producteurs majeurs sont la Turquie (10 Mt), le Kazakhstan (6,7 Mt) et l'Inde (4,1 Mt). Enfin, certains pays produisent un peu de chromite, dont la Finlande, Oman, l'Iran, le Brésil, l'Albanie et le Zimbabwe. Au Zimbabwe, les changements politiques ont contribué à un retour des investissements, notamment de la part d'entreprises indiennes, chinoises et sud-africaines. Il est très probable que la production zimbabwéenne progresse fortement dans les prochaines années, même si l'année 2019 a été en partie décevante par rapport aux objectifs de production affichés. Bien que la plupart de la chromite soit extraite en tant que substance principale, environ 14 % de la production mondiale est un sous-produit de l'exploitation de platinoïdes dans le complexe du Bushveld, en Afrique du Sud (soit le tiers de la production sud-africaine).

Selon les données compilées par le site « l'Élémentarium » porté par la Société chimique de France, environ 13,5 Mt de ferrochrome ont été

produites en 2018, soit 8,2 Mt en chrome contenu. Les principaux producteurs de ferrochrome sont la Chine (39 %), l'Afrique du Sud (29 %), le Kazakhstan (10 %), l'Inde (10 %) et la Finlande (4 %). Il existe plusieurs spécifications de ferrochrome, contenant entre 52 % et 75 % de chrome, mais également 0,01 % à 9,5 % de carbone et 1 % à 14 % de silicium. Par exemple, le ferrochrome à haute teneur en carbone (HC) est surtout utilisé pour la fabrication d'aciers inoxydables et il est produit à partir de chromite à haute teneur en chrome (> 60 % Cr et 4-6 % C) provenant du Kazakhstan, du Zimbabwe et de la Turquie dans une moindre mesure. À l'inverse, le chrome « charge » provient des chromites d'Afrique du Sud qui sont moins riches en chrome (50-55 % Cr), mais qui contiennent plus de carbone (6-8 % C). Il est également utilisé pour la fabrication d'aciers inoxydables, mais selon des processus différents.

Les capacités de production mondiale de chrome métal (99,996 % Cr) étaient de 57 000 tonnes en 2017 et provenaient principalement de Russie (33 %), de Chine (28 %), de France (21 %) et du Royaume-Uni (14 %). Deux types de chrome métal sont commercialisés : le chrome métal aluminothermique, qui est produit à partir d'oxydes de chrome et le chrome métal électrolytique qui est fabriqué à partir du ferrochrome ou de l'acide chromique. En France, la production

de chrome aluminothermique est assurée par la société DCX Chrome sur son site de Marly.

L'USGS évalue à approximativement 570 Mt les réserves mondiales de chromite (45 % Cr_2O_3) en 2019. Le Kazakhstan et l'Afrique du Sud possèdent respectivement 40 % et 35 % de ces réserves. Les ressources en chromite sont considérables puisqu'elles atteindraient 12 Gt et se trouveraient à 95 % au Kazakhstan et en Afrique du Sud.

Du fait de ses qualités et de son abondance géologique, les industriels n'ont pas cherché à remplacer le chrome par un autre élément dans son usage principal, l'acier inoxydable.

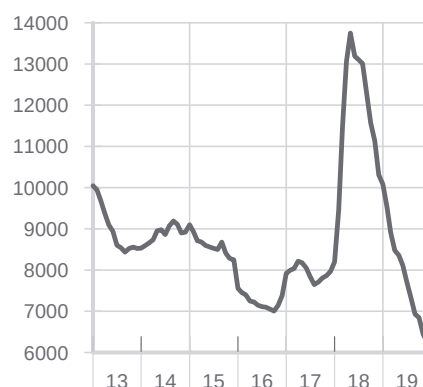
Les aciers inoxydables sont largement recyclés avec un taux de recyclage en fin de vie (« *old scrap* ») de 80 % à 90 %. Les autres alliages et superalliages sont également recyclés pour le même usage – si l'alliage est préservé – ou pour alimenter la production de ferrochrome dans le cas contraire. Le chrome métal contenu dans les superalliages n'est pas récupéré en tant que tel, mais ceux-ci sont fortement recyclés pour des usages proches du fait de leur valeur très élevée.

À l'instar de nombreux autres petits métaux, les prix du chrome ne sont pas établis sur les marchés boursiers. Ils sont déterminés après négociations entre producteurs et utilisateurs. Compte tenu de la diversité des produits se rapportant au

Chrome
(en milliers de tonnes)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	26 400	30 400	30 200	35 700	43 100	44 000
Afrique du Sud	12 000	14 000	14 700	16 500	17 600	17 000
Finlande					2 210	2 200
Inde	3 540	3 200	3 200	3 500	4 300	4 100
Kazakhstan	3 700	5 490	5 380	4 580	6 690	6 700
Turquie	2 600	3 500	2 800	6 500	8 000	10 000
Autres pays	4 590	4 220	4 160	4 580	4 250	4 000

Prix du chrome métal aluminothermique
(en dollars/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

chrome et de la variabilité de la teneur en chrome qu'ils contiennent, il existe une grande diversité de prix. Le prix moyen du chrome métal aluminothermique (99 % Cr) a été de \$ 7 916/t en 2019. Il affiche une baisse de 32 % par rapport à 2018 (\$ 11 710/t) et est même passé sous la barre des \$ 6 300/t en décembre 2019. Les prix du ferrochrome (HC 60 % Cr et 6-8 % C) ont également connu une baisse de 26 % entre 2018 et 2019, passant de \$ 2 683/t à \$ 1 975/t en moyenne. Ces baisses s'expliquent en grande partie par un excès de chromite et de ferrochrome sur le marché, en raison d'une production plus soutenue du minerai UG2 par les producteurs de platine en Afrique du Sud. En effet, les prix bas du platine ont fortement incité les producteurs à valoriser le chrome contenu dans les résidus miniers (donc en tant que sous-produit) pour continuer à être rentables. En 2019, c'est plus d'un million de tonnes de concentré de chromite qui a intégré le marché. En plus de l'Afrique du Sud, plusieurs pays ont augmenté leur production entre 2017 et 2019 comme la Turquie (+ 3,5 Mt), le Kazakhstan (+ 2,1 Mt) ou encore l'Inde (+ 600 000 tonnes).

Actuellement dominé par la production sud-africaine, le marché du chrome pourrait connaître des évolutions à moyen terme, notamment liées au rôle croissant de l'Indonésie dans la production intégrée de nickel (NPI) et d'aciers inoxydables pour répondre à la demande chinoise, ainsi qu'aux manœuvres des trois producteurs miniers majeurs (Afrique du Sud, Kazakhstan et Inde). Même si les cours devraient rester moroses à court terme en raison d'une demande pour les aciers inoxydables plus faible et d'un excès de chromite/chrome sur le marché, la situation devrait toutefois évoluer à moyen terme. D'une part, le niveau UG2 du complexe du Bushveld ne pourra à lui seul combler éternellement une demande croissante des industriels et, d'autre part, la société Eskom – principal fournisseur d'électricité en Afrique du Sud – a annoncé une augmentation de ses tarifs de 25 % sur les trois prochaines années, impactant nécessairement la production de ferrochrome sud-africaine, très gourmande en énergie. Cela pourrait provoquer un déficit de ferrochrome sur le marché chinois notamment, et donc une hausse des prix. À plus long terme, plusieurs sociétés développent un procédé de pro-

duction d'acier inoxydable sans passer par l'étape de ferrochrome. Le concentré de chromite serait alors directement fondu et utilisé tel quel. C'est par exemple le cas de l'usine appartenant à la société chinoise Tsingshan située en Indonésie qui a été conçue pour se passer à terme du ferrochrome, et donc produire à un coût beaucoup plus avantageux.

Gallium (Ga)

En 2019, la production de gallium a été de 320 tonnes, selon l'USGS, soit un marché d'environ \$ 50 millions. Le gallium est principalement un sous-produit de l'industrie de l'alumine. Il possède une température de fusion de seulement 29,8 °C, mais une température d'ébullition de 2 04 °C. Le gallium raffiné se combine avec l'arsenic ou l'azote pour former des matériaux semi-conducteurs. Ceux-ci ont un débouché principal : l'électronique. Le marché du gallium est en fort surplus depuis 2013.

Sur une consommation mondiale d'environ 300 tonnes, une majeure partie est utilisée pour les circuits intégrés en électronique et pour l'optoélectronique (diodes électroluminescentes – DEL –, diodes lasers, photodiodes). Plusieurs dizaines de tonnes sont utilisées ponctuellement pour la recherche sur les neutrinos en physique des particules. Les principaux composés utilisés sont l'arséniure de gallium (GaAs) et le nitrure de gallium (GaN). Le GaAs est utilisé comme substrat privilégié pour la production de circuits intégrés fonctionnant à des fréquences supérieures aux substrats à base de silicium. Ils sont consommés par les DEL, la téléphonie mobile (environ deux tiers de la demande), les communications *wifi*, ainsi que dans le secteur de la défense (avions de combat et missiles). La propriété de conversion de l'électricité en lumière du nitrure de gallium fait qu'il est utilisé dans certaines DEL et dans les diodes lasers pour le stockage optique des DVD et *Blu-ray*, mais également pour des applications satellites ou de télévision par câble. Depuis quelques années, le GaN est également utilisé comme semi-conducteur dans les circuits intégrés, en remplacement du silicium et de l'arséniure de gallium, car il affiche de meilleures performances avec une bande interdite plus large. De plus en plus de fabricants

de semi-conducteurs adoptent le GaN pour accélérer les télécommunications dans l'électronique embarquée et les objets communicants. Une plus faible quantité de gallium est consommée dans les cellules photovoltaïques en couches minces CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium). Les cellules photovoltaïques au CIGS contiennent environ 10 % de gallium. Selon les chiffres du rapport annuel 2019 de l'institut allemand Fraunhofer pour les systèmes solaires, la technologie CIGS représentait en 2018 environ 2 % de la puissance photovoltaïque mondiale. Les forts gains de rendement réalisés durant ces dix dernières années ainsi que l'absence de toxicité pourraient à nouveau rendre les couches minces CIGS attractives dans les années à venir. Il est à noter que le gallium peut également se trouver dans les onduleurs des installations photovoltaïques.

Selon l'USGS, les téléphones mobiles de troisième et quatrième génération (4 G) consomment près de dix fois plus de GaAs que les téléphones mobiles de première génération. Les ventes de *wafers* au GaAs ont augmenté de 17 % en 2019. La performance du secteur des semi-conducteurs est, elle, très variable. Aussi, le développement massif du réseau 5G, la demande des communications sans fil, ainsi que la croissance de l'éclairage par DEL à travers le monde, devraient continuer à porter la demande en gallium.

Si le gallium peut être valorisé en sous-produit du zinc (5 %), il est surtout récupéré lors de la production d'alumine (95 %) par le procédé Bayer. Cette récupération est rendue possible par une série de réactions chimiques : attaque à la soude, précipitations successives des ions aluminates, puis traitement des ions gallates par électrolyse, solvant, ou résines échangeuses d'ions. Par la suite, et en fonction des applications, le gallium doit être purifié par une autre série de procédés chimiques conduisant à une pureté de 99,99999 %, ou 7N. C'est en raison de la technicité et du coût des opérations qu'il existe très peu de raffineurs d'alumine produisant du gallium. On considère que moins de 5 % des raffineries mondiales d'alumine sont équipées pour récupérer le gallium et que moins de 1 % du gallium physiquement extrait est effectivement récupéré.

En 2019, la production de gallium est estimée par l'USGS à 320 tonnes de qualité > 4 N

(99,99 % Ga) dont 205 tonnes de qualité 6 à 7 N (pureté supérieure à 99,9999 % Ga). Cette baisse de 22 % représente un retour au niveau de la production de 2017, laissant suggérer que 2018 a été une année où les consommateurs ont reconstitué leurs stocks. Les États-Unis ont d'ailleurs réduit leurs importations de gallium de 90 % en 2019, à la suite d'un triplement de celles-ci en 2018 en raison des menaces de taxe de 10 % à 25 % sur le gallium chinois. Les capacités mondiales de production de ces deux niveaux de pureté sont bien supérieures aux quantités réellement produites puisqu'elles sont évaluées respectivement à 730 tonnes et 330 tonnes par l'USGS. La Chine a produit la quasi-totalité du gallium primaire en 2019 (environ 95 %). Selon l'USGS, l'Ukraine et la Russie, respectivement en deuxième et troisième positions, auraient produit seulement 4 tonnes de Ga primaire chacune. Seuls quelques producteurs maîtrisent les techniques de purification 6N et 7N, notamment en Chine, au Japon, en Slovaquie et aux États-Unis. Le raffinage du gallium à haute pureté a été arrêté en 2018 au Royaume-Uni.

Le gallium étant récupéré comme sous-produit, il n'existe pas d'évaluation normalisée des réserves. Néanmoins, l'USGS estime que les réserves mondiales de bauxite contiendraient plus de 1 Mt de gallium (récupérable à 10 %). À ce chiffre, il faut ajouter les quantités de gallium contenues dans les minerais de zinc, voire dans certains gisements de phosphates et de charbon.

Le gallium fait partie des substances pour lesquelles des stocks conséquents ont été découverts à la bourse faillie *Fanya Metal Exchange* (FME). Le stock de gallium de 191,2 tonnes de Ga a été acheté aux enchères par la compagnie chinoise Vital Materials. Vital a aussi remporté les stocks de germanium, tellure, sélénium, bismuth et indium afin d'accomplir son projet de « mine de surface », sorte de coffre-fort des matières premières minérales pour le secteur des télécommunications (voir l'encadré sur la bourse de Fanya).

Compte tenu de son faible prix et de son marché excédentaire, peu de substitutions sont recherchées pour le gallium. À un prix plus élevé, les DEL peuvent être remplacées par leurs homologues organiques (DELO ou OLED en anglais). Les composés GaAs, GaN et GaP (phosphure de gallium) peuvent être remplacés par des composés

au silicium (SiGe) ou par du phosphore d'indium (InP) dans les circuits intégrés, avec une baisse de puissance (mais un gain en fréquence).

Le recyclage du gallium a surtout lieu en boucle courte par récupération des déchets de fabrication du gallium raffiné et des galettes de GaN ou GaAs. Il y aurait une capacité totale de traitement de 270 tonnes par an selon l'USGS, la production secondaire ayant lieu au Canada, en Chine, en Allemagne, au Japon et aux États-Unis. En revanche, le Groupe international pour les ressources (GIR) du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) estime à moins de 1 % la quantité de gallium recyclé à partir des déchets en fin de vie. Il est en effet extrêmement difficile et coûteux de récupérer les quelques microgrammes de Ga contenus dans les substrats des circuits intégrés et des DEL. Malgré la hausse de la demande en gallium pour ces applications, l'apparition d'une filière efficace de recyclage de ces déchets va donc dépendre fortement de la collecte des produits et/ou d'une certaine volonté politique, peu probable à court terme.

Comme de nombreux autres petits métaux, il n'y a pas de cotation publique du gallium. Le prix est établi directement entre producteurs et utilisateurs. Le prix spot moyen du gallium (de pureté de 99,99 %) a été de \$ 163/kg en 2019, en recul de 20 % par rapport à la moyenne des prix observés en 2018. Le stock de gallium de la FME, représentant environ la moitié de la production annuelle mondiale, a pu contribuer à maintenir les prix bas. Le principal enjeu du marché du gallium est un retour à l'équilibre des prix à un niveau soutenable pour les producteurs. L'industrie des DEL ainsi que les télécommunications optiques et sans fil semblent être en mesure d'apporter des débouchés, tout en garantissant à la Chine le monopole d'un marché supplémentaire.

Germanium (Ge)

En 2019, la production mondiale de germanium est estimée par l'USGS à 130 tonnes, soit un marché représentant environ \$ 160 millions. Le germanium ne forme pour l'instant pas de concentrations naturelles économiquement exploitables en mine. Il est un sous-produit de la métallurgie du zinc (75 %) et du charbon (25 %). Le germanium

est un métal rare, essentiellement utilisé pour ses propriétés semi-conductrices.

On estime la répartition des usages comme telle : fibres optiques, 30 % ; panneaux photovoltaïques à haut rendement, 20 % ; systèmes de vision nocturne et optiques captant l'infrarouge, 20 % ; catalyse de polymères (téréphtalate de polyéthylène – PET – utilisé pour l'embouteillage de boissons), 20 % ; circuits électroniques hautement intégrés et autres applications (poudres luminophores, métallurgie et chimiothérapie), < 10 %. La télécommunication 5G utilise des semi-conducteurs de haute performance, notamment à base de tétrachlorure de germanium (GeCl₄). Cet usage devrait massivement se développer dans les années à venir.

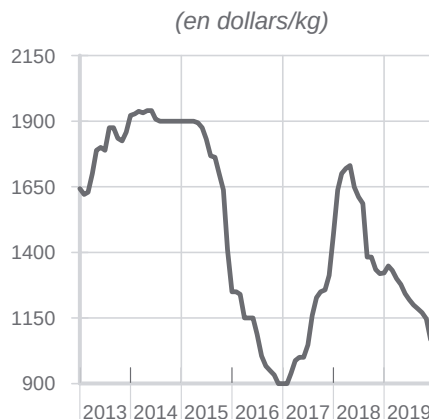
La Chine est le premier producteur mondial de germanium depuis plus de dix ans avec une offre de 85 tonnes en 2019, soit 65 % de la production mondiale. Elle tient cette place grâce à sa position dominante dans la métallurgie du zinc et la valorisation des cendres volantes issues de la combustion du charbon. Cependant, depuis 2015, de nombreux sites de production de petite et moyenne tailles ont fermé. Les raisons principales sont de fortes surcapacités de production et des impacts environnementaux conséquents (rejets d'arsenic, de fer, d'acide sulfurique) que le gouvernement veut réduire. En 2018, la production mondiale de germanium avait rebondi à 130 tonnes et s'est donc maintenue en 2019, toujours selon l'USGS.

Une raffinerie de plomb-zinc canadienne avait dû stopper sa production de germanium début 2018, à la suite d'une avarie majeure. Alors qu'elle prévoyait de redémarrer au second semestre 2018, c'est finalement début 2019 qu'elle a repris sa production. Quelques producteurs chinois de germanium ont arrêté leurs usines en 2019 à cause d'une demande plus faible qu'escomptée. Un autre facteur pesant sur les prix a été la possibilité de la revente d'un stock de 92,3 tonnes de germanium précédemment détenues par la bourse faillie *Fanya Metal Exchange* (FME). C'est finalement en décembre 2019 que la mise aux enchères de ce stock a été réalisée et que ce dernier a été remporté par la compagnie chinoise Vital Materials. Vital a également acquis les stocks de gallium, tellure, sélénium, bismuth et indium vendus dans les mêmes conditions afin d'accomplir

Germanium (en kilogrammes de métal raffiné)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	165 000	165 000	126 000	106 000	130 000	130 000
Chine	120 000	115 000	80 000	60 000	94 600	85 000
Russie	5 000	5 000	6 000	6 000	6 000	6 000
États-Unis	3 000	3 000	3 000	2 000		
Autres pays	40 000	40 000	40 000	40 000	30 000	40 000

Prix du germanium Marché libre européen



(Sources : Mineral Commodity Summaries ; World Mining Data pour les données des États-Unis, 2013 à 2016 : estimations)

son projet de « mine de surface », sorte de coffre-fort des matières premières minérales pour le secteur des télécommunications (voir encadré sur la bourse de Fanya).

Le marché du germanium est, comme celui de nombreux petits métaux, très opaque. Il est en partie caractérisé par l'existence de cycles de stockage et déstockage qui évoluent selon les prix et les besoins des consommateurs (par exemple pour le secteur de la défense). Depuis 2015, le Bureau des réserves d'État chinois (*State Reserve Bureau*) constituerait des stocks stratégiques en achetant 20 à 30 tonnes de germanium chaque année. Les producteurs chinois détiendraient, quant à eux, d'importants stocks, entre 20 tonnes et 40 tonnes de Ge.

Le prix moyen du germanium a été de \$ 1 234/kg en 2019, affichant une baisse de 20 % par rapport à 2018 (\$ 1 543/kg). En 2018, il avait réalisé une hausse de 43 % par rapport à 2017.

Il n'existe pas d'estimation précise des réserves et des ressources en germanium en raison de son exploitation en sous-produit. L'USGS estime que seulement 3 % du germanium contenu dans les minerais de zinc est récupéré. Il indique des réserves importantes de germanium dans les mines de zinc situées en Alaska, au Tennessee et dans l'État de Washington. Les cendres volantes résultant de la combustion du charbon constitue-

raient une ressource importante, notamment en Chine et en Russie, non quantifiée à ce jour. Un tiers de la consommation mondiale de germanium (environ 30 tonnes) proviendrait du recyclage. Il s'agit principalement de recyclage en boucle courte (chutes, limailles, poussières liées aux procédés de fabrication).

Dans les semi-conducteurs, l'alliage silicium-germanium peut être substitué par le phosphore d'indium ou par les composés au gallium (nitrure ou arséniure), dont les largeurs de bandes interdites sont toutefois différentes.

En 2019, Ivanhoe Mining a publié un rapport technique NI 43-101 sur son projet d'exploitation de la mine de zinc de Kipushi, en République démocratique du Congo. Ce gisement contiendrait 691 tonnes de germanium dans ses ressources indiquées et mesurées. Il a produit par le passé 278 tonnes de Ge entre 1956 et 1978, et pourrait représenter une nouvelle source de production.

Indium (In)

En 2019, la production d'indium raffiné a été de 760 tonnes selon l'USGS, représentant un marché de taille modeste, évalué à environ \$ 134 millions. L'indium est essentiellement un sous-produit de la métallurgie du zinc. C'est un métal tendre, ductile et malléable, possédant un point de fusion

assez faible (157 °C), mais un point d'ébullition élevé (2 080 °C). Son principal usage est comme conducteur électrique transparent dans les écrans plats, sous la forme d'oxyde mixte d'étain-indium appelé ITO (*Indium-Tin-Oxide*).

Le chiffre le plus récent de la demande mondiale en indium primaire et secondaire date de 2015, alors estimé à 1 500 tonnes, avec 56 % utilisées sous forme d'ITO pour l'industrie des écrans plats. Ses autres utilisations se répartissent en soudures sans plomb (10 %), en cellules photovoltaïques CIGS en couches minces (8 %), en matériaux d'interface thermique (6 %), piles et batteries (5 %), alliages et composés (4 %), semi-conducteurs et LED (3 %) et diverses autres applications (8 %).

L'ITO, oxyde mixte d'étain-indium, est un très bon conducteur électrique, transparent sous forme de couche mince (quelques microns), très stable, adhérent parfaitement aux substrats sur lesquels il est déposé (plastiques, verres, etc.). Son utilisation a permis la révolution des écrans tactiles en tout genre. Il est aujourd'hui indispensable dans les écrans plats (LCD, plasma ou OLED) et est également utilisé pour la production de matériaux d'interface thermique (verres architecturaux, etc.). Le marché de l'indium est donc fortement corrélé au marché des écrans plats, qui devrait croître d'environ 5 % d'ici à 2027 selon le cabinet Future Market Insights. Par ailleurs, la technologie IGZO (oxyde mixte, de zinc, gallium et indium) qui présente une haute définition et une finesse tactile à moindre coût énergétique pourrait relancer les ventes et tirer la demande d'indium vers le haut.

Les soudures et joints d'appareils fonctionnant à des températures cryogéniques ou sous vide utilisent l'indium sous forme métal ou en alliage. En effet, ses caractéristiques lui permettent de réduire le point de fusion des alliages. Il intervient également dans les soudures en remplacement du plomb, banni progressivement de nombreux usages en raison de sa toxicité.

L'indium rentre aussi dans la composition des cellules photovoltaïques en couches minces (CIS – cuivre, indium, sélénium et CIGS – cuivre, indium, gallium et sélénium). L'utilisation des technologies en couches minces est très largement minoritaire vis-à-vis de cellules photovoltaïques au silicium. Ces dernières représentent 95 % du mar-

ché photovoltaïque mondial, contre une part néanmoins stable à environ 2 % pour la technologie CIGS, selon les chiffres du rapport annuel 2019 du *Fraunhofer Institute*. Les technologies en couches minces consomment ainsi une petite part de l'indium mondial (8 %). Les capacités photovoltaïques mondiales continuent leur croissance avec 415 GW de capacités installées à fin 2017 contre 134 GW en 2013, ce qui bénéficie également à la technologie CIS/CIGS qui est passée d'une production de 1 400 MWp en 2016 à 1 900 MWp en 2017.

En 2019 et comme indiqué précédemment, la production d'indium raffiné a été de 760 tonnes selon les données préliminaires de l'USGS, contre 741 tonnes en 2018. Il n'existe en revanche pas de mine d'indium. Il est récupéré uniquement en tant que sous-produit d'autres métaux comme le zinc (95 %) et, dans une moindre mesure, le cuivre et l'étain (5 %). Il est produit à partir des poussières et résidus des fonderies (principalement de zinc) avec une qualité de 3 N (99,9 %) ou 4 N (99,99 %) et peut être purifié jusqu'à 6 ou 7 N (99,99999 %) pour certaines applications comme les semi-conducteurs. Il existe très peu de sociétés possédant une chaîne de production intégrée de l'extraction de minerai de zinc à la production d'indium. Dans la plupart des cas, l'extraction du minerai et le raffinage du métal ont lieu dans des pays différents, ce qui explique la difficulté à connaître l'origine exacte de l'indium produit. De plus, seulement 35 % des raffineries de zinc sont équipées d'une filière de récupération d'indium.

Selon l'USGS, les principaux producteurs d'indium raffiné sont la Chine avec 300 tonnes (40 % de la production mondiale) et la Corée du Sud avec 240 tonnes (32 %). Les autres pays producteurs sont le Japon et le Canada (75 tonnes et 60 tonnes respectivement), la Belgique (20 tonnes), le Pérou (10 tonnes) et la Russie (5 tonnes). La France produit également de l'indium purifié à 99,998 % sur le site d'Auby exploité par Nyrstar. La compagnie a mis en place une filière de raffinage d'indium en 2012, mais a dû faire face à un incendie sur la chaîne de production en novembre 2015, stoppant ainsi la production d'indium en 2016. Si la production du site était de 41 tonnes en 2015, les capacités annuelles ont depuis été portées à 72 tonnes.

Selon Nyrstar, la production 2018 s'est élevée à 42,6 tonnes, en hausse de 43 % par rapport à celle de 2017 (29,8 tonnes), alors que l'USGS l'estimait à 50 tonnes. Par ailleurs, la société Nyrstar a fait face à des difficultés financières importantes et a donc été réorganisée en juillet 2019 sur décision de son actionnaire principal Trafigura, entraînant des retards sur la parution du rapport annuel 2019, et donc des chiffres de la production d'indium, que l'USGS estime encore une fois à 50 tonnes pour cette année.

L'indium étant récupéré comme sous-produit minoritaire, il n'existe pas d'évaluation standardisée des réserves et ressources mondiales. Néanmoins, les chercheurs Werner, Mudd & Jowitt ont pu, en 2017, estimer les ressources en indium des gisements de zinc, cuivre et étain dont les teneurs en indium étaient documentées ou supposées. Ils ont abouti à des ressources d'environ 380 000 tonnes d'indium, soit plus de cinq cents années de production au rythme de 2017. Selon cette étude, les principaux pays détenteurs d'indium seraient l'Australie (13 %), le Canada (12 %), la Russie (11 %), la Chine (7 %) et le Pérou (7 %). Comme pour le gallium, au-delà des ressources et réserves en terre, il existe une grande marge de progression pour la production d'indium dans les raffineries, puisque seulement 35 % d'entre elles sont équi-

pées d'une filière de récupération d'indium. En outre, il est théoriquement possible de récupérer l'indium contenu dans les déchets de certaines raffineries de zinc.

À l'instar de nombreux autres petits métaux, les stocks détenus sont très mal évalués. Lors de l'effondrement de la bourse du *Fanya Metal Exchange* en 2015, les stocks atteignaient 3 609 tonnes, soit quasiment trois années de demande. Le *State Reserve Bureau* – représentant les réserves stratégiques chinoises – détiendrait également des stocks d'indium comme le suggère l'achat de plus de 200 tonnes de métal déclaré en 2013.

Le 28 janvier 2019, à la surprise générale, le tribunal populaire de Kunming (province du Yunnan) a pris la décision de vendre deux lots d'indium métal (respectivement 7,6 tonnes et 27,04 tonnes) aux enchères sur le site internet Alibaba, dans le but d'indemniser les investisseurs lésés lors de la chute de la bourse Fanya. Or, cette vente établie à un prix de base de ¥ 1 200/kg (le prix spot était d'environ ¥ 1 430-1 480/kg à cette période) n'a suscité aucune offre et s'est soldée par un échec. Plusieurs mois plus tard, le tribunal de Kunming a remis en vente plusieurs métaux et c'est une compagnie chinoise n'ayant aucun lien avec les métaux (Kunming Rongke New Materials) qui a acquis de nombreux lots, dont

Indium
(en tonnes de métal raffiné)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale (en indium contenu)	844	759	680	714	741	760
Allemagne	10					
Belgique	25	20	20	20	22	20
Brésil						
Canada	65	70	71	67	58	60
Chine	460	350	300	287	300	300
Corée du Sud	150	195	210	225	235	240
France	43	41		30	40	50
Japon	72	70	70	70	70	75
Pérou	14	9	10	10	11	10
Russie	5	4	5	5	5	5

Prix de l'indium
Marché libre européen
(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

la totalité des stocks de gallium, de germanium, de sélénium, de bismuth et d'indium métal. Le 22 janvier 2020, la société Vital, qui fournit du métal et des composants pour de nombreuses industries, dont l'électronique, la pharmacie ou les énergies renouvelables, a admis avoir été derrière les achats effectués par Kunming Rongke New Materials.

Le prix moyen de l'indium (99,99 % Europe), établi directement entre producteurs et utilisateurs, a été de \$ 177/kg en 2019 (– 37 % par rapport à 2018), et a même atteint \$ 138/kg fin décembre, se rapprochant inexorablement des niveaux de 2003.

Peu de substitutions sont recherchées pour l'indium compte tenu de son faible prix et de sa disponibilité actuelle sur le marché. Dans les écrans plats, les oxydes étain-indium des conducteurs transparents peuvent être remplacés par des oxydes de zinc et d'étain dopés, moins chers, mais moins performants, des nanotubes de carbone ou d'argent (plus chers) ou des conducteurs transparents organiques (PEDOT). Les alliages à base de bismuth et d'étain (BiSn) peuvent remplacer ceux contenant de l'indium dans les soudures en fonction de critères de prix et de performance.

Comme pour le gallium, l'essentiel du recyclage est réalisé en boucle courte avec les chutes de fabrication (« *new scrap* ») récupérées lors du procédé de pulvérisation de couches minces ITO. Lors ce processus, seulement 30 % d'indium est déposé sur la cible. Cela laisse donc théoriquement 70 % d'indium récupérable, même si des pertes sont inévitables. En revanche, les teneurs en indium dans les appareils en fin de vie (« *old scrap* ») sont très faibles. Ces faibles teneurs et les prix bas de l'indium n'encouragent donc pas la création d'une filière de recyclage pérenne à court et moyen terme.

La demande en indium devrait continuer à être portée par le secteur des écrans plats qui devrait croître d'environ 5 % d'ici à 2027 selon le cabinet Future Market Insights et dans une moindre mesure par celui des panneaux photovoltaïques en couches minces CIS et CIGS. Pour la plupart des producteurs, il n'y a pas de risques majeurs sur l'approvisionnement en indium à court et moyen terme, bien qu'une grande part soit sous contrôle chinois.

Magnésium (Mg)

En 2019, la production mondiale de magnésium métal est estimée à 1,1 Mt (hors États-Unis) selon l'USGS, en hausse de 10 % par rapport à 2018. Son marché est d'environ \$ 2,7 milliards. Si l'ion magnésium est un élément chimique nécessaire à la vie de la quasi-totalité des êtres vivants, le magnésium sous forme métallique intervient dans certains alliages pour leur donner légèreté, résistance et usinabilité. Le magnésium est considéré par l'Europe et les États-Unis comme un élément très critique, l'essentiel du marché du magnésium primaire se situant en Chine. Selon Roskill, la consommation de magnésium métal était proche de 1 Mt, en 2019. Elle se répartissait en 2018 de la manière suivante :

- 37 % pour des alliages Mg-Al, contenant en moyenne 0,8 % Mg. Ces alliages sont utilisés dans les infrastructures de transport et dans la construction ou pour la fabrication de canettes de boissons ;
- 32 % pour la production de moulages sous pression, contenant généralement 90 % Mg. Les moulages sont utilisés dans le domaine de la construction spatiale, l'automobile, l'aéronautique et dans les applications de défense ainsi que pour la production de châssis d'appareils électroniques haut de gamme (appareils photo, ordinateurs portables, tablettes, etc.) ;
- 15 % pour la désulfuration de l'acier (principal débouché de la poudre de magnésium chinoise) ;
- 10 % comme réducteur pour la fabrication du titane métal à partir du procédé Kroll (principalement en Russie) dont une partie proviendrait de magnésium recyclé ;
- 5 % pour la production de fonte à graphite sphéroïdal (fonte ductile) ;
- 1 % pour d'autres usages, dont des médicaments et compléments nutritionnels.

Le principal potentiel de croissance de la demande est l'allègement des équipements automobiles et aéronautiques, conduisant les secteurs des alliages d'aluminium et des moulages sous pression à connaître des taux de croissance allant de 3 % à 5 % par an selon Roskill. Le magnésium reste également très utilisé par les principaux producteurs de titane pour l'aéronautique, à savoir la Russie, le Kazakhstan et l'Ukraine.

La production totale de magnésium métal de 1,1 Mt estimée par l'USGS n'inclut pas les États-Unis, les données concernant le producteur américain US Magnesium étant confidentielles. L'essentiel du marché du magnésium est en Chine, avec 75 % à 85 % de la production mondiale et presque 50 % de la consommation de magnésium primaire en 2019. Dans ce pays, une grande part de la production est toujours réalisée par le procédé « Pidgeon », très énergivore et consommateur de charbon. Cependant, le gouvernement chinois a intensifié les mesures environnementales en imposant de nouvelles normes sur les émissions de particules. Si ces normes étaient généralisées à toute la Chine, ce procédé devrait alors être abandonné et remplacé par d'autres procédés moins polluants. Le procédé Dow permet d'obtenir du magnésium à partir de l'électrolyse du chlorure de magnésium provenant de saumures ou d'eau de mer. Ce procédé est utilisé par l'Israélien Dead Sea Magnesium et l'Australien Magontec en Chine (bassin de Qaidam). Israël est le cinquième producteur mondial de magnésium, derrière la Chine, la Russie, les États-Unis et le Kazakhstan. Ses exportations de magnésium vers les États-Unis ont été jugées déloyales par le département du Commerce américain suite à une plainte d'US Magnesium

en 2018. L'institution américaine a demandé des droits compensatoires temporaires de 14 % et une taxe antidumping de 219 % sur les importations israéliennes. Selon Argus, ces menaces ont stoppé les importations israéliennes et renforcé les importations de magnésium secondaire du Canada, de Taïwan et de Chine. Fin 2019, la Commission du commerce international américaine a statué que de telles mesures n'avaient pas lieu d'être. Les importations israéliennes sont donc réparties de plus belle. En 2019, une taxe antidumping de 141 % était en vigueur aux États-Unis sur les importations de Chine.

En 2020 et 2021, des capacités de production devraient apparaître hors Chine. Nevada Clean pourrait récupérer 35 000 tonnes par an de Mg de son gisement de dolomie aux États-Unis. L'Australien Latrobe Magnesium a, pour sa part, terminé une étude de faisabilité en 2019. Il a commencé la construction d'une usine en 2020 et prévoit le démarrage en 2021 d'une production de 3 000 tonnes par an à partir du traitement de cendres volantes issues de centrales à charbon. Selon Roskill, ce procédé conduirait à l'émission de 12 tonnes de CO₂ par tonne de magnésium, comparé aux 25 tonnes de CO₂ par tonne de magnésium « Pidgeon ». À terme, l'usine pourrait

Magnésium
(en milliers de tonnes de métal)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	970	972	1000	1100	996	1100
Brésil	16	15	16	15	15	15
Canada				<0,5	<0,5	<0,5
Chine	874	852	871	930	800	900
Corée du Sud	10	10	10	10	10	
États-Unis	40	40	40	40		
Iran			2	3	1	
Israël	26	19	23	23	21	20
Kazakhstan	20	8	10	9	17	25
Russie	18	60	58	40	70	80
Turquie			5	14	4	5
Ukraine		8	5	8	8	10

Prix du magnésium
Marché libre européen
(en dollars/tonne)



(Sources : Mineral Commodity Summaries, British Geological Survey, World Mineral Production pour la production des États-Unis)

produire 40 000 tonnes par an. L'Allemand RWG Power pourrait être intéressé par cette technique pour récupérer le magnésium de ses centrales à charbon. Cependant, le déclin de charbon prévu pour 2038 en Allemagne n'offre pas de perspectives stables. Le Canadien Alliance Magnesium a annoncé lui aussi la construction d'une usine en 2020 et la production de 50 000 tonnes par an en 2021. Elle serait approvisionnée en énergie par une centrale hydroélectrique.

Il n'existe pas d'estimation précise des réserves de magnésium. Le magnésium étant un élément commun dans diverses roches courantes (dolomie, basaltes des planchers océaniques) ainsi que dans l'eau de mer, la ressource géologique en magnésium est très abondante.

Le magnésium est bien recyclé, avec une production secondaire d'environ 200 000 tonnes à 250 000 tonnes, dont la moitié viendrait des États-Unis (70 000 tonnes en boucle courte – *new scrap* – et 30 000 tonnes en boucle longue – *old scrap*). Ceci s'explique en partie par une filière de recyclage des canettes bien établie dans ce pays. En Chine, de nouvelles normes ont été prescrites en 2019 pour encourager le recyclage des résidus de métallurgie. En termes de substituts, l'aluminium et le zinc peuvent remplacer le magnésium, mais au prix d'un gain de poids (moins avantageux). Le carbure de calcium peut être utilisé à la place du magnésium dans la désulfuration du fer et de l'acier.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le prix spot moyen annuel du magnésium métal sur le marché européen a été de \$ 2 454/t en 2019, en baisse de 3 % par rapport à 2018. Ceci illustre un certain équilibre de marché, où les acteurs s'attendent à une demande continue, en particulier de la part du secteur des transports en quête continue d'allègement.

Malgré une offre de plus en plus diversifiée, plusieurs freins industriels demeurent pour étendre encore l'utilisation du magnésium, tels que son inflammabilité et sa corrosion rapide à l'air. Le franchissement de ces barrières industrielles pourrait ouvrir de nouveaux marchés. À plus long terme, les batteries rechargeables au magnésium-ion qui ont une capacité et une densité d'énergie théori-

quement double de celle des batteries lithium-ion pourraient prendre des parts de marché. Mais il reste là aussi de nombreux obstacles techniques à surmonter, comme les problèmes de passivation et le poids supplémentaire par rapport au lithium. À l'instar de très nombreux marchés de matières premières, la pandémie de Covid-19 devrait affecter celui du magnésium en 2020.

Manganèse (Mn)

En 2019, la production mondiale de manganèse s'est élevée à 19 Mt selon l'USGS, le plaçant au rang de cinquième métal industriel le plus important après le fer, l'aluminium, le chrome et le cuivre. L'industrie de l'acier représente plus de 90 % de ses usages ce qui rend ce marché très dépendant de l'activité sidérurgique mondiale. Il est évalué à \$ 36 milliards. Le rôle croissant des oxydes et sulfates de manganèse dans deux technologies de batterie Li-ion pourrait néanmoins modifier une partie de la structuration des producteurs dans un futur proche.

Le manganèse de qualité métallurgique est destiné à la fabrication de ferroalliages qui représente 90 % des usages. Le manganèse joue un double rôle dans la fabrication de l'acier : 30 % de la demande dans ce secteur concerne la désulfuration et la désoxydation de l'acier lors de la fabrication de la fonte et son affinage. Le manganèse se combinant très bien au soufre et à l'oxygène, son ajout permet d'éviter que le soufre ne s'associe au fer, ce qui fragiliserait l'acier par accumulation de cémentite aux joints de grains. Aux dires de nombreux producteurs, le manganèse est « insubstituable » dans cet usage. Le reste de la demande, soit 70 %, concerne la fabrication de ferroalliages rentrant dans la composition finale d'un grand nombre d'aciers. Si les teneurs en manganèse dans les aciers sont très variables et peuvent atteindre 14 %, un acier « classique » contient lui entre 6 % et 7 % de Mn. Les aciers au manganèse sont utilisés essentiellement pour les secteurs du bâtiment et de l'automobile pour leurs propriétés de dureté, d'élasticité, de résistance à l'usure et à l'abrasion. Les principaux ferroalliages à base de manganèse se distinguent en quatre catégories selon la teneur en manganèse, en carbone et en silice :

- *High carbon ferromanganese* (HC Fe-Mn) : 74–82 % Mn, < 7,5 % C, < 1,2 % Si ;
- *Medium carbon ferromanganese* (MC Fe-Mn) : 80–85 % Mn, < 1,5 % C, < 1,5 % Si ;
- *Low carbon ferromanganese* (LC Fe-Mn) : 80–90 % Mn, < 0,75 % C, < 7 % Si ;
- *Ferro-silico manganese* (Fe-Si-Mn) : 65–68 % Mn, < 3 % C, < 21 % Si.

Les débouchés du manganèse de qualité chimique et de qualité batterie sont les alliages spéciaux, le secteur des piles et batteries, et la chimie, soit environ 10 % des usages. Cependant, chaque usage demande une forme et une qualité spécifiques du manganèse.

Sous forme métal, le manganèse est utilisé préférentiellement dans les alliages non ferreux pour les renforcer, tels que ceux d'aluminium et de cuivre. Il est souvent obtenu par électrolyse d'une solution sulfatée manganésifère et affiche une teneur de 99,97 % Mn avec moins de 0,02 % C. Le produit commercialisable est généralement sous forme de copeaux ou paillettes (« *flakes* ») de métal.

Les composés chimiques de manganèse comprennent plusieurs formes, dont la principale est le dioxyde de manganèse, qui est soit naturel (pyrolusite), soit synthétique (dioxyde de manganèse

chimique – CMD ou électrolytique – EMD). De nombreux autres composés existent – le permanganate de potassium, les sulfates, les chlorures de manganèse, etc. – et rentrent dans la composition d'engrais et d'aliments pour animaux, dans l'électronique ou pour le traitement de surfaces des pigments et métaux. Ils représentent néanmoins une part minime des usages.

Le dioxyde de manganèse (MnO_2) rentre donc dans la composition des piles sèches (salines ou alcalines) ainsi que de manière croissante pour les technologies de batteries Li-ion. Il est utilisé comme matériau actif des cathodes de ces batteries pour en augmenter la conductibilité électrique. Il rentre dans la composition des cathodes LMO (Oxyde de Lithium-Manganèse) à hauteur de 65 % en masse, ainsi que celle des cathodes NMC (Oxyde de Nickel-Manganèse-Cobalt) de formule chimique $Li (NiMnCo) O_2$, contenant entre 6 % et 19 % de manganèse en masse en fonction de la configuration retenue. Cette technologie connaît un fort développement notamment en Chine, car elle devient le type de cathode privilégiée pour les batteries Li-ion équipant les appareils électroniques de grande taille, ainsi que de nombreux véhicules et bus électriques. Actuellement, le type NMC 111 (1/3 Ni, 1/3 Mn et 1/3

Manganèse

(en milliers de tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale						
	17 200	17 500	15 700	17 300	18 900	19 000
Afrique du Sud	5 200	5 900	5 300	5 400	5 800	5 500
Australie	3 050	2 450	2 240	2 820	3 480	3 200
Birmanie	98				207	210
Brésil	1 040	1 090	1 080	1 160	1 310	1 200
Chine	3 000	3 000	2 330	1 700	1 200	1 300
Côte d'Ivoire					395	400
Gabon	1 860	2 020	1 620	2 190	2 330	2 400
Géorgie					200	200
Ghana	418	416	553	810	1 360	1 400
Inde	945	900	745	734	961	1 000
Kazakhstan	385	222	212	168	140	130
Malaisie	378	201	266	478	390	420
Mexique	236	220	206	212	210	190
Ukraine	422	410	425	735	517	540
Autres pays	740	678	681	898	397	910

Prix du manganèse Marché libre européen

(en dollars/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Co) prédomine. Cependant, les constructeurs se tournent de plus en plus vers une technologie de type NMC 622 (3/5 Ni, 1/5 Mn et 1/5 Co), voire NMC 811 (4/5 Ni, 1/10 Mn et 1/10 Co). Les prévisions de croissance de la demande en Mn pour cet usage sont donc fortes, ce qui pourrait conduire prochainement à des modifications des filières industrielles, notamment pour produire des sulfates de manganèse purifiés préférés par les fabricants de batteries.

En 2019 et comme évoqué précédemment, la production minière de manganèse a été de 19 Mt selon les données préliminaires de l'USGS contre 18,9 Mt en 2018. Environ 60 % proviennent de trois pays : l'Afrique du Sud (5,5 Mt – 29 %), l'Australie (3,2 Mt – 17 %) et le Gabon (2,4 Mt – 13 %), suivis par le Ghana, la Chine, le Brésil et l'Inde.

Les ressources en Chine étant de médiocre qualité et proches de l'épuisement, le marché est devenu très dépendant de la production d'Afrique du Sud qui a été multipliée par six depuis l'année 2000. Cependant, le pays souffre de problèmes d'infrastructures récurrents, notamment ferroviaires et portuaires. Port Elizabeth est par exemple l'unique infrastructure portuaire pour assurer les exportations de manganèse du pays, mais n'a qu'une capacité limitée et insuffisante pour faire face aux hausses récentes de production. Or, plus de la moitié de la demande issue de Chine a jusqu'ici été assurée en majeure partie par les exportations sud-africaines.

L'offre mondiale de manganèse apparaît toutefois relativement flexible. Elle est contrôlée par un nombre restreint de producteurs, souvent liés

à l'exploitation du minerai de fer. En 2012, après la chute des cours du minerai de fer et du manganèse, beaucoup ont préféré fermer temporairement leurs opérations. La tension ainsi créée sur l'offre a progressivement joué son rôle, réussissant à freiner la chute continue des cours jusqu'en 2016 et à inverser la tendance, aidée par la reprise de la sidérurgie chinoise jusqu'en 2018. Les prix élevés ont encouragé une réouverture des mines et une reprise de la production entre 2017 et 2018. De la même manière, la production de ferromanganèse a augmenté d'environ 20 %.

Les gisements de manganèse sont de manière générale associés aux gisements de fer, car leurs modes de formation sont assez similaires. Les minéraux manganésifères (pyrolusite, rhodochrosite, etc.) ont précipité à partir de l'eau de mer pour former des roches sédimentaires stratifiées. Les minerais à haute teneur (> 35 % Mn) sont principalement utilisés dans les alliages, tandis que ceux à plus basse teneur (< 35 % Mn) sont ajoutés lors de la production de fonte. L'évaluation des ressources et réserves mondiales est difficile et très imprécise. Néanmoins, l'USGS indique que les réserves cumulées de l'Afrique du Sud (260 Mt), de l'Ukraine (140 Mt) et du Brésil (140 Mt) représentent les deux tiers des réserves mondiales estimées à environ 810 Mt. Si l'on ajoute les réserves australiennes (100 Mt) et gabonaises (61 Mt), c'est alors 87 % des réserves mondiales qui sont détenues par ces cinq pays. En Europe, dix pays détiennent des ressources en manganèse, dont la Finlande, le Portugal et la République tchèque. Ces ressources n'ont cepen-

De la mine aux produits

Une fois le manganèse extrait de la mine, il est généralement réparti en trois unités selon sa teneur : qualité métallurgique, qualité chimique et qualité batterie. La qualité métallurgique, qui représente la plus grande partie des concentrés, contient le plus souvent au minimum 48 % Mn et des teneurs variables en éléments traces (Fe, Al, As, P, etc.) qui vont impacter ses caractéristiques finales. La qualité chimique doit contenir environ 35 % Mn tandis que la qualité batterie affiche des teneurs situées entre 44 % et 54 % Mn.

Le manganèse de qualité métallurgique est principalement destiné à la fabrication de ferroalliages (90 % des usages). Les débouchés du manganèse de qualité chimique et de qualité batterie (environ 10 % des usages), soit sous forme métallique ou de composés chimiques manganésifères, sont les alliages spéciaux, le secteur des piles et batteries, et la chimie.

Mercure (en tonnes de métal contenu dans la production minière)						
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	Production mondiale					
	2 370	3 270	2 500	3 800	4 060	4 000
Argentine				25	25	30
Chili						
Chine	1 600	2 800	2 000	3 380	3 600	3 500
Espagne						
États-Unis	15	15	15	15		
Kirghizstan	75	40	50	20	20	20
Mexique	500	300	300	197	234	240
Norvège				20	20	20
Pérou	40	35	40	40	40	40
Russie	50					
Tadjikistan	30	30	30	100	100	100
Autres pays		60	60	12	20	20

(Sources : Mineral Commodity Summaries,
British Geological Survey World Mineral Production pour la production des États-Unis)

dant pas un poids significatif parmi les ressources mondiales.

D'autres réserves de manganèse existent dans les fonds marins du globe. Il s'agit des nodules de manganèse de quelques centimètres de diamètre tapissant des plaines abyssales. Les nodules représenteraient quelques milliards de tonnes de manganèse supplémentaires, mais leur coût d'exploitation et le risque d'impacts importants sur l'environnement rendent leur utilisation très peu probable à court et moyen termes.

Le manganèse n'est pas substituable dans ses principaux usages (sidérurgie, alliages, etc.). Les aciers, ferrailles et alliages contenant du manganèse sont pour partie recyclés, le plus souvent pour être réutilisés au sein de nouveaux alliages.

Les prix du manganèse sont fixés au travers de contrats établis directement entre producteurs et utilisateurs. En 2019, le prix moyen du Mn métal (*flakes* à 99,97 % Mn) a été de \$ 1 904/t, en baisse de 20 % par rapport à 2018 (\$ 2 374/t). Néanmoins, les années 2018 et 2019 ont été mar-

quées par de fortes variations des prix : \$ 1 825/t début janvier 2018 contre \$ 3 015/t entre juillet et août de la même année et \$ 1 580/t en décembre 2019. Cette forte amplitude peut être en partie expliquée par l'abondance soudaine de manganèse sur le marché, liée à la reprise de nombreux producteurs en 2017 et 2018, en particulier en Afrique du Sud et en Chine ainsi qu'au développement des réseaux portuaires et ferroviaires en Afrique du Sud notamment.

La demande future en manganèse sera tirée en grande partie par la croissance de l'urbanisation mondiale, ainsi qu'en moindre mesure par l'électromobilité et le développement des technologies de batteries Li-ion. Cet usage devrait rester très minoritaire en volume (au maximum quelques dizaines de milliers de tonnes de manganèse, soit moins de 10 % du marché). Il pourrait cependant inciter certains producteurs à revoir leurs modèles d'exploitation. La production de manganèse métal « électrolytique » est un secteur en plein développement en Chine. Néanmoins, le sélénium

utilisé en Chine dans cette production (voir la section consacrée au sélénium dans ce chapitre) induit des impuretés potentiellement pénalisantes pour l'usage dans les batteries Li-ion. Certains acteurs européens pourraient alors avoir une carte à jouer. Enfin, l'USGS rapporte que les États-Unis ont repris la constitution de stocks stratégiques de manganèse électrolytique notamment (les derniers stocks de manganèse dataient de 2004). Ce choix fait suite au classement de cette substance comme critique pour l'industrie de la Défense. L'USGS rapporte des stocks évalués à 292 000 tonnes de minerai de manganèse de qualité métallurgique, 193 000 tonnes de ferromanganèse haute teneur en carbone et 432 tonnes de manganèse métal « électrolytique ».

Molybdène (Mo)

En 2019, la production mondiale de molybdène s'est élevée à 290 000 tonnes selon l'USGS. Il est produit pour moitié en produit principal (Chine) et pour moitié en tant que sous-produit du cuivre, en particulier dans les gisements de type porphyre d'Amérique du Sud. Par sa température de fusion élevée (2 617 °C), il fait partie du groupe des cinq métaux réfractaires avec le niobium, le rhénium, le tantale et le tungstène. Il possède en outre une bonne résistance à la corrosion, un faible coefficient de dilatation thermique et une bonne conductivité thermique et électrique. Ces caractéristiques en font un métal de choix pour les ferro-alliages (80 % de la demande). Le marché du molybdène est donc corrélé à celui de l'acier et il est conséquent, puisqu'il est évalué à environ \$ 8 milliards.

Selon l'Association internationale du molybdène (IMO), la demande mondiale était de 265 000 tonnes de molybdène contenu en 2018. L'oxyde de molybdène (MoO_3) de qualité technique contient au minimum 57 % de Mo et est obtenu par le grillage des concentrés miniers. Cet oxyde sert de référence pour la cotation du métal sur le *London Metal Exchange* (LME). Il peut être utilisé tel quel lors de la production de fonte ou subir des traitements pour donner entre autres du ferromolybdène, du molybdène métal et des composés chimiques.

En 2018, 82 % du molybdène sont utilisés pour renforcer la résistance des aciers. La réparti-

tion précise se décompose en aciers dits d'ingénierie (42 %), aciers inoxydables (23 %), aciers pour l'outillage (7 %), la production de fonte (7 %) et les superalliages (3 %). Les autres usages du molybdène concernent les composés chimiques (13 %) utilisés principalement pour la fabrication de catalyseurs dans l'industrie du raffinage d'hydrocarbures, des pigments et des peintures et, enfin, le molybdène sous forme métallique (5 %) pour les applications électriques.

Les domaines d'utilisation du molybdène sont extrêmement variés, ce qui est un atout pour la stabilité générale du marché. Ils comprennent l'industrie pétrolière et gazière (activités de forages, installations sous-marines, construction des raffineries, catalyseurs), les engrais (micronutriments), l'automobile (certains composants du moteur et de la transmission), l'industrie agroalimentaire (cuves, tuyaux résistants à la corrosion), la génération électrique (centrales nucléaires, turbines à vapeur, à gaz), les transports (pièces de trains, de réacteurs d'avion), la construction (tunneliers, fers à béton, ponts, système de ventilation) et la défense.

Selon le groupe CPM, le taux de croissance annuel moyen de la demande en molybdène devrait être de 5 % d'ici 2025. Les fondamentaux sont robustes, en particulier sur le marché des aciers inoxydables. Cette demande est en particulier tirée par l'amélioration de la qualité des aciers chinois et indien, matérialisée entre autres par une hausse de la teneur en molybdène. La Chine est ainsi passée de 6 kg de molybdène métal par tonne d'acier en 2005 à 8,6 kg Mo par tonne d'acier en 2016, mais elle demeure encore loin des standards aux États-Unis (40 kg Mo par tonne d'acier).

En 2019 et selon les données préliminaires de l'USGS, la production minière de molybdène a été en baisse par rapport à 2018 (données révisées à 297 000 tonnes). La production minière mondiale provient à 90 % de cinq pays : la Chine (130 000 tonnes, soit 45 %), le Chili (54 000 tonnes, soit 19 %), les États-Unis (44 000 tonnes, soit 15 %), le Pérou (28 000 tonnes, soit 10 %) et le Mexique (16 000 tonnes, soit 5,5 %).

Le molybdène est produit pour moitié comme produit principal et pour moitié en sous-produit ou coproduit du cuivre, de l'or et plus rarement du tungstène. À titre d'exemple, les États-Unis possèdent deux mines produisant du molybdène en

Molybdène

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

2014 2015 2016 2017 2018 2019**Production mondiale****281 000 235 000 279 000 296 600 297 000 290 000**

Argentine			800	450	600	600
Arménie	7 100	7 200	6 300	5 800	5 000	5 400
Canada	9 700	2 300	2 710	5 290	4 680	4 700
Chili	48 800	52 600	55 600	62 500	60 200	54 000
Chine	103 000	83 000	130 000	130 000	133 000	130 000
États-Unis	68 200	47 400	35 800	40 700	41 400	44 000
Iran	4 000	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500
Mexique	14 400	11 300	11 900	14 000	15 100	16 000
Mongolie	2 000	2 000	2 440	1 800	1 800	1 800
Ouzbékistan	530	450	450	450	200	200
Pérou	17 000	20 200	25 800	28 100	28 000	28 000
Russie	4 800	4 500	3 000	3 100	2 800	2 800
Turquie	1 300	900	450	900	900	900

**Prix du cadmium
Marché libre européen**

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

produit principal et sept mines en sous-produit du cuivre. La quasi-totalité de la production chinoise provient de mines où le métal est le produit principal. De manière générale, les mines exploitant le molybdène en produit principal servent de variable d'ajustement de l'offre face aux baisses de prix du marché, les mines exploitant en sous-produit pouvant répercuter cette baisse sur les autres métaux associés.

L'USGS évalue les réserves mondiales de molybdène à 18 Mt, dont 8,3 Mt pour la Chine (46 % des réserves mondiales). En additionnant les réserves chinoises à celles des États-Unis (2,7 Mt), du Pérou (2,9 Mt), du Chili (1,4 Mt) et de la Russie (1 Mt), le total est porté à 91 %. Les ressources en terre sont estimées à environ 20 Mt, auxquelles pourraient venir s'ajouter les ressources sous-marines comme les nodules polymétalliques et les encroûtements.

Le molybdène est recyclé à partir des déchets de la catalyse, des aciers et des superalliages, ce qui représente entre un quart et un tiers du molybdène total produit (primaire et secondaire). Comme il n'existe pas de filière de recyclage permettant de séparer le molybdène des autres métaux contenus dans l'acier, la réutilisation des déchets se fait en général pour un même secteur (les aciers automo-

biles, par exemple) après reconditionnement pour éviter les pertes de performance.

Le molybdène est peu substitué dans ses usages du fait de ses caractéristiques très intéressantes et surtout d'une offre variée et d'un prix relativement faible. Néanmoins, il pourrait être remplacé dans les alliages par le bore, le chrome, le niobium et le vanadium, dans les outils par le tungstène et dans les matériaux réfractaires, par le graphite, le tantale, ainsi que le tungstène à nouveau.

Le molybdène est coté au LME de Londres depuis 2010. Le prix moyen de l'oxyde technique de molybdène (concentré grillé, 57 % Mo) a été de \$ 25,09/kg en 2019, en baisse de 4,7 % par rapport à 2018 (\$ 26,32/kg). Du fait de ses usages dans l'industrie de l'énergie, le prix du molybdène est relativement corrélé à ceux du pétrole et du gaz, ainsi qu'aux activités des activités d'exploration (offshore et en puits horizontaux). Le ralentissement de ces dernières et le poids de la guerre commerciale sino-américaine expliquent en partie la baisse observée en 2019.

En termes d'exploration, à moyen terme, l'ouverture de nouvelles mines de cuivre, stimulée par la demande croissante pour la mobilité électrique et le stockage d'énergie, devrait induire une

hausse de la production mondiale de molybdène en sous-produit de ces mines. La tendance semble s'accélérer, en particulier en Amérique du Sud. En revanche, l'un des gros projets emblématiques – Pebble dans le sud-est de l'Alaska – subit de nombreux rebondissements. En mai 2018, la société First Quantum Minerals a annoncé mettre fin à son accord d'investissement dans le projet situé près de Bristol Bay. Le projet est désormais détenu à 100 % par Northern Dynasty Minerals, une petite société d'exploration canadienne. Trois des plus grandes sociétés minières du monde – Mitsubishi Corporation, Anglo American et Rio Tinto – ont déjà conclu par le passé que le projet Pebble était « un mauvais investissement » et ont abandonné le projet. Ce projet controversé concerne l'un des plus grands gisements de cuivre-or-molybdène non développés au monde et a déjà nécessité un investissement de plus de \$ 800 millions. Les ressources ont été évaluées à 2,5 Mt Mo et 36 Mt Cu.

Niobium (Nb)

Pour l'année 2019, la production mondiale du niobium est estimée à 74 000 tonnes par l'USGS, soit une augmentation de 8,5 % par rapport à 2018. Cette hausse a été tirée par une augmentation de la production au Brésil en réponse à la demande chinoise pour des aciers à haute limite d'élasticité (HLE). Le Brésil compte pour 88 % de la production totale.

Le ferroniobium (FeNb) – un alliage qui a une teneur en niobium de 60 % à 65 % – représente environ 90 % des usages du niobium. La transformation des minerais contenant le niobium en ferroniobium conduit à des usages ultra-majoritaires dans l'industrie de l'acier : aciers HLE, aciers inoxydables, réfractaires. Les principaux sont les aciers à haute limite d'élasticité ou aciers HLE microalliés, contenant 0,5 % Nb. Ils sont utilisés à 45,2 % pour la construction, 23 % pour l'automobile, 16 % pour les pipe-lines et 6 % pour certains aciers inoxydables. L'utilisation de pièces en acier HLE permet soit d'améliorer considérablement, à taille égale, la résistance mécanique de la pièce (de 20 % à 30 %), soit d'en réduire la taille et le poids de l'ordre de 30 %.

Une petite part de ferroniobium très pur (99 % Nb), produit sous vide, est également utilisée pour

les superalliages composant les parties chaudes des réacteurs d'avion ou des turbines à gaz. Cet usage représente environ 3 % du marché du niobium, à parts égales avec l'utilisation du niobium métal pour la production de supraconducteurs et de dérivés chimiques utilisés pour la production de céramiques et de catalyseurs.

Selon les données préliminaires de l'USGS, le Brésil aurait produit 65 000 tonnes de niobium en 2019, soit 88 % de la production mondiale. L'industrie et le marché du niobium sont fortement intégrés, avec pour principal acteur la société brésilienne CBBM assurant près de 80 % de la production mondiale de niobium et ferroniobium. Sa mine principale est la mine d'Araxá, dans l'État du Minas Gerais, avec des teneurs en niobium dans le minerai (sous forme de pirochlore) de l'ordre de 10 %, comparé à seulement 1 % pour le gisement de Boa Vistas. Deuxième source mondiale, la mine de Boa Vistas est également située au Brésil dans l'État de Goiás. Elle est exploitée depuis 2016 par un autre acteur d'importance, la société d'État China Molybdenum, avec une capacité d'environ 9 000 tonnes de niobium métal. Enfin, l'autre pays ayant une production industrielle significative est le Canada, avec la mine de Niobec située au Québec. Elle est exploitée depuis 2015 par Magris Resources, avec une production estimée à 7 600 tonnes Nb, soit 10,3 % de la production mondiale.

Le complément de l'offre minière mondiale est issu de l'exploitation artisanale (où le niobium et le tantale sont portés par la colombite, la tantalite ou le coltan) en particulier au Nigeria, au Rwanda, en République démocratique du Congo et en Sierra Leone. Or, les minerais issus du Nigeria contiennent une part de radioactivité qui crée de lourdes contraintes pour l'exportation de concentrés.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le niobium est l'un des rares métaux ayant vu son prix augmenter en 2019, le prix annuel moyen du ferroniobium (65 % Europe) s'établissant à \$ 41,54/kg contre \$ 38,57/kg en 2018, soit une hausse de 7,7 % sur l'année.

Le principal facteur de cette hausse est lié aux enjeux de compétition avec le vanadium pour la fabrication d'aciers HLE en Chine. En effet, le

pays a adopté des normes de construction plus strictes, en particulier le changement des standards pour les constructions antisismiques, avec une résistance à la traction minimum de 600 MPa au lieu de 335 MPa auparavant. Celles-ci ont été mises en œuvre à partir de novembre 2018. Atteindre ces caractéristiques demande d'ajouter de plus grandes quantités de vanadium et de niobium lors de la production des aciers HLE. Sous forme de ferrovanadium (FeV) et de ferroniobium (FeNb), les deux éléments sont relativement bien substituables. L'avantage du vanadium est qu'il permet une amélioration linéaire de la limite d'élasticité en fonction des quantités ajoutées, tandis qu'avec le niobium cette relation n'est pas linéaire et demande un contrôle très précis au moment du procédé de raffinage des grains de l'acier, au risque de former des microstructures fragilisant l'acier (bainite). La substitution du FeV par le FeNb est donc possible, mais elle s'effectue :

- d'une part, à usine par usine sur des critères avant tout techniques ;

- d'autre part, lorsque le prix du FeV dépasse celui du FeNb durant une longue période.

Ce fut le cas en 2019, ce qui explique les bonnes performances du métal avec une hausse de la production et des prix du niobium sur l'année.

Les perspectives de croissance de la demande sont bonnes, assurées en premier lieu par l'industrie sidérurgique, ce qui a incité le principal acteur du marché, CBMM, à étendre sa capacité de pro-

duction à 150 000 tonnes de FeNb (soit environ 90 000 tonnes de Nb contenu). Elle sera effective au quatrième trimestre 2020. Le groupe pourrait également envisager une nouvelle expansion à 225 000 tonnes de FeNb. Elle dépendra toutefois fortement du développement futur de l'industrie sidérurgique en Chine, mais également de la concrétisation de nouvelles applications du niobium.

Ainsi, CBMM cherche désormais à développer de nouvelles applications pour le niobium afin de sécuriser de nouvelles sources de revenus. L'utilisation du niobium dans des générations futures de batteries est l'une des pistes étudiées par le groupe, avec notamment des recherches sur le graphène, un matériau dérivé du graphite présentant d'intéressantes synergies avec le niobium. CBMM est également partenaire de Toshiba depuis quelques années pour la recherche sur les anodes en niobium-oxyde de titane (NTO). Un investissement de \$ 7,2 millions pour une usine pilote au Japon a été décidé. En 2019, le budget de recherche et développement (R&D) de CBMM pour le segment des batteries était d'environ \$ 10 millions, ce qui représente une proportion considérable sur le budget total de R&D de l'entreprise.

Selon Roskill, le marché du niobium dans les batteries pourrait atteindre 3 000 tonnes de Nb d'ici le milieu de la prochaine décennie. Un autre marché potentiel de croissance est celui du niobium nanocristallin, actuellement estimé à 1 200 tonnes de Nb contenu.

Niobium

(en tonnes de métal contenus dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	55 900	64 300	63 900	69 100	68 200	74 000
Brésil	50 000	58 000	57 000	60 700	59 000	65 000
Canada	5 480	5 750	6 100	6 980	7 700	7 600
Autres pays	420	570	800	1 410	1 460	1 500

Prix du ferro-niobium 65 % Nb Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Selon l'USGS, les réserves connues de niobium seraient supérieures à 13 Mt. La ressource mondiale n'a pas été estimée, mais elle paraît importante. Le plus grand gisement mondial connu est Seis Lagos, dans l'État brésilien d'Amazonas, avec une ressource d'environ 56 Mt.

En décembre 2017, la société NioCorp a, quant à elle, publié l'étude de faisabilité de la mise en exploitation du gisement de niobium et scandium d'Elk Creek au Nebraska. Celui-ci contient une ressource indiquée de 418 000 tonnes de Nb. En 2019, les plans de construction de la mine ont été mis à jour avec pour objectif d'augmenter la durée de vie de la mine de quatre ans et de réduire les impacts environnementaux de son exploitation, notamment en évitant les rejets d'eau dans la rivière Missouri. La construction pourrait commencer en 2021.

Rhénium (Re)

En 2019, la production mondiale de rhénium s'est élevée à 49 tonnes selon l'USGS. Le rhénium n'est obtenu qu'en sous-produit du molybdène, lui-même en grande partie sous-produit du cuivre. C'est un métal très réfractaire avec une température de fusion de 3 180 °C, la plus élevée des métaux après le tungstène. Les principales applications du rhénium sont de deux types : au sein de superalliages et en catalyse dans l'industrie pétrolière. L'une des particularités de ce marché

est la quasi-absence d'acteurs chinois le long de la chaîne de valeurs, fait rare dans le monde des petits métaux.

Les superalliages à base de nickel représentent 80 % de la demande mondiale, contenant de l'ordre de 3 % Re en poids. Les catalyseurs en pétrochimie arrivent en deuxième position avec environ 15 % des usages. Les autres applications comme les alliages Mo-Re et W-Re représentent 5 % des usages du rhénium.

Le perrhéate d'ammonium (APR) est le principal produit intermédiaire. Il est utilisé pour obtenir l'acide perrhénique et le rhénium métal sous forme de poudres, pellets ou briquettes. Le rhénium rentre dans la composition des superalliages à base de nickel notamment pour la fabrication des aubes de turbines pour la partie chaude des réacteurs d'avions civils et militaires. Grâce au rhénium, des températures allant jusqu'à 1 500 °C peuvent être atteintes, augmentant à la fois la poussée des réacteurs ainsi que la longévité de ces pièces tout en diminuant la consommation en kérosène du réacteur. Tirée par la demande aéronautique, la demande en superalliages devrait continuer de croître. En 2018, Airbus estimait un besoin de 37 390 nouveaux avions entre 2018 et 2037 en raison du doublement de la flotte mondiale de passagers durant cette période.

En pétrochimie, le rhénium est l'un des catalyseurs clés dans les réactions de reformage cataly-

Rhénium
(en kilos de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	44 700	49 400	51 600	48 700	48 600	49 000
Arménie	351	350	350	300	281	280
Chili	25 000	26 000	27 000	27 000	27 000	27 000
Chine		2 400	3 000	2 500	2 500	2 500
États-Unis	8 500	7 900	8 440	8 200	8 220	8 400
Kazakhstan	300	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
Ouzbékistan	900	1 000	1 000	460	460	400
Pologne	7 600	8 900	9 000	9 300	9 090	9 300
Autres pays	2 000	1 800	1 800			

Prix du rhénium
Marché libre européen
(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

tique du pétrole, opération chimique servant à valoriser une fraction du pétrole (le naphtha lourd) en essence. La demande de rhénium dans cet usage reste stable, la part des substituts comme les catalyseurs à base de platine n'ayant pas augmenté significativement.

Il n'existe pas de production minière de rhénium à proprement parler. La production primaire est métallurgique puisque le rhénium est récupéré lors du traitement des fumées résultant du grillage de la molybdénite (sulfure de molybdène). Si la production de rhénium a été de 49 tonnes en 2019 (contre 48,6 tonnes en 2018) selon les données préliminaires de l'USGS, elle serait, selon Roskill, de l'ordre de 75 tonnes, toujours en 2019.

L'industrie est fortement concentrée. Les principaux producteurs de rhénium sont en effet Molymet et Codelco au Chili. Ils totalisent une offre de 27 tonnes de rhénium récupérées dans les résidus de fonderie de leurs opérations à travers le monde (incluant également celles de Belgique, du Mexique et du Pérou). En Pologne, l'acteur KGHM a produit 9,3 tonnes de rhénium en 2019, suivi par Freeport McMoran aux États-Unis avec 8,4 tonnes. Les producteurs de moindre importance sont situés en Chine et au Kazakhstan, notamment.

L'USGS évalue avec de grandes incertitudes les réserves mondiales de rhénium à 2 400 tonnes dont 1 300 tonnes pour le Chili (54 % des réserves mondiales). Les autres pays détenteurs de réserves significatives sont les États-Unis avec 400 tonnes, la Russie avec 310 tonnes et le Kazakhstan avec 190 tonnes. L'USGS estime les ressources mondiales à 11 000 tonnes, dont 5 000 tonnes aux États-Unis.

Les prix du rhénium sont établis par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Plusieurs produits sont distingués selon leurs caractéristiques :

- Rhénium métal (pellets à 99,9 % Re) : prix moyen en 2019 de \$ 1 270/kg, en baisse de 18,4 % par rapport à 2018 ;
- Perrhéate d'ammonium (APR), *basic grade* (69,2 % Re) : prix moyen en 2019 de \$ 820,8/kg, en baisse de 16,7 % par rapport à 2018 (\$ 985,6/kg) ;
- Perrhéate d'ammonium (APR), *catalyst grade* (>69,2 % Re) : prix moyen en 2019 de \$ 1 242/kg, en baisse de 16,8 % par rapport à 2018.

Un événement majeur du marché du rhénium survint en août 2008 lorsque son prix atteignit \$ 12 500/kg suite à un phénomène spéculatif de nature industrielle. En 2019, l'évolution des prix est contrastée, marquée par une chute pour tous les produits. Désormais mature, l'industrie du recyclage du rhénium crée une certaine stabilité et joue sur des niveaux de prix relativement bas. Le recyclage s'est en effet grandement amélioré en quelques années, représentant désormais près de la moitié de l'approvisionnement total. Les principaux producteurs de rhénium secondaire se situent au Japon, en Allemagne, aux États-Unis ainsi qu'au Kazakhstan, en Ouzbékistan et en Arménie. En France, un acteur est concerné avec l'entreprise Eurotungstène Poudres, désormais filiale d'Umicore.

En outre, depuis la crise de 2008, de nombreuses tentatives ont été réalisées pour substituer le rhénium dans ses applications majeures, notamment en produisant des superalliages avec moins de rhénium (General Electric, par exemple) ou sans rhénium (Safran, par exemple) en le remplaçant par d'autres métaux (W, Mo, Co, etc.) avec des performances relativement similaires. Ces recherches continuent avec, à la clé, un nouveau brevet déposé en janvier 2020 par le producteur de superalliages Cannon-Muskegon, montrant un abaissement de la teneur en rhénium des superalliages monocristallins à 1,4 %-1,6 % Re.

Le rhénium est un marché de niche, équilibré, et contrôlé par un petit nombre d'acteurs. Une des particularités de ce marché est que la Chine n'y joue quasiment aucun rôle, fait rare dans le monde des petits métaux. La filière européenne est, à l'inverse, bien structurée, avec notamment des investissements conséquents de la part du groupe KGHM pour maintenir sa place sur le marché et auprès des constructeurs de moteurs aéronautiques (Pratt & Whitney, RollsRoyce, Cannon Muskegon, General Electric) qui devraient continuer de tirer la demande à moyen terme. Du côté de l'offre primaire, aucun projet majeur de rhénium n'est en cours. La croissance de la demande sera principalement satisfaite par les filières de recyclage bien développées.

Scandium (Sc)

Plus abondant que le plomb dans la croûte terrestre, le scandium est sûrement le métal le moins

produit au monde, avec un marché n'excédant pas 20 tonnes en 2019. La valeur de son marché est estimée à \$ 60 millions. Souvent classé parmi les terres rares, le scandium a pourtant des caractéristiques géologiques et industrielles distinctes, en particulier du fait de son très faible rayon ionique. Ses autres particularités sont une faible densité ($2,99 \text{ g/cm}^3$, proche de celle de l'aluminium) et un haut point de fusion ($1\,541 \text{ }^\circ\text{C}$). Le marché du scandium peut être qualifié d'immature. À ce jour, son prix élevé et sa faible disponibilité ont été des obstacles à son utilisation. Réciproquement, le marché de niche qu'il représente n'a pas permis les investissements nécessaires pour développer substantiellement l'offre. Cette situation pourrait changer dans les années à venir, de nouvelles sources de production se concrétisant en 2019.

Le scandium est utilisé sous deux formes principales, toutes deux situées dans des domaines technologiques très porteurs. De manière principale, le scandium est utilisé pour le stockage stationnaire d'énergie au sein des piles à combustible à oxydes solides de haute température (SOFC). Il intervient comme stabilisateur de l'électrolyte avec des performances de conduction électrique très intéressantes. D'autre part, les alliages aluminium-scandium (Al-Sc) – parmi les plus légers et les plus résistants connus – sont utilisés dans le secteur du transport (aéronautique civile et militaire, automobile, etc.), ainsi que dans les équipements sportifs de haute qualité (cycles, clubs de golf, battes de baseball, etc.), les lampes halogènes, mais également les équipements militaires. L'ajout de petites quantités de scandium améliore considérablement les propriétés thermomécaniques de l'aluminium tout en conservant la légèreté du matériau. Le scandium affine la structure cristalline de l'aluminium si bien que le métal allié peut être soudé sans perte de résistance. Il permet le moulage de formes complexes et augmente la résistance à la corrosion et la conductivité thermique de l'alliage. Ainsi, le scandium pourrait trouver des applications dans l'impression 3D de pièces de haute technicité.

Les concentrations naturelles de scandium dans la croûte terrestre sont trop faibles pour former à elles seules des gisements exploitables. Il n'y a ainsi pas de mines de scandium, celui-ci étant récupéré uniquement en sous-produit du trai-

tement métallurgique d'autres substances (acier, tungstène, titane, nickel, cobalt, zirconium, étain, uranium), voire dans les filières de transformation du charbon et des phosphates. En 2019, l'USGS indique une production mondiale avoisinant les 15 à 20 tonnes, sous forme d'oxyde de scandium (Sc_2O_3). Une fraction de cette production (soit quelques dizaines de kilos) aurait effectivement été transformée en scandium métal.

La production chinoise s'élèverait à 10 tonnes par an d'oxyde de scandium (Sc_2O_3), en tenant compte de la production de scandium *via* la récupération des déchets issus de la fabrication des oxydes de titane et de l'acier. En deuxième position, la Russie produirait entre 3 tonnes et 5 tonnes par an de Sc_2O_3 , principalement à partir des résidus miniers d'uranium et lors du traitement de phosphates. Enfin, le Kazakhstan et l'Ukraine produiraient annuellement entre 100 kg et 200 kg de Sc_2O_3 , provenant des résidus de traitement de l'uranium.

Bien qu'il soit très peu récupéré, les ressources de scandium sont abondantes. C'est bien la forte dilution de cette substance dans la croûte terrestre qui limite son exploitation.

Le scandium peut être substitué par l'yttrium pour certaines applications. Une très faible quantité de scandium se retrouve dans l'aluminium recyclé, sans qu'il soit séparé.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix du scandium sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Les prix dépendent beaucoup de la forme et de la qualité recherchée. En 2017, le prix du scandium à 99,9 % était estimé à \$ 5 500/kg, alors que le prix du Sc_2O_3 s'établissait à environ \$ 1 500/kg. Il est généralement vendu en lots individuels de quelques kilogrammes.

En 2019, les développements visant à augmenter la production de scandium montrent un réel dynamisme. En 2017, la société China Minmetals a lancé la construction d'un site d'extraction de nickel-cobalt-manganèse avec récupération du scandium. Elle prévoit une production annuelle de 20 à 40 tonnes de Sc_2O_3 , après une phase pilote dont l'avancée n'est pas connue.

En Inde, la récupération de scandium en sous-produit de la production de dioxyde de titane

est envisagée dans l'État d'Odisha, avec le projet de construction d'une usine dotée d'une capacité de 2,4 tonnes par an de Sc_2O_3 . Aux Philippines, l'opérateur japonais Sumitomo, exploitant le cobalt et le nickel latéritique par un procédé de lixiviation acide à haute pression (HPAL), a commencé la récupération du scandium avec la production d'un concentré intermédiaire (oxalate de scandium), converti en oxyde à la raffinerie Harima au Japon. La production devrait être de 7,5 tonnes par an de Sc_2O_3 . En Russie, les recherches pour la récupération du scandium sont concentrées sur le traitement des boues rouges issues du raffinage de l'alumine, notamment par la compagnie Rusal, l'un des premiers producteurs d'aluminium au monde. Dans les monts Oural, une usine pilote a engagé une étude de faisabilité pour la production annuelle de 3 tonnes de Sc_2O_3 .

Aux États-Unis se trouve le projet de production de scandium le plus avancé : Elk Creek (Société Niocorp), dont l'étude de faisabilité publiée fin 2017 montre que les réserves probables de cette carbonatite contiennent 2 400 tonnes de Sc selon l'USGS. La rhyolite de Round Top (Texas) contient également du scandium. Ce projet pourrait être relancé par la compagnie Texas mineral resources, qui a par ailleurs démontré la production de terres rares dont du scandium à partir de résidus miniers du charbon. Ucore Rare Metals continue le développement de son projet Bokan en Alaska.

En Australie, s'il n'y a aucune production minière de scandium à ce jour, une petite dizaine de projets sont en cours d'évaluation économique ou d'études de faisabilité. Parmi ces derniers, quatre se distinguent par leur avancement :

- Le projet Nyngan de la compagnie Scandium International Mining Corp prévoit un début de production fin 2019, sous réserve de financement. L'objectif est de produire annuellement 38,5 tonnes de Sc_2O_3 en 2021. L'étude de faisabilité fait état de réserves estimées à 1,44 Mt contenant environ 590 tonnes de Sc en utilisant une teneur de coupure efficace de 155 ppm Sc (parties par million).

- Le projet Sunrise (anciennement Syerston), de la compagnie Clean Teq, a finalisé une étude de faisabilité définitive permettant d'entamer la période de financement du projet avant construc-

tion en 2019. La production de scandium visée de 50 tonnes par an est en sous-produit du nickel et du cobalt. Les réserves prouvées et probables seraient de 7 800 tonnes de Sc, soit la plus grande ressource mondiale en scandium publiquement documentée à ce jour.

- Le projet SCONI (Scandium-Cobalt-Nickel) de la compagnie Australian Mines Limited a programmé le début des travaux de construction de la mine en 2019 et une production ne démarrant pas avant 2021. Une production annuelle de 74 tonnes est prévue sur trente ans avec des réserves de 2 000 tonnes en 2019.

- Le projet Owendale de Platina Resources a terminé une étude de faisabilité en 2018. Il est prévu une production de 20 à 40 tonnes par an de Sc_2O_3 extraites par HPAL. Les réserves seraient de 3 500 tonnes de Sc_2O_3 .

D'autres projets susceptibles de produire du scandium sont en cours en Turquie et en Europe. Si ces projets venaient à aboutir, le marché pourrait alors se transformer.

Sélénium (Se)

En 2019, la production de sélénium mondiale a été estimée à 2 800 tonnes par l'USGS (hors États-Unis). La taille de son marché, à l'instar de son prix, a beaucoup varié et est aujourd'hui estimée aux alentours de \$ 57 millions. Le sélénium a des propriétés chimiques voisines de celles du soufre et du tellure. Il est essentiellement extrait en sous-produit du cuivre et est utilisé pour ses propriétés semi-conductrices, photosensibles et photoélectriques, ainsi que comme oligo-élément pour les humains ou le bétail. Si les applications métallurgiques constituent la plus grande part de ses usages (40 %), l'ajout de sélénium dans les engrais est obligatoire dans certains pays, par exemple en Finlande dont les sols sont très déficitaires en cet oligo-élément indispensable à la santé humaine et animale. Le marché du sélénium est très opaque et les chiffres publiés sont souvent contradictoires. Les données ci-dessous sont donc indicatives.

La demande mondiale en sélénium serait d'environ 3 500 tonnes. Elle est répartie entre les usages suivants : 40 % pour des applications métallurgiques (dont la production électrolytique du

manganèse), 25 % pour l'industrie du verre, 10 % dans l'agriculture, 10 % pour la chimie et les pigments, 10 % dans l'électronique et 5 % en usages divers. En métallurgie, le sélénium peut remplacer le dioxyde de soufre lors de l'électrolyse du manganèse. L'usage du dioxyde de sélénium permet d'y accroître l'efficacité et la productivité tout en diminuant la consommation d'énergie. L'USGS reporte une augmentation rapide du nombre de producteurs chinois de manganèse électrolytique : ils étaient 49 en 2018, contre 51 en 2017 et 41 en 2016.

L'autre usage important du sélénium concerne l'industrie du verre. Le sélénium y est utilisé pour décolorer les verres (neutralisation des teintes verdâtres dues à des impuretés ferrugineuses), colorier les verres en rouge (feux de signalisation), mais également pour réduire la transmission thermique des vitres dans les voitures ou les bâtiments, un marché en constante augmentation à l'échelle mondiale.

Le sélénium rentre aussi dans la composition des redresseurs de courant, des cellules photoélectriques et des cellules photovoltaïques en couches

minces (CIS – diséléniure de cuivre et d'indium et CIGS – disulfoséléniure de cuivre, d'indium et de gallium). Malgré une utilisation aujourd'hui très minoritaire des technologies photovoltaïques en couches minces vis-à-vis de cellules photovoltaïques au silicium, ces dernières continuent néanmoins à être utilisées pour les applications requérant une plus grande flexibilité et un plus haut rendement (voir la section consacrée au gallium). Le sélénium est enfin utilisé comme oligo-élément et ajouté dans les engrais et dans l'alimentation animale.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production raffinée de sélénium s'est inscrite en hausse de 3 % entre 2018 et 2019. Les données concernant les États-Unis sont cependant gardées confidentielles. Les principaux producteurs mondiaux sont la Chine (950 tonnes), le Japon (750 tonnes) et l'Allemagne (300 tonnes). Ces trois pays représentent quasiment les trois quarts de la production mondiale.

Le sélénium possédant des propriétés chimiques similaires à celles du soufre, il se concentre préférentiellement dans les sulfures des gisements de

Sélénium (en tonnes)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale de métal						
	2 435	2 200	3 270	2 700	2 810	2 800
Allemagne	700	660	700	300	300	300
Belgique	200	200	200	200	200	200
Canada	150	154	176	49	61	60
Chili	70					
Chine			920	930	930	930
États-Unis	160	90	116	122		
Finlande	75	94	96	105	100	100
Inde						
Japon	760	773	752	729	768	770
Pérou	40	40	45	45	45	45
Philippines						
Pologne	80	90	87	88	76	70
Russie	150	135	145	150	150	150
Serbie						
Suède			100	20	90	50
Turquie				50	50	50
Autres pays	50	50	47	47	44	40

Prix du sélénium Marché libre européen (en dollars/lb)



(Source : US Geological Survey Minerals Yearbook)

cuivre, nickel-cuivre sulfuré, de plomb ou de zinc. Cependant, il n'existe pas de production minière de sélénium. Il est récupéré essentiellement lors du retraitement des boues anodiques issues du raffinage du cuivre, et minoritairement en sous-produit des gisements de plomb-zinc. Ce phénomène explique la corrélation entre les pays producteurs de sélénium et les fonderies/raffineries de cuivre. Dans la plupart des cas, la production est assurée par traitement des boues résiduelles s'accumulant dans les cellules d'électrolyse à la suite du raffinage des anodes de cuivre obtenues par la voie pyrométallurgique à partir de concentrés importés. La Chine, le Japon sont les acteurs dominants du raffinage du cuivre, certains acteurs européens étant également importants : Allemagne (Aurubis), Belgique (Umicore), Finlande (Boliden), Pologne (KGHM) et Suède (Boliden).

L'USGS évalue avec de très grandes incertitudes les réserves mondiales de sélénium, les teneurs en sélénium dans les minerais n'étant que rarement renseignées. Celles-ci s'établiraient à 99 000 tonnes Se, dont 26 000 tonnes en Chine (26 % des réserves mondiales). Les autres pays détenteurs de réserves significatives sont la Russie, le Pérou et les États-Unis avec respectivement 20 %, 13 % et 10 % des réserves mondiales selon ces données. Des ressources conséquentes de sélénium se trouveraient également dans les charbons avec des teneurs comprises entre 0,5 et 12 ppm.

Lors de la chute de la bourse du *Fanya Metal Exchange* en 2015 (voir l'encadré consacré à ce sujet), le gouvernement chinois avait reporté des stocks de sélénium de 337,8 tonnes, soit environ un mois de la production mondiale de 2018. En janvier 2020, le tribunal de Kunming a remis en vente plusieurs métaux et c'est une compagnie chinoise n'ayant aucun lien avec les métaux (Kunming Rongke New Materials) qui a acquis de nombreux lots, dont la totalité des stocks de gallium, de germanium, de sélénium, de bismuth et d'indium métal. Le 22 janvier 2020, la société Vital, qui fournit du métal et des composants pour de nombreuses industries, dont l'électronique, la pharmacie ou les énergies renouvelables, a admis avoir été derrière les achats effectués par Kunming Rongke New Materials et donc du lot de sélénium, soit 337,8 tonnes.

Le prix du sélénium est établi par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Le prix

moyen du sélénium (teneur de 99,5 %) a été de \$ 20,4/kg en 2019, en baisse de 48 % par rapport à 2018 (\$ 39,1/kg). Les prix du sélénium ont fortement varié ces dernières années puisqu'ils étaient de \$ 175,3/kg en avril 2011, mais de seulement \$ 11/kg en mai 2016. Il semblerait que l'augmentation de la production de manganèse électrolytique en Chine (voir la section consacrée au manganèse) ait été un facteur significatif de remontée des prix entre 2016 et 2018. Ces prix haussiers ont conduit à une surproduction ponctuelle de métal et donc à un retour à des prix observés en 2016-2017.

La plupart du sélénium recyclé provient des déchets électroniques, des panneaux photovoltaïques en couches minces et des tambours des anciens photocopieurs. Du fait d'un usage dispersif, le sélénium utilisé en verrerie, en métallurgie, en agriculture ou en pigmentation – parmi d'autres applications – n'est pas récupérable.

Les risques sur le marché du sélénium apparaissent aujourd'hui faibles avec un approvisionnement suffisant et flexible. Les perspectives de développement rapide des technologies photovoltaïques à couches minces CIGS s'étant fortement réduites, la demande reste focalisée sur les domaines traditionnels de la métallurgie et la verrerie dont la demande demeure qui maintiennent la croissance, notamment portée par l'urbanisation et le développement du parc automobile mondial.

Silicium (Si)

Le silicium est le second élément le plus abondant dans l'écorce terrestre après l'oxygène. C'est un élément ubiquiste et important pour le fonctionnement de nombreux êtres vivants. Il est utilisé dans de très nombreux domaines où il se trouve soit sous forme oxydée, soit en combinaison avec d'autres éléments chimiques. Dans ce chapitre, seul le marché de la forme pure dite silicium « métal » est abordé. En 2019, la production mondiale de silicium métal est d'environ 3 Mt. Le marché du Si métal représente une valeur approximative de \$ 7 milliards en prenant en compte le marché du polysilicium.

Le silicium « métal » correspond à un matériau contenant plus de 98 % de Si, bien que l'élément Si ne soit pas considéré comme un métal, mais comme un métalloïde.

Le silicium métal est principalement utilisé dans les alliages d'aluminium Al-Si (43 %) et les silicones (32 %). Cependant, il est plus connu comme l'élément phare des cellules photovoltaïques (17 %) et des semi-conducteurs (6 %), dont les croissances ont été très fortes sur la période 2015-2018. Les alliages Al-Si sont très utilisés dans tous les types de véhicules, qu'ils soient terrestres, marins, ou aériens, mais également dans le bâtiment, les équipements ménagers, les câbles électriques, et les emballages. Allié à l'aluminium, le silicium améliore la coulabilité et réduit le coefficient de dilatation thermique. Dans les silicones, le silicium métal est transformé en gaz pour former des chaînes Si-O qui donnent un polymère ayant une consistance de gel, de résine, ou de gomme. Dans les cellules photovoltaïques, les propriétés semi-conductrices du silicium permettent l'effet photoélectrique nécessaire à la production d'électricité. Son coût réduit lui a permis de devenir majoritaire par rapport à d'autres semi-conducteurs tels que le germanium. C'est également le cas en électronique, où les propriétés semi-conductrices du silicium sont fondamentales pour le fonctionnement des circuits intégrés, le stockage et la transmission d'informations, présentant un bon compromis coût-performance.

La consommation de silicium métal a été en forte hausse sur la période 2010-2019 (+ 6,3 % par an) en raison d'une demande forte de la part des constructeurs de cellules solaires et pour les alliages d'aluminium. Le silicium est produit par la réduction de la silice (SiO_2) dans un four à arc électrique en présence de charbon et parfois de copeaux de bois. En fonction de la technicité de l'application, le silicium métal doit être raffiné à différents niveaux de pureté : 98-99 %, pour la qualité métallurgique (MG) ; 99,9999 %, ou « 6 N », pour la qualité solaire (SoG) ; et jusqu'à 99,9999999 %, ou « 9 N », pour la qualité électronique (EG). La majorité des cellules photovoltaïques utilisent du silicium SoG. Celui-ci s'obtient à partir de silicium MG, après distillation du trichlorosilane (SiHCl_3), puis décomposition en présence d'hydrogène (procédé Siemens). Il peut également être obtenu en lit fluidisé ou par raffinage métallurgique (qualité métallurgique améliorée). Le polysilicium est ensuite transformé en lingot poly – ou monocristallin par différents procédés chimiques. À partir des années 2000, les cellules au Si polycristallin s'étaient imposées comme la forme majoritaire grâce à des prix bien inférieurs pour un rendement de 10 % à 15 %. En 2019, les cellules au Si monocristallin reprennent des parts

Silicium
(en milliers de tonnes)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	8 100	7 630	7 600	6 600	7 400	7 000
Afrique du Sud	84	84	85	65	65	
Bhoutan		78	69	55	90	90
Brésil	154	117	110	170	220	210
Canada	52	54	51	54	57	60
Chine	5 500	5 000	5 000	4 000	4 800	4 500
Espagne	81	81	81	69	69	70
États-Unis	373	411	384	415	430	320
France	130	121	120	126	140	140
Inde	86	60	59	59	57	60
Islande	75	75	79	76	83	80
Malaisie			82	113	140	150
Norvège	332	375	380	375	370	370
Russie	700	747	750	670	600	600
Ukraine	92	59	66	60	49	50
Autres pays	389	368	310	274	290	290

Prix du silicium
Marché libre européen

(en dollars/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

de marché, car l'écart de coût se réduit tandis que les rendements atteignent 25 %. Selon les données de l'Institut Fraunhofer, la distribution des technologies photovoltaïques mondiales était en 2017 de 61 % de polycristallin, 32 % de monocristallin et 5 % de couches minces. Le silicium EG, quant à lui, passe nécessairement par une forme monocristalline (méthode de Czochralski, ou zone fondue flottante). Les producteurs de silicium EG sont peu nombreux et communiquent peu sur leur production.

L'USGS estime une production totale de 7 Mt en Si contenu dans le silicium métal et dans le ferrosilicium. La production 2019 de silicium métal (sans ferrosilicium) se situerait proche de 3 Mt. Elle serait en fait en léger recul par rapport à 2018 alors que l'USGS avait nettement sous-estimé le niveau de la production en 2018 dans son estimation de 2019. Selon Roskill, la Chine a produit près de 70 % du silicium métal mondial en 2019, production qu'Argus estime à 2,2 Mt. Selon la Société chimique de France (SCF), les principaux producteurs de silicium métallurgique en 2018 étaient Ferroglobe (341 000 tonnes), Dow Consumer Solutions (207 000 tonnes), Elkem (164 000 tonnes), Rima (96 000 tonnes) ainsi que Rusal (62 000 tonnes). Toujours selon la SCF, la production de polysilicium de grande pureté a été de 413 000 tonnes en 2018, les trois premiers producteurs étant Wacker (58 000 tonnes), GCL (58 000 tonnes) et OCI (54 000 tonnes). En 2019, la production chinoise de polysilicium a été de 313 000 tonnes, en augmentation de plus de 20 % par rapport à 2018.

Les ressources en silicium sont considérées comme très importantes en raison de l'omniprésence de la silice et des minéraux silicatés sur Terre. C'est pourquoi les réserves de silicium ne sont généralement pas estimées. En revanche, le silicium métal de très haute pureté (EG) n'est produit que par quelques acteurs et son marché est très opaque, pouvant créer certains goulots d'étranglement dans la chaîne de production.

Le silicium métal est recyclé principalement lors du traitement des panneaux photovoltaïques en fin de vie. Dans les usages métallurgiques, le recyclage du silicium est lié au recyclage du métal principal (acier, fonte, aluminium). La fumée de silice, coproduit de la métallurgie du silicium ser-

vant de charge minérale améliorant les propriétés de certains bétons et aciers, peut être récupérée en boucle courte. Dans les autres usages dissipatifs, le silicium n'est pas recyclé. Le gallium, le germanium et le tellure de cadmium peuvent se substituer au silicium en tant que semi-conducteurs sur des critères de prix et de performances. Pour les applications métallurgiques, le manganèse, l'aluminium ou le titane peuvent se substituer au silicium avec une efficacité moindre ou un coût supérieur.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le prix annuel moyen du silicium métallurgique (MG) a été de \$ 1 504/t en 2019, en net recul par rapport à 2018 (\$ 1 782/t), bien qu'une forte variabilité soit observée sur les cinq dernières années.

Le marché du silicium est surcapacitaire depuis plusieurs décennies. En 2018 et 2019, certains producteurs comme Ferroglobe et Elkem ont décidé d'arrêter temporairement certains fours aux États-Unis et en Norvège, réduisant leurs productions de 20 % à 30 %. En 2020, le marché reste sous la pression d'un ralentissement économique mondial, accentué par la pandémie Covid-19.

Tantale (Ta)

En 2019, la production mondiale serait de 1 800 tonnes de Ta (métal contenu), sur la base des données de l'USGS. L'ordre de grandeur du marché est compris entre \$ 500 millions. Le tantale fait partie du groupe des métaux réfractaires avec une température de fusion de 3 017 ° C. C'est aussi un métal particulièrement dense (16,7), très résistant à la corrosion par les acides, et doté d'une permittivité élevée. Cette dernière propriété permet la fabrication de condensateurs électroniques de très faibles volumes et robustes, principale application mondiale du tantale. Sa dureté et sa résistance à la chaleur sont également prisées pour les superalliages et les outils de coupe (carbures).

Si la demande mondiale en 2018 a été marquée par une hausse de 16 % de la demande en condensateurs en tantale à 14 milliards d'unités, après une baisse régulière de 3 % par an, en moyenne, de 2002 à 2017, l'année 2019 est loin d'avoir été

aussi bonne pour le marché du tantale puisque la plupart des usages ont été ralentis par une croissance mondiale relativement atone. La forte hausse de la demande en 2018 s'expliquait par une pénurie mondiale de condensateurs multicouches en céramiques (MLCC) d'environ 500 milliards de pièces, selon la même source. Depuis les années 2000, les condensateurs MLCC dominent en effet le marché aux dépens des condensateurs au tantale, pour la plupart des applications électroniques grand public, essentiellement sur des critères de coûts et de disponibilité (les condensateurs au tantale étant plus rares, plus chers mais extrêmement fiables donc généralement limités aux dispositifs hautes performances et hautes températures). Or, la croissance de la production d'appareils électroniques avait dépassé la capacité de production des condensateurs MLCC, permettant ainsi aux condensateurs au tantale de regagner des parts de marchés. Cet usage, qui représente environ 34 % de la consommation mondiale du tantale selon Roskill (soit 535 tonnes de Ta), est revenu sur des bases plus modestes, en raison d'une correction du marché suite à une très forte hausse en 2018.

Le deuxième secteur d'usage du tantale est au sein de superalliages, avec 18 % de la demande mondiale. Comme les autres métaux réfractaires, la résistance à la corrosion et aux très hautes températures du tantale sont des atouts significatifs dans la fabrication de ces superalliages, utilisés pour la production des aubes de turbine des parties chaudes des réacteurs d'avion ou des turbines à gaz. Si la croissance de ce secteur est estimée à 7 % par an d'ici 2027 étant donné le dynamisme des commandes aéronautiques récentes, l'année 2019 a été relativement calme.

Les cibles de pulvérisation viennent ensuite avec 14 % de la demande mondiale. Ces cibles sont utilisées par exemple pour le dépôt de couches minces de nitrure de tantale sur des substrats métalliques pour les protéger contre la corrosion.

À l'instar du tungstène, le tantale est également utilisé pour la conception de carbures extrêmement durs utilisés pour la production d'outils de découpe et le revêtement de moules en acier utilisés pour le moulage sous pression de l'aluminium. Cet usage représente 5 % de la demande mondiale.

Enfin, 29 % du tantale est utilisé pour d'autres usages métallurgiques, ainsi que sous forme de composés chimiques (oxydes). On peut alors retrouver le tantale dans des usages aussi divers que dans les verres de lunette ou des éléments de prothèses de hanche ou du genou, du fait de sa grande stabilité biologique.

En 2019 et comme évoqué précédemment, la production mondiale serait de 1 800 tonnes de Ta (en métal contenu). Cependant, les statistiques concernant l'extraction minière du tantale sont très peu précises. Pour Roskill, elle s'établirait ainsi à 1 575 tonnes de Ta. Selon les données de l'USGS, la République démocratique du Congo (RDC) et le Rwanda demeurent, en 2019, les sources principales de tantale au monde. En effet, il existe une part importante d'exploitation artisanale et d'exportation de colombo-tantalite (aussi appelé coltan) à partir de la région des Grands Lacs africains. Les données estimées sont de 740 tonnes de Ta contenu pour la RDC (41 %) et 370 tonnes de Ta pour le Rwanda (21 %), suivis du Brésil (14 %), du Nigeria (12 %) et de la Chine (5,6 %).

Si la répartition de la production mondiale de tantale penchait depuis plusieurs années en faveur des sources artisanales d'Afrique centrale (notamment à cause des coûts de production nettement plus bas), cette situation devrait évoluer à très court terme. L'Australie, en particulier, pourrait redevenir un producteur majeur. En effet, l'exploitation de pegmatites géantes connaît un regain du fait de la croissance très rapide de la demande en lithium. Or, les gisements concernés sont des sources historiques de production industrielle de tantale (en particulier Greenbushes et Wodgina).

Ainsi, en 2017, l'approvisionnement de tantale en sous-produit de lithium était d'environ 40 tonnes de Ta, provenant presque entièrement de la mine de Greenbushes en Australie, soit moins de 3 % de l'offre mondiale. En 2018, selon Roskill, la part de l'Australie serait davantage de l'ordre de 5 % (soit 100 tonnes Ta) grâce, notamment, à l'arrivée du tantale produit par les opérations minières de Mt Cattlin (société Galaxy Resources, 20 tonnes Ta par an) et Mt Marion (société Neometals, 37 tonnes Ta par an). Si le premier semestre 2019 a vu les capacités de production australienne de tantale augmenter, les ré-

sultats sur l'année 2019 sont décevants, en raison de l'arrêt et la mise en sommeil ou « care & maintenance » en août de la mine de Bald Hill (Tawana Resources) dus aux prix très bas du lithium. La production australienne de tantale en 2019 aurait été de 20 tonnes Ta selon l'USGS, nettement en dessous des prévisions.

Néanmoins d'ici 2022, l'Australie pourrait représenter 20 % de la production mondiale, si les délais de mises en production et de mises sur le marché sont respectés. Le relais sera assuré par de nouveaux projets, certains ayant déjà expédié leurs premiers concentrés de spodumène (minerai de lithium) en 2018. Il s'agit en particulier des projets Pilgangoora (société Altura Mining, 136 tonnes Ta/an), Pilgangoora (société Pilbara Minerals, 136 tonnes Ta/an), Wodgina (société MinRes, 181 tonnes Ta/an), Bald Hill (société Tawana Resources, 118 tonnes Ta/an, actuellement stoppé), ainsi que du développement des capacités sur les opérations Mt Cattlin et Mt Marion. Ces projets marquent le début de ce qui semble être une nouvelle source de très grands volumes de tantale à faible coût.

Au Brésil, les deux opérations principales sont également en expansion et devraient renforcer cette tendance. Il s'agit de la mine de Pitinga, ex-

ploitée par Minsur (130 tonnes Ta par an) et de celle de Mibra exploitée par AMG (Advanced Metallurgical Group). Cette dernière a subi des réparations à la suite d'un incendie début 2017 et compte également développer la production de lithium et de tantale en coproduits, ce qui augmenterait de manière substantielle la production actuelle (prévue à 272 tonnes de Ta mais qui n'a tourné que six mois en 2019 en raison des prix bas du lithium et d'une faible demande en tantale).

Dans le reste du monde, l'usine Silmet à Sillamae en Estonie produisait annuellement environ 45 tonnes de Ta issues du traitement de minerai de la péninsule de Kola en Russie. L'usine – qui appartient désormais à la société Neo Performance Materials (NPM), née de la restructuration financière en 2016 du groupe américain MolyCorp – a stoppé sa production en juillet 2019 puisque le stockage des déchets radioactifs issus du traitement des minerais de niobium-tantale a atteint les limites prévues. Le ministère de l'Environnement estonien a donc demandé à la compagnie de trouver un autre site de stockage avant une éventuelle reprise de l'activité.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou

Tantale
(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	1 200	1 100	1 220	1 800	1 890	1 800
Australie	50	20	60	83	23	20
Brésil	150	115	103	110	250	250
Burundi					23	32
Canada						
Chine	60	60	94	110	90	100
Éthiopie			63	65	70	40
Mozambique	85					
Nigeria	60		192	153	200	210
Rép. dém. du Congo	200	350	370	760	740	740
Rwanda	600	410	350	441	421	370
Autres pays	140	117	45	83	40	39

Prix du tantale
Marché libre européen
(en dollars/kg)



(Sources : Mineral Commodity Summaries ; World Mining Data pour les données de l'Australie, 2015)

utilisateurs. En 2019, le prix annuel moyen du tantale métal (Ta 99,8 % EU) s'est établi à \$ 275/kg, en baisse de 28 % par rapport à 2018 (\$ 380,1/kg).

Cette baisse, qui fait suite à celle de 2018, s'explique entre autres par la disponibilité plus importante de tantale sur le marché international et une demande moins forte qui ont provoqué un excédent de tantale en 2019. Une autre conséquence est une compétition grandissante entre l'offre australienne et la production de tantale du Rwanda et de RDC, en défaveur de ces derniers. En effet, les crédits obtenus par la coproduction du lithium permettent des coûts de production très bas. De plus, l'avantage du minerai australien, malgré des contraintes de radioactivité, est d'être indéniablement estampillé « sans-conflit », critère pénalisant les sources d'Afrique centrale. Une troisième conséquence est la possibilité que le marché revienne sur les contrats d'approvisionnement à long terme du tantale, devenus rares ces dernières années. Un autre poids pèse sur la compétitivité du tantale congolais, celle de l'imposition d'une taxe à l'exportation de 10 % sur le tantale issu de la réforme du code minier de RDC en 2018. Pour certains analystes, ces mesures auraient en outre l'effet pervers de favoriser la contrebande du tantale *via* les pays voisins (Rwanda et Ouganda) pour éviter les taxes. Le coût de la traçabilité est donc un paramètre-clé pour l'avenir du marché du tantale, posant encore de nombreuses questions.

Le tantale ne peut pas être substitué dans les microcondensateurs sans une forte perte de performances, comme indiqué plus haut. Les condensateurs MLCC ou au niobium sont cependant des alternatives moins coûteuses. Les superalliages peuvent être recyclés par des entreprises spécialisées, en particulier aux États-Unis et en Europe du fait du poids de l'industrie aéronautique. Il existe aussi du recyclage de tantale à partir des déchets en boucle courte (« *new scrap* »), produits durant la fabrication de produits électroniques et de matériaux utilisant le tantale. En fin de vie, ce recyclage est plus compliqué, mais reste un axe de développement, notamment celui des cartes électroniques.

Les réserves mondiales de tantale dépassent 90 000 tonnes de Ta, les seules données accessibles et vérifiables ne concernent que l'Australie (55 000 tonnes Ta selon l'USGS) et le Brésil

(34 000 tonnes Ta). Les ressources en terre sont donc vraisemblablement bien supérieures, notamment au Canada et aux États-Unis (55 000 tonnes identifiées par l'USGS). Leur mise en production potentielle dépendra des conditions économiques du marché.

À l'échelle mondiale, les perspectives pour la demande en tantale sont favorables, avec une croissance moyenne de 4 % à 5 % par an d'ici 2027 selon Roskill. Les perspectives concernant les condensateurs au tantale sont particulièrement bonnes, la demande de nouveaux condensateurs étant en grande partie destinée à des produits à hautes performances, tels que ceux pouvant fonctionner dans les nouveaux dispositifs de communication 5G ou ceux pouvant fonctionner à des températures élevées dans les véhicules électriques. Les condensateurs sont le plus grand marché du tantale et ils devraient donc le rester. Le développement futur de ces derniers sera axé sur le remplacement de plusieurs MLCC par un seul condensateur au tantale. Les cibles de pulvérisation, les produits chimiques à base de tantale et les produits métallurgiques ont une large gamme d'applications finales et cette diversité offre une mesure de protection contre les fluctuations des différents marchés.

Tellure (Te)

En 2019, la production de tellure mondiale (hors États-Unis) a été de 470 tonnes selon l'USGS. Le tellure est un élément très rare dans l'écorce terrestre (1 ppb – 1 partie par milliard). Il est essentiellement extrait en sous-produit de la métallurgie du cuivre. Il est souvent associé au sélénium avec lequel il partage des propriétés chimiques voisines. Le tellure est utilisé pour ses propriétés semi-conductrices, photosensibles et photoélectriques. Le marché du tellure, d'une valeur d'environ \$ 28 millions, est très opaque. Les données fournies sont donc sujettes à caution.

Le principal usage est la production de panneaux photovoltaïques à couches minces au tellure de cadmium (CdTe). Selon l'USGS, il représentait 40 % de la consommation en 2018. Le tellure est aussi utilisé dans les générateurs thermoélectriques et en métallurgie en tant qu'additif pour accroître l'usinabilité de métaux comme

l'acier ou le cuivre. Le tellure de bismuth a la particularité de pouvoir transformer la chaleur en électricité (effet Peltier). Cette propriété est utile dans les systèmes réfrigérants portables (utilisés pour le séquençage de l'ADN, par exemple). Les autres procédés ou produits consommant du tellure sont la vulcanisation du caoutchouc, l'imagerie thermique, les capteurs pour l'imagerie spatiale, les détecteurs de rayons X, les colorants pour l'industrie céramique, les capteurs biologiques, les fongicides, les algicides, les parasitocides, et d'autres usages.

La technologie photovoltaïque à couches minces CdTe ne représentait qu'environ 2 % de la puissance photovoltaïque installée dans le monde en 2017, soit 2,3 GWc (gigawatt-crête). Cependant, un acteur dominant s'est établi comme le producteur de la plupart des cellules au CdTe dans le monde : l'Américain First Solar. Bénéficiant de soutiens locaux et fédéraux, First Solar a inauguré en 2019 une nouvelle usine de production de modules basée à Perrysburg en Ohio. Celle-ci devrait progressivement atteindre une production annuelle de 1,9 GW de modules, soit 25 % de la capacité totale de l'Américain (7,6 GW/an). Selon Argus, d'autres constructeurs comme le Chinois CNBM Optoelectrics ou l'Allemand Calyxo (seul Européen) prévoient d'augmenter leurs produc-

tions de modules solaires CdTe à respectivement 1 GW par an et 0,06 GW par an.

Selon la *Minor Metals Trade Association* (MMTA), ces développements pourraient générer un déficit en tellure raffiné, associé à une hausse de prix. En effet, selon plusieurs sources, il faudrait actuellement de 70 tonnes à 90 tonnes de tellure pour produire 1 GW de modules photovoltaïques CdTe. Une fabrication annuelle de 8,6 GW de modules (First Solar et CNBM) demanderait donc entre 600 et 780 tonnes de tellure par an, uniquement pour le secteur du solaire. Bien que de nouvelles capacités de production puissent apparaître, celles-ci restent tributaires de la production des substances principales desquelles le tellure est sous-produit. Une hausse de la demande pourrait être couverte partiellement ou en totalité, grâce à une généralisation de la récupération de tellure dans les résidus de métallurgie.

Le tellure possédant des propriétés chimiques similaires à celles du soufre, il se concentre préférentiellement dans les sulfures des gisements de cuivre, nickel-cuivre sulfuré ou plomb-zinc. Cependant, tout comme le sélénium, il n'est pas extrait en tant que produit principal. Plus de 90 % du tellure est produit à partir de boues anodiques collectées lors du raffinage électrolytique du cuivre. Le reste provient des écrémages des raffineries de

Tellure
(en tonnes de métal raffiné)

	2016	2017	2018	2019
Production mondiale	410	518	460	470
Afrique du Sud		7	6	5
Bulgarie	4	5	5	5
Canada	18	49	25	30
Chine	280	290	280	290
États-Unis	50	50		
Japon	33	38	58	55
Russie	35	44	42	40
Suède	39	35	45	40

(Source : USGS Mineral Commodity Summaries, États-Unis : estimations)

plomb et des poussières et des gaz générés lors de la fusion des minerais de bismuth, de cuivre et de plomb-zinc. D'autres sources potentielles de tellure comprennent le tellure de bismuth et certains minerais d'or, comme à Kankberg (Suède) ou au Canada.

Alors qu'en 2019 la production de tellure mondiale (hors États-Unis) a été estimée par l'USGS à 470 tonnes – un niveau stable par rapport à 2018 –, la MMTA indiquait, elle, une production mondiale annuelle de plus de 800 tonnes, ce qui semble traduire des disparités entre estimations et le fait qu'un certain nombre de pays producteurs ne publient pas leur production annuelle. Selon l'USGS, la Chine est le premier producteur de tellure raffiné avec près de 60 % de la production mondiale (soit 290 tonnes). Les producteurs de tellure hors Chine sont principalement des pays producteurs de cuivre raffiné : le Japon, la Russie, les États-Unis, la Suède, le Canada, l'Afrique du Sud et la Bulgarie. En 2019, les stocks de 170 tonnes de tellure provenant de la bourse chinoise faillie *Fanya Metal Exchange* (FME) ont été mis aux enchères et achetés par Vital Materials, une entreprise chinoise. Vital Materials a aussi racheté tout ou parties des stocks de gallium, de germanium, de sélénium, de bismuth et d'indium avec la volonté de créer une « mine de surface » pour approvisionner les fabricants de nouvelles technologies (voir l'encadré sur la bourse de Fanya).

Certains projets de récupération du tellure sont en cours. On peut citer, par exemple, le projet indien de raffinerie de cuivre Mundra porté par Adani Enterprises, qui pourrait récupérer 96 tonnes de tellure par an. GGX Gold, quant à lui, a mesuré de fortes teneurs de tellure (avec une concentration entre 0,5 kg/t et 4 kg/t selon Argus Metals) sur son projet de Gold Drop (cuivre, or, argent) dans la province canadienne de Colombie britannique. S'il se concrétisait, ce projet serait un candidat possible pour approvisionner First Solar en CdTe via son partenaire canadien 5 N Plus.

L'USGS évalue avec de très grandes incertitudes les réserves de tellure récupérable à 31 000 tonnes, dont 21 % en Chine, 11 % aux États-Unis et 3 % au Canada. Les chiffres indiqués ne comprennent cependant que le tellure hypothétiquement récupérable et contenu dans les réserves de cuivre.

Au-delà des utilisations dispersives ou dissipatives telles que les pigments, le tellure est recyclable en petites quantités en fin de vie des panneaux solaires ou dans certains photocopieurs. Il est éventuellement recyclé de manière non fonctionnelle dans les alliages. Plusieurs matériaux peuvent remplacer le tellure dans la plupart de ses utilisations, mais généralement avec des pertes d'efficacité ou de qualité. Il est à noter que le tellure possède une certaine toxicité.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. En 2019, le prix spot du tellure (99,99 % Europe) a baissé de manière assez linéaire avec un prix annuel moyen de \$ 60/kg. Un engouement sur le marché des cellules à CdTe semble être le principal moteur de la croissance de consommation du tellure à court terme.

Terres rares (TR)

En 2019, l'ordre de grandeur du marché des terres rares (TR) est d'environ \$ 6 milliards, avec une production de 210 000 tonnes selon l'USGS (exprimée en Oxydes de Terres rares ou OTR). Les terres rares sont un ensemble de seize éléments métalliques (les lanthanides et l'yttrium, en excluant le scandium), à la configuration électronique remarquable caractérisée par des électrons venant remplir l'orbitale 4f, située à proximité du noyau. Cette caractéristique atomique est à l'origine de propriétés remarquables de ces éléments, en particulier optiques (en absorption [coloration] comme en émission [luminescence]) et magnétiques. En 2019, la demande en aimants permanents de haute performance néodyme-fer-bore (NdFeB) a continué de tirer le marché des TR.

Les secteurs d'utilisation des TR ont beaucoup évolué depuis 2010, année de la crise mondiale provoquée par la restriction des exportations chinoises au reste du monde, ce qui avait entraîné une baisse momentanée de la consommation mondiale. Dès 2012, la croissance de cette consommation a repris, pour dépasser les 160 000 tonnes d'OTR en 2016. C'est le secteur des aimants permanents qui a fortement tiré cette dernière, en particulier la technologie NdFeB, utilisant le néodyme (Nd), le praséodyme (Pr) et, dans une

moindre mesure, le dysprosium (Dy) et le terbium (Tb) pour les applications de hautes performances. En 2019, les aimants NdFeB représentent ainsi environ 30 % en tonnage des usages des TR, et près de 53 % en valeur. La demande en aimants NdFeB croît à un rythme annuel de plus de 10 %. Les secteurs d'usage de ces aimants sont multiples, au sein de moteurs électriques à très haut rendement où ils autorisent la miniaturisation (électronique, robotique) et la réduction massique des équipements (générateurs d'éoliennes off-shore, moteurs des véhicules électriques, etc.). Les autres secteurs d'usages des TR deviennent proportionnellement minoritaires, soit du fait d'usages restreints ou spécifiques (industrie de défense, lasers médicaux, etc.) ou, au contraire, d'usages à plus faible valeur ajoutée pour des applications où les performances ont une moindre importance (poudres de polissage, catalyseurs automobiles, alliages métallurgiques). Ces secteurs utilisent alors des mélanges de TR relativement plus abondants et moins chers, en particulier le lanthane (La) et le cérium (Ce). En moyenne, la demande en TR progresse de 8 % à 10 % par an et devrait se poursuivre à ce

rythme en raison de l'essor des véhicules électriques et de l'éolien off-shore, ainsi que celui de l'électronique et de la robotique. À un tel rythme de croissance, la consommation mondiale de TR pourrait doubler en moins de dix ans. Le cas des véhicules électriques est éloquent. Si les ventes de véhicules électrifiés étaient de l'ordre de 2 millions en 2019, beaucoup de scénarii prévoient une augmentation exponentielle de ces dernières. En 2030, elles seraient comprises entre 20 millions par an et 38 millions par an dans les deux scénarii principaux établis par l'Agence internationale de l'énergie (scénarii *New Policies Scenarios et EV30@30*). Or, selon les données du consultant Roskill, en 2018, les nouveaux véhicules électrifiés mis sur le marché étaient à 90 % équipés de moteurs à aimants permanents à TR contre la technologie de moteurs à induction, par exemple choisie par BMW pour s'affranchir des TR. Ainsi, avec une valeur moyenne de 2 kg d'aimants permanents NdFeB embarqués dans ces nouveaux véhicules, soit 750 g d'alliage Nd-Pr, ce nouveau marché attendrait entre 15 000 tonnes et 28 500 tonnes d'alliage Nd-Pr, contre 3 000 tonnes en 2018, ce

Terres rares

(en tonnes d'oxydes contenus dans le minerai)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale						
	123 000	130 000	129 000	132 000	190 000	210 000
Australie	8 000	12 000	15 000	19 000	21 000	21 000
Birmanie					19 000	22 000
Burundi					630	600
Brésil Chine		880	2 200	1 700	1 100	1 000
États-Unis	105 000	105 000	105 000	105 000	120 000	132 000
Inde	5 400	5 900			18 000	26 000
Madagascar		1 700	1 500	1 800	2 900	3 000
Malaisie					2 000	2 000
Russie	240	500	300	180	200	
Thaïlande	2 500	2 800	2 800	2 600	2 700	2 700
Vietnam	2 100	760	1 600	1 300	1 000	1 800
		250	220	200	920	900

(Source : Mineral Commodity Summaries)

qui représente une augmentation considérable et pourrait correspondre à 60 % de la demande totale en aimants NdFeB, contre 10 % actuellement.

En 2019, la production minière mondiale de terres rares est donc estimée à 210 000 tonnes d'OTR par l'USGS dont 70 % à 90 % – en fonction des estimations – pour la Chine. Le gouvernement chinois contrôle désormais la production de TR par province en imposant des quotas de production renouvelés chaque année. Ces derniers sont en hausse en 2019 à 132 000 tonnes OTR (contre 120 000 tonnes en 2018 et 105 000 tonnes OTR en 2017). Toutefois, une importante production illégale subsiste au-delà de ces quotas, en particulier dans le sud du pays concernant l'extraction de TR lourdes, et s'étant déplacée en 2019 en Birmanie. La frontière située au Yunnan a été fermée puis réouverte trois fois durant l'année, ne permettant cependant pas de stopper les flux illégaux, qui pourraient représenter jusqu'à 15 % de la production chinoise totale.

En termes d'opérations minières, les États-Unis sont aujourd'hui le deuxième producteur mondial avec la reprise de la mine de Mountain Pass en Californie par l'opérateur MP Materials. En 2019, 26 000 tonnes OTR ont ainsi été extraites, destinées à produire des concentrés de terres rares, exportés et revendus par le partenaire chinois Shenghe. Une extension des capacités est prévue en 2020.

La société australienne Lynas, quant à elle, ne se contente pas de la production de concentrés de TR, mais réalise l'essentiel de ses bénéfices grâce au raffinage du néodyme et du praséodyme. Si la production totale en tonnages est de 21 000 tonnes d'OTR, un quart environ est sous forme d'oxydes de Nd-Pr, en grande partie destinée à assurer la production japonaise d'aimants permanents NdFeB.

Dans le reste du monde, des productions modestes peuvent être mentionnées, notamment en Russie avec la société Solikamsk produisant 3 000 tonnes d'OTR sous forme de concentrés de terres rares à partir de sa mine de Karnasurt, située dans la péninsule de Kola et exportés pour être traités dans l'usine Silmet en Estonie, filiale de Neo Performance Materials. C'est également le cas au Burundi, au Brésil (compagnie CBMM), en Inde (société Indian Rare Earths) ou encore

en Malaisie et en Thaïlande, en sous-produit des mines d'étain.

La production de TR raffinées est inférieure en ordre de grandeur, évaluée à 173 000 t OTR en 2019 par le consultant Roskill, avec un quota de 127 000 tonnes en Chine.

Selon les chiffres de l'USGS, les réserves mondiales sont de l'ordre de 120 Mt d'OTR. Ces réserves sont bien réparties : 36 % en Chine suivie par le Brésil (18 %), le Vietnam (18 %) et la Russie (10 %). Les ressources pourraient atteindre 375 Mt OTR selon l'hypothèse haute du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) prenant notamment en considération les gisements africains (Songwe Hill au Malawi, Tantalus à Madagascar, etc.) et groenlandais. Il est à noter que la proportion des différentes terres rares contenues dans le minerai joue un rôle fondamental sur la viabilité économique des projets.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. En 2019, exprimés sous forme métal 99 % Fob (Franco à bord) Chine, les prix des TR ont légèrement baissé en valeur absolue, tout en restant à des niveaux stables par rapport aux années précédentes. Ces prix sont à considérer de manière individuelle par élément de TR, une grande disparité existant entre les terres rares légères – très abondantes – et les terres rares lourdes réservées à des applications de niche du fait de leur rareté et de leur prix. Ainsi, le lanthane et le cérium ont perdu 5 % de leur valeur en 2019, à \$ 6/kg en moyenne. Le prix du terbium, la plus chère des terres rares, s'est quant à lui établi à \$ 660,8/kg, en hausse de 8,5 % par rapport à 2018, tout comme le dysprosium (+ 9,6 %) à \$ 292,6/kg, tandis que les prix du praséodyme et du néodyme, utilisés pour les aimants permanents NdFeB, s'établissaient respectivement à \$ 98,9/kg et \$ 56,9/kg en 2019.

À travers le monde, de nombreux projets d'exploration continuent leur développement. En Australie, plusieurs projets pourraient entrer en production d'ici 2021, sous réserve de financement. Il s'agit d'Arafura, pour une capacité de 3 600 tonnes par an d'OTR, et de Browns Range (Northern Minerals), avantage par d'importantes ressources en dysprosium. En apparence prometteur, le projet suédois de Norra Karr est quant à lui

Titane
(en milliers de tonnes)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale d'ilménite						
	5 570	6 190	5 500	5 000	6 870	7 000
Afrique du Sud	600	1 280	1020	550	765	820
Australie	720	720	780	730	720	660
Brésil	100	48	48	50	66	70
Canada	480	595	595	840	630	690
Chine	960	850	840	300	2 100	2 100
États-Unis	100	200	100	100	100	100
Inde	190	180	180	300	319	320
Kenya	100	267	280	280	272	200
Madagascar	300	140	92	110	228	300
Mozambique	510	460	540	600	575	590
Norvège	440	258	260	220	236	260
Russie	110	116				
Sénégal	60	257	250	300	297	290
Sri Lanka	32					
Ukraine	250	375	210	230	373	380
Vietnam	560	360	240	200	105	150
Autres pays	90	77	71	150	83	90

Production mondiale de rutile

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	470	760	800	770	594	600
Afrique du Sud	53	67	67	95	103	110
Australie	190	380	380	290	141	140
Inde	17	18	19	10	15	14
Kenya	22	71	84	87	90	74
Madagascar	9	5				
Malaisie						
Mozambique			7	9	8	8
Sénégal			9	10	9	9
Sierra Leone	100	113	130	160	114	120
Ukraine	63	90	95	95	94	94
Autres pays	17	14	8	13	21	29

Production mondiale d'éponge de titane métal

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	206	180	170	193	205	225
Chine	110	62	60	72	75	84
États-Unis	13	19	13	13	13	13
Inde			1	1	1	1
Japon	25	42	54	51	49	54
Kazakhstan	9	9	9	9	16	20
Russie	42	40	38	40	44	44
Ukraine	7	8	8	8	7.5	9.0

Prix de l'éponge de titane métal
Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

toujours en attente d'autorisations environnementales du gouvernement suédois en 2019.

Au Groenland, le développement du grand gisement de Kvanefjeld est un enjeu important du marché. En janvier 2019, la formation d'une coentreprise entre le groupe Shenghe et China National Nuclear Corp a été annoncée. Cette *joint-venture* sera chargée de l'importation, de l'exportation et le commerce de matériaux de TR transportant des radionucléides. Un accord d'enlèvement de 32 000 tonnes par an de concentrés contenant les TR a été conclu, ainsi que la possibilité pour Shenghe de devenir l'actionnaire majoritaire en montant ses parts à 60 % du capital en 2020. Les acteurs chinois sont ainsi bien placés pour aboutir à la mise en production de ce projet. La seule barrière demeurant à ce jour concerne les demandes de permis d'exploitation minière, soumises en 2015 et encore non finalisées, notamment du fait des sujets relatifs aux impacts environnementaux du projet.

En Russie, le développement du gisement de Tomtor en Yakoutie est poussé par les autorités russes et mené par l'entreprise ThreeArcMining, *joint-venture* entre l'entreprise d'État Rostec et la compagnie ICT Group. La construction pourrait avoir lieu en 2021. La production serait de l'ordre de 20 000 tonnes d'OTR par an.

Dans le reste du monde, ce sont les acteurs australiens et américains qui sont les plus avancés. À l'été 2019, des accords ont ainsi été passés entre les gouvernements américain et australiens pour des collaborations renforcées sur le sujet des TR. Ils devraient aboutir à la construction d'une ou plusieurs usines de séparation des terres rares, point clé de l'enjeu industriel associé à ces métaux. En Australie, le projet de Lynas de construire une usine de séparation à Kalgoorlie a reçu le soutien du gouvernement par un statut spécial. Aux États-Unis, le Pentagone, *via* le laboratoire de recherche de l'*US Air Force* a récemment annoncé qu'il prévoyait d'accorder environ \$ 40 millions de fonds de contrepartie aux entreprises qui pourraient séparer et traiter de 500 à 5 000 tonnes de terres rares par an. La société Lynas devrait être l'une d'entre elles, avec un projet d'usine au Texas en partenariat avec Blue Line Corp. En outre, une usine de traitement pilote dans le Colorado a également été inaugurée en décembre 2019 par les

sociétés Texas Mineral Resources Corp et son partenaire USA Rare Earth, dans le but de séparer et de purifier les terres rares issues du gisement de Round Top, au Texas.

Titane (Ti)

Le titane est produit à partir de deux principaux minéraux, l'ilménite et le rutil, dont la production cumulée a été estimée par l'USGS à 7,6 Mt en 2019. Le titane est utilisé pour deux usages principaux : le premier est la production d'oxyde de titane (TiO_2) dont les capacités mondiales sont estimées à 7,7 Mt et le second est l'élaboration du titane métal (éponges de titane) dont la production est de 225 000 tonnes en 2019, toujours selon l'USGS. Le titane est un métal léger, abondant dans l'écorce terrestre, aux excellentes propriétés mécaniques, résistant à la corrosion et biocompatible.

Selon les données de la compagnie Titanium Zirconium Minerals International (TZMI), 90 % du titane produit est utilisé sous forme d'oxyde de titane (TiO_2) en tant que pigment. Les données de 2013 indiquent que les usages du TiO_2 se répartissent de la façon suivante : 56 % dans la composition des peintures et des revêtements, 24 % dans les matières plastiques et les caoutchoucs, 8 % pour le papier, 4 % pour l'encre (4 %) et 2 % dans des fibres textiles et synthétiques. Le reste des applications comprend, entre autres, la pharmacie, les cosmétiques, la céramique et la purification de l'air.

Seulement 5 % du titane mondial est utilisé sous forme d'éponges de titane métal. Ces éponges sont produites pour près de moitié (49 %) pour la fabrication de pièces pour l'aéronautique civile (éléments de réacteurs, pylônes d'attache du réacteur, trains d'atterrissage, etc.). La croissance envisagée par Safran est d'environ 5 % par an, en moyenne, pour la période 2015-2027. Les applications industrielles (échangeurs de chaleur, tuyauteries résistant à la corrosion) pour les centrales électriques conventionnelles, les usines de dessalement de l'eau de mer et les installations pétrochimiques ou chimiques représentent 39 % de la demande des éponges de titane. Les biens de consommation (lunetterie, bijouterie, prothèses, etc.) et les équipements de défense (construction

d'avions, missiles, bateaux) sont responsables respectivement de 8 % et 4 % de la demande totale en titane métal. Les 5 % restants sont utilisés dans les soudures à l'arc électrique.

En 2019, les productions mondiales d'ilménite (FeTiO_3) et de rutil (TiO_2) – les deux principaux minerais de titane – ont évolué par rapport à 2018, atteignant respectivement 7 Mt (+ 1,9 %) et 0,6 Mt (– 1 %) selon l'USGS. La production d'oxyde de titane découle de ces deux exploitations. Les capacités de production d'oxyde de titane TiO_2 ont, quant à elles, été estimées à 7,66 Mt en 2019 (équivalent à environ 4,6 Mt de titane contenu), sans évolution par rapport à 2018.

Les réserves de titane sont considérables. En 2019, les réserves d'ilménite et de rutil estimées par l'USGS étaient de 820 Mt (exprimées en contenu TiO_2), soit plus de cent ans de production au rythme actuel.

La production mondiale d'éponges de titane métal est estimée par l'USGS à 212 000 tonnes en 2019, en hausse de 10 % par rapport à 2018. Or, par suite d'obligations de confidentialité, l'USGS ne publie pas les données de production des États-Unis, mais uniquement les capacités qui sont de 13 100 tonnes. Ce niveau de production reste toutefois sensiblement inférieur au niveau atteint en 2014, à 239 000 tonnes. Une part de l'explication est à rechercher dans la progressive maturité des circuits de recyclage du titane métal, offrant une disponibilité croissante de matériaux d'origine secondaire. D'autre part, les capacités mondiales de production d'éponges de titane sont très importantes, menant à des taux d'utilisation faibles. En 2016, seulement 62 % des capacités de production auraient été utilisées à l'échelle mondiale, ce taux tombant à 51 % pour la Chine. La Chine est néanmoins le premier producteur mondial d'éponges de titane, bien que ces dernières ne soient pas encore d'une qualité suffisante pour répondre aux normes très strictes de l'industrie aéronautique. Seule la moitié de la production totale d'éponges de titane est certifiée par l'industrie aéronautique.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. En 2019, le prix annuel moyen de l'éponge de titane de qualité TG-Tv, contenant au minimum 97,75 % de titane, a diminué de 3,6 %

par rapport à 2018, s'établissant à \$ 6,43/kg sur le marché spot contre \$ 6,67/kg l'année précédente. Les prix du titane certifié aéronautique, probablement beaucoup plus élevés, ne sont pas disponibles.

La croissance de l'aéronautique civile et militaire, ainsi que le dessalement de l'eau de mer devraient continuer de soutenir la demande en titane métal. En 1960, le Boeing 727 contenait 1 % en poids de titane. Aujourd'hui le Boeing 787 Dreamliner en contient 14 %, l'Airbus 350 13 % et le futur Boeing 777X en contiendra 15 %. Ceci a donc un impact important sur la demande en titane, vu les carnets de commandes des constructeurs d'avions (voir le chapitre consacré au cobalt). Le taux de croissance moyen de la demande dans ce secteur est évalué à 3 % par an d'ici 2025, voire davantage.

À terme, l'usage du titane pourrait – au moins partiellement – être remis en cause par la compétition avec des alliages d'aluminium dont les propriétés pour améliorer la légèreté et la résistance des appareils pourraient être comparables. Il s'agit en particulier de l'alliage aluminium-scandium, néanmoins dépendant d'une production future de scandium en quantité suffisante (voir la section consacrée au scandium). Le développement de l'utilisation de l'aluminure de titane dans la construction des réacteurs d'avion pourrait, de son côté, créer une demande nouvelle.

Le titane est l'un des métaux se prêtant particulièrement bien aux méthodes de fabrication additive. C'est en effet un métal très dur et difficile à usiner, ce qui se traduit par des chutes de production pouvant atteindre 70 % du poids du titane à mettre en œuvre pour obtenir une pièce déterminée. Les profondes évolutions en cours de ces techniques pourraient permettre des gains considérables d'efficacité dans l'usinage du titane par rapport aux techniques d'usinage classique, ouvrant de nouvelles potentialités d'applications marchées.

Le titane et les alliages de titane sont recyclables selon des conditions précises de reconditionnement, en particulier pour la filière aéronautique. En France, le complexe industriel de production de titane de qualité aéronautique de Saint-Georges-de-Mons, en Auvergne, intégrant l'unité de recyclage d'Ecotitanium, a été inauguré

en septembre 2017. Ce complexe industriel dote l'industrie aéronautique d'une capacité autonome de production de titane de qualité aéronautique en produisant des alliages de titane à partir de chutes et de copeaux issus du façonnage des pièces par les constructeurs et sous-traitants aéronautiques. Ce projet a nécessité plus de € 48 millions de la part des actionnaires (UKAD 43,5 %, ADEME 41,3 % et Crédit Agricole Centre France 15,2 %), ainsi que d'autres acteurs comme la Banque européenne d'investissement (BEI).

Tungstène (W)

En 2019, la production mondiale de tungstène a été de 85 000 tonnes selon l'USGS. Ce marché est évalué à \$ 2,5 milliards et se caractérise par un quasi-monopole de la Chine sur l'ensemble des premiers maillons de la chaîne de production, à l'instar des terres rares. Le tungstène pur est le métal au plus haut point de fusion connu (3 422 °C), avec des propriétés de dureté exceptionnelles et une très forte densité (19,25), équivalente à celle de l'or. Il joue un rôle clé dans de nombreuses industries, dont celle de défense, car il intervient dans la production de carbures cimentés, de super-alliages et d'aciers extrêmement résistants.

Les principaux usages du tungstène peuvent être considérés par type de produits ou par sec-

teurs industriels. La forme des carbures cimentés est la plus représentée avec 59 % des usages selon Roskill. Les carbures cimentés sont des matériaux très durs, très résistants et réfractaires. Les plus fréquents sont les carbures tungstène-cobalt, pour leur complémentarité. En effet, le cobalt est le métal qui a les meilleures propriétés pour lier les carbures et il forme un eutectique partiel avec WC à 1 275 °C – 1 350 °C, en deçà de sa propre température de fusion (1 495 °C). Les carbures WC sont donc à la fois extrêmement homogènes, durs et résistants à de hautes températures. Ils sont indispensables pour la production des outils de découpe ou de perçement utilisés dans de nombreux domaines industriels, par exemple en aéronautique pour l'usinage du titane ou de polymères à renfort de fibres de carbone, ou encore pour les forets millimétriques utilisés pour la fabrication des circuits imprimés en électronique. Les plus gros consommateurs sont toutefois les outils de découpe et d'usinage dans les industries mécaniques ou de travaux publics (outils de forage en industrie minière, inserts des godets chargeurs des engins de chantier, etc.).

Les aciers et alliages au tungstène représentent 20 % de la demande mondiale. Les aciers concernés sont en premier lieu des aciers alliés, principalement utilisés au sein d'outils dans la découpe d'autres métaux, de bois ou de polymères.

Tungstène
(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale (arrondi)	86 800	89 400	88 100	82 100	81 100	85 000
Autriche	870	861	954	975	936	940
Bolivie	1 250	1 460	1 110	994	1 370	1 200
Canada	2 340	1 680				
Chine	71 000	73 000	72 000	67 000	65 000	70 000
Corée du Nord					1 410	1 100
Espagne		835	650	564	750	500
Mongolie			753		1 940	1 900
Portugal	671	474	549	727	715	700
Royaume-Uni		150	736	1 090	900	
Russie	2 800	2 600	3 100	2 090	1 500	1 500
Rwanda	1 000	850	820	720	920	1 100
Vietnam	4 000	5 600	6 500	6 600	4 800	4 800
Autres pays	2 060	1 910	880	1 300	900	900

Prix de l'éponge de titane métal
Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Pour un travail à froid, des aciers à 0,5 % W à 3 % W sont utilisés. Pour un travail à chaud, les teneurs utilisées sont de 1,5 % W à 18 % W. Ce sont ensuite des aciers dits rapides, c'est-à-dire contenant plus de 7 % de W + Mo + V combinés. Enfin, le tungstène intervient dans certains aciers inoxydables lorsqu'une forte résistance à la chaleur, à la corrosion et à la fatigue est recherchée (installations offshore, traitement des eaux usées, systèmes de désalinisation de l'eau de mer, etc.). Le tungstène est également très utilisé dans les superalliages (parties chaudes des turboréacteurs en aéronautique et aérospatiale ou pour les turbines à gaz dans la production d'électricité). Ces alliages ont des compositions complexes, surtout à base de nickel, allié avec des proportions variables de chrome, cobalt, fer, ainsi que des quantités plus faibles de nombreux métaux en fonction des propriétés recherchées (molybdène, tantale, aluminium, titane, zirconium, niobium, vanadium, bore, voire rhénium, ruthénium, yttrium et hafnium). L'usage du tungstène permet là aussi de renforcer la résistance à la chaleur, à la fatigue, à la corrosion et au fluage.

13 % de l'utilisation du tungstène est sous forme de tungstène métal, dont l'application grand public la plus connue fut la production des filaments des ampoules à incandescence. Cependant cet usage ne représente plus que 4 % de la consommation mondiale et est en constante perte de vitesse, progressivement remplacé par d'autres technologies d'éclairage beaucoup plus performantes en termes de conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse. Les autres usages sous forme de métal pur comprennent : les électrodes des lampes à décharge lumineuse haute pression et basse pression, certains contacts électriques et électroniques, des anodes dans les tubes à rayons X pour l'imagerie médicale et l'imagerie de sécurité dans les aéroports notamment, les résistances chauffantes de fours industriels de haute température, ainsi que la recherche pour la fusion thermonucléaire civile. Le projet ITER prévoit ainsi d'utiliser du W métal pour le revêtement du « divertor » qui constitue le « plancher » du réacteur).

Les 8 % restants de la consommation de tungstène à l'échelle mondiale sont sous forme de composés chimiques, que l'on retrouve essentiellement au sein de catalyseurs et de pigments.

En 2019 et comme évoqué précédemment, la production mondiale de tungstène était de 85 000 tonnes (en W contenu) selon les données préliminaires de l'USGS, soit une augmentation de 4,8 % par rapport à 2018. La Chine reste le premier producteur mondial de tungstène avec 70 000 tonnes estimées, soit 82 % de la production mondiale. 95 % de la production chinoise est assurée par un seul producteur : China MinMetals, à travers différentes filiales dont la principale est Jiangxi Xiushui Xianglushan Tungsten. Elle correspond au regroupement des entités de production chinoises au sein d'un seul consortium. Cette consolidation datant des années 1990 et 2000 a permis à la Chine d'inonder le marché international et de réaliser un « dumping » important sur les prix mondiaux du tungstène à cette époque, entraînant la fermeture de nombreuses mines occidentales, notamment en France (mine de Salau, Ariège). Aujourd'hui la Chine est non seulement le principal producteur, mais également consommateur mondial de tungstène avec plus de 60 % du total.

Toutefois, l'année 2019 a été marquée par une baisse globale de la demande (– 20 %), en particulier celle concernant la consommation d'outils de coupe dans l'industrie de l'électronique grand public touchée par le ralentissement de la croissance mondiale et le différend commercial sino-américain. L'incertitude sur le devenir des stocks de paratungstate d'ammonium (APT) de la bourse de Fanya a également contribué à peser sur les prix et la production.

À l'instar de nombreux autres petits métaux, les prix du tungstène ne sont pas établis sur les marchés boursiers. Ils sont établis après négociations entre producteurs et utilisateurs en fonction du produit et de sa qualité. Le principal produit internationalement commercialisé est l'APT qui est à la base de la production de poudre de tungstène, l'essentiel de la mise en œuvre de ce métal à l'échelle industrielle se faisant par des techniques de métallurgie des poudres. Les prix de l'APT ont ainsi connu une forte baisse jusqu'à septembre 2019, la moyenne mensuelle sur le marché européen passant de \$ 33,7/kg en janvier à \$ 24,3/kg fin août. La moyenne annuelle s'établit à \$ 30,4/kg soit une baisse de 22,3 % par rapport à 2018 et un plus bas des prix de l'APT depuis 2016.

Les stocks d'APT immobilisés depuis l'effondrement de la bourse de Fanya (voir la section consacrée en début de chapitre) représentaient près de 30 000 tonnes d'APT soit plus d'un quart de la consommation mondiale. Ils n'ont été acquis que début septembre 2019 par l'acteur China Molybdenum, ce qui a permis d'améliorer les perspectives du marché.

Les réserves de tungstène publiées par l'USGS sont de 3,2 Mt, dont 57 % en Chine.

Le recyclage du tungstène dépend des filières, certaines étant particulièrement efficaces (pour certains carbures de tungstène et superalliages en fin de vie). La substitution du tungstène est généralement possible dans ces deux principaux usages, notamment par des carbures au titane (TiC) ou au tantale (TaC), sur des critères de performance et de prix.

Les perspectives de croissance de la demande à moyen terme sont fortement corrélées aux dynamiques industrielles mondiales en particulier des secteurs minier, pétrolier, aéronautique et aérospatiale, étant donné l'importance des carbures de tungstène dans les outils de découpe et de forage. Toutefois, la substitution des superalliages par l'aluminure de titane en aéronautique et, à terme, par les céramiques à matrice composite pourrait conduire à une réduction progressive de la demande provenant de ce secteur.

Du côté de l'offre, un certain dynamisme est à noter. Le consultant Roskill identifie quatorze projets au stade de développement à l'horizon 2028. En Chine, Jiangxi Xincheng Tungsten, une filiale du principal producteur Jiangxi Tungsten, est sur le point de lancer une nouvelle usine de production d'APT et de trioxyde de tungstène pour une capacité de 5 000 tonnes par an pour l'APT et de 1 000 tonnes par an pour le trioxyde de tungstène. Cela représente une augmentation conséquente sachant que Xincheng Tungsten produit actuellement entre 3 000 tonnes et 4 000 tonnes par an d'APT. La construction a commencé en juillet 2018 pour un coût total de \$ 70,7 millions et les opérations d'essai se sont achevées en novembre 2019.

En Europe, un certain nombre de projets ont atteint des jalons importants en 2019, en particulier Barruecopardo (compagnie Saloro) et La Parrilla (compagnie W Resources) en Espagne.

Les premiers concentrés du projet Barruecopardo de Saloro ont été produits en octobre 2019 et la confirmation des premières ventes de 20 tonnes de cargaisons à des acheteurs internationaux a été donnée fin novembre par Ormonde Mining (propriétaire à 30 % de Saloro).

Le projet phare de la société britannique W Resources, La Parrilla, est quant à lui monté en production au dernier trimestre 2019, avec 21,4 tonnes de concentré de tungstène et 7,9 tonnes de concentré d'étain produites. La société a indiqué que les qualités initiales de concentrés de tungstène répondaient au niveau des critères d'expédition de ses clients (en particulier la compagnie autrichienne Wolfram Bergbau und Hütten (WBH) et une compagnie américaine) et que les qualités s'amélioreront à mesure que l'usine passera à la production en régime permanent (24 h/24) pour atteindre 200 tonnes par mois. La compagnie poursuit ses objectifs de développement avec le lancement de la mine de Régua, dans le nord du Portugal. Des synergies importantes doivent être réalisées entre ces deux projets. Lors de l'exploitation initiale de la mine, le minerai de Régua sera traité pour produire un concentré de 8 % à 12 % de WO_3 , qui sera ensuite transporté par camion à l'usine de traitement de La Parrilla pour une mise à niveau jusqu'à obtenir un concentré à 60 % de WO_3 . Le coût en capital de cette usine est estimé à \$ 1,7 million. W Resources possède trois autres projets au Portugal, dont un concernant le tungstène (Tarouca), ainsi que deux sur l'or et le cuivre (Portalegre et Monforte-Tinoca).

En Grande-Bretagne, la mine de tungstène-étain de Drakelands (située près d'Hemerdon à Plymouth) et les installations de traitement autrefois exploitées par le groupe australien Wolf Minerals ont été acquises fin 2019 par la société Tungsten West pour \$ 3,7 millions. La clé du succès futur de ces opérations sera de résoudre les problèmes de traitement, Wolf Minerals ayant très vite rencontré des difficultés de récupération du minerai. Les opérations avaient été arrêtées fin 2018 après la faillite de Wolf Minerals, en raison d'environ \$ 91 millions d'impayés envers ses créanciers. À son ouverture en 2015, Drakelands avait une capacité annuelle de production de 2 600 tonnes de concentrés de tungstène.

Vanadium (V)

La production de vanadium s'est élevée à 73 000 tonnes en 2019 selon l'USGS, soit un petit marché de l'ordre de \$ 1,6 milliard. La production est en légère hausse par rapport à celle de 2018 (+ 2,5 %). Le vanadium est un métal ductile, à point de fusion élevé (1 910 °C), et possédant quatre états d'oxydation, ce qui lui confère des propriétés très intéressantes dans plusieurs de ses applications. La principale utilisation du vanadium est dans la production d'aciers microalliés à haute limite d'élasticité (aciers HLE). Les applications dans la production de divers types d'acier représentent environ 91 % de la consommation mondiale, dont environ 46 % pour les aciers HLE. Dans les applications hors industrie sidérurgique, on trouve la fabrication d'alliages de titane et d'aluminium (4 %), la chimie (3 %) avec la fabrication d'acide sulfurique, d'anhydride maléique et de caoutchouc synthétique, et enfin les batteries à flux redox (2 %).

Le vanadium est commercialisé sous deux formes principales : d'une part, le ferrovanadium, un alliage utilisé pour la production d'aciers spéciaux tels que les aciers inoxydables durs et résistants pour les couteaux ou les instruments chirurgicaux, les essieux, les engrenages pour voitures, les pièces de moteurs à réaction, ou encore des tubes spéciaux pour l'industrie chimique, etc. ;

d'autre part, sous forme de pentoxyde de vanadium (V_2O_5), utilisé comme pigment pour les céramiques et le verre, comme catalyseur dans certaines réactions chimiques et dans la production d'aimants supraconducteurs, ainsi que pour la production des batteries à flux redox.

Sous forme de ferrovanadium, le vanadium est l'un des additifs les plus rentables dans les alliages d'acier en raison des très faibles quantités nécessaires pour augmenter considérablement la résistance à la traction. Il suffit en effet de l'ajout de 0,1 % de V à un acier pour doubler sa résistance. Le principal débouché est donc les aciers HLE. Ce sont des aciers au carbone possédant des limites d'élasticité de 300 à 600 MPa, avec un allongement à la rupture de 20 %. Leur intérêt est d'obtenir ces caractéristiques avec une faible teneur en carbone (< 0,1 %) ce qui les rend soudables sans précautions particulières et leur confère de bonnes tenues au choc, jusqu'à basse température (– 40 °C). Ils sont caractérisés par de faibles teneurs en vanadium (moins de 0,15 %) et d'autres métaux d'alliages (niobium ou molybdène) qui forment également des précipités de très petite taille en s'associant avec le carbone et l'azote dissous dans l'acier, ce qui produit le durcissement et les bonnes caractéristiques mécaniques. Les aciers HLE sont en particulier utilisés pour des aciers résistants aux chocs et aux vibrations. Le développement de ces aciers a permis, entre autres, la mise

Vanadium
(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production minière	82 700	77 800	79 000	71 200	71 200	73 000
Afrique du Sud	21 000	14 000	10 000	7 960	7 700	8 000
Brésil			8 000	5 210	5 500	7 000
Chine	45 000	42 000	45 000	40 000	40 000	40 000
États-Unis						470
Russie	15 100	16 000	16 000	18 000	18 000	18 000
Autres pays	580	5 800				

Prix vanadium pentoxide
Caf Europe
(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

en œuvre de normes de construction plus strictes en Chine (changement des standards pour les constructions antisismiques, les fers à béton devant dorénavant être en acier HLE au vanadium), en partie responsables de la hausse de la demande de vanadium en 2017 et 2018.

Le vanadium peut aussi être allié à l'aluminium, avec lequel il crée des alliages ultralégers et plus résilients. Enfin, les alliages avec le titane, par exemple le TAV6 (90 % de titane, 6 % d'aluminium et 4 % de vanadium), présentent le meilleur rapport robustesse/légèreté et sont essentiels en construction aéronautique ou spatiale. Le vanadium peut aussi avoir des applications dans l'industrie nucléaire, car il n'absorbe pas facilement les neutrons.

Les batteries à flux redox au vanadium présentent des caractéristiques prometteuses pour le stockage stationnaire d'énergie, bien que ne représentant que 2 % de la demande ces dernières années. Leur fonctionnement utiliserait environ 7 kg de pentoxyde de vanadium (V_2O_5) par kWh d'énergie stockée. Elles fonctionnent par oxydoréduction, mettant à profit les quatre différents degrés d'oxydation du vanadium au sein de l'électrolyte. Plusieurs pilotes de stations de stockage d'énergie équipées de batteries à flux redox au vanadium ont été créés, principalement en Chine (l'une dans la province du Hubei, par l'opérateur Pu Neng, l'autre dans la province de Liaoning de 800 MWh) ou plus récemment en Allemagne par la société RedT (70 MWh). Le vanadium est également utilisé dans certaines batteries au lithium, comme c'est le cas dans les véhicules Blue, Car d'Autolib à Paris, qui font appel à une technologie lithium-métal-polymère, avec des cathodes en pentoxyde de vanadium, carbone et polymère.

La production mondiale de vanadium émane de trois sources : la production primaire, la coproduction et la production secondaire. Celle à partir de sources primaires représente 14 % du vanadium produit. Elle est issue principalement de magnétite titanifère avec des minerais dont la teneur en oxyde de vanadium est comprise entre 1 % et 2 %. La coproduction à partir de laitiers d'aciérie constitue 74 % de la production mondiale, tandis que les 12 % restants proviennent d'une production secondaire issue du traitement de cendres

volantes, de résidus pétroliers, de scories de fonte et de catalyseurs usagés riches en vanadium. Le vanadium est caractérisé par sa forte affinité avec le carbone, ce qui explique sa concentration naturelle dans certains gisements pétroliers ou dans des schistes noirs riches en matière organique, ainsi que dans les résidus industriels (laitiers d'aciérie, cendres volantes, résidus pétroliers).

Lors de la production primaire de vanadium, celui-ci est souvent aggloméré avec du titane, qui doit être séparé en tant qu'impureté pendant le traitement. Plus la teneur en titane dans le minerai est élevée, plus il est difficile d'éliminer le vanadium. Le produit final est le pentoxyde de vanadium, qui peut être utilisé soit directement, soit pour fabriquer du ferrovanadium destiné à l'industrie de l'acier.

En 2019, la première estimation de la production mondiale de vanadium par l'USGS est de 73 000 tonnes de vanadium contenu. Trois pays représentent 90 % de la production mondiale de vanadium : la Chine (54 %), la Russie (25 %) et l'Afrique du Sud (11 %). Le Brésil complète le tableau avec près de 7 000 tonnes provenant de la mine de magnétite de haute qualité de Maracas, dans l'État de Bahia, exploitée par la compagnie Largo Resources. Cette production est achetée à l'avance à 100 % par Glencore par un accord de long terme d'une durée de six ans.

En Chine, l'augmentation progressive de l'offre depuis les années 2000 résulte principalement de la croissance de la coproduction dans les activités sidérurgiques existantes, mais aussi de la hausse constante des niveaux de production secondaire. Au cours du « super-cycle » des matières premières (2002-2012) qui a vu les prix du vanadium et du minerai de fer augmenter considérablement, les producteurs chinois ont lancé de vastes projets d'expansion de capacités, conduisant à des niveaux mondiaux records de production (90 000 tonnes en 2014). L'industrie du vanadium chinoise est concentrée entre quelques grands groupes sidérurgiques, dont Pangang Group Vanadium Titanium & Resources Co. et Hebei Iron & Steel Group Co. La production primaire à partir de magnétite devrait également se développer avec des groupes tels que Xining Special Steel Co., Zhejiang Hailiang Co., et Shanghai Dingli Technology Development Group.

En Afrique du Sud, le complexe du Bushveld est le siège de l'essentiel de la production du pays, désormais assurée par deux producteurs : Glencore d'une part, avec la mine Rhovan (9 200 tonnes par an de V_2O_5 en 2018) et, d'autre part, la compagnie Bushveld Minerals qui ambitionne de devenir un important producteur intégré, incluant la production de batteries redox au vanadium avec la mine et l'usine de Vametco (4 570 t/an V_2O_5), rachetée à Evraz en 2017, ainsi que les projets Mokopane et Brits Vanadium. En mai 2019, la société a acquis la société Vanchem pour \$ 68 millions, dans le prolongement de sa stratégie de croissance.

Aux États-Unis, la société Energy Fuels – un important producteur d'uranium – a annoncé fin 2018 avoir repris la production de vanadium dans son complexe de White Mesa Mill (Utah). Energy Fuels devrait produire mensuellement environ 440 tonnes de V_2O_5 entre 2019 et 2020 et les ressources ont été estimées à 70 000 tonnes. De plus, la société possède plusieurs autres mines d'uranium susceptibles de fournir du vanadium (La Sal Complex, Whirlwind, etc.).

En août 2019, US Vanadium LLC, basée à New York, a conclu un accord avec Evraz Stratcor pour acquérir l'usine de traitement de vanadium de Hot Springs en Arkansas. L'installation produit des oxydes de vanadium de haute pureté et des produits chimiques en vanadium en aval pour les clients des industries du catalyseur, de la chimie, de la pétrochimie, du titane et du stockage d'énergie.

Compte tenu des réserves identifiées, l'Australie, le Canada, le Pérou, les États-Unis et Madagascar ont chacun le potentiel pour devenir des producteurs importants de vanadium. En termes d'exploration, on assiste actuellement à un découplage progressif entre la production de vanadium et celle de minerai de fer, avec un nombre croissant d'exploitations ciblées exclusivement sur le vanadium, notamment au Brésil, en Afrique du Sud ou en Australie (encouragée par la hausse récente du prix du vanadium). La teneur en titane est également un paramètre important de ces projets. Une faible teneur en titane dans ces gisements de magnétite est une caractéristique attrayante d'un projet au vanadium du fait de la difficulté de les séparer et des prix respectifs de ces deux métaux.

Selon S&P Global, le cumul des ressources et des réserves conformes aux standards internationaux atteindrait 73 Mt de vanadium. En tête de file des pays attractifs, l'Australie, qui compte dix-sept projets portant sur le vanadium et substances connexes, dont celui très avancé de Mount Peake développé par la compagnie TNG ou le projet Speewah Dome mené par la société King River Resources.

Le recyclage représente environ 10 % de la consommation, par récupération du vanadium contenu dans les aciers rapides, les superalliages et les catalyseurs usés.

Comme de nombreux autres petits métaux, il n'y a pas de cotation publique du vanadium. Le prix est établi directement entre producteurs et utilisateurs. Le prix spot moyen du pentaoxyde de vanadium (V_2O_5) européen est revenu à un niveau moyen de \$ 22,1/kg en 2019 – contre \$ 40,5/kg en 2018 –, ce qui illustre une hausse très ponctuelle des prix liée à une réaction conjoncturelle (augmentation de la demande des aciéristes chinois suite à l'augmentation des standards pour les constructions antisismiques). La forte substitution par le ferroniobium – dont les prix sont restés stables – est en grande partie responsable de l'effondrement des prix du vanadium en 2019 (voir la section consacrée au niobium). Le retour à la parité des prix entre le ferrovanadium et le ferro-niobium pourrait entraîner un mouvement inverse en faveur du vanadium, dont l'ampleur, à ce stade, n'est pas claire.

Toutefois, bien que prometteuse pour le stockage stationnaire d'énergie, la technologie des batteries au vanadium à flux redox ne montre pas un degré de maturité suffisant pour s'approprier une grande part du marché à court terme. Le battage médiatique concernant les batteries redox au vanadium semble ainsi s'être momentanément estompé, et le marché du vanadium semble équilibré à court terme.

Zirconium (Zr)

Le zirconium est un élément relativement abondant dans la croûte terrestre avec une concentration de 0,028 %, deux fois plus importante que celle du zinc et quatre fois plus importante que celle du cuivre. Dans le tableau périodique des éléments, le zirconium est situé sur la même colonne

que le titane et l'hafnium, avec lesquels il partage plusieurs caractéristiques physico-chimiques. Le zirconium est principalement issu du minéral zircon, un silicate de zirconium (ZrSiO_4), qui est le plus souvent utilisé sous forme broyée. Seulement 3 % des zircons récupérés vont servir à la production de zirconium métal.

La demande mondiale en zircon s'est élevée en 2019 à environ 1 Mt selon les données de la société Sheffield Resources. Près de 80 % de la demande mondiale est concentrée dans trois zones géographiques : la Chine (47 %), l'Europe (21 %) et l'Inde (10 %). Les principaux usages du zircon sont la production de céramiques (47 %), de produits chimiques (21 %), de matériaux réfractaires (17 %), de sables de fonderies (12 %) et celle d'éponge de zirconium métal (3 %). Le zircon est également traité pour produire de la zircone, un oxyde de zirconium (ZrO_2). La zircone est utilisée dans de nombreuses applications comme les réfractaires, les abrasifs et les supports de catalyseurs, ainsi que pour la joaillerie bon marché, les cristaux transparents de zircone pouvant être taillés de manière à évoquer le diamant dont ses propriétés optiques remarquables le rapprochent.

Les différents débouchés de la production de céramiques sont la fabrication de carreaux (environ 85 %), de produits sanitaires (14 %) et de vaisselle (1 %). Une fois la céramique finement broyée, l'ajout de zircon permet d'obtenir un bon pouvoir opacifiant, ainsi qu'une très bonne résistance à l'abrasion et aux agents chimiques.

L'élaboration du zirconium métal à partir du zircon ou de la zircone ne représente que 3 % de consommation de zircon. Elle est cependant un secteur à haute valeur ajoutée. Le zirconium métal est utilisé pour plus de deux tiers dans l'industrie nucléaire, vu son excellente transparence aux neutrons. Il peut être sous forme d'alliages Zircalloy 1, Zircalloy 2 ou Zircalloy 4. Ces derniers servent de gaines isolantes autour de l'uranium enrichi dans les réacteurs nucléaires. Ces alliages contiennent différents métaux en essayant d'utiliser le moins possible d'hafnium, car celui-ci a des propriétés inverses au zirconium quant à l'absorption des neutrons. En effet, le zirconium présente une faible section efficace (faible réaction avec les neutrons émis par l'uranium) ainsi qu'une bonne tenue aux fortes températures et à la corrosion.

En plus du secteur nucléaire, le zirconium métal est utilisé sous forme d'alliages et superalliages pour l'industrie chimique et l'aéronautique.

Selon Titanium Zirconium Minerals International (TZMI), la demande en zircon devrait afficher une hausse d'environ 2,8 % par an d'ici 2030. Celle-ci est portée principalement par la consommation du secteur de la céramique pour les produits sanitaires. L'urbanisation massive en Inde devrait également tirer la consommation de zircon vers le haut. Concernant la demande pour le zirconium métal, elle va être corrélée à l'industrie du nucléaire. Selon l'Association mondiale du nucléaire, il y avait 449 réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde à la fin de l'année 2018, contre 448 en 2017. En outre, 55 réacteurs étaient en construction, dont 36 en Asie et 10 en Russie et Europe de l'Est, soulignant la poursuite de la croissance de l'énergie nucléaire dans les pays émergents, et ce, malgré le développement alternatif de sources d'énergies « renouvelables » à l'échelle mondiale.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production de concentré de zircon a été estimée à 1,4 Mt en 2019, un chiffre proche de celui de 2018 (1,48 Mt). Quatre pays représentent plus des trois-quarts de la production mondiale de zircon, ce sont : l'Australie avec 38 % de la production mondiale (550 000 tonnes), l'Afrique du Sud (370 000 tonnes), les États-Unis (100 000 tonnes) et la Chine (80 000 tonnes). L'USGS évalue à 62 Mt les réserves mondiales d'oxyde de zirconium en 2019, en chute de 15 % par rapport à 2018 (73 Mt), dont 68 % en Australie et 10 % en Afrique du Sud.

En raison de sa forte densité (entre 3,9 et 4,8 g/cm³), le zircon se concentre dans des sables de type « placers ». Il est souvent associé à d'autres minéraux lourds, comme le rutile et l'ilménite (minerais de titane), la magnétite (minerai de fer) ou la monazite (minerai de terres rares). Ces placers correspondent à d'anciens dépôts fluviaux et peuvent avoir été remobilisés par le vent pour former parfois d'épaisses dunes, comme dans la province de KwaZulu-Natal (KZN) en Afrique du Sud. Les sables riches en zirconium sont purifiés par des concentrateurs à spirale afin de séparer les éléments légers, tandis que des séparateurs magnétiques permettent d'extraire l'ilménite et

Zirconium
(en milliers de tonnes de concentré)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production mondiale (arrondi)	1 420	1 520	1 320	1 600	1 480	1 400
Afrique du Sud	387	380	360	377	350	370
Australie	551	567	450	505	560	550
Chine	150	140	140	140	140	80
États-Unis		80	50	80	100	100
Inde	40	40	40			
Indonésie	110	110	110	110		
Kenya				44	45	50
Mozambique	51	52	68	74	48	50
Sénégal			53	82	64	70
Autres pays	130	150	96	138	170	170

**Prix de l'éponge de zirconium
+ Hafnium métal**
(en yuans/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

le rutile. La plupart des compagnies exploitent et produisent sur place un concentré sableux riche en oxyde de zirconium. Ce concentré est soit utilisé directement dans certains usages, soit transformé en zircon ou en composés chimiques pour d'autres usages.

L'autre minéral contenant du zirconium est la baddeleyite, qui contient jusqu'à 99,3 % d'oxyde de zirconium (ou zircon de formule ZrO_2), ainsi qu'un peu d'hafnium. À l'échelle mondiale, les quantités produites *via* cette filière sont faibles, la baddeleyite étant seulement exploitée dans la zone de Kovdorsky, en Russie, par la société Eurochem.

Le zirconium métal est élaboré par une série d'étapes comprenant la carbochloration à partir soit de zircon, soit du zircon, puis par réduction *via* le procédé Kroll. Les éponges de zirconium métal obtenues contiennent jusqu'à 5 % d'hafnium. Dans le cas où le métal est utilisé pour l'industrie nucléaire, d'autres traitements complexes et très coûteux doivent avoir lieu pour séparer le zirconium de l'hafnium.

La production de zirconium métal était estimée à environ 7 000 tonnes en 2012 par la *Minor Metals Trade Association* (MMTA), dont 3 000 tonnes pour les États-Unis, 1 800 tonnes pour la France, 1 000 tonnes pour la Russie, 800 tonnes pour la Chine et 400 tonnes pour l'Inde. En France, les éponges de zirconium sont pro-

duites à partir de zircon, sur le site de Jarrie, par la société Framatome, filiale d'Orano (ex-Areva). Ces éponges sont ensuite livrées à l'usine d'Ugine pour y être transformées en alliages sous différentes formes utilisées dans divers secteurs, dont l'industrie nucléaire.

Le zirconium métal est recyclé à travers les déchets issus de la fabrication des éponges de zirconium. Dans les autres usages, en raison de leur nature dispersive, le zirconium n'est presque pas recyclé.

Du fait de son prix relativement élevé, les industriels ont développé des substituts à l'usage du zirconium, entraînant toutefois souvent des baisses de performances. Le zircon peut être remplacé par de la chromite ou de l'olivine dans les fonderies, par du spinelle et de la dolomite dans les réfractaires, ainsi que par du niobium, du tantale et de l'acier inoxydable dans l'industrie nucléaire.

Les prix du zirconium sont établis par négociation entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen de l'éponge de zirconium (teneur de 99,4 % et contenant de l'hafnium) a été, en 2019, de ¥ 237/kg soit \$ 34/kg, un prix en baisse de 5 % par rapport à 2018 (\$ 37/kg).

Pour Fastmarkets, cette chute des prix est due à une conjonction de plusieurs facteurs comme un ralentissement de l'économie mondiale, une baisse de la demande en matériaux réfractaires en

Chine et le développement de la substitution dans les céramiques. Par ailleurs, la consommation de zircon, passée sous la barre du million de tonnes en 2019, pourrait même atteindre 850 000 tonnes à 900 000 tonnes en 2020. Néanmoins, le développement de plusieurs applications nécessitant de la zircone ou du zirconium métal dans le secteur de la chimie devrait permettre de maintenir les prix et donc le marché à flot.

Toujours selon la société TZMI, la production pourrait également chuter dans les prochaines années en raison d'une baisse des minerais de qualité qui sont généralement exploités lors des premières années de l'exploitation. Bien que les réserves en zircon dépassent le million de tonnes dans les projets en cours d'étude, seulement une infime partie d'entre eux verront le jour dans un futur à moyen terme. TZMI prévient que l'offre en zircon pourrait passer sous la barre du million de tonnes d'ici 2024. À cela s'ajoute le fait que la production de zircons dans la province de Hainan – qui représente 90 % de la production chinoise, soit environ 150 000 tonnes – a été quasiment stoppée en 2019 en raison de la mise en place d'un statut de zone de libre d'échange pour le secteur financier et industriel, ce qui a provoqué de nombreuses fermetures de mines. TZMI estime que la production dans cette province pourrait tomber à moins de 10 000 tonnes par an, ce qui pourrait conduire la Chine à ne plus exploiter ce minéral dans un futur proche. Si la production d'oxychlorure de zirconium en Chine – évaluée à 200 000 tonnes par an – consomme une grande quantité de zircons (plus de 130 000 tonnes annuellement), elle est également soumise à de sérieux problèmes environnementaux puisque la production d'oxychlorure génère des déchets contenant de l'uranium et du thorium. De plus, les deux tiers des entreprises chinoises produisant ce composé se situent dans des régions très arides où l'eau est évidemment un enjeu majeur. Plusieurs usines pourraient donc fermer dans les prochaines années.

À l'instar de celle du titane, la filière du zirconium est assez complexe du fait des nombreuses étapes de transformation : zircon/baddeleyite, zircone, composés chimiques, zirconium métal, etc. De plus, les acteurs et les lieux de production sont nombreux et dispersés géographiquement. Ces caractéristiques font de la production de zirconium

métal un secteur stratégique et à haute valeur ajoutée, bien que minoritaire au regard des usages pour l'industrie des céramiques, qui tirent l'essentiel du marché.

Hafnium (Hf)

L'hafnium est un métal de transition ductile, résistant à la corrosion et chimiquement similaire au zirconium. Il se trouve naturellement dans les minerais de zirconium (zircon et baddeleyite) avec un ratio d'une part d'hafnium pour 50 parts de zirconium. L'hafnium étant produit à partir des résidus de la purification du tétrachlorure de zirconium, il convient de se référer à la section précédente sur le zirconium pour une analyse plus complète.

La demande en hafnium est d'environ 70 tonnes. Il est utilisé pour près de la moitié des usages dans les superalliages, comme stabilisateur haute température. L'hafnium est également utilisé sous forme d'anode dans les torches à plasma et il est retrouvé en dépôts pour différentes applications optiques. Enfin, ses propriétés d'absorption des neutrons en font un métal particulièrement prisé pour les barres de contrôle dans l'industrie nucléaire (écrans à neutrons permettant d'arrêter au mieux la réaction en cas d'urgence), en particulier dans les sous-marins. Ce dernier usage ne représente cependant que 2 % à 3 % de la demande mondiale en hafnium.

Les perspectives de croissance des secteurs aéronautique (+ 5 % par an, avec un doublement du trafic aérien dans les quinze prochaines années) et nucléaire devraient tirer la croissance de la demande mondiale.

Les éponges d'hafnium métal sont produites par réduction du tétrachlorure d'hafnium qui est lui-même un dérivé de la fabrication du zirconium métal pour l'industrie nucléaire. La production est de l'ordre de 70 tonnes à 80 tonnes par an et provient essentiellement de France (43 %) et des États-Unis (41 %). Les autres producteurs sont l'Ukraine et la Chine qui comptent chacun pour 8 % de la production mondiale selon la compagnie Lipmann Walton & Co, repris par la Commission européenne en 2017. Comme pour le zirconium, c'est la société Framatome, filiale d'Orano (ex-Areva), qui produit de l'hafnium ultrapur sur le site de Jarrie pour les applications aéronautiques

principalement. Selon les données du commerce extérieur, la France a exporté 35 tonnes d'hafnium en 2019 (contre 30 tonnes en 2018) dont 9 tonnes vers les États-Unis, 15 tonnes vers l'Allemagne et 7 tonnes vers la Grande-Bretagne.

Il n'existe pas de calcul normalisé des ressources et réserves d'hafnium. Néanmoins, l'USGS estime les réserves de zirconium à 62 Mt. Il est alors possible de déterminer de manière très simplifiée les réserves en hafnium en utilisant le ratio Zr : Hf soit 50 : 1. Cela représenterait environ 1,2 Mt d'hafnium.

Du fait des très faibles quantités utilisées, le recyclage de l'hafnium est quasiment inexistant.

Dans certains superalliages, l'hafnium peut être substitué par le zirconium.

Les prix de l'hafnium sont établis par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Ils dépendent très fortement de ceux du zirconium. En 2019, le prix moyen de l'hafnium (99 %) a été de \$ 832/kg selon Argus Media. L'offre et la demande affichent depuis plusieurs années un certain équilibre. Les réserves et ressources en minéraux contenant de l'hafnium (et du zirconium) sont conséquentes et devraient faire face à une hausse de la demande soutenue par l'industrie aéronautique.