

CYCLOPE

sous la direction de Philippe Chalmin et Yves Jégourel

Les Marchés Mondiaux

2019

Matières premières - Monnaies - Services - Agriculture -
Énergie - Finance - Industrie - Commodités

“Les illusions perdues”

Honoré de Balzac

CYCLOPE

2019

**Les Marchés
mondiaux**

Les illusions perdues

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 **3 650 euros HT**.

2. **L'abonnement à la synthèse mensuelle est fixée à 1 350 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	VII
Les collaborateurs de CyclOpe 2019	XI
Les auteurs de CyclOpe ont publié en 2018 et 2019	XVI
Les entreprises qui ont soutenu CyclOpe en 2019	XXI
Première partie : Les illusions perdues	1
I Les illusions perdues	3
II Le grand jeu.....	33
III De rêves en illusions	41
– Chine, Belt and road initiative, saison 2 : « tenir la route et serrer la ceinture ».....	42
– Inde 2019 : le Modi Raj en question	53
– Amérique du Sud : économie en berne et risques politiques .	61
– La Russie et ses nouvelles alliances	74
– Afrique du Nord et Moyen-Orient : l’eau ne coule plus sous les ponts	80
– Afrique subsaharienne : sur un fil.....	91
IV Tempêtes commerciales et climatiques.....	105
– Avis de tempête sur le commerce mondial.....	106
– Changements climatiques : Katowice et l’enjeu de la sortie du charbon	121
– Le climat en 2018 : la tendance au réchauffement sur le long terme se poursuit	136
Deuxième partie : Les marchés.....	143
Les marchés mondiaux en 2018, perspectives 2019	145
I Les marchés financiers.....	163
II Grains et agriculture tempérée.....	215
III Produits tropicaux	369
IV Produits aquatiques.....	471
V Minerais et métaux	491
VI Énergie.....	659
VII Grands marchés industriels.....	747
VIII Services.....	795

Les collaborateurs de CyclOpe 2019

Philippe CHALMIN Coordination générale	Professeur d'histoire économique à l'Université Paris-Dauphine, Président de l'Observatoire de la Formation des Prix et des Marges des Produits Alimentaires	Au fil de l'année... Les illusions perdues, Agriculture, OMC Marchés dérivés, Art, Tabac
Yves JÉGOUREL	Maître de conférences à l'Université de Bordeaux, Senior Fellow au Policy Center for the New South (Rabat)	Coordination minerais et métaux Fer et acier, Argent

Sébastien ABIS	Directeur du Club DEMETER et chercheur associé à l'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
Mickaël ATTIA	Crop Analyst, GEOSYS	Climat et grandes cultures
Stéphanie AYRAULT	Journaliste agricole	Jute
Jean BAKOUMA	Directeur adjoint Production et consommation durables au WWF	Bois tempérés
Jean-Joseph BOILLOT	Chercheur associé à l'IRIS Coprésident du Euro-India Economic & Business Group (EIEBG)	Inde
Laurence BOISSEAU	Journaliste, <i>Les Échos</i>	Minerais et métaux
Pascal BONIFACE	Directeur de l'IRIS (Institut de relations internationales et stratégiques)	Panorama géopolitique

Antoine BOUBAULT	Chercheur-ingénieur en intelligence minérale au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)	Petits métaux
Benoît de CARBONNIÈRES	CEO - Forrest Industry Groupe Forrest International Lubumbashi - Haut Katanga 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 UMR MOISA (Montpellier)	Vin
Sylvie CORNOT-GANDOLPHE	Présidente SCG Consulting	Charbon vapeur, Charbon à coke
Jean-Philippe DAUVIN	Chef économiste honoraire STMicronics	Semi-conducteurs
Michel DERDEVET	Secrétaire général d'Enedis, Professeur au Collège d'Europe de Bruges	Réseaux électriques
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 d'économie à l'Université Paris-Dauphine, Directeur du 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, Thé
Ralph ICHTER	Président Euroconsultants, (Washington)	Politique agricole et commerciale américaine
Dominique JACOMET	Directeur général de l'Institut français de la mode (IFM)	Textiles
Muryel JACQUE	Journaliste Matières premières <i>Les Échos</i>	Or
Helga JOSUPEIT	Chercheur, marché des produits de la mer (Rome, Italie)	Produits aquatiques
Félix KANE	Consultant Agriculture ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt	Fruits et légumes tempérés, Pommes de terre Fruits secs
Alain KARSENTY	Économiste au Cirad	Bois tropicaux
Elisabeth LACOSTE	Directeur de la Confédération internationale des betteraviers européens, CIBE (Bruxelles)	Sucre, Éthanol
Gaétan LEFEBVRE	Géologue-économiste au BRGM	Petits métaux
Mathieu LEGUERINEL	Géologue-économiste au BRGM	Petits métaux
Jean-Paul LEHMANN	Membre de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN)	Uranium
Julien LEMOND	Weather Product Manager GEOSYS (Toulouse)	Le climat en 2018 la tendance au réchauffe- ment sur le long terme se poursuit
Denis LOEILLET	Responsable de l'Observatoire des marchés du Cirad-Persyst UR 26 et rédacteur en chef de la revue <i>FruiTrop</i> (Montpellier)	Agrumes, Bananes, Ananas, Fruits tropicaux
Bernard LOMBARD	Trade & Industrial Policy Director Confederation of European Paper Industries (CEPI) (Bruxelles)	Pâtes et papiers, Fibres recyclées
François LUGUENOT	Analyste de marchés de matières premières agricoles	Céréales
Béatrice MATHIEU	Rédacteur en chef à <i>L'Express</i>	Miel

Patricio MENDEZ DEL VILLAR	Économiste au 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 d'économie à Montpellier Supagro, 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	Ferrailles
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 l'IRIS	Pétrole, Produits pétroliers
Christian de PERTHUIS	Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine, 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 (London School of Economics) 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 Cirad Directeur adjoint de l'UMR IATE (Ingénierie des agro-polymères et technologies émergentes)	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	Métaux non ferreux, Engrais, Fret maritime
Boris SOLIER	Maître de conférences à l'Université de Montpellier Responsable du programme de recherche « Transitions énergétiques » Chaire Économie du Climat, Université Paris-Dauphine	Électricité, Nucléaire
Perrine TONIN	Responsable des études économiques Groupe Avril	Oléoprotéagineux
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
Tancrede VOITURIEZ	Chercheur au 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	

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 métaux alcalins, jouant un rôle très important dans le stockage de l'énergie (surtout le lithium) ;
- les éléments semi-conducteurs (notamment Si, Ga, Ge, As, Se, In, Te), à la base de l'électronique moderne et de ses applications en plein essor, 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 fabrication 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 comportent une première estimation des productions 2018, telles que publiées par l'*United States Geological Survey* (USGS), le Service géologique des États-Unis, dans son analyse annuelle de l'industrie minérale mondiale « Mineral Commodity Summaries ». Ces données sont

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 2017	Production 2018	Variation de la production 2018/2017 (en %)	Réserves 2017	Réserves 2018	Variation des réserves 2018/2017 (en %)
Antimoine	kt	Sb	137	140	2.19%	1 500	1 500	0.00%
Béryllium	t	Be	210	230	9.52%	N/A	N/A	N/A
Bismuth	kt	Bi	16 900	16 000	-5.33%	N/A	N/A	N/A
Cadmium	t	Cd	25 400	26 000	2.36%	N/A	N/A	N/A
Chrome	kt	Chromite	35 700	36 000	0.84%	510 000	560 000	9.80%
Cobalt	t	Co	120 000	140 000	16.67%	7 100 000	6 900 000	-2.82%
Gallium	t	Ga	320	410	28.13%	N/A	N/A	N/A
Germanium	kt	Ge	106	120	13.21%	N/A	N/A	N/A
Hafnium	t	Hf	70-80	70-80	N/A	N/A	N/A	N/A
Indium	kt	In	714	750	5.04%	N/A	N/A	N/A
Lithium	kt	Li	69	85	23.19%	16 000	14 000	-12.50%
Magnésium	kt	Mg	1 050	970	-7.62%	N/A	N/A	N/A
Manganèse	kt	Mn	17 300	18 000	4.05%	680 000	760 000	11.76%
Molybdène	kt	Mo	297	300	1.01%	17 000	17 000	0.00%
Niobium	kt	Nb	69.10	68	-1.59%	> 4300	>9100	111.63%
Rhénium	t	Re	48.8	49	0.41%	2 500	2 400	-4.00%
Scandium	t	Sc	<15	<15	N/A	N/A	N/A	N/A
Sélénium	t	Se	2 710	2 800	3.32%	100 000	99 000	-1.00%
Silicium	kt	Si	6 580	6 700	1.82%	N/A	N/A	N/A
Tantale	t	Ta	1 810	1 800	-0.55%	>110000	>110 000	0.00%
Tellure	t	Te	470	440	-6.38%	31 000	31 000	0.00%
Terres rares	kt	Oxydes de terres rares	132	170	28.79%	120 000	120 000	0.00%
Titane métal	kt	Ti	181	180	-0.55%	N/A	N/A	N/A
Tungstène	t	W	82	82	-0.12%	3 200	3 300	3.13%
Vanadium	kt	V	71	73	2.53%	20 000	20 000	0.00%
Zirconium	kt	Concentrés de zircon	1 550	1 500	-3.23%	74 000	73 000	-1.35%

(Source des données : USGS 2018 - Mineral Commodity Summaries)

à considérer comme des estimations provisoires, susceptibles de révisions importantes 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 2018, la croissance rapide de la production mondiale de véhicules électriques a poursuivi sa lancée, témoignant d'une dynamique désormais bien enclenchée. Le nombre de véhicules légers électriques et hybrides en circulation dans le monde a désormais dépassé la barre des 3 millions. La Chine est le premier marché mondial avec 55 % de la production et des ventes, suivie par l'Union européenne (UE), le Japon et les États-Unis. En Europe, les ventes ont progressé de 44 % en un an, avec 180 000 véhicules électriques et hybrides vendus au 1^{er} semestre 2018 contre 125 000 pour la même période de l'année précédente. Les conséquences s'observent directement sur la consommation et la modification des circuits industriels des petits métaux concernés. Les premiers touchés sont les « métaux

des batteries », en particulier le cobalt et le lithium utilisés dans les cathodes des batteries lithium-ion dites « Li-ion ». Leur demande est désormais orientée à plus de moitié vers cet usage. Néanmoins, la production et les prix ayant augmenté très rapidement, l'année 2018 s'est illustrée par une saturation de ces marchés, en particulier en Chine, conduisant à une chute rapide des prix qui cherchent désormais un nouveau seuil d'équilibre.

Avec une hausse de son cours de 155 % sur un an, le vanadium a été le métal phare de l'année 2018. Si la principale cause est liée à son rôle fondamental pour améliorer la qualité des aciers, ses quatre états d'oxydations pourraient également lui offrir des perspectives intéressantes dans le stockage d'énergie à grande échelle issue de sources renouvelables. La bonne santé des industries aéronautique, nucléaire et de défense est confirmée, notamment par un carnet de 1 500 commandes pour les seuls constructeurs Boeing et Airbus en 2018 – ce qui soutient la demande en métaux de superalliages – et par une hausse de 58 % des prix du « zirconium-métal » sur l'année. Dans le domaine de l'électronique et des TIC, les tensions commerciales entre Washington et Pékin ont pesé sur la volatilité des prix d'un certain nombre de petits métaux utilisés pour leurs propriétés semi-conductrices, mais les fondamentaux demeurent solides, en raison notamment du développement toujours plus rapide des réseaux de communication 5G.

Le tableau 1, ci-contre, permet de comparer la première estimation de la production 2018 des métaux étudiés dans ce chapitre avec celle de 2017, 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 2, ci-après, 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 (Sb¹, Be, Bi, Cr, Co, Li, Mn, Mo, Nb, Ta, Terres rares, V, W, Zr) soit au stade de 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 2018 ;
- (Colonne D) : 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

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

Données complémentaires

A	B	C	D	E
Matière première	Premier producteur mondial	Part de la production mondiale du premier producteur en 2018	Sous-produit	Notes
Antimoine	Chine	72 %	Partiellement : plomb, or, zinc	
Bérylium	USA	73 %	Non	
Bismuth	Chine	80 %	Essentiellement : plomb, tungstène	
Cadmium	Chine	32 %	Essentiellement : zinc	W. Prod. US : 400 t. en 2016 (WMD)
Chromite (minerai de chrome)	Afrique du Sud	48 %	Rarement : platinoïdes	Données de production estimées
Cobalt (production minière)	République Dém. du Congo	66 %	Essentiellement : cuivre, nickel	
Gallium	Chine	88 %	Exclusivement : aluminium	Données 2016 (WMD)
Germanium	Chine	65 %	Exclusivement : zinc, charbon	W. Prod. US : 3 t. en 2016 (WMD)
Hafnium	France	43 %	Exclusivement : zirconium	Données 2012 (MMTA)
Indium	Chine	40 %	Exclusivement : zinc, cuivre, plomb, étain	
Lithium	Australie	60 %	Rarement : potasse	W. Prod. US : 2100 t. en 2016 (WMD)
Magnésium	Chine	80 %	Non	
Manganèse	Afrique du Sud	30 %	Non	
Molybdène	Chine	44 %	Partiellement : cuivre	
Niobium	Brésil	88 %	Non	
Rhénium	Chili	55 %	Exclusivement : molybdène	
Scandium	Chine	66 %	Exclusivement : Terres Rares, fer, uranium	Données de production métallurgiques estimées
Sélénium	Chine	34 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc	
Silicium	Chine	60 %	Non	Silicium métal + ferrosilicium
Tantale	Rwanda	38 %	Partiellement : niobium, lithium, étain, Terres Rares	
Tellure	Chine	61 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc, bismuth	
Terres rares	Chine	71 %	Non	
Titane (éponge)	Chine	35 %	Non	
Tungstène	Chine	83 %	Non	
Vanadium	Chine	55 %	Essentiellement : acier, titane	
Zirconium	Australie	33 %	Non	

MMTA : Minor Metals Trade Association

W : donnée américaine confidentielle

WMD : World Mining Data 2018, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus

(Sources des données : USGS 2018, WMD 2018, MMTA)

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 E) : 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 « 2018 » 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.

Antimoine (Sb)

En 2018, la production mondiale d'antimoine métal est estimée par l'USGS à 140 000 t. L'antimoine pur est un semi-métal gris argenté, cassant, mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité. Ses propriétés sont liées à la forme sous laquelle il est utilisé. 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 ou les peintures. En alliage avec le plomb, il est très utilisé pour la fabrication de batteries automobiles, ce qui représente ses deux principaux usages à l'échelle mondiale. Le marché de l'antimoine est de l'ordre de \$ 800 millions. Il fait partie des métaux classés « critiques » par la Commission européenne.

En 2017, d'après les données du consultant Roskill, la consommation d'antimoine était proche de 200 000 t Sb contenues. La hausse de la demande

est toutefois compensée par une diminution des quantités d'antimoine ajoutées dans les produits. Deux usages représentaient 84 % de la demande mondiale. Le premier est la production de retardateurs de flamme (53 % du total), à partir de trioxyde d'antimoine (ATO, sa forme d'intermédiaire la plus répandue, à ne pas confondre avec l'*antimony-tin-oxide*, i.e. l'oxyde d'étain-antimoine). L'ATO combiné avec des ions halogénures (chlore ou brome) fiabilise les propriétés ignifugeantes d'additifs intégrés notamment dans les plastiques. Cet usage devrait continuer sa progression avec le développement des revêtements et matériaux ignifuges divers. Il pourrait toutefois être limité par des réglementations sanitaires plus strictes. En effet, l'antimoine est suspecté d'être cancérigène pour l'homme. Fin 2018, l'Alaska réfléchissait à une interdiction des produits antimoniés.

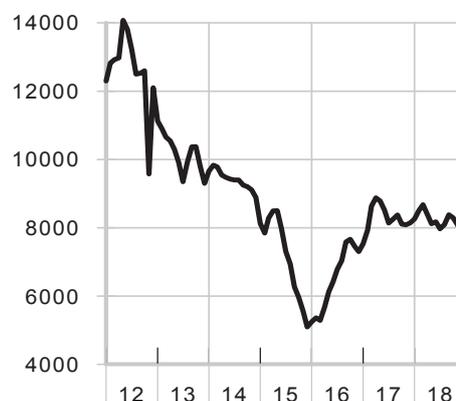
Le deuxième usage est lié à la production de plomb antimonié, représentant 31 % de la demande

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
--	------	------	------	------	------	------

Production mondiale						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	154 000	161 000	141 000	148 000	137 000	139 000
Afrique du Sud	3 100	1 600		1 200		
Australie		5 800	3 700	5 000	3 120	3 100
Birmanie	9 000	3 300	3 000	3 000	1 000	1 000
Bolivie	5 000	5 500	4 200	2 670	2 700	2 700
Chine	120 000	120 000	110 000	108 000	98 000	100 000
Guatemala				25	25	25
Iran				200	300	300
Kazakhstan				573	700	700
Laos				242	340	300
Mexique				196	243	240
Pakistan				114	60	60
Russie	7 000	9 000	9 000	8 000	14 400	14 000
Tadjikistan	4 700	4 700	8 000	14 000	14 000	14 000
Turquie		4 500	2 500	4 000	2 000	2 000
Vietnam				643	380	300
Autres pays	5 200	6 200	1 000			

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

mondiale. Ce dernier est utilisé quasi exclusivement pour la fabrication des batteries automobiles au plomb. L'antimoine permet d'augmenter la dureté, la résistance à la fatigue et à la corrosion du plomb. Cet usage subit deux tendances antagonistes : reconnu pour sa fiabilité, les pays en voie de développement accentuent leur demande, alors que les pays développés utilisent de plus en plus de batteries sans plomb antimoné. Par ailleurs, les véhicules électriques ne nécessitent pas de batteries de démarrage au plomb, ce qui devrait à moyen terme réduire la demande en antimoine pour ce secteur. Roskill prévoit que la filière métallurgique de l'antimoine devienne « autosuffisante », grâce au recyclage bien établi et généralisé des batteries au plomb antimoné, combiné à la diminution de la demande.

Le reste de la demande d'antimoine se répartit dans diverses applications, notamment dans les industries du verre, des émaux et céramiques, mais également des munitions au plomb, du caoutchouc (vulcanisation des caoutchoucs rouges), ainsi que dans la catalyse pour la production de fibres de polyester et du polytéréphtalate d'éthylène (PET), largement utilisé pour la production des bouteilles en plastique. Ainsi, 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 (écrans tactiles) et 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.

La production mondiale d'antimoine métal est estimée par l'USGS à 140 000 t pour 2018, en augmentation de 2 % par rapport à 2017. 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.

Selon l'USGS, la Chine est le premier producteur mondial avec 100 000 t Sb, suivie par la Russie et le Tadjikistan, chacun ayant produit 14 000 t en 2018. Cependant, les difficultés s'ac-

cumulent en Chine sur les plans minier et métallurgique, avec des réserves en baisse, des teneurs très faibles pour les prix pratiqués, ainsi qu'un fort impact environnemental. Ceci a obligé le pays à fermer de nombreuses mines ou à adopter des normes environnementales plus strictes. Selon Roskill, la production minière chinoise a décliné de 7 % par an sur la période 2010-2017. En compensation, la Chine importe de plus en plus de concentrés d'antimoine du Tadjikistan, de Russie, d'Australie, de Birmanie et de Bolivie. Elle a, par ailleurs, réussi tant bien que mal à maintenir sa production minière en 2018, afin de satisfaire ses objectifs de production de Sb métal et d'ATO. Cela lui a permis de produire environ 73 000 t de Sb métal dont une partie a servi à la production de 88 000 t d'ATO, selon Argus Media. Les longues années de réduction des surplus ont donné l'occasion à d'autres acteurs de reprendre de la place sur le marché de l'antimoine.

L'entreprise russe Polyus, un des dix plus gros producteurs d'or au monde, a annoncé qu'elle avait commencé à récupérer l'antimoine de ses résidus miniers en 2018. Sa production annuelle de 2019 pourrait représenter, à elle seule, 20 % de la production mondiale, soit 30 000 t/an, un niveau inégalé. Il faut cependant noter que la quasi-totalité de la production de Polyus (14 000 t) a pour l'instant été destinée aux raffineries chinoises. Ailleurs dans le monde, de nouveaux projets sont développés, comme le projet de raffinage de l'antimoine métal à Krasnokamensk en Russie, par Voyager Group. À Oman, la mise en service possible du « four à antimoine », détenu en partie par Tri-Star Resources, est un autre facteur pouvant entraver la domination chinoise sur le marché du Sb transformé. Ce four pourrait raffiner jusqu'à 20 000 t/an d'antimoine métal et de trioxyde dans les années à venir, à condition qu'il sécurise ses apports de matière première en provenance de Turquie (Goynuk) et/ou du Canada. La compagnie United States Antimony Corp. a redémarré deux fours au Mexique. Mandalay Resources Corp. a prouvé de nouvelles réserves en Australie sur son site de Costerfield, ce qui laisse de bonnes 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'antimoi-

ne contenu en 2018, selon l'USGS), toutefois en baisse de 10 % en 2018. Si la Chine a tendance à importer davantage de concentrés, elle cherche à maintenir un certain contrôle sur l'activité minière en positionnant des acteurs chinois comme China Nonferrous Gold et Tibet Huayu Mining sur de nouveaux projets au Tadjikistan. Cela devrait permettre à la Chine de rester un acteur majeur de ce marché pour les années à venir.

Les stocks de concentrés, de métal, et d'oxyde sont méconnus. Cependant, l'antimoine fait partie

des stocks de substances qui ont été déclarés lors de la fermeture de la bourse Fanya en Chine (voir l'encadré ci-dessous). Fastmarkets les estimait à 18 660 t en 2015. En 2018, il n'a pas été possible de déterminer le devenir de ces stocks.

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. Roskill estime que la baisse de la demande de batteries au plomb antimonifié, couplée à une hausse du recyclage, va faire que la filière métal-

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 lancée 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. Ses promoteurs offraient à la souscription la possibilité d'achat et de vente à tout moment et la promesse de rendements de 13 % par an. Or, ce système reposait sur une forme sophistiquée de schéma de Ponzi et les difficultés sont apparues en 2014, quand la bourse a dû créer un fonds « tampon » pour faire face aux coûts de financement de ses stocks et aux engagements de son fonds auprès de différents investisseurs. Cela n'a pas suffi et, face à ses nombreuses difficultés, 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.

Les quantités rapportées à la fermeture de la bourse – sans information plus précise sur les qualités exactes des produits – étaient respectivement de : 18 660 t d'antimoine, 19 228 t de bismuth, 22 t de cobalt électrolytique, 3 639 t d'indium, 197 t de gallium métal, 92 t de germanium, 431 t de tungstène et 29 651 t d'APT, 3 t d'argent, 35 t de pentoxyde de vanadium, 337 t de sélénium, 149 t de dysprosium et 4 t de terbium.

Depuis, 220 000 investisseurs chinois cherchent à obtenir le remboursement de leurs investissements, représentant environ \$ 6,6 milliards. Le procès se fait toujours attendre. Toutefois, selon Argus Media en mars 2019, il semble qu'un tribunal local ait finalement infligé des amendes d'un milliard de yuans (\$ 150 millions) au *Fanya Metal Exchange* ainsi qu'à quatre sociétés liées à cette bourse, pour des montants de respectivement 500 millions, 50 millions et 5 millions de yuans aux motifs de « levée de fonds illégale » et de « détournement de fonds ». L'ancien président de la bourse, Shan Jiuliang, aurait été condamné à dix-huit ans de prison. Ces décisions de justice ne statuent toutefois pas sur le devenir des stocks, ni même de leur réalité.

Le 28 janvier 2019, à la surprise générale, le tribunal populaire de Kunming a pris la décision de vendre deux lots d'indium métal (respectivement 7,6 t et 27,04 t) aux enchères sur le site internet Alibaba. Or, cette vente n'a suscité aucune offre, se soldant donc par un échec et continuant de maintenir un certain degré d'opacité autour de cette structure et de l'impact potentiel des stocks détenus sur les marchés des petits métaux concernés.

lurgique de l'antimoine pourrait devenir « auto-suffisante ». Ce n'est pas le cas des autres usages, comme les ignifugeants, qui ont tendance à être dispersifs. 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 pour 2018 de l'antimoine métal a été le même que celui de 2017 : \$ 8 230/t. Il est difficile de prédire son évolution pour 2019 au vu des transitions qui sont en cours.

La tendance de la demande future en antimoine devrait être en faible hausse, poussée par des normes de sécurité incendie plus strictes, avec une faible substituabilité pour les retardateurs de flamme. Elle pourrait être cependant freinée par la réduction de la quantité d'antimoine dans les produits, l'abandon progressif des batteries au plomb antimonisé, et par les éventuelles réglementations sanitaires et commerciales à venir, notamment aux États-Unis (Alaska).

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 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 %, mais ces applications n'en sont pour l'instant qu'au stade de la recherche.

Béryllium (Be)

En 2018, la production mondiale de béryllium s'est élevée à 230 t 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. Malgré un quasi-monopole exercé par les États-Unis sur la production primaire, ce petit marché de l'ordre de \$ 150 à 200 millions n'est généralement pas soumis à de grosses tensions, comme l'illustre la stabilité relative observée à nouveau en 2018.

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale de minerai						
	260	290	230	220	214	234
États-Unis	235	270	205	155	150	170
Brésil				5	3	3
Chine	20	20	20	50	50	50
Madagascar				6	6	6
Mozambique	6	2				
Nigeria				6	4	4
Rwanda				1	1	1
Autres pays	1	1	6			

(Source : Mineral Commodity Summaries)

Les propriétés uniques du béryllium comprennent la légèreté, la rigidité et la résistance à la corrosion extrêmes, une transparence aux rayons X très élevée, ainsi qu'une 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 t 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.).

En 2018, la production mondiale s'est élevée à 230 t selon l'USGS, soit 10 % d'augmentation (d'après les données actualisées, révisées à 210 t pour 2017). Les États-Unis demeurent le premier producteur mondial de béryllium avec 170 t, soit 73 % du total. 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 ultra pur et de divers alliages. Les autres productions minières se situent en Chine (de l'ordre de 50 t) 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, où peu de données sont disponibles.

La production métallurgique et de raffinage est plus diversifiée, avec notamment l'acteur japonais NGK Insulators 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 2018 à 21 000 t de Be contenu. Les ressources mondiales (non normées) sont estimées par l'USGS à plus de 100 000 t Be contenues, 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.

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 (susceptible 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 aérospatiale : \$ 350 à \$ 1 900/kg ;
- alliage AlBe (39 % Be) pour composant aérospatial : \$ 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 baisse en 2018 à \$ 500/kg Be, contre \$ 640/kg en 2017.

La croissance de la demande est largement tirée par les besoins en connectique d'alliages CuBe. L'année 2018 a montré une augmentation de la consommation apparente américaine de produits à base de béryllium d'environ 20 % par rapport à 2017, selon les données du premier producteur américain, notamment sur les ventes d'alliages au béryllium et de béryllium métal. La demande en produits électroniques grand public, pour l'industrie de défense, et dans le secteur de l'énergie a tiré cette croissance.

En mai 2018, le Département de l'intérieur des États-Unis, en coordination avec d'autres agences fédérales, a publié une liste de trente-cinq minéraux critiques (83 FR 23295), dont le béryllium fait partie. Dans ce cadre, la *Defense Logistics Agency* a eu pour mission de constituer un stock de défense nationale s'élevant à 47 t de Be métal. Selon l'USGS, l'inventaire de ce stock au 30 septembre 2018 est de : 67 t Be métal, 7 t sous forme de poudre métallique et 1 t sous forme de minerai (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)

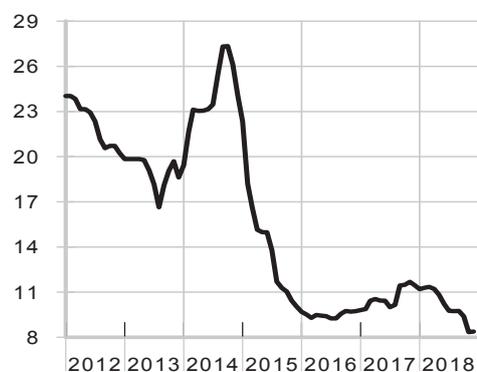
En 2018, la production mondiale de bismuth raffiné a été de 16 000 t selon les données préliminaires de l'USGS. Le bismuth est essentiellement un sous-produit de l'extraction et de la métallurgie du plomb et du tungstène. C'est un métal malléable, à basse température de fusion (271 °C) et semi-conducteur. 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,

Bismuth
(en tonnes)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale de minerai	8 400	13 600	10 300	17 100	16 900	16 300
Bolivie	10	10	10			
Bulgarie					50	50
Canada	35	3	3	25	25	25
Chine	7 500	7 600	7 500	14 000	13 500	13 000
Japon				428	525	590
Kazakhstan				140	270	270
Laos				2 000	2 000	2 000
Mexique	824	948	700	539	513	340
Vietnam		4 950	2 000			
Russie	40	40	40	4		

Prix du bismuth
Marché libre européen
(en dollar/lb)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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, l'USGS estime qu'aux États-Unis, plus de 60 % de la consommation intérieure de bismuth en 2018 est destinée aux industries pharmaceutique et cosmétique. Dans ce pays, l'un des usages les plus populaires est dans le cas de traitements gastriques ou d'ulcères de l'estomac. Néanmoins, l'usage de ces médicaments est plus restreint dans d'autres zones, dont l'Europe, et la répartition des usages est bien différente. 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 2018, la production mondiale de Bi raffiné estimée par l'USGS a été de 16 000 t (cette quantité est toutefois exprimée en poids total et non en Bi contenue). D'autres sources indiquent néanmoins un ordre de grandeur plus proche de 8 000 t à 11 000 t, notamment pour le ministère autrichien du Développement durable et du Tourisme, ce qui illustre l'opacité du marché de ce petit métal et des statistiques disponibles. L'hétérogénéité des statistiques 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-produit 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 80 % 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 2018, les mesures environnementales en Chine se sont poursuivies, avec de moindres effets sur l'offre en bismuth qu'en 2017. De plus, l'année a été marquée par un net recul de la demande et une situation d'excédents sur le marché, provoqué par plusieurs facteurs, en particulier la guerre commerciale entre Pékin et Washington. Des taxes à l'entrée de 10 % imposées par les États-Unis sur le bismuth chinois à partir de septembre ont obligé les producteurs chinois à baisser leurs prix vers les autres marchés, dont l'Europe et le Japon. Certains fournisseurs chinois ont ainsi pâti de marges très faibles et pourraient être contraints de réduire les volumes de production à l'avenir, bien qu'il n'y ait encore eu aucune preuve de réduction effective.

En outre, les informations toujours inaccessibles sur la quantité, la localisation et la potentielle disponibilité des stocks du *Fanya Metal Exchange* pèsent encore sur les prix (voir l'encadré sur ce sujet). En août 2015, à l'effondrement de cette bourse, les stocks de bismuth étaient estimés à 19 228 t (de qualité inconnue), soit plus d'un an de production mondiale.

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 bismuth affiche parmi les pires performances des petits métaux en 2018, avec une baisse de 5 % du prix moyen (Bi 99,99 % Europe) à \$ 10,13/kg.

Au niveau de l'offre primaire, ces dernières années ont vu l'émergence d'un producteur alternatif : la compagnie Masan Resources. Celle-ci est désormais le deuxième producteur mondial avec une capacité de 2 000 t/an de concentrés de

bismuth. Elle exploite la mine de tungstène de Nui Phao, au Vietnam. 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.

5N 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 production de bismuth ultra pur, 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, elle est en pratique quasi inexistante, 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. Au vu de l'avancement des autorisations et des financements, une mise en production peut être envisagée à l'horizon 2020. Les réserves probables et prouvées sont de l'ordre de 40 000 t de bismuth pour une durée de vie de vingt ans.

Cadmium (Cd)

Selon l'USGS, la production mondiale de cadmium en 2018 était de 26 000 t. 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 les usages. 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 (80 %) est la production d'accumulateurs rechargeables au nickel-cadmium (batteries NiCd). L'usage de ces batteries, longtemps utilisées dans les équipements électriques portables, est en déclin continu, du fait du développement rapide des batteries lithium-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). Un autre usage important (18 %) est la production de pigments jaunes, orange ou rouges très utilisés, par exemple pour le revêtement des engins de chantier, car ils protègent l'acier de la corrosion. Un amendement, daté de février 2017, 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

Cadmium
(en tonnes de métal raffiné)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale						
	22 500	22 700	23 200	23 900	25 400	25 700
Australie	380	350	380			
Bulgarie	400	350	360			
Canada	1 400	1 310	1 160	2 310	1 800	1 800
Chine	7 000	7 000	7 600	8 200	8 200	8 200
Corée du Sud	4 000	4 010	4 200	3 600	5 600	5 600
États-Unis	500	550	500	400		
Inde	450	380				
Japon	1 830	1 830	1 960	1 990	2 140	2 100
Kazakhstan	1 200	1 200	1 500	1 500	1 500	1 500
Mexique	1 490	1 410	1 300	1 190	1 160	1 200
Pays-Bas	560	640	640	630	600	900
Pérou	695	769	760	820	797	800
Pologne	400	628	630			
Russie	1 200	1 200	1 300	1 300	1 200	1 200
Autres pays	1 020	1 350	1 410	2 400	2 370	2 400

Prix du cadmium
Marché libre européen

(en dollar/kg)



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

vanadate de bismuth ou sulfure de cérium, ne présentant pas ou moins de risques de toxicité. Cet usage devrait donc lui aussi être fortement réduit d'ici quelques années.

Les usages restants du cadmium (environ 2 %) 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 dérivés. Le plus populaire est le tellure de cadmium (CdTe) pour les cellules photovoltaïques à couches minces, nécessitant environ 100 kg de Cd par MW de capacité de production installée (voir la section consacrée au tellure). Cet usage a un fort potentiel de développement, bien que le silicium domine largement aujourd'hui le marché des cellules photovoltaïques. Dans les panneaux photovoltaïques, le CdTe est encapsulé et ne présente pas de risques sanitaires.

Selon l'USGS, la production mondiale de Cd était de 26 000 t en 2018 (sans la production américaine, tenue secrète), un niveau en légère augmentation par rapport à celui observé en 2017 (25 400 t). En 2018, la Chine, premier métallurgiste du zinc, demeure aussi le premier producteur

mondial de cadmium, avec 32 % 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.

Il n'existe pas d'estimation des réserves en cadmium, celui-ci n'existant qu'à l'état de 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 Retrie Technologies, basée dans l'Ohio (États-Unis), produit des lingots de cadmium secondaire à partir du recyclage des batteries NiCd par pyrométallurgie. Il pourrait ainsi alimenter son voisin First Solar, plus gros fabricant de cellules photovoltaïques à CdTe, qui va fortement augmenter sa capacité de production en 2019 (voir la section consacrée au tellure). Le cadmium peut être substitué dans la plupart des usages, cependant à un coût plus élevé.

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 2018, le marché du cadmium a été relativement actif, avec un prix spot atteignant \$ 3,75/kg en début d'année. Le prix annuel moyen du cadmium en 2018 a été de \$ 2,87/kg, en progression de près de 68 % par rapport à 2017.

Le cadmium est un métal dont l'ingestion sous forme bioassimilable 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 phosphaté (P_2O_5), avec une évolution possible vers 40 mg Cd/kg puis 20 mg Cd/kg. Cette réglementation 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. 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 2018, la production mondiale de chromite – le minerai de chrome – a atteint 36 Mt selon l'USGS, en hausse de 1 % par rapport à 2017 (35,7 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 (70 %). Cet usage ne nécessite pas la production de chrome métal, mais d'un alliage, le ferrochrome, nettement plus facile à produire.

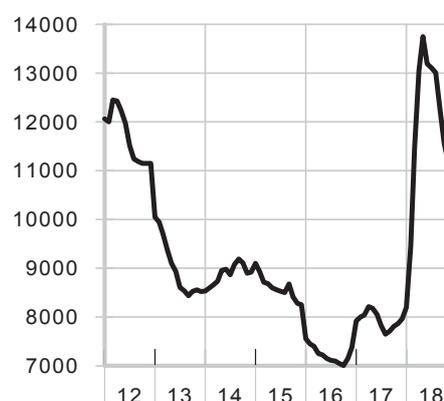
La demande mondiale en chromite se situe autour des 30 Mt et progresse d'environ 3 % par an depuis 2008 selon Roskill. La production de ferrochrome représente 96 % de la demande en chromite. Elle est destinée à 73 % pour la production des aciers inoxydables et à 27 % pour d'autres

Chrome
(en milliers de tonnes)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	28 800	26 400	30 400	30 200	35 700	33 100
Afrique du Sud	13 700	12 000	14 000	14 700	16 500	16 000
Inde	2 950	3 540	3 200	3 200	3 500	3 500
Kazakhstan	3 700	3 700	5 490	5 380	4 580	4 600
Turquie	3 300	2 600	3 500	2 800	6 500	4 500
Autres pays	5 150	4 590	4 220	4 160	4 580	4 500

**Prix du chrome métal
aluminothermique**

(en dollar/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

aciers et alliages au chrome. Le chrome métal ne compte que pour environ 0,5 % de la demande en chromite et est utilisé pour plus de moitié dans les superalliages pour l'aéronautique (parties chaudes des réacteurs d'avion) et l'énergie (turbines à gaz).

Pour justifier son appellation, l'acier inoxydable doit contenir au minimum 10,5 % de chrome. 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 5 % par an d'ici à 2026.

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 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 16 Mt (soit 48 %). Les autres pays producteurs majeurs sont le Kazakhstan (4,6 Mt), la Turquie (6,5 Mt) et l'Inde (3,5 Mt). Enfin, certains pays produisent un peu de chromite dont la Finlande, l'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.

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 quart de la production sud-africaine).

Selon l'*International Chromium Development Association* (ICDA) et Roskill, environ 11,5 Mt de ferrochrome ont été produites en 2015, soit 7 Mt en chrome contenu. Les principaux producteurs de ferrochrome sont la Chine (37 %), l'Afrique du Sud (33 %), le Kazakhstan (10 %), l'Inde (8 %) 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, dans une moindre mesure, de Turquie. 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.

La production mondiale de chrome métal (99,996 % Cr) était de 46 000 t en 2015 et provenait principalement de Russie (35 %), de Chine (26 %), de France (20 %) et du Royaume-Uni (15 %). 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 560 Mt les réserves mondiales de chromite (45 % Cr₂O₃) en 2018. Le Kazakhstan et l'Afrique du Sud possèdent respectivement 41 % et 36 % 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 si l'alliage n'est pas préservé. Le chrome métal contenu dans les super-alliages 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 établis après négociations entre producteurs et utilisateurs. Compte tenu de la diversité des produits se rapportant au 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 \$ 11 710/t en 2018. Il a affiché une hausse de 47 % par rapport à 2017 (\$ 7 936/t). Néanmoins, cela reflète assez mal la forte variabilité annuelle du prix puisqu'il était de \$ 8 198/t en janvier, a bondi à \$ 13 748/t en mai, pour redescendre à \$ 10 311/t en décembre. Les prix du ferrochrome (HC 60 % Cr et 6-8 % C) ont, quant à eux, connu une très légère baisse de 1 % entre 2017 et 2018, passant de \$ 2 714/t à \$ 2 683/t en moyenne. Les hausses des prix survenues depuis fin 2016 ont notamment fait suite à la restructuration de l'industrie sud-africaine face à une demande mondiale toujours plus soutenue. En effet, des pays émergents comme l'Inde compensent largement la baisse relative de la consommation observée en Chine.

Le marché du chrome, actuellement extrêmement dominé par la production sud-africaine, 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). Si les cours se maintiennent, de nouvelles capacités de production pourraient également voir le jour au Canada, en Oman, en Russie et surtout au Zimbabwe.

Cobalt (Co)

En 2018, la production minière mondiale du cobalt a été de 140 000 t selon l'USGS, soit une augmentation de 17 % par rapport à 2017. Presque la totalité de cette production provient de l'extraction

et de la métallurgie du cuivre (72 %) et du nickel (25 %). 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. Il joue également un rôle fondamental pour le stockage d'énergie, sa consommation au sein des batteries rechargeables en particulier de type lithium-ion (Li-ion) représentant désormais plus de 50 % de la demande mondiale.

Le consultant Darton Commodities a estimé la demande mondiale à 111 300 t pour 2018, en augmentation de 6,6 % par rapport à 2017. Le marché des batteries aurait représenté 54 % de cette consommation, soit 60 500 t Co. 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'utilisations du cobalt dans ces différentes cathodes.

Les batteries Li-ion sont actuellement celles qui ont la plus grande capacité d'accumulation d'énergie par unité de masse, ce qui explique leur développement rapide à partir de la fin des années quatre-vingt-dix, en particulier pour des applications portables. Aujourd'hui, le principal secteur tirant la vente de ces batteries est la production de véhicules électriques. Selon Avicenne Energy, 50 % du volume des ventes totales de batteries Li-ion dans le monde (exprimé en GWh) est destiné à cet usage. Le nombre de véhicules électriques et hybrides en circulation dans le monde est passé d'une dizaine de milliers en 2010 à près de 3 millions en 2017. En termes de ventes, les véhicules électriques et hybrides ont représenté en 2018 environ 2 % des ventes totales de véhicules légers. En Europe, les ventes ont progressé de 44 % en un an, avec 180 000 véhicules électriques et hybrides vendus au 1^{er} semestre 2018 contre 125 000 sur la même période un an auparavant. La Chine est le premier marché mondial avec 55 % de la production et des ventes, suivie par l'Union européenne, le Japon et les États-Unis. Pour beaucoup de constructeurs automobiles, les technologies Li-ion ont semblé le meilleur compromis entre les performances, la légèreté, la fiabilité, la durée de vie, et le coût de fabrication des batteries pour leurs futurs véhicules électriques.

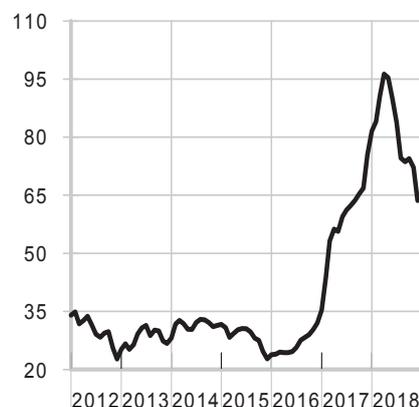
Cobalt

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production minière						
	110 000	123 000	126 000	111 000	120 100	135 700
Afrique du Sud		3 000	3 000	2 300	2 300	2 200
Australie	6 400	5 980	6 000	5 500	5 030	4 700
Brésil	3 000	2 600				
Canada	6 920	6 570	6 900	4 250	3 870	3 800
Chine	7 200	7 200	7 700		3 100	3 100
Cuba	4 200	3 700	4 300	4 200	5 000	4 900
États-Unis		120	760	690	640	500
Madagascar		3 100	3 700	3 800	3 500	3 500
Maroc	2 100				2 200	2 300
Nouvelle-Calédonie	3 190	4 040	3 680	3 390		
Papousie Nouvelle-Guinée				2 190	3 310	3 200
Philippines	3 000	4 600	4 300	4 100	4 600	4 600
Congo	54 000	63 000	63 000	64 000	73 000	90 000
Russie	6 300	6 300	6 200	5 500	5 900	5 900
Zambie	5 200	5 500	4 600	3 000		
Autres pays	8 000	7 080	11 600	7 600	7 650	7 000

**Prix du cobalt
Marché libre européen**

(en dollar/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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 pigments (5 %), les aimants permanents samarium-cobalt (3 %), et diverses applications complétant le tableau, dont l'usage pour agents séchants et pneumatiques.

Dans les superalliages, le cobalt peut être utilisé jusqu'à 3 % de la masse totale. Ces alliages ont des compositions complexes, surtout à base de nickel, allié avec des proportions variables de chrome, de fer, ainsi qu'avec des quantités plus

faibles de nombreux métaux en fonction des propriétés recherchées (molybdène, tantale, aluminium, titane, zirconium, niobium, vanadium, bore, voire rhénium, ruthénium, yttrium, hafnium). 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 est également en forte croissance, porté par une forte dynamique de commandes d'avions à l'échelle mondiale (1 500 commandes pour les seuls constructeurs Boeing et Airbus en 2018) et devrait nécessiter à lui seul

Typologie de la cathode	Chimie	Abréviation	% Co	Caractéristiques et usages préférentiels
Oxyde de Lithium-Cobalt	Li CoO 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>

quelques dizaines de milliers de tonnes de cobalt supplémentaires par an à l'horizon 2025.

Parmi les principaux usages du cobalt se trouvent aussi les carbures cémentés, qui sont des matériaux très durs, très résistants et réfractaires. Les carbures cémentés 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 mondiaux.

La hausse du secteur des batteries lithium-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 %/an jusqu'en 2025.

En 2018, la production minière mondiale de cobalt s'est élevée à 140 000 t, selon les données préliminaires de l'USGS, contre 136 000 t pour Darton Commodities. 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 :

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

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

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

- du 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 1 600 t en 2018.

Un dernier type de gisement potentiel sont 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 pro-

ductrices 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 2018, à 33 % de la production primaire mondiale. En RDC, Glencore contrôle la mine de Mutanda, premier producteur mondial en 2018, avec 27 300 t Co contenues. À cela s'ajoute la mine de Kamoto/KOV ayant repris la production en 2018 – bien qu'arrêtée temporairement en novembre 2018 suite à une problématique de radioactivité du minerai – après des investissements conséquents de modernisation, et une capacité annoncée de 11 000 t. S'ajoutent également ses opérations minières à Sudbury (Canada) et Murrin Murrin (Australie), soit une capacité totale de près de 42 000 t Co contenu. Or, seule une faible part de cette production de cobalt est raffinée par Glencore (7 000 t en 2017, selon Darton Commodities). La plupart de la production, en particulier celle des mines en RDC est vendue sous forme d'hydroxydes de cobalt, ces intermédiaires à haute valeur ajoutée particulièrement recherchés par les fabricants de précurseurs de batteries. En témoigne l'accord d'enlèvement (ou *offtake*) signé en 2018 avec le groupe chinois GEM, fournisseur du fabricant de batteries CATL et s'étendant jusqu'en 2020 pour près de 20 000 t de cobalt contenu. La stratégie de l'entreprise peut ainsi être vue comme purement spéculative, n'étant impliquée qu'aux niveaux en amont de la chaîne de valeur et jouant le rôle de négociant à l'échelle mondiale.

D'autre part, la structure et les enjeux actuels du marché du cobalt reposent en grande partie sur la croissance d'acteurs et d'intérêts chinois dans l'exploitation du cobalt en RDC. La Chine est devenue au début des années deux mille le premier producteur métallurgique de cobalt mondial, bien que n'étant que le douzième 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 t 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 en 2016, avec l'achat de

la deuxième plus grosse mine de cobalt au monde (Tenke Fungurume) pour \$ 4 milliards. Avec cet achat, l'entreprise s'est assuré le contrôle de près de 15 % de la production primaire de cobalt. La stratégie initiale était fondée sur l'exportation massive de concentrés et produits intermédiaires de cobalt de RDC directement en Chine pour être raffinés, facilitée par une présence sur place. Les quantités reportées par les bases de données de commerce mondial (*Trade Map*) vont jusqu'à 300 000 t/an de minerais et concentrés pour les années 2015 et 2016. Désormais, le modèle de ces entreprises chinoises s'oriente progressivement vers l'intégration verticale. Par des partenariats voire des fusions entre entreprises, le contrôle des coûts et de l'ensemble de la chaîne de valeur est progressivement assuré. Les entreprises exploitant des mines en RDC sont intégrées aux raffineurs et producteurs de précurseurs de batteries sur le territoire chinois. La formation de conglomerats d'ampleur internationale en aval de la chaîne de valeur s'inscrit sur le long terme et vise à faire de ces acteurs des leaders mondiaux du stockage d'énergie et de la production de véhicules électriques. Ce sont aujourd'hui les exemples des multinationales GEM, CATL ou BYD qui en témoignent.

Les questions de traçabilité, d'exploitation artisanale et de travail des enfants sont également une caractéristique fondamentale du marché du cobalt. Cependant, plusieurs précisions sont nécessaires. La présence d'enfants dans l'exploitation artisanale de minerais, dont le cobalt, et les conditions de travail de ces mines ont été dénoncés à juste titre à de nombreuses reprises, en particulier par Amnesty International au travers de son rapport « This is what we die for » paru en 2016. Néanmoins, la médiatisation et la simplification outrancière de ce sujet vont parfois à l'encontre d'une compréhension plus fine des mécanismes sur place, voire des solutions à y apporter.

L'exploitation artisanale a d'abord des origines géologiques. Du fait de leur altération, les roches portant les minéraux oxydés, tels que l'hétérogénite, naturellement enrichis en cobalt, sont facilement exploitables sans machines industrielles. C'est ce qui explique le développement à grande échelle de leur exploitation à l'échelle artisanale, en particulier lorsque l'augmentation des prix internationaux les transforme en un moyen de

subsistance, voire en une source de revenus conséquente. Le travail des enfants est une réalité bien distincte de celle des mines artisanales, en particulier parce qu'un grand nombre de ces sites fonctionnent *via* des structures organisées, ayant une hiérarchie et un fonctionnement propres.

La question de traçabilité est également distincte. Elle désigne le fait que 10 % à 20 % de la production de cobalt de RDC est d'origine difficilement traçable (indiquant par la même occasion que 80 % de cette production est issu de mines industrielles bien identifiées). Le gouvernement de RDC estime ainsi que 5 000 t à 25 000 t de minerai seraient produites annuellement par des mineurs artisans et captées par des « négociants ». L'explication ici est que les « négociants » en question, souvent chinois, sont des acteurs industriels en mesure de réaliser les premières étapes de métallurgie, c'est-à-dire de produire des concentrés ou des intermédiaires sous forme d'hydroxydes $\text{Co}(\text{OH})_2$. Or, il est possible d'intégrer une partie du minerai d'origine artisanale avec un minerai d'origine industrielle pour obtenir des produits métallurgiques identiques. Plusieurs sociétés chinoises implantées en RDC semblent avoir développé ces méthodes de recours aux productions artisanales de sources non traçables (la compagnie Zeijhang Huayou Cobalt a notamment été identifiée spécifiquement par Amnesty International en 2016). Les liens entretenus avec le gouvernement central demeurent flous. L'intégration verticale progressive de ces acteurs renforce l'opacité de ces circuits.

Les réserves mondiales de cobalt sont relativement abondantes, estimées par l'USGS à 6,9 Mt Co. Néanmoins, la région de la *Copperbelt* en Afrique centrale concentre plus de la moitié des réserves mondiales de cobalt connues à ce jour. En effet, si l'on considère seulement les évaluations conformes aux standards internationaux, les trois plus gros gisements sont Mutanda, Kamoto-KOV et Tenke-Fungurume. Ils contiennent individuellement plus de 2 Mt de Co et représentent, à eux seuls, 60 % des réserves et 66 % des ressources mondiales documentées en 2018. Dans le reste du monde, il existe de nombreux gisements de taille intermédiaire contenant 0,2 Mt à 0,3 Mt Co, associés à des dépôts de type nickel latéritique ou de type magmatique sulfuré, dont les teneurs sont

généralement beaucoup plus basses que celles des gisements congolais. 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 Lumbumbashi avec une capacité de 5 500 t Co et un accord d'*offtake* avec Glencore. En 2019, le projet Kolwezi Tailings (RTR Metalkol) opéré par ERG devrait entrer en production, mettant sur le marché 10 000 t à 15 000 t Co supplémentaires. Il est en partie financé par la Chine, pour un investissement global d'environ \$ 2,2 milliards. D'autres projets similaires devraient suivre d'ici 2021, comme le projet Kipushi (Cape Lambert Resources), avec une capacité annoncée de 4 000 t Co.

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 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 facteurs pèsent sur l'évolution des prix du cobalt. En 2018, le prix spot moyen du cobalt métal au *London Metal Exchange* (LME) a été de \$ 72 745/t, en hausse de 30 % par rapport à 2017, n'illustrant toutefois pas une tendance à un rééquilibrage enclenché à l'été. En effet, suite à un pic historique observé en avril 2018 (\$ 92 250/t), les prix se sont effondrés à partir de juin 2018, en raison notamment d'une surproduction d'intermédiaires sur le marché chinois. Le prix du cobalt métal a fini l'année 2018 à \$ 55 500/t contre \$ 75 500/t un an auparavant. Cette chute s'est poursuivie au début de l'année 2019 et devrait progressivement se stabiliser. Les prix du cobalt sur le marché libre européen (cathode de pureté 99,8 % *alloy grade* Rotterdam) montrent une évolution similaire, avec des prix légèrement plus hauts néanmoins.

L'un des principaux sujets est celui de l'émergence du marché des intermédiaires (hydroxydes et sulfates de cobalt), pour lesquels la fixation des prix demeure peu transparente à ce jour. Ainsi, malgré une cotation publique du cobalt depuis 2010 sur le LME, une grande partie des échanges se fait encore de gré à gré, entre producteurs et utilisateurs traditionnels, par des contrats de long terme en fonction des qualités des produits. Le prix du cobalt métal au LME est donc un indicateur utile, mais il ne représente pas l'intégralité du marché et des échanges. Les sulfates et hydroxydes de cobalt, obtenus comme produits intermédiaires des différentes métallurgies à partir de l'acide sulfurique, sont devenus des intermédiaires recherchés pour la chimie des cathodes de batteries Li-ion. Ils représentent une part croissante des échanges mondiaux de cobalt depuis 2017. Or, la référence de prix est celle du cobalt métal. Ainsi, la vente des intermédiaires était réalisée jusque-là sur la base d'un pourcentage du prix du métal. Ce schéma n'est plus adapté et remis en question à la fois par les producteurs et les consommateurs demandant une meilleure transparence des prix pour une qualité donnée d'intermédiaires. La mise en place rapide d'une cotation distincte pourrait avoir pour avantage de limiter les risques de spéculation. À ce jour, le différentiel de prix entre les deux 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. Le LME a ainsi annoncé une évolution de la cotation. L'objectif serait notamment de mettre en place des contrats à terme appelés *cash-settled* – par opposition aux contrats autorisant la livraison physique – pour le cobalt, plus faciles à gérer, car permettant notamment de ne pas avoir à détenir de stock physique de métal. Les premiers contrats doivent être lancés en mars 2019.

S'il y a peu de risques sur la ressource géologique en elle-même, de fortes contraintes peuvent peser ponctuellement sur la disponibilité du cobalt sur le marché. La diversité géologique des gisements joue un rôle primordial dans l'économie des projets miniers associés et entraîne des différences dans les investissements nécessaires, les procédés métallurgiques utilisés et les produits intermé-

diaires de cobalt obtenus, dont la demande croissante est propre à créer des tensions.

Gallium (Ga)

En 2018, la production de gallium est estimée par l'USGS à 410 t de qualité > 4 N (99,99 % Ga) soit un marché d'environ \$ 60 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 2 204 °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 t, 67 % des usages concernent les circuits intégrés en électronique, 25 % l'optoélectronique (diodes électroluminescentes – LED –, diodes lasers, photodiodes), et 5 % les cellules photovoltaïques en couches minces CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium). Plusieurs dizaines de tonnes sont utilisées ponctuellement pour la recherche des neutrinos en physique des particules. L'USGS différencie cette répartition en fonction des formes de composés du gallium. Ainsi, 92 % des usages seraient sous forme d'arséniure de gallium (GaAs). Ce dernier 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 la téléphonie mobile (environ 2/3 de la demande), les communications wifi, ainsi que dans le secteur de la défense (avions de combat et missiles). Le nitrure de gallium (GaN) est utilisé dans 8 % des usages. La propriété de conversion de l'électricité en lumière du nitrure de gallium fait qu'il est utilisé dans certains LED 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 télécommuni-

cations dans l'électronique embarquée et les objets communicants.

Les couches semi-conductrices des cellules photovoltaïques CIGS contiennent environ 10 % de gallium. Malgré les prévisions très positives de nombreux analystes sur cette technologie dans les années 2007-2008, les panneaux en couches minces ont été remplacés dans de nombreux cas par des panneaux au silicium amorphe ou cristallin, moins chers. Selon les chiffres du rapport annuel 2018 de l'institut allemand *Fraunhofer Institute for Solar Energy*, la technologie CIGS se maintient à environ 2 % de la production mondiale d'électricité photovoltaïque, rattrapant ainsi la production électrique par couches minces CdTe (tellurure de cadmium) qui se développe moins vite. 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. 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 (4G) consomment près de dix fois plus de GaAs que les téléphones mobiles de première génération. Aussi, le développement massif du réseau 5G, la demande des communications sans fil, ainsi que la croissance de l'éclairage par LED 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 produit lors du raffinage de la bauxite en 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 allant jusqu'à 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 en sous-produit. On considère que moins de 5 % des raffineries mondiales d'alumine sont équipées pour récupérer le gallium et que moins d'1 % du gallium physiquement extrait est effectivement récupéré.

Pour 2018, la production de gallium est estimée par l'USGS à 410 t de qualité > 4 N (99,99 % Ga) dont 205 t de qualité 6 à 7 N (pureté de 99,99999 % Ga). Les capacités mondiales pour la production de ces deux niveaux de pureté sont néanmoins bien supérieures, respectivement évaluées à 730 t et 320 t selon l'USGS, avec pour explication de cette différence les coupes volontaires de production de certains acteurs, principalement chinois, pour faire remonter les prix. La Chine a tout de même produit 88 % de la quantité totale de gallium en 2018, en augmentation de 28 % par rapport à 2017. Selon l'USGS, l'Ukraine et la Russie, en deuxième et troisième positions, auraient produit seulement 6 t de Ga primaire chacune. Seuls quelques producteurs maîtrisent les techniques de purification 6N et 7N, notamment en Chine, au Japon, en Slovaquie, au Royaume-Uni et aux États-Unis.

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. À ces chiffres, il faut ajouter les quantités de gallium contenues dans les minerais de zinc voire dans certains gisements de phosphates et de charbon.

Les stocks de gallium sont peu connus. Le gallium fait partie des substances pour lesquelles des stocks étaient détenus par la bourse de Fanya lors de sa fermeture en août 2015 (voir l'encadré consacré à ce sujet). Ces stocks représentaient 190 t de Ga métal (de pureté inconnue), soit près de la moitié de la consommation mondiale annuelle.

Peu de substitutions sont recherchées pour le gallium compte tenu de son faible prix et de son marché excédentaire en 2018. À un prix plus élevé, les LED peuvent être remplacés par leurs homologues organiques (OLED). Les composés GaAs et GaN peuvent être remplacés par des composés au silicium (SiGe) ou au 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 270 t/an selon l'USGS, la production secondaire ayant

lieu au Canada, en Chine, en Allemagne, au Japon, aux États-Unis et au Royaume-Uni. 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 LED. 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 remontée des cours et/ou d'une certaine volonté politique, peu probable à court et moyen termes.

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 d'environ \$ 203/kg en 2018 ce qui, certes, est en hausse de 46 % par rapport à la moyenne 2017, mais reste très bas par rapport au niveau de 2011 où il avait atteint \$ 985/kg.

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 LED ainsi que les télécommunications optiques et sans fil semblent être en mesure d'apporter des réponses, tout en garantissant à la Chine le monopole d'un marché supplémentaire.

Germanium (Ge)

La production mondiale de germanium est estimée par l'USGS à 120 t en 2018, soit un marché d'environ \$ 230 millions. Le germanium ne forme pas de concentrations naturelles économiquement exploitables, il est un sous-produit de la métallurgie du zinc (75 %) et, dans une moindre mesure, du charbon (25 %). Le germanium est un métal très rare, utilisé essentiellement pour ses propriétés semi-conductrices.

On estime la répartition des usages en 2018 comme telle : fibres optiques (30 %), panneaux photovoltaïques à haut rendement (20 %), systèmes de vision nocturne et optique captant l'infrarouge (20 %), catalyse de polymères, notamment pour la production du téréphtalate de polyéthylène (PET) utilisé pour l'embouteillage

de boissons (20 %), circuits électroniques hautement intégrés ; et d'autres applications – poudres luminophores, métallurgie et chimiothérapie – pour moins de 10 % des usages. Une application émergente est la télécommunication 5G qui utilise des semi-conducteurs de haute performance, notamment à base de gallium et de tétrachlorure de germanium (GeCl₄). Cet usage devrait massivement se développer dans les années à venir. Les propriétés semi-conductrices du germanium et ses multiples usages de haute technicité expliquent un taux de croissance d'environ 5 %/an de sa production au cours de la période 2007-2016.

La Chine est le premier producteur mondial de germanium avec 65 % de la production mondiale, une place qu'elle a su garder grâce à sa position dominante dans la métallurgie du zinc et la valorisation des cendres volantes de la combustion du charbon. Or, depuis 2016, de nombreux sites de production de petite et moyenne tailles ont été fermés dans le pays. La raison principale invoquée est le fort impact environnemental de la production du germanium, qui fait appel à une longue série de procédés chimiques (rejets d'arsenic, de fer, d'acide sulfurique), entraînant la baisse continue de la production mondiale jusqu'en 2017, où elle a atteint un minimum à 106 t selon l'USGS, soit la moitié des capacités de production mondiale. En 2018, la production mondiale de germanium

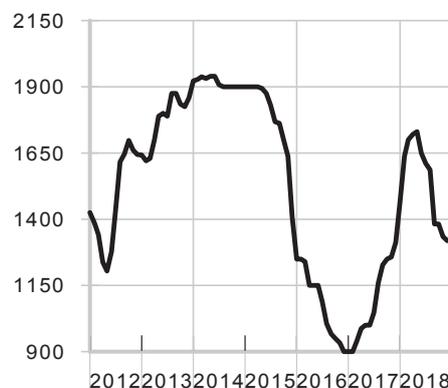
a rebondi à 120 t, uniquement du fait de la Chine. Le marché du germanium semble en effet être revenu à l'équilibre à la faveur d'une hausse de la demande, dont une part significative proviendrait du secteur de la défense.

Les États-Unis sont les premiers concernés. Or, après avoir réussi à se détacher de la forte dépendance de leur approvisionnement vis-à-vis de la Chine en 2017, ces derniers ont été contraints de reprendre leurs importations de Chine début 2018. En effet, suite à une avarie majeure sur un site de production, le partenaire canadien a dû arrêter sa production, pour ne la reprendre qu'au deuxième semestre 2018. À cela se sont ajoutés les jeux de la guerre commerciale lancée entre Washington et Pékin. Après une forte pression de la Chine *via* des réductions de taxes à l'exportation, la réponse américaine fut une taxe de 10 % sur les wafers au germanium chinois, ainsi que la menace d'une taxe de 25 % sur le germanium brut importé de Chine. Si les tensions ont entraîné des pénuries momentanées pour certains importateurs, dont la Corée du Sud par exemple, le marché du germanium s'est quelque peu apaisé fin 2018, la menace américaine n'étant finalement mise en application que pour certains produits contenant du germanium, mais pas sur le germanium brut.

Le marché du germanium est, comme celui de nombreux petits métaux, très opaque. Il est en

Germanium (en kilogrammes de métal raffiné)						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	158 000	165 000	165 000	126 000	106 000	116 000
Chine	110 000	120 000	115 000	80 000	60 000	75 000
Russie	5 000	5 000	5 000	6 000	6 000	6 000
États-Unis	3 000	3 000	3 000	3 000		
Autres pays	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	35 000

Prix du germanium
Marché libre européen
(en dollar/kg)



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

partie caractérisé par l'existence de stocks importants et par les besoins du secteur de la défense chinoise. Depuis 2015, le Bureau des réserves d'État chinois (*State Reserve Bureau*) constitue des stocks stratégiques en achetant 20 à 30 tonnes de germanium chaque année. Les producteurs chinois détiendraient, quant à eux, entre 20 t et 40 t Ge. Le devenir du stock de 92 t de germanium censé exister à la bourse faillie de Fanya est toujours inconnu. Il est cependant possible qu'il ait alimenté le secteur de la défense chinoise ou les réserves du *State Reserve Bureau*.

Comme de nombreux autres petits métaux, il n'y a pas de cotation publique du germanium. Le prix est établi directement entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen du germanium a été de \$ 1 543/kg en 2018, affichant une hausse de 43 % par rapport à 2017 (\$ 1 082/kg). Pourtant, à la suite du pic de mai 2018 à \$ 1 731/kg, le prix spot a chuté continuellement pour atteindre \$ 1 319/kg en décembre. Ce contraste de l'évolution du prix avec la dynamique du marché laisse penser qu'une partie des stocks de germanium ont été un « tampon » pour résister aux tensions commerciales. Il est alors difficile de prédire si les stocks pourront faire face à une nouvelle bataille commerciale. Les prix devraient en tout cas repartir à la hausse en 2019 si la production n'augmente pas significativement.

Il n'existe pas d'évaluation précise des réserves et des ressources en germanium. L'USGS estime que seulement 3 % du germanium contenu dans les minerais de zinc est actuellement récupéré, ceci à cause de la complexité des procédés de récupération, qui doivent respecter des normes environnementales strictes. Les cendres volantes résultant de la combustion du charbon constituent également une ressource importante, non quantifiée. Un tiers de la consommation mondiale de germanium proviendrait du recyclage. Il s'agit principalement de recyclage primaire (chutes, limailles, poussières liées aux procédés de fabrication).

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

En 2018, Ivanhoe Mining a publié l'étude de préfaisabilité de son projet d'exploitation de la

mine de zinc de Kipushi, en RDC. Ce gisement contient 691 t de germanium dans ses ressources indiquées et mesurées. Il a produit par le passé 278 t Ge entre 1956 et 1978, et pourrait représenter une nouvelle source de production.

Indium (In)

En 2018, la production d'indium raffiné a été de 750 t selon l'USGS, représentant un marché de taille modeste, évalué à environ \$ 211 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 t, 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 %), en alliages et composés (4 %), en semi-conducteurs et LED (3 %) et dans diverses autres applications (8 %).

L'ITO 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 à celui des écrans plats, qui devrait croître d'environ 5 % d'ici 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

Indium
(en tonnes de métal raffiné)

2013 2014 2015 2016 2017 2018

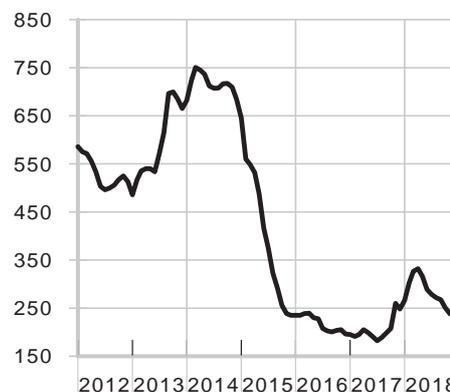
Production mondiale (en indium contenu)

799 844 759 680 714 755

Allemagne	10	10				
Belgique	30	25	20	20	20	20
Brésil						
Canada	65	65	70	71	67	70
Chine	415	460	350	300	287	300
Corée du Sud	150	150	195	210	225	230
France	33	43	41		30	50
Japon	72	72	70	70	70	70
Pérou	11	14	9	10	10	10
Russie	13	5	4	5	5	5

Prix de l'indium
Marché libre européen

(en dollar/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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 94 % du marché photovoltaïque mondial, contre une part néanmoins stable à environ 2 % pour la technologie CIGS, selon les chiffres du rapport annuel 2018 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 capacité installée à fin 2017, contre 134 GW en 2013.

En 2018, la production d'indium raffiné a été de 750 t selon les données préliminaires de l'USGS (contre 714 t en 2017). Il n'existe pas de mine d'indium. Il est récupéré uniquement en tant que sous-produit d'autres métaux comme le zinc (95 %) et, dans une bien 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 (99,9999 %) 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 t (40 % de la production mondiale) et la Corée du Sud avec 230 t (31 %). Les autres pays producteurs sont le Canada et le Japon (70 t chacun), la Belgique (20 t), le Pérou (10 t) et la Russie (5 t). 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 t en 2015, les capacités annuelles ont depuis été portées à 72 t. Se-

lon Nyrstar, la production s'est élevée à 42,6 t en 2018, en hausse de 43 % par rapport à celle de 2017 (29,8 t), alors que l'USGS l'estime à 50 t. Enfin, la société Umicore a annoncé, fin 2017, qu'elle avait cédé son activité « cibles de pulvérisation ITO » à son partenaire chinois First Rare Materials Co., la société mère du Groupe Vital, l'un des principaux producteurs chinois de produits à base de métaux secondaires. En conséquence de cette vente, la production d'ITO à Providence (États-Unis) a été stoppée au profit de l'usine de Qingyuan en Chine.

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 t d'indium, soit plus de 500 ans 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 équipées 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 (voir l'encadré consacré à ce sujet), les stocks atteignaient 3 629 t, soit quasiment trois ans de la demande. Les informations toujours inaccessibles sur la quantité, la localisation et la potentielle disponibilité de ces stocks pèsent encore sur les prix de l'indium. Le *State Reserve Bureau*, réserve stratégique chinoise, détiendrait également des stocks d'indium comme le suggère l'achat de plus de 200 t 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 t et 27,04 t) 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 CNY (yuan) 1 200/kg (le prix spot était d'environ CNY 1 430-1 480/kg à cette période) n'a suscité aucune offre et s'est soldée par un échec. Cette situation continue donc de peser sur les cours.

Le prix moyen de l'indium (99,99 % Europe), établi directement entre producteurs et utilisateurs, a été de \$ 281/kg en 2018 (+ 37 % par rapport à 2017). Il est cependant en baisse continue depuis le mois d'avril, tendance se poursuivant en 2019, proche des de \$ 200/kg alors qu'il cotait à \$ 750/kg en 2014 (loin de son maximum à \$ 1 028/kg en mars 2005). Les prix étant actuellement encore légèrement au-dessus des coûts de production, les producteurs notamment chinois peuvent concéder une nouvelle baisse des prix, ce qui peut expliquer l'attentisme des acteurs du marché face à la vente aux enchères des stocks de Fanya. Cependant, une réduction plus importante des cours en 2019 les mettrait en difficulté croissante.

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 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 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.

Lithium (Li)

En 2018, la production mondiale de lithium (hors États-Unis) est estimée à 85 000 t par l'USGS, exprimée en lithium contenu, soit 23 % d'augmentation par rapport à 2017 (données révisées à 69 000 t contre 43 000 t initialement). Le marché du lithium représente désormais un ordre de grandeur de \$ 1,4 milliard, contre \$ 286 millions en 2016. Le lithium est un métal de la famille des métaux alcalins. Il est le plus léger de tous les métaux. Avec une densité de 0,53, il est deux fois plus léger que l'eau. Il a comme particularité de céder très facilement l'électron de sa couche externe, ce qui en fait un élément hautement réactif en présence d'un accepteur d'électrons tel que l'oxygène. En d'autres termes il s'enflamme très facilement à l'air. Cela en fait aussi un élément ayant un potentiel électrique standard négatif

très élevé, ce qui explique son intérêt pour le développement de cathodes des batteries de hautes performances des technologies Li-ion. Cet usage représente désormais près de 50 % de la demande mondiale en lithium.

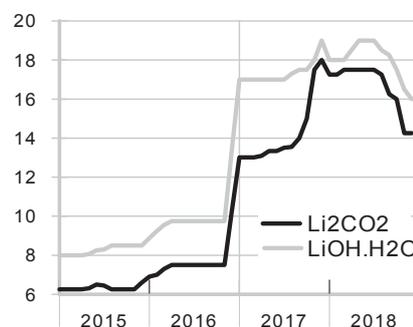
Les batteries Li-ion sont actuellement celles qui ont la plus grande capacité d'accumulation d'énergie par unité de masse, ce qui explique leur développement rapide à partir de la fin des années quatre-vingt-dix, en particulier pour des applications portables. Aujourd'hui, le principal secteur tirant la vente de ces batteries est la production de véhicules électriques. Selon Avicenne Energy, 50 % du volume des ventes totales de batteries Li-ion dans le monde (exprimé en GWh) est destiné à cet usage. Le nombre de véhicules électriques et hybrides en circulation dans le monde est passé d'une dizaine de milliers en 2010 à plus de 3 millions en 2018. La consommation totale de lithium pour cet usage est passée d'une part de marché de 20 % en 2008 (soit 4 260 t Li) à près de 46 % en 2018, à savoir 2 000 t Li, la demande totale en 2018 étant évaluée à 47 600 t Li.

Les usages du lithium sont cependant très diversifiés avec, en second plan, en particulier l'industrie du verre et de la céramique (27 %), les graisses lubrifiantes au lithium (7 %), le traitement

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	35 000	33 800	33 500	40 100	68 500	84 700
Argentine	2 500	3 200	3 600	5 800	5 700	6 200
Australie	12 700	13 300	14 100	14 000	40 000	51 000
Brésil	400	160	200	200	200	600
Chili	11 200	11 500	10 500	14 300	14 200	16 000
Chine	4 700	2 300	2 000	2 300	6 800	8 000
États-Unis	1 870	2 150	2 000	2 100		
Namibie						500
Portugal	570	300	200	400	800	800
Zimbabwe	1 000	900	900	1 000	800	1 600

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



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

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 (6 %), ainsi que la métallurgie de l'aluminium (1 %). Les autres usages représentent 6 % du marché et comprennent, entre autres, la production de ciment, la pyrotechnie, ou le traitement de l'eau.

À l'horizon 2025, la demande totale en lithium pourrait atteindre 150 000 t Li, selon le producteur Albemarle, et jusqu'à 180 000 t selon Roskill, soit une croissance moyenne de 18 %/an. Le modèle économique et industriel de production de batteries Li-ion pour le stockage d'énergie devrait en effet perdurer pendant plus de dix ans avant une éventuelle rupture technologique. D'ici 2030, la part du secteur des batteries devrait ainsi être comprise entre 60 % et 86 % du total, soit un tonnage supérieur à 100 000 t Li, ou plus de cinq fois le marché total du lithium en 2008. Du côté de l'offre, l'anticipation d'une telle augmentation de la demande face à une production mondiale jusque-là relativement modeste a entraîné d'importantes modifications des circuits de production mondiaux.

En 2018, la production minière mondiale de lithium est estimée entre 85 000 t Li par l'USGS, issue à 85 % de trois pays, l'Australie, le Chili et l'Argentine. Cependant, les acteurs industriels et financiers contrôlant ces productions dépassent largement les frontières de ces trois pays. En effet, on observe plusieurs types d'opérateurs de tailles différentes sur le marché du lithium. D'une part, cinq entreprises multinationales, contrôlant entre 80 % et 90 % de la production mondiale. D'autre part, un grand nombre de petits producteurs et de compagnies d'exploration ou « juniors » ayant émergé au cours des deux dernières décennies pour mettre en production de « nouveaux » gisements de lithium suite au boom de la demande et des prix.

Les trois plus gros producteurs historiques sont la société chilienne *Sociedad Química y Minera de Chile* (SQM) et les entreprises américaines FMC Corp. et Albemarle Corp. Les secteurs d'activité traditionnels de ces groupes sont la chimie, l'agroalimentaire (engrais azotés), ou encore la pharmacie. L'exploitation du lithium n'a donc jamais été leur cœur de métier et n'a toujours re-

présenté qu'une part minoritaire de leurs chiffres d'affaires : en 2017, seuls 30 % des revenus de la compagnie SQM étaient issus de l'exploitation du lithium. Cependant, elles contrôlent à elles trois un peu plus de 50 % de la production mondiale et comptent bien continuer à jouer un rôle majeur sur le marché mondial, en adaptant leurs schémas de production à la demande croissante.

En 2018, leurs actions tendent à le montrer :

– Pour SQM, le développement passe avant tout par des extensions de capacités de production au Chili. Les capacités actuelles sont estimées à environ 9 000 t Li (sous forme raffinée de carbonates ou hydroxydes de lithium). L'objectif est de passer à 13 000 t d'ici 2021, puis tripler ces capacités à l'horizon 2030. Ces projets d'extensions connaissent jusqu'ici des réserves de la part des autorités chiliennes, notamment du fait des quantités d'eaux pompées dans les nappes du Salar d'Atacama. Cependant, le 10 janvier 2019, l'autorité de régulation environnementale a approuvé un plan de la part de SQM pour réduire de 10 % son utilisation d'eau d'ici mai 2020. SQM est également en partenariat, en Australie, avec la société Kidman Resources pour développer le projet Mount Holland. Le consortium entend construire une usine de conversion d'une capacité de 45 000 t/an d'hydroxydes de lithium à Kwinana d'ici 2021. Des accords préalables ont déjà été conclus avec le fabricant de batteries LG Chem pour vendre une partie de la production (12 000 t/an d'hydroxydes de lithium pendant dix ans).

– Du côté d'Albermale, la dynamique est différente. Du fait de délais d'obtention d'autorisations de la part du gouvernement chilien et de difficultés avec les autorités politiques, la société américaine a décidé de parier largement sur l'Australie pour son développement. En août 2018, Albermale a ainsi investi \$ 1,15 milliard pour le contrôle de 50 % de la mine de Wodgina en formant une *joint-venture* avec la société Mineral Resources Australia. Cette collaboration devrait permettre de remettre en production l'immense mine de lithium et de tantale. La conversion sur place du minerai de lithium (spodumène) en hydroxydes, intermédiaires recherchés pour la fabrication des batteries, est elle aussi annoncée à court terme. Le pari d'une expansion australienne se justifie pour gagner une exposition plus grande aux deux

sources de productions de lithium (salars et roche dure), et pour bénéficier d'un cadre législatif plus stable et prévisible. Albermale détient déjà 49 % de la société Talison Lithium qui exploite la plus grosse mine de lithium actuelle (Greenbushes, en Australie) avec le chinois Tianqi Lithium (détenant 51 %). La mine produit près de 20 500 t de Li par an (à partir de 740 000 t de concentrés de spodumène à 6 % Li₂O). Albermale exploite également le Salar d'Atacama au Chili (8 000 t Li/an).

– Enfin, FMC a décidé de séparer la branche lithium de ses activités sous le nom Livent et a lancé une introduction en bourse, à New York, de cette dernière en octobre 2018, assurant des perspectives de croissance certaines. En plus de l'exploitation en Argentine du Salar del Hombre Muerto, d'une capacité d'environ 9 000 t Li, FMC a lancé un partenariat avec la junior Nemaska Lithium au Québec, dont la production devrait commencer en 2019. La société annonce une augmentation de capacité d'ici 2025 pour produire 55 000 t/an d'hydroxydes de lithium.

Parallèlement à cela, deux entreprises chinoises, Tianqi Lithium et Jiangxi Ganfeng Lithium, ont depuis quelques années pris une envergure considérable sur le marché du lithium, ayant investi sur l'ensemble de la chaîne de valeur, avec notamment de nombreuses participations hors Chine. De manière générale, l'augmentation des capacités de conversion de la Chine en quelques années fait de ce pays un acteur incontournable du marché du lithium. Le pays attire aujourd'hui près de la moitié du lithium mondial (sous forme de concentrés de spodumène, en particulier australiens, ou de carbonates ou hydroxydes de lithium, issus des salars sud-américains). Les entreprises chinoises s'orientent progressivement vers le contrôle de mines en dehors de leur territoire et des maillons ultérieurs de la chaîne sur leur sol, à savoir la fabrication et l'assemblage des batteries Li-ion, jusqu'à la production intégrée de véhicules électriques (le chinois BYD est le numéro deux mondial des ventes en 2018, derrière Tesla).

Plusieurs événements ont illustré cette consolidation des deux principaux groupes chinois producteurs de lithium durant l'année 2018 :

– Ganfeng s'est assuré des sources d'approvisionnement primaire supplémentaires en rachetant les parts de SQM (37,5 %) dans le projet Cau-

chari-Olaroz en Argentine pour \$ 87,5 millions. L'entreprise s'est également garanti des débouchés pour ses produits par l'établissement de deux partenariats majeurs avec des acteurs en aval de la chaîne de valeur : un contrat de sept ans avec le coréen LG Chem, et un accord de deux ans avec Tesla portant sur 20 % de sa production annuelle d'hydroxydes de lithium de qualité batterie.

– Du côté de Tianqi Lithium, le renforcement s'est également fait aux dépens de SQM, par la prise de participation de 23,77 % dans la société chilienne. Bien qu'uniquement financière, cette participation permet au groupe chinois d'accéder au conseil d'administration de SQM et d'opérer un certain contrôle sur sa stratégie globale. Cette transaction fait suite à la fusion des groupes PotashCorp et Agrium en 2017 pour créer le groupe Nutrien, rendant obligatoire la vente des parts de Potash Corp dans SQM. Après plusieurs rebondissements et recours devant les risques certains d'abus de position dominante, cette vente a finalement été autorisée en fin d'année 2018 par l'autorité chilienne CORFO.

L'emprise des cinq principaux groupes producteurs de lithium sur le marché mondial s'est donc accentuée en 2018, les chinois en tête. D'une ampleur inférieure, les compagnies d'exploration « juniors » ont une place spécifique dans ce marché. Leur rôle consiste à identifier de nouveaux gisements et à démontrer la faisabilité économique de leur exploitation. Cette dernière est en général assurée ensuite par des acteurs de plus grande envergure. Le développement des compagnies juniors sur le marché du lithium a été fulgurant depuis les années deux mille. On en compte aujourd'hui plus d'une centaine, présentes dans toutes les géographies, en particulier en Australie, Amérique du Sud, Amérique du Nord, mais également en Afrique et en Europe, où une dizaine est actuellement recensée. La tendance actuelle est à l'intégration sur toute la chaîne de valeur et à la consolidation des exploitants *via* de nombreux projets de *joint-ventures*. L'objectif est de limiter les risques liés aux investissements en jeu, mais aussi de capter le maximum de valeur ajoutée de la production de composés de lithium.

En 2018, les prix du lithium ont connu une chute remarquable, en particulier les prix spot du carbonate de lithium en Chine (99,5 %, en

référence incoterms « ex-works »), passés d'une moyenne de \$ 18 000/t en 2017 à \$ 11 500/t à partir d'octobre 2018. Cependant, ces prix ne représentent qu'une fraction du marché et des échanges, la majeure partie étant des contrats de moyen et long termes entre producteurs et utilisateurs. Ils illustrent toutefois les surcapacités générées en Chine suite aux augmentations massives de capacités des années 2016 et 2017. Le prix du lithium varie d'un producteur à l'autre en fonction de la qualité du produit commercialisé et de sa forme, les hydroxydes devenant privilégiés aux carbonates de lithium pour un usage dans les technologies Li-ion de type NMC (voir la section consacrée au cobalt). Le prix annuel moyen du carbonate de lithium pour des contrats spot livrables à partir des États-Unis a, quant à lui, été de \$ 16 670/t en 2018 contre \$ 14 190/t en 2017 et \$ 7 620/t en 2016.

L'évolution de la cotation du lithium à l'échelle internationale représente un enjeu important de ce marché en 2019. À ce jour, le lithium n'ayant pas de cotation officielle, la majorité des contrats s'effectue en dehors des places de marchés mondiaux. Pour y remédier, le LME a annoncé réfléchir à la mise en place de contrats de cotation du lithium pour 2019-2020 permettant de répondre à cette problématique. Le modèle serait des contrats appelés *cash-settled*, plus faciles à gérer, car permettant notamment de ne pas avoir à détenir de stock physique de métal. Ces nouveaux standards pourraient également permettre plus de visibilité pour les producteurs et futurs producteurs. La difficulté est cependant de tomber d'accord sur les qualités exigées des intermédiaires. Les premiers contrats de ce type devraient être lancés au second semestre 2019.

Les réserves mondiales sont estimées à 14 Mt Li par l'USGS, tandis que les ressources mondiales s'établiraient à 62 Mt, soit des niveaux confortables, augmentés ces dernières années par l'intensité des recherches en exploration. Par ailleurs le potentiel de découverte de nouveaux gisements, notamment de type hectorite, paraît considérable.

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, par exemple des batteries au magnésium ou au sodium, 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.

En conclusion, si la ressource en lithium est abondante à l'échelle mondiale, le développement industriel des gisements et des procédés adaptés reste un important défi afin d'exploiter au mieux les potentialités de ce marché en croissance.

Magnésium (Mg)

En 2018, la production mondiale de magnésium métal est estimée à 970 000 t (hors États-Unis) selon l'USGS, en baisse de 8 % par rapport à 2017. Son marché est d'environ \$ 2,5 milliards. Si le magnésium est un élément chimique nécessaire à la vie de la quasi-totalité des êtres vivants, il en va très différemment sous forme de métal pur. Sous forme métallique, le magnésium forme des alliages ultralégers, ayant d'excellentes propriétés mécaniques et d'usinabilité. L'essentiel du marché du magnésium primaire se situe en Chine.

Selon Roskill, la consommation de magnésium métal est proche de 1 Mt, se répartissant comme suit :

- 37 % pour des alliages MgAl, contenant en moyenne 0,8 % Mg : ils sont largement 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. Ils sont largement utilisés dans le domaine de la construction spatiale, automobile, aéronautique et dans des 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 (dont une partie proviendrait de magnésium recyclé, d'origine secondaire) ;

- 5 % pour la production de fonte à graphite sphéroïdal (fonte ductile) ;

- 1 % pour d'autres usages, dont des médicaments et compléments nutritionnels.

Le principal moteur de la croissance de la demande est la demande d'allègement croissant des équipements automobiles et aéronautiques, conduisant les secteurs des alliages d'aluminium et des moulages sous pression à être les plus dynamiques, avec des taux de croissance annuels de 3 % à 4 % d'ici 2020, 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.

En 2018, selon l'USGS, la production totale de magnésium métal serait de 970 000 t – hors États-Unis, les données concernant le producteur américain US Magnesium étant confidentielles – contre 1,05 Mt en 2017. L'essentiel du marché du magnésium est en Chine, avec 82 % de la production mondiale et presque 50 % de la consommation de magnésium primaire en 2018. Dans ce pays, une grande part de la production était répartie sur une cinquantaine de fonderies utilisant le procédé Pidgeon, très énergivore et consommateur de charbon. En 2018, les « inspections » environnementales chinoises ont décidé de fermer un grand nombre d'usines utilisant ce type de procédé. La production de magnésium a ainsi décliné d'environ 8 %.

D'autres procédés existent pour la production de magnésium tels que le procédé « Dow » qui 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 qui est le troisième producteur mondial de magnésium, derrière l'américain US Magnesium. Le troisième producteur de Mg est la Russie avec une production de 65 000 t en 2018, dont une partie est consommée pour la production de titane.

Au cours de l'année 2018, US Magnesium a demandé l'ouverture d'une enquête devant le Dé-

partement du commerce des États-Unis afin de protester contre les avantages financiers concédés à Dead Sea Magnesium. Ces derniers lui ont permis d'exporter vers les États-Unis près de 54 % des importations totales du pays en magnésium métal à un prix avantageux.

Il n'existe pas de mesure rigoureuse 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.

De nombreux projets étaient à l'étude ou ont démarré en 2018, ce qui pourrait créer un excédent d'offres. En Chine, une usine de récupération de magnésium commencerait à exploiter les saumures du bassin de Qaidam pour extraire environ 100 000 t/an de Mg de pureté 99,96 %. En Norvège, SilMag aurait pour sa part commencé une production estimée à 65 000 t/an. Au Canada, plusieurs projets sont en cours (notamment au Québec) dont une usine (Alliance) qui pourrait produire 50 000 t/an de Mg. Un projet porté par l'indien Tremag Alloys Private Ltd devrait aussi commencer la production de 50 000 t/an de Mg. Aux États-Unis, Nevada Clean pourrait récupérer 35 000 t/an de Mg de son gisement de dolomie. En Australie, un projet de Latrobe Magnesium prévoyait la production de 40 000 t de Mg, à partir de mi-2019. Par ailleurs, un autre projet de récupération de 5 000 t/an de Mg à partir des cendres volantes de l'exploitation du charbon était au stade de l'étude de faisabilité.

Le magnésium est bien recyclé, avec une production secondaire d'environ 200 000 t à 250 000 t, dont la moitié viendrait des États-Unis – 70 000 t en boucle courte *new scrap* et 30 000 t en boucle longue *old scrap* –. Ceci s'explique en partie par une filière de recyclage des canettes bien établie dans ce pays. En termes de substituts, l'aluminium et le zinc peuvent certes remplacer le magnésium, mais avec un gain de poids ce qui les rend moins avantageux. Le carbure de calcium peut également 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 ma-

gnésium métal sur le marché européen a été de \$ 2 523/t en 2018, en hausse de 10 % par rapport à 2017. 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 théoriquement 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.

Manganèse (Mn)

En 2018, la production mondiale de manganèse s'est élevée à 18 Mt selon l'USGS, le plaçant au rang de cinquième métal industriel le plus

important après le fer, l'aluminium, le cuivre et le chrome. 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 \$ 42 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 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 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 rentrants 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 6 % à 7 % Mn. Les aciers

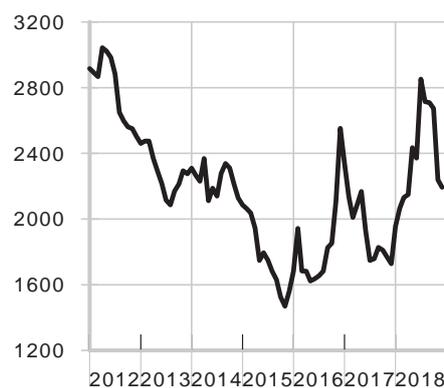
Manganèse

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	17 000	17 200	17 500	15 700	17 300	18 100
Afrique du Sud	4 300	5 200	5 900	5 300	5 400	5 500
Australie	2 980	3 050	2 450	2 240	2 820	3 100
Birmanie	157	98				
Brésil	1 120	1 040	1 090	1 080	1 160	1 200
Chine	3 000	3 000	3 000	2 330	1 700	1 800
Gabon	1 970	1 860	2 020	1 620	2 190	2 300
Ghana		418	416	553	810	850
Inde	920	945	900	745	734	770
Kazakhstan	390	385	222	212	168	170
Malaisie	430	378	201	266	478	510
Mexique	212	236	220	206	212	220
Ukraine	300	422	410	425	735	740
Autres pays	597	740	678	681	898	940

Prix du manganèse Marché libre européen

(en dollar/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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, tels que ceux d'aluminium et de cuivre, pour les renforcer. 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. – qui rentrent dans la composition d'engrais et d'aliments pour animaux, dans l'électronique ou pour le traitement de surface des pigments et métaux. Ils représentent 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 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 2018, la production minière de manganèse a été de 18 Mt selon les données préliminaires de l'USGS, contre 17,3 Mt en 2017. Environ 75 % de la production mondiale de manganèse provient de quatre pays : l'Afrique du Sud (5,5 Mt, soit 30 %), l'Australie (3,1 Mt, soit 17 %), le Gabon (2,3 Mt, soit 13 %) et la Chine (1,8 Mt, soit 10 %), suivis par le Brésil, le Ghana 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 elle 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 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

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 influencer 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.

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.

Les prix élevés ont encouragé une réouverture des mines et une reprise de la production. Sur les neuf premiers mois de 2017, la production de manganèse a bondi de 28 % par rapport à 2016, notamment en Afrique du Sud, au Ghana – où l'exploitant ConsMin a doublé sa production – ainsi qu'en Australie avec le redémarrage des opérations de Woodie Woodie et Bootu Creek. 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 (230 Mt) et de l'Ukraine (140 Mt) représentent un peu moins de la moitié des réserves mondiales, estimées à environ 760 Mt. Si l'on ajoute les réserves brésiliennes (110 Mt) et australiennes (99 Mt), c'est alors plus de 75 % des réserves mondiales qui sont détenues par ces quatre pays. En Europe, dix pays

détiennent des ressources en manganèse, dont la Finlande, le Portugal et la République tchèque. Ces ressources n'ont cependant pas de 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.

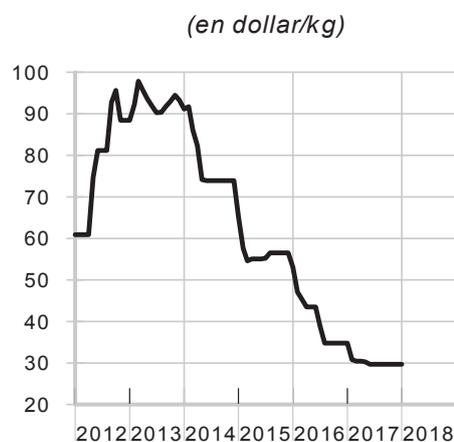
Les prix du manganèse sont établis par contrats directs entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen du Mn métal (*flakes* à 99,97 % Mn) a été de \$ 2 374/t en 2018, en hausse de 22 % par rapport à 2017 (\$ 1 943/t). Néanmoins, l'année 2018 a été marquée par de fortes variations des prix : \$ 1 825/t début janvier, \$ 3 015/t entre juillet et août et \$ 2 125/t fin décembre. Cette forte amplitude peut être interprétée en partie 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.

La demande future en manganèse sera tirée en grande partie par la croissance de l'urbanisation mondiale, ainsi qu'en moindre mesure par l'élec-

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	1 882	2 370	3 270	2 500	3 800	3 400
Argentine					25	30
Chili	50					
Chine	1 600	1 600	2 800	2 000	3 380	3 000
Espagne						
États-Unis	15	15	15	15	15	15
Kirghizstan	100	75	40	50	20	20
Mexique	ND	500	300	300	197	200
Norvège					20	20
Pérou	45	40	35	40	40	40
Russie	50	50				
Tadjikistan	32	30	30	30	100	100
Autres pays			60	60	12	10

Prix du mercure
Marché libre européen



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

tromobilité 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 électrolytique est un secteur en plein développement en Chine. Néanmoins, le sélénium utilisé en Chine dans cette production (voir la section consacrée au sélénium) induit des impuretés potentiellement pénalisantes pour l'usage dans les batteries Li-ion. Certains acteurs européens pourraient alors avoir une carte à jouer.

Ainsi le groupe Erachem-Prince, issu de la fusion d'Erachem, filiale du groupe Eramet, et de l'américain Prince en 2017, est le leader mondial des additifs et composés chimiques de manganèse de haute pureté. Avec des actifs aux États-Unis, en Belgique, au Mexique et en Chine, le groupe est bien positionné pour étendre sa capacité de production d'oxydes et sulfates de manganèse de qualité batterie. Le projet Chvaletice de retraitement d'anciens tailings en République tchèque par

la société canadienne EuroManganese est également intéressant, avec des ressources indiquées de 27 Mt à 7,3 % Mn.

Molybdène (Mo)

En 2018, la production mondiale de molybdène s'est élevée à 300 000 t 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 ferroalliages (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

253 000 t de molybdène contenu en 2017. L'oxyde de molybdène (M_oO_3) de qualité technique contient au minimum 57 % Mo et est obtenu par le grillage des concentrés miniers. Cet oxyde sert de référence pour la cotation du métal au London Metal Exchange. 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 2017, plus de 80 % du molybdène est utilisé pour renforcer la résistance des aciers. La répartition précise se décompose en aciers dits d'ingénierie (40 %), aciers inoxydables (23 %), aciers pour l'outillage (8 %), la production de fonte (8 %) et les superalliages (2 %). 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 (6 %) 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 2018, la production minière de molybdène a été de 300 000 t selon les données préliminaires de l'USGS, en légère hausse par rapport à 2017 (données révisées à 297 000 t). La production minière mondiale provient à 90 % de cinq pays : la Chine (130 000 t, soit 44 %), le Chili (61 000 t, soit 20 %), les États-Unis (42 000 t, soit 14 %), le

Molybdène

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

2013 2014 2015 2016 2017 2018

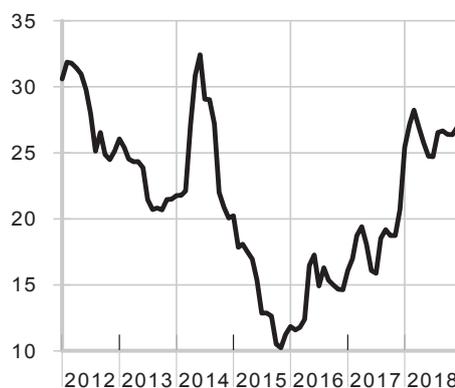
Production mondiale

258 000 281 000 235 000 279 000 296 600 296 300

Argentine				800	450	450
Arménie	6 700	7 100	7 200	6 300	5 800	5 000
Canada	7 620	9 700	2 300	2 710	5 290	5 100
Chili	38 700	48 800	52 600	55 600	62 500	61 000
Chine	101 000	103 000	83 000	130 000	130 000	130 000
États-Unis	60 700	68 200	47 400	35 800	40 700	42 000
Iran	4 000	4 000	3 500	3 500	3 500	3 500
Mexique	12 100	14 400	11 300	11 900	14 000	15 000
Mongolie	1 900	2 000	2 000	2 440	1 800	1 800
Ouzbékistan	530	530	450	450	450	450
Pérou	18 100	17 000	20 200	25 800	28 100	28 000
Russie	4 800	4 800	4 500	3 000	3 100	3 100
Turquie	1 500	1 300	900	450	900	900

Prix du molybdène Marché libre européen

(en dollar/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Pérou (28 000 t, soit 9 %) et le Mexique (14 000 t, soit 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 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. En 2018, la situation des producteurs – en particulier celle des exploitants de mines monométalliques chinoises – s'est améliorée grâce à une bonne reprise des prix (+ 45,5 % sur un an). Si la poursuite des mesures environnementales « Clean air » a eu pour conséquence la fermeture d'un certain nombre d'opérations, l'impact n'a été que de court terme, car il touchait en majeure partie les usines vétustes et de petite taille.

L'USGS évalue les réserves mondiales de molybdène à 17 Mt dont 8,3 Mt pour la Chine (49 % des réserves mondiales). En additionnant les réserves chinoises à celles des États-Unis (2,7 Mt), du Pérou (2,2 Mt), du Chili (1,8 Mt) et de la Russie (1 Mt), le total est porté à 95 %. 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 automobiles, 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 \$ 26,32/kg en 2018, en hausse de 45,5 % par rapport à 2017 (\$ 18,10/kg). De par ses usages dans l'industrie de l'énergie, le prix du molybdène est relativement corrélé à ceux du pétrole et du gaz. Depuis 2016, la remontée des cours du pétrole brut, ainsi que la reprise des activités d'exploration (*offshore* et en puits horizontaux), mais également la bonne dynamique du marché des aciers inoxydables ont fortement favorisé la hausse des prix du molybdène.

En mars 2019, le LME a lancé un nouveau type de contrats sur le molybdène, appelé *cash-settled*. Ces contrats, plus faciles à gérer, car ils n'obligent pas à détenir des stocks physiques, devraient permettre de mieux répondre aux demandes des producteurs et des consommateurs en matière de gestion du risque, et ainsi permettre d'accroître les volumes de transactions sur la place financière londonienne.

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'accroître, 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. En février 2019, le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis a publié la très attendue étude d'impact sur l'environnement (DEIS) du projet, qui a suscité de vives réactions d'opposants locaux. Une consultation formelle et un processus de commentaires du public doivent avoir lieu pour une décision d'autorisation au printemps 2019. 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 2018, la production mondiale du niobium a été estimée à 68 000 t par l'USGS. Comme les années précédentes, le marché est resté largement déterminé à la fois par un pays producteur – le Brésil avec une production de 60 000 t, soit 88 % du total – et un domaine d'application, celui de la sidérurgie mondiale. Le niobium, parfois appelé « columbium », fait partie du groupe des métaux réfractaires, avec une température de fusion de 2 477 °C.

Le ferro-niobium (FeNb), 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 ferro-niobium conduit à des usages ultra-majoritaires dans l'industrie de l'acier : aciers à haute limite d'élasticité (HLE), aciers inoxydables, réfractaires. Les principaux sont les aciers à haute limite d'élasticité ou aciers HLE microalliés, conte-

nant 0,5 % Nb. Ils sont utilisés à 45,2 % pour la construction, 23 % pour l'automobile, 16 % pour les pipelines, 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 ferro-niobium 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 l'USGS, en 2018, le Brésil aurait produit 60 000 t de niobium, soit 88 % de la production mondiale (total évalué à 68 000 t). Cependant, ce marché est très oligopolistique et les principaux producteurs n'ont aucune contrainte de publication, ce qui entraîne l'absence de chiffres officiels de production.

Les chiffres de l'Institut international du tantale et du niobium (TIC) concernant la production mondiale de concentrés de niobium s'élevaient quant à eux à 83 500 t en 2017. À l'étape ultérieure, 58 700 t de Nb contenu avaient été re-

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	59 400	55 900	64 300	63 900	69 100	68 000
Brésil	53 100	50 000	58 000	57 000	60 700	60 000
Canada	5 260	5 480	5 750	6 100	6 980	7 000
Autres pays	1 000	420	570	800	1 410	1 000

Prix du ferro-niobium 65 % Nb
Marché libre européen

(en dollar/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

çues par les raffineurs, destinés respectivement à 91 % à la production de FeNb, 4 % sous forme d'oxydes, 3,5 % FeNb produit sous vide, 1 % sous forme métal et 0,2 % sous forme d'alliages divers.

L'industrie et le marché du niobium sont fortement intégrés, avec le principal acteur, la société brésilienne CBBM, assurant près de 90 % de la production mondiale de niobium et ferro-niobium. 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.

La mine de Boa Vistas, deuxième source mondiale, 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 t 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 7 000 t Nb, soit 9 % 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 au Sierra Leone. Or, les minerais issus du Nigeria contiennent une part de radioactivité qui crée de lourdes contraintes pour l'exportation de concentrés. L'analyse des flux mondiaux montre que la destination d'exportation privilégiée de ces concentrés est la Chine avec près de \$ 70 millions de transactions en 2017.

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 2018, le prix annuel moyen du ferro-niobium à 65 % a augmenté pour la deuxième année consécutive, s'établissant à \$ 38,57/kg contre \$ 34,81/kg en 2017, soit 10 % d'augmentation sur l'année.

Plusieurs facteurs expliquent ce phénomène :

- D'une part, le développement par la Chine de normes de construction plus strictes (en particulier le changement des standards pour les constructions antisismiques, avec une résistance à la trac-

tion minimum de 600 MPa au lieu de 335 MPa auparavant). Celle-ci s'est faite en plusieurs étapes et s'est accentuée, en 2018, avec la mise en œuvre début novembre de la norme nationale révisée concernant les barres d'armature (GB-T 1499.2-2018). Ces mesures ont eu un impact sur la consommation chinoise de niobium, car ces aciers nécessitent de plus grandes quantités de vanadium et de niobium pour atteindre les caractéristiques voulues. Si l'impact sur le vanadium a été plus spectaculaire, la demande en niobium s'est également accentuée, notamment suite à un déficit ponctuel de l'offre en vanadium durant l'année. Les deux éléments sont relativement bien substituables dans les aciers HLE.

- En électronique, la forte demande en condensateurs en 2018 n'a pu être comblée par les seuls condensateurs en céramiques (MLCC). Bien qu'ayant la plus forte part de marché aux dépens des condensateurs au tantale et de ceux au niobium (essentiellement sur des critères de coûts et de disponibilité), la situation de pénurie des condensateurs MLCC a entraîné un regain de la demande pour les condensateurs au niobium et ceux au tantale.

- Enfin, la reprise de programmes d'armements ambitieux à travers le monde (aux États-Unis et en Chine, par exemple) a également joué sur la demande en alliages spéciaux impliquant le niobium.

Selon l'USGS, les réserves connues de niobium seraient supérieures à 9,1 Mt, représentant plus de cent trente ans de production actuelle. La ressource mondiale n'a pas été estimée, mais elle paraît importante. Le plus grand gisement mondial connu est Seis Lagos, dans la province d'Amazone, au Brésil, avec une ressource d'environ 56 Mt.

Les aciers HLE peuvent être recyclés, ce qui permet de limiter la demande en niobium d'origine minière. Ce recyclage a généralement lieu en boucle fermée, c'est-à-dire au sein d'un même secteur d'usages (les aciers automobiles, par exemple).

Le niobium est peu substitué dans ses usages du fait de ses caractéristiques très intéressantes. Néanmoins, comme vu précédemment, du fait de similitudes de propriétés, le molybdène et le vanadium peuvent aussi être utilisés pour pro-

duire des aciers microalliés, le tantale et le titane en tant qu'éléments d'alliages dans certains aciers inoxydables, ainsi que le molybdène, le tantale et le tungstène dans les superalliages.

Plusieurs perspectives devraient soutenir la croissance de la demande en niobium à un rythme compris entre 1 % et 3 %/an sur la période 2018-2025. La poursuite de l'amélioration des performances des aciers chinois et indiens (aciers HLE, aciers inoxydables) est la première d'entre elles. La relance de la mise en chantier de grands projets de pipelines, notamment en Amérique du Nord, est également un facteur favorable à la demande de niobium, tout comme la tendance des constructeurs automobiles et aéronautiques à un allègement constant des véhicules. La prédominance d'un seul acteur majeur intégré verticalement a un effet positif sur la stabilité des prix du niobium. En effet, responsable de 80 % de la production mondiale, CBMM s'efforce de conserver des prix relativement stables afin de garder un avantage concurrentiel sur les éventuelles substitutions. Anticipant une forte croissance du secteur, l'entreprise a annoncé augmenter de 50 % sa capacité de production de ferro-niobium d'ici fin 2020.

La compétition pourrait s'élargir dans les années à venir si l'exploitation des gisements de Panda Hill (Tanzanie) et/ou d'Elk Creek (États-Unis) était lancée, ce qui prendra encore quelques

années. En décembre 2017, la société NioCorp a 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 t Nb.

Rhénium (Re)

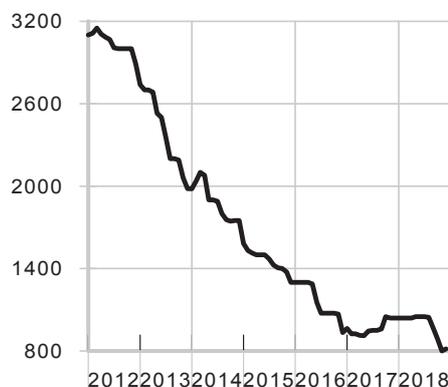
En 2018, la production mondiale de rhénium s'est élevée à 49 t selon l'USGS, soit l'un des métaux les moins produits au monde après le scandium. Le rhénium n'est obtenu qu'en sous-produit du molybdène, lui-même étant, en grande partie, un sous-produit du cuivre. C'est un métal très réfractaire avec une 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 valeur, fait rare dans le monde des petits métaux.

Pour l'USGS, la demande mondiale est d'environ 60 t. Elle concerne pour 80 % les superalliages à base de nickel contenant de l'ordre de 3 % Re en poids (voir la section consacrée au cobalt) et 15 % les catalyseurs en pétrochimie. Les autres applications comme les alliages MoRe et WRe représentent 5 % des usages du rhénium.

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	49 980	44 700	49 400	51 600	48 700	49 100
Arménie	350	351	350	350	300	260
Chili	25 000	25 000	26 000	27 000	27 000	27 000
Chine			2 400	3 000	2 500	2 500
États-Unis	8 100	8 500	7 900	8 440	8 200	8 300
Kazakhstan	2 500	300	1 000	1 000	1 000	1 200
Ouzbékistan	5 500	900	1 000	1 000	460	500
Pologne	7 530	7 600	8 900	9 000	9 300	9 300
Russie						
Autres pays	1 000	2 000	1 800	1 800		

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Le perrhénate 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. La demande en superalliages devrait continuer de croître, tirée par le cycle récent de commandes d'appareils dans l'industrie aéronautique (voir la section consacrée au cobalt).

En pétrochimie, le rhénium est l'un des catalyseurs clés dans les réactions de reformage catalytique du pétrole, opération chimique servant à valoriser une fraction du pétrole (le naphta 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.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production de rhénium a été de 49 t en 2018 (contre 48,8 t en 2017). Le premier producteur mondial est le chilien Molymet. Il représente à lui seul plus de la moitié de la production mondiale avec une estimation de 27 t, suivi par KGHM en Pologne (9,3 t) et Freeport McMoran aux États-Unis (8,3 t). Les producteurs de moindre importance sont situés notamment en Chine et au Kazakhstan.

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). L'USGS évalue avec de grandes incertitudes les réserves mondiales de rhénium à 2 400 t, dont 1 300 t pour le Chili (54 % des réserves mondiales). Les autres pays détenteurs de réserves significatives sont les États-Unis avec 400 t, la Russie avec 310 t et le Kazakhstan avec 190 t. L'USGS estime les ressources mondiales à 11 000 t, dont 5 000 t aux États-Unis.

Les prix du rhénium sont établis par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Plu-

sieurs produits sont distingués selon leurs caractéristiques :

- rhénium métal (pellets à 99,9 % Re) : prix moyen 2018 de \$ 1 504/kg, en baisse de 5,7 % par rapport à 2017 ;

- perrhénate d'ammonium (APR) basic grade (69,2 % Re) : prix moyen 2018 de \$ 985/kg, en hausse de 2,2 % par rapport à 2017 ;

- perrhénate d'ammonium (APR) catalyst grade (> 69,2 % Re) : prix moyen 2018 de 1 450 \$/kg, en baisse de 12,5 % par rapport à 2017.

Un événement majeur du marché du rhénium est survenu en août 2008 lorsque son prix a atteint \$ 12 500/kg suite à un phénomène spéculatif de nature industrielle. En 2018, l'évolution des prix est contrastée et a continué sa chute pour certains 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, sa part dans l'approvisionnement total passant à presque la moitié du total en quelques années. Ainsi, l'USGS estimait la quantité de rhénium métal recyclé en 2014 à 26 t (dont 10 t issues des déchets de superalliages et 16 t issues du recyclage de catalyseurs). 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.

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 aéro-

nautiques (Pratt & Whitney, Rolls-Royce, Cannon Muskegon, General Electric) qui devraient continuer de tirer la demande à moyen terme.

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 15 t en 2018, pour une valeur estimée à environ \$ 75 millions. Souvent classé parmi les terres rares, le scandium a pourtant des caractéristiques géologiques et industrielles bien distinctes, en particulier du fait de son très faible rayon ionique. Il mérite donc d'être distingué de ce classement. Ses autres particularités sont une faible densité (2,99 g/cm³, proche de celle de l'aluminium) et un haut point de fusion (1 541 °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 à développer substantiellement l'offre. Cette situation pourrait changer dans les années à venir, de nouvelles sources de production semblant apparaître en 2018.

Le scandium est utilisé sous deux formes principales, toutes deux situées dans des domaines très porteurs d'innovations technologiques. D'une part, 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 (AlSc), parmi les plus légers et les plus résistants connus, qui 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, et les équipements militaires. L'ajout de petites quantités de Sc transforme considérablement les propriétés de l'aluminium tout en conservant la légèreté du matériau. Le scandium affine la structure cristalline de l'aluminium au point où le métal allié peut être soudé sans perte de résistance. Il augmente également sa plasticité dans le moulage de formes complexes, améliore la résistance à la corrosion et augmente la

conductivité thermique de l'alliage. Ainsi, le scandium pourrait trouver des applications dans l'impression 3D de pièces à 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 traitement métallurgique d'autres substances (terres rares, acier, tungstène, titane, zirconium, étain, uranium), voire dans les filières de transformation du charbon et des phosphates. L'USGS indique une production mondiale avoisinant les 15 t en 2018, sous forme d'oxyde de scandium (Sc₂O₃). Environ 1 % de cette production (soit quelques dizaines de kilos) aurait effectivement été transformé en scandium métal.

La production de scandium à partir de résidus miniers de l'extraction des terres rares en Chine semble être la source principale de scandium. La production chinoise s'élèverait à 10 t/an d'oxyde de scandium (Sc₂O₃), prenant également en compte la production de scandium *via* la récupération des déchets issus de la fabrication des oxydes de titane. En deuxième position, la Russie produirait entre 3 et 5 tonnes par an de Sc₂O₃, principalement à partir des résidus miniers d'uranium. Enfin, le Kazakhstan et l'Ukraine produiraient annuellement 100 kg à 200 kg de Sc₂O₃, provenant également des résidus de traitement de l'uranium.

Bien que le scandium soit très peu récupéré, ses ressources sont abondantes. C'est bien la forte diffusion de cette substance dans la croûte terrestre qui l'empêche d'être davantage exploitée.

Le scandium peut être substitué par l'yttrium pour certaines applications. Une très faible quantité de scandium se retrouve dans l'aluminium recyclé. Cependant, il n'y a pas encore de recyclage du scandium à proprement parler.

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 2018, le prix du scandium à 99,9 % est estimé à \$ 5 000/kg, à un niveau relativement stable. Il est généralement vendu en lots individuels de quelques kilogrammes (le plus souvent 1 kg ou 5 kg).

En 2018, les développements visant à augmenter la production de scandium montrent un réel dynamisme. En Chine, la société China MinMetals a lancé en 2017 la construction d'un site d'extraction de nickel-cobalt-manganèse avec récupération du scandium. Elle prévoit une production de 20 t/an Sc_2O_3 , après une phase pilote lancée fin 2018.

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 t/an 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, converti en oxyde à la raffinerie Harima au Japon. La production devrait être de 7,5 t/an Sc_2O_3 .

En Russie, les recherches pour la récupération du scandium sont concentrées sur le traitement des boues rouges résiduelles 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 laisse entrevoir la production de 3 t/an Sc_2O_3 d'ici à un an.

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 et ressources indiquées de cette carbonatite contiennent 6 300 t Sc. Au Texas, la rhyolite de Round Top contient également du scandium, mais ce projet est un peu moins avancé. Aucune nouvelle étape majeure de ce projet n'a été franchie depuis l'étude économique préliminaire de 2013. Il en est de même pour le projet Bokan situé 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, trois 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 38,5 t/an Sc_2O_3 . L'étude de faisabilité fait état de réserves estimées à 1,44 Mt contenant environ 590 t Sc en utilisant

une teneur de coupure efficace de 155 ppm Sc (parties par million).

- Le projet Syerston, de la compagnie CleanTeq, a finalisé une étude de faisabilité définitive permettant d'entamer la période de financement du projet avant construction en 2019. La production de scandium visée de 50 t/an est en sous-produit du nickel et du cobalt. Les réserves et ressources mesurées et indiquées sont de 12 300 t 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 prévoit le début des travaux en 2019 avec une production ne démarrant pas avant 2021. Une production annuelle de 89 t/an est prévue sur dix-huit ans.

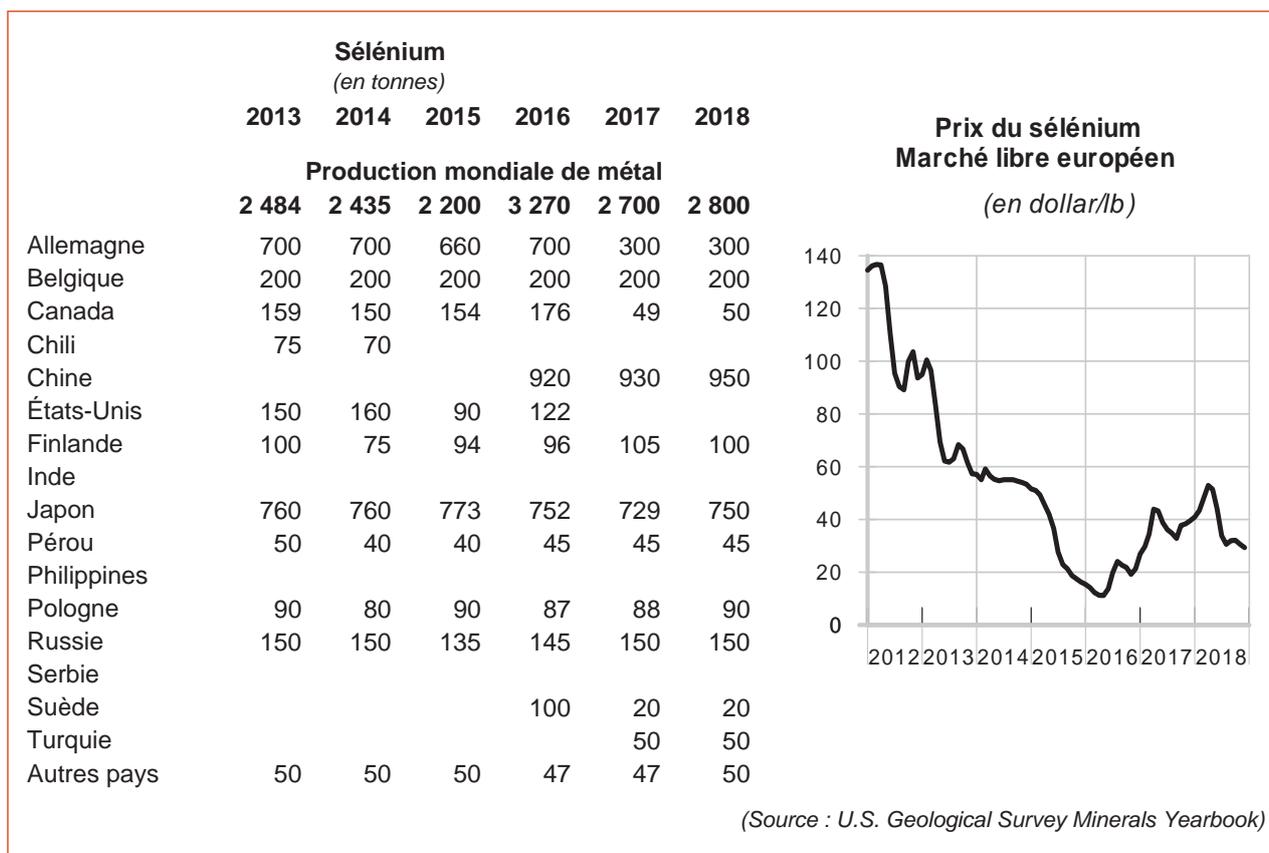
- Le projet Owendale de Platina Resources a terminé une étude de faisabilité. Il est prévu une production de 20 à 40 t/an Sc_2O_3 extraites par HPAL.

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 2018, la production de sélénium mondiale a été estimée à 2 800 t 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 \$ 109 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 t. 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 % en agriculture, 10 % pour la chimie et les pigments, 10 % en 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 51 en 2017, contre 47 en 2016 et 26 en 2015. Cette hausse aurait contribué à la remontée des cours du sélénium observée depuis 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 pho-

toélectriques 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 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 ainsi que dans l'alimentation animale.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production raffinée de sélénium mondiale a été estimée à 2 800 t en 2018, en hausse de 3 % par rapport à 2017. Les données concernant les États-Unis sont gardées confidentielles. Les principaux producteurs mondiaux sont la Chine (950 t), le Japon (750 t) et l'Allemagne (300 t). 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 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 mineurairement 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 t Se, dont 26 000 t 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 t, soit environ un mois de la production mondiale de 2018. Malgré les incertitudes au sujet du devenir de ce stock, son niveau est suffisamment faible pour ne pas peser sur les cours du sélénium.

Les prix du sélénium sont établis par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen du sélénium (teneur de 99,5 %) en 2018 a été de \$ 39,1/kg, en hausse de 7 % par rapport à 2017 (\$ 36,4/kg). Les prix du sélénium ont fortement varié ces dernières années puisqu'ils étaient de \$ 175,3/kg en avril 2011, mais seulement de \$ 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.

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 utilisations – 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 croissante, portée notamment par l'urbanisation et le développement du parc automobile mondial.

Silicium (Si)

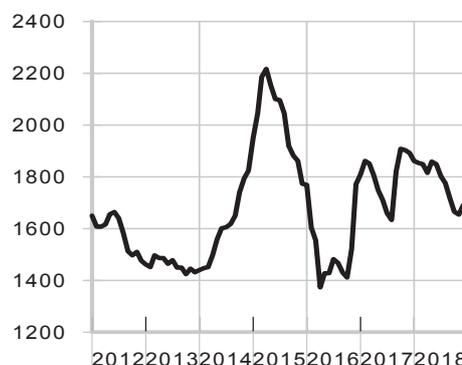
Le silicium est le second élément le plus abondant dans l'écorce terrestre après l'oxygène. C'est un élément ubiquiste et important pour le fonctionnement de nombreux êtres vivants. Cependant, son utilisation industrielle en tant que métal est privilégiée sous deux formes, le silicium métal et le ferrosilicium, uniquement abordés dans ce chapitre. En 2018, les productions mondiales de silicium métal et de ferrosilicium sont estimées respectivement à 2,5 Mt et 4,2 Mt par l'USGS. On les retrouve dans d'innombrables applications, du secteur du bâtiment aux hautes technologies, en passant par les polymères. Il est aujourd'hui l'élément phare des cellules photovoltaïques pour la production d'électricité. Ces deux marchés représentent un total d'environ \$ 13 milliards au niveau mondial.

Le silicium métal correspond à un matériau contenant plus de 98 % Si. Le ferrosilicium est, quant à lui, un alliage de fer et de silicium avec une teneur moyenne de 75 % Si. La différence entre le marché du silicium métal et du ferrosilicium ne se situe pas tant du côté de la production que du côté de la consommation. En effet, près de 86 % du ferrosilicium est utilisé dans les aciers (69 %) et la fonte (17 %). Dans le premier cas, il

Silicium
(en milliers de tonnes)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	7 840	8 100	7 630	7 600	6 600	6 700
Afrique du Sud	84	84	84	85	65	65
Bhoutan			78	69	55	65
Bésil	230	154	117	110	170	190
Canada	35	52	54	51	54	54
Chine	5 200	5 500	5 000	5 000	4 000	4 000
Espagne		81	81	81	69	69
États-Unis	365	373	411	384	415	430
France	170	130	121	120	126	130
Inde	86	86	60	59	59	62
Islande	75	75	75	79	76	76
Malaisie				82	113	140
Norvège	362	332	375	380	375	380
Russie	733	700	747	750	670	670
Ukraine	96	92	59	66	60	52
Autres pays	359	389	368	310	274	300

Prix du silicium
Marché libre européen
(en dollar/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

sert à désoxyder les aciers ; dans le deuxième cas, il est ajouté à la fonte pour accélérer la graphitisation du carbone lors du refroidissement de la coulée. Ceci donne une fonte grise plus ductile et plus résistante à la corrosion. Les 14 % restants servent à la production de magnésium, lequel est principalement produit en Chine par le procédé Pidgeon (voir la section consacrée au magnésium).

Le silicium métal est pour sa part principalement utilisé dans les alliages d'aluminium AlSi (43 %) et les silicones (32 %). Il a néanmoins une contribution fortement croissante dans les cellules photovoltaïques (17 %) et l'électronique (6 %).

Les alliages AlSi sont très utilisés dans tous types de véhicules, qu'ils soient terrestres, marins, ou aériens, mais aussi dans le bâtiment, les équipements ménagers, les câbles électriques, ainsi que les contenants et les emballages. Associé à l'aluminium, le silicium améliore la coulabilité et réduit le coefficient de dilatation thermique. Dans les silicones, le silicium forme 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, tout en autorisant un coût réduit 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.

Alors que la consommation de silicium métal a été en forte hausse sur la période 2010-2017 (+ 6,3 %/an), le marché du ferrosilicium a montré un fort déclin (- 10 % sur la période). Plusieurs raisons expliquent ce phénomène : d'un côté, le silicium métal a bénéficié d'une demande forte de la part des constructeurs de cellules solaires et pour les alliages d'aluminium ; de l'autre côté, l'acier chinois utilise de moins en moins de ferrosilicium (malgré une nette hausse de cette production d'acier). Depuis une dizaine d'années, de nombreux électrometallurgistes, y compris en France, ont converti leurs capacités de production de ferrosilicium en capacités de production de silicium métal. Le marché du ferrosilicium reste donc

guidé principalement par l'évolution des marchés de l'acier et du magnésium chinois. Il est à noter que certains producteurs de magnésium chinois sont contraints, depuis 2018, à ne plus recourir au procédé Pidgeon, très polluant. La demande en silicium pour cet usage pourrait donc en être réduite. Le silicium métal, lui, devrait continuer à être de plus en plus consommé, porté par la demande mondiale croissante en semi-conducteurs.

Le silicium et le ferrosilicium sont tous deux produits de manière similaire : par la réduction de la silice (ou quartz, SiO_2) dans un four à arc électrique en présence de charbon et parfois de copeaux de bois. Pour le ferrosilicium, on ajoute également des boulettes (billes de minerai de fer) ou des résidus de fer (*scraps*) au mélange.

En fonction de la technicité de l'application, le silicium métal doit être raffiné à des niveaux précis :

- 98-99 %, pour la qualité métallurgique (MG) ;
- 99,9999 %, ou « 6 N », pour la qualité solaire (SoG) ;
- jusqu'à 99,9999999 %, ou « 9 N », pour la qualité électronique (EG).

Les cellules photovoltaïques utilisent du silicium SoG obtenu par différents procédés (procédé Siemens, lit fluidisé, ou par raffinage métallurgique). Le silicium polycristallin est moins pur que le monocristallin, ce qui conduit à un rendement plus faible (10 % à 15 %). Cependant, il est beaucoup moins cher à produire, si bien qu'il s'est imposé à partir des années deux mille comme la forme dominante sur le marché des cellules photovoltaïques. Selon les données de l'Institut Fraunhofer, la distribution des technologies photovoltaïques mondiales en 2017 serait à 62 % de polycristallin, 33 % de monocristallin et 5 % de couches minces. Le silicium EG, quant à lui, ne peut pas se passer d'un état monocristallin. Il s'obtient après distillation du trichlorosilane (SiHCl_3), puis décomposition en présence d'hydrogène, et enfin cristallisation par la méthode de Czochralski, ou zone fondue flottante. Les producteurs de silicium EG sont peu nombreux et ne fournissent généralement pas leurs données de production.

L'USGS estime une production totale de 6,7 Mt en Si contenu (ferrosilicium inclus) pour

2018, soit une augmentation de 120 000 t par rapport à 2017. Cela suggère que la hausse de production du silicium métal – évaluée à 2,5 Mt – compense la baisse de production du ferrosilicium qui est estimée à 4,2 Mt. Les principaux producteurs de ferrosilicium sont la Chine, la Russie et la Norvège. Les principaux producteurs de silicium métal sont la Chine, la Norvège et le Brésil. Selon la Société chimique de France, les principaux producteurs de silicium métallurgique étaient, en 2017, Ferroglobe (417 000 t), Dow Consumer Solutions (207 000 t), Elkem (159 000 t), Rima (103 000 t) et Rusal (62 000 t). En 2015, la production de silicium SoG était principalement assurée par le chinois GCL (24 %), suivi de l'allemand Wacker (19 %) et du sud-coréen OCI (16 %).

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, ce qui peut 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 récupération de la fumée de silice est une forme de recyclage 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 \$ 1 782/t en 2018, un niveau stable par rapport à 2017 (\$ 1 800/t), bien qu'une forte volatilité ait été observée sur les cinq dernières années.

Fin 2018, le marché du silicium a été excédentaire, en raison du ralentissement des marchés mondiaux de l'acier et de l'aluminium. Ceci a forcé les producteurs européens à partiellement couper leur production. Ferroglobe puis Elkem ont décidé d'arrêter temporairement certains fours aux États-Unis et en Norvège, réduisant leurs productions de 20 % à 30 %. Le Brésil, la Chine et la Russie ont mieux résisté, notamment grâce à des coûts de production et des prix de vente plus faibles qui leur ont permis de capter une part de la demande européenne. Certaines usines de production, comme à Yongdeng en Chine, en ont profité pour réaliser des travaux d'amélioration. Le marché ne devrait pas retrouver l'équilibre avant le deuxième semestre de 2019, voire 2020.

Tantale (Ta)

La production mondiale de tantale serait, en 2018, de 1 800 t de Ta métal contenu, sur la base des données de l'USGS. L'ordre de grandeur du marché est compris entre \$ 400 millions et \$ 600 millions. Le tantale fait partie du groupe des métaux réfractaires avec une température de fusion de 3 017 °C. C'est aussi un métal particu-

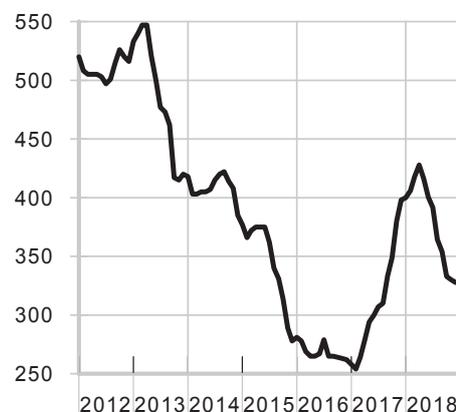
lièrement dense (16,7), très résistant à la corrosion par les acides, et doté d'une permittivité élevée. Cette dernière propriété permet la fabrication de condensateurs électroniques de très faibles volumes et robustes, principale application mondiale du tantale. Sa dureté et sa résistance à la chaleur sont également prisées pour les superalliages et les outils de coupe (carbures).

En 2018, la demande mondiale – évaluée aux alentours de 1 600 tonnes – 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, selon le fabricant KEMET. Celle-ci s'explique par une pénurie mondiale en 2018 de condensateurs multicouches en céramiques (MLCC) d'environ 500 milliards de pièces, selon la même source. Depuis les années deux mille, 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

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale	786	1 200	1 100	1 220	1 800	1 850
Australie		50	20	60	83	100
Brésil	98	150	115	103	110	100
Burundi	20					
Canada	5					
Chine		60	60	94	110	120
Éthiopie	8			63	65	70
Mozambique	115	85				
Nigeria	60	60		192	153	150
Rép. dém. du Congo	170	200	350	370	760	710
Rwanda	250	600	410	350	441	500
Autres pays		140	117	45	83	100

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



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

production d'appareils électroniques semble avoir dépassé la capacité de production des condensateurs MLCC, permettant ainsi aux condensateurs au tantale de regagner des parts de marchés. Cet usage représenterait 34 % de la consommation mondiale en 2018 selon Roskill, soit 535 t Ta.

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. En raison du dynamisme des commandes aéronautiques récentes, la croissance de ce secteur est estimée à 7 % par an d'ici 2027. 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 intervient également 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, le tantale est utilisé pour d'autres usages métallurgiques, ainsi que sous forme de composés chimiques (oxydes), et ce, pour 29 % de la demande. On peut ainsi 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 2018, la production mondiale serait de 1 800 t de Ta métal contenu selon l'USGS. Cependant, les statistiques concernant l'extraction minière du tantale sont très peu précises. Pour Roskill, elle s'établirait à 1 575 t Ta. En 2018 et selon les données de l'USGS, la République démocratique du Congo (RDC) et le Rwanda demeurent les sources principales de tantale mondiales. 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 710 t Ta contenu pour la RDC (38 %) et 500 t Ta pour le Rwanda (27 %), suivis par la Chine (6,6 %), le Brésil (5,5 %) et l'Australie (5 %).

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 t 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 7 %, soit 100 t à 110 t Ta, grâce notamment à l'arrivée du tantale produit par les opérations minières de Mt Cattlin (société Galaxy Resources, 20 t Ta/an) et Mt Marion (société Neometals, 37 t Ta/an).

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 relai 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, 119 t Ta/an), Bald Hill (société Tawana Resources, 96 t Ta/an) et, enfin, du projet Pilgangoora de la société Pilbara Minerals avec une production annoncée de 110 t Ta/an en 2019, puis près de 300 t Ta/an à partir de 2020. Ces développements 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, exploitée par Minsur (130 t Ta/an) et de celle de Mibra exploitée par AMG (Advanced Metallurgical Group). Cette dernière a subi des reconstructions 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 220 t Ta pour 2019.

Dans le reste du monde, l'usine Silmet à Sil-lamae, en Estonie, produit près de 45 t Ta/an, issu du traitement de minerai de la péninsule de Kola en Russie. L'usine appartient désormais à la société Neo Performance Materials (NPM), née de la restructuration financière, en 2016, du groupe américain MolyCorp.

La disponibilité plus importante de tantale sur le marché international aura plusieurs conséquences majeures à court et moyen termes, à commencer par un marché probablement excédentaire en 2019. Toutefois, les producteurs australiens et les négociants mondiaux pourraient choisir de ne pas inonder immédiatement le marché avec 100 % de cette production à bas prix, afin d'éviter une chute trop brutale des cours. L'impact à la baisse sur les prix a néanmoins déjà commencé à se faire sentir en 2018 et jouera également sur les prix de long terme du tantale, qui devraient se stabiliser à un nouveau palier (vraisemblablement autour de \$ 300/kg à 350/kg Ta 99,8 %). La deuxième 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 des 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.

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 2018, le prix annuel moyen du tantale métal (Ta 99,8 % EU) s'est établi à \$ 380,75/kg, montrant cependant une évolution contrastée. Au premier semestre, les prix ont fortement augmenté atteignant un pic en avril (\$ 427,88/kg). Ce dernier répercutait la hausse du prix du concentré de tantalite (30 % Ta₂O₅) due à des événements en RDC : incertitudes sur le nouveau code minier, litige provisoire et fermeture de mines à Rubaya, au nord Kivu. Une chute continue a suivi, pour atteindre un plus bas à \$ 327,63/kg. Celle-ci s'est poursuivie en 2019.

Les entreprises minières de RDC sont les premières touchées par cette baisse, en particulier les quelques exploitations mécanisées (Somika, par exemple), ayant peu de flexibilité sur l'outil et les coûts de production. Le 7 janvier 2019, la Société minière de Bisunzu, le plus grand mineur de coltan de ce pays, a annoncé mettre fin à sa certification ITSCI en raison de la hausse des coûts. En effet, le coût des mesures pour être considérés comme conformes dans le cadre de certains programmes de certification (audits, étiquetage, etc.) a été estimé entre \$ 130/t et \$ 180/t sur la base du minerai (ou symboliquement « 5 \$ par livre de Ta₂O₅ produite, soit 0,454 kg »). Ce fardeau est de plus en plus lourd pour de nombreuses sociétés minières qui envisagent de se retirer de ces processus. Elles étaient jusqu'à présent réticentes, de crainte qu'il ne leur soit trop difficile de vendre des minerais « non certifiés ».

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 que sont le Rwanda et l'Ouganda. 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 nouveaux déchets (*new scrap*), produits durant la manufacture 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 110 000 t Ta, les seules données accessibles et vérifiables ne concernant que l'Australie (76 000 t Ta selon l'USGS, dont 37 000 t conformes aux normes internationales) et le Brésil (34 000 t Ta). Les ressources en terre sont donc vraisemblable-

ment bien supérieures, notamment au Canada et aux États-Unis (55 000 t 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 positives, avec une croissance moyenne de 4 % à 5 % par an d'ici 2027 selon Roskill. Les perspectives concernant les condensateurs au tantale sont particulièrement favorables, 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, et devraient donc rester, le plus grand marché unique du tantale. 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 2018, la production de tellure mondiale (hors États-Unis) a été estimée par l'USGS à 440 t. 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 et souvent associé au sélénium avec lequel il partage des propriétés chimiques voisines. Il est utilisé pour ses propriétés semi-conductrices photosensibles et photoélectriques. Le marché du tellure, d'une valeur d'environ \$ 15 millions, est très opaque. Les données ci-dessous sont donc indicatives.

Le principal usage estimé par l'USGS en 2018 est la production de panneaux photovoltaïques à couches minces au tellure de cadmium (CdTe) représentant 40 % de la consommation, soit 175 t. La production de générateurs thermoélectriques représente 30 % des usages. Le tellure de bismuth a la particularité de pouvoir transformer la chaleur en électricité (effet Peltier), propriété utilisée pour la production de systèmes

réfrigérants portables utilisés pour la réalisation d'équipements de laboratoire, notamment pour le séquençage de l'ADN, nécessitant l'application de trois températures différentes en séquence rapide. 15 % de la demande en tellure est utilisée en métallurgie, en tant qu'additif pour accroître l'usabilité de l'acier. La vulcanisation du caoutchouc sous forme de diéthylthiocarbamate de tellure représente 5 % de la demande. Les usages restants (10 %) sont l'imagerie thermique, les capteurs photo 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.

Cet élément n'est que peu utilisé en raison du faible développement de la technologie photovoltaïque à couches minces CdTe, par rapport au développement rapide de celle à base de silicium. Ceci pourrait bientôt changer avec la volonté de First Solar, le plus gros fabricant de cellules photovoltaïques à couches minces CdTe, de doubler sa production annuelle de cellules CdTe en 2019, à 7,6 GW/an. En effet, First Solar veut profiter de la taxe de 30 % instaurée par l'administration Trump sur l'importation des cellules photovoltaïques au silicium. Un autre constructeur, le chinois CNBM Optoelectrics, prévoit lui aussi d'augmenter sa production à 1 GW/an de panneaux solaires à CdTe. Selon plusieurs études, il faut actuellement de 70 t à 90 t de tellure par GW de capacité de production électrique. Une demande supplémentaire de tellure d'environ 400 t pourrait alors apparaître à l'horizon 2020, rendant ainsi le marché temporairement déficitaire et faisant monter les

Tellure (en tonnes de métal raffiné)			
	2016	2017	2018
Production mondiale			
	410	420	420
Afrique du Sud		7	7
Bulgarie	4	5	5
Canada	18	49	30
Chine	280	290	300
États-Unis	50	50	50
Japon	33	38	36
Russie	35	44	35
Suède	39	35	32

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

prix. Néanmoins, à partir du 1^{er} janvier 2019, les subventions pour l'installation de panneaux photovoltaïques diminueront itérativement de 30 % à 10 % au 1^{er} janvier 2022, ce qui pourrait réduire la croissance de la demande.

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'existe pas de production minière de tellure. Plus de 90 % du tellure est produit à partir de boues anodiques collectées lors du raffinage électrolytique du cuivre, le reste provenant des écrémages des raffineries de 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).

En 2018, la production mondiale de tellure (hors États-Unis) a été estimée par l'USGS à 440 t, en baisse de 6 % par rapport à 2017. La Chine est le premier producteur de tellure raffiné avec près de 61 % de la production mondiale (300 t). Cependant de nombreux pays producteurs ne publient pas leur production annuelle de tellure.

En 2018, les stocks de 170 t de tellure supposément détenus par la bourse chinoise du *Fanya Metal Exchange* sont toujours hypothétiques, et pourraient avoir été dilués. Les producteurs de tellure hors Chine sont principalement des pays producteurs métallurgiques de cuivre : le Japon, la Russie, les États-Unis, la Suède, le Canada, l'Afrique du Sud et la Bulgarie.

L'USGS évalue avec de très grandes incertitudes les réserves de tellure à 31 000 t, dont 21 % en Chine, 11 % aux États-Unis, et 3 % au Canada. Les chiffres indiqués ne comprennent cependant que le tellure contenu dans les réserves de cuivre.

Au-delà des utilisations très 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. Plusieurs matériaux peuvent remplacer le tellure dans la plupart de ses utilisations, mais généralement avec des pertes d'efficacité ou de qualité de produit.

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 2018, le prix spot du tellure (99,99 % Europe) a remonté significativement avec un prix moyen de \$ 74/kg sur l'année, soit le double du prix moyen sur 2017. On reste cependant en deçà des prix de plus de \$ 100/kg sur la période 2010-2015, ce qui illustre les hésitations du marché. Les développements des fabricants de cellules à CdTe semblent devenir le principal moteur de croissance. 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 t/an de tellure.

Terres rares (TR)

En 2018, l'ordre de grandeur du marché des terres rares (TR) est d'environ \$ 7 milliards, avec une production de 170 000 t 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 2018, la demande en aimants permanents de haute performance néodyme-fer-bore (NdFeB) a continué de tirer le marché des TR, notamment du fait de l'engagement croissant pour une transition énergétique à l'échelle mondiale.

Les secteurs d'utilisation des TR ont évolué depuis 2011. Après un impact certain, la consommation mondiale a repris sa croissance à partir de 2012 pour atteindre 160 000 t en 2016. Le principal moteur de cette croissance est le secteur des aimants permanents, utilisant en particulier le néodyme (Nd), et le praséodyme (Pr), avec en moindre mesure le dysprosium (Dy) et le terbium (Tb) pour les applications de hautes performances. Cette demande croît à plus de 10 % par an du fait de l'usage de ces aimants dans un nombre croissant de moteurs électriques à très haut rendement, où ils autorisent la miniaturisation (électronique, robotique) et la réduction massique des équipements (générateurs d'éoliennes *offshore*, moteurs

Terres rares
(en tonnes d'oxydes contenus dans le minerai)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale						
	109 000	123 000	130 000	129 000	132 000	168 000
Australie	2 000	8 000	12 000	15 000	19 000	20 000
Birmanie						5 000
Burundi						1 000
Brésil	330		880	2 200	1 700	1 000
Chine	95 000	105 000	105 000	105 000	105 000	120 000
États-Unis	5 500	5 400	5 900			15 000
Inde	2 900		1 700	1 500	1 800	1 800
Malaisie	180	240	500	300	180	200
Russie	2 500	2 500	2 800	2 800	2 600	2 600
Thaïlande	800	2 100	760	1 600	1 300	1 000
Vietnam	220		250	220	200	400

(Source : Mineral Commodity Summaries)

des véhicules électriques, etc.) pour des performances améliorées.

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 abondantes (lanthane, cérium) et moins chères. Cette tendance s'observe également depuis 2017 pour certains aimants de moindre qualité, la substitution du néodyme par le cérium (Ce) ou le lanthane (La) étant privilégiée afin de réduire les coûts de fabrication et les contraintes de rareté. 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 de l'éolien *offshore* et des véhicules électriques, ainsi que celui de l'électronique et de la robotique.

En 2018, plus de 90 % des moteurs des véhicules électriques utilisent des aimants permanents à TR selon les données de Roskill. Cette part de la

demande est estimée à 10 % de la demande totale d'aimants permanents NdFeB et elle devrait passer à 20 % en 2021, jusqu'à potentiellement 60 % en 2030.

En 2018, la production totale est estimée à 170 000 t OTR par l'USGS. Ce chiffre représente une fourchette basse, puisqu'il ne prend en compte que les quotas officiels du gouvernement chinois (120 000 t au total en 2018, en augmentation de 14 % par rapport à 2017) et non la production illégale du pays, ajoutant potentiellement 40 000 t à 50 000 t OTR. La part de la Chine serait ainsi comprise entre 80 % et 90 % en fonction des estimations.

Aux États-Unis, la production à Mountain Pass a repris au premier trimestre 2018, ayant donné lieu à la production de 15 000 t d'OTR selon l'USGS. Une grande partie était destinée à l'exportation vers la Chine.

En Malaisie, la société Lynas a atteint en 2018 des niveaux de production record, en particulier sur le néodyme et praséodyme, à un total proche de 20 000 t OTR. Ces terres rares constituent 65 % de l'approvisionnement destiné à assurer la production japonaise d'aimants permanents NdFeB.

Cependant, Lynas connaît des difficultés quant au renouvellement de ses autorisations d'exploitation par le gouvernement malais. Ainsi, la société a dû annoncer, fin novembre, l'interruption temporaire de ses activités du fait de l'atteinte de son quota annuel de production. Cette dernière cherche à l'augmenter, mais les autorités locales exigent pour ce faire un plan d'action pour la gestion des déchets de raffinage des TR contenant de la radioactivité. Les pourparlers et négociations en cours devraient connaître une issue en 2019.

Dans le reste du monde, des productions modestes peuvent être mentionnées, notamment en Russie avec la société Solikamsk, troisième producteur mondial. Sa production s'élève à 3 000 t d'OTR sous forme de concentrés de terres rares, extraits 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.

Au Burundi, l'entreprise Rainbow Rare Earth a produit en 2018 environ 1 000 t de concentrés de TR à 58 % OTR. Le néodyme et le praséodyme constituent 20 % en masse de ce concentré, mais 80 % de sa valeur. L'exploitation se fait en grande partie de manière semi-mécanisée. L'objectif est d'atteindre une production de 250 t à 300 t par mois. La viabilité du projet est en partie assurée par un partenariat avec le sidérurgiste allemand ThyssenKrupp.

D'autres productions mineures peuvent être mentionnées au Brésil (compagnie CBMM), en Inde (société Indian Rare Earths) ou encore en Malaisie, en Birmanie et en Thaïlande. Dans ces derniers cas, les terres rares sont extraites en sous-produit des mines d'étain.

Selon les chiffres de l'USGS, les réserves mondiales sont de l'ordre de 120 Mt OTR. Ces réserves sont bien réparties, avec 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 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.

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, en particulier le projet Arafura, pour lequel les dernières étapes de l'usine pilote doivent être finalisées en 2019 pour une capacité de 3 600 t/an OTR, et le projet Browns Range (Northern Minerals), avantage par d'importantes ressources en dysprosium.

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 t OTR par an.

Au Groenland, le développement du grand gisement de Kvanefjeld a franchi d'importants jalons en 2018, sous l'impulsion de soutiens chinois. En plus d'être l'un des plus gros gisements de terres rares hors Chine à ce jour avec des ressources estimées à 10 Mt OTR, la valorisation d'uranium, de zinc et de fluorine en coproduits ou sous-produits est également envisagée et représente l'un des atouts importants du projet. C'est également le meilleur exemple de la stratégie chinoise de développement de projets de terres rares hors de Chine. Elle est incarnée par le groupe Shenghe Resources Holding, également présent dans le consortium ayant permis la reprise d'exploitation de la mine de Mountain Pass aux États-Unis. Cette entreprise est le principal actionnaire de la junior australienne Greenland Minerals Ltd développant le projet Kvanefjeld. Après avoir signé un mémorandum d'accord en août 2018, avec le soutien du gouvernement groenlandais, Greenland Minerals a déclaré le 23 janvier 2019 la formation d'une *joint-venture* (JV) entre Shenghe et un nouveau partenaire de poids : China National Nuclear Corp. La nouvelle société dénommée China Nuclear Hua Sheng Mining Ltd. sera l'agent désigné pour l'importation, l'exportation et le commerce de matériaux de terres rares transportant des radionucléides. Les acteurs chinois sont ainsi bien placés pour aboutir à la mise en production de ce projet d'ici 2020. Un accord d'*offtake* (enlèvement) de 32 000 t par an de concentrés contenant les terres rares a été conclu, ainsi que la possibilité pour Shenghe de devenir l'actionnaire majoritaire en montant ses parts à 60 % en 2020. La seule bar-

rière 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.

En 2018, les prix des TR ont retrouvé une certaine stabilité après un sursaut momentané en 2017. C'est en particulier la prédominance de contrats d'approvisionnement à long terme qui permet d'expliquer ce phénomène. N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. 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. Exprimé sous forme métal 99 % Fob (Franco à bord) Chine, le lanthane et le cérium sont restés à des niveaux quasi inchangés en 2018, à \$ 6,20/kg en moyenne. Le prix du terbium, la plus chère des terres rares, s'est quant à lui établi à \$ 604,93/kg, en baisse de 10,5 % par rapport à 2017, tout comme le dysprosium (- 2,6 %) à \$ 264,70/kg. À l'inverse, la revalorisation du praséodyme à \$ 97,41/kg en 2018 contre \$ 85/kg en moyenne sur 2016 et 2017 illustre le poids de la demande en aimants permanents NdFeB.

La substitution de technologies a été l'une des principales réponses des acteurs occidentaux face aux restrictions chinoises d'exportations de terres rares mises en œuvre en 2010-2011. Ainsi, des technologies alternatives se sont développées et restent privilégiées par un certain nombre de constructeurs automobiles ou d'éoliennes : technologies de moteurs à bobines de cuivre, les véhicules à moteur (ex. : Renault) ou aimants à induction pour les rotors d'éoliennes (ex. : Enercon).

Plus récemment, une autre stratégie semble se développer parallèlement : l'ajout de terres rares plus légères (lanthane, cérium) en complément du néodyme et du praséodyme pour les aimants permanents de moindre performance. Cette substitution permet de profiter de l'abondance relative de ces éléments et de réduire les coûts de production. Elle a cependant demandé de nombreux développements, tout comme la réduction des quantités de dysprosium ajoutées pour les aimants hautes performances. En février 2018, Toyota annonçait

avoir développé des aimants utilisant 50 % de moins de néodyme et aucun dysprosium ni terbium pour ses nouvelles générations de véhicules (notamment, la Prius de cinquième génération).

Au-delà de la production primaire, le recyclage se développe également en Europe et aux États-Unis, en particulier celui des aimants permanents, imitant progressivement le Japon. Les sociétés japonaises (Sojitz, Daido Steel, Showa Denko et Shin Etsu) ont en effet mis en place très tôt des circuits de recyclage efficaces, par la récupération de chutes d'aimants permanents lors de leur fabrication ainsi que celle des appareils en fins de vie (climatiseurs, etc.). En Inde et au Vietnam, des usines de production d'aimants permanents NdFeB soutenues par ces entreprises ont vu le jour et sont aujourd'hui opérationnelles, ainsi que des centres de recherche sur les Terres Rares. Pour exemple, Shin Etsu dispose d'une usine de recyclage en Inde avec une capacité de production d'origine secondaire de 2 200 t OTR.

Aux États-Unis, Rare Earths Salts au Nebraska a produit 430 t OTR en 2018 à partir de déchets de lampes fluo compactes contenant des terres rares légères (Y, La, Ce) et quelques lourdes (Tb, Eu). La société vise une capacité de 3 500 t/an OTR à terme.

Malgré ces initiatives, la Chine est devenue en 2018 le premier importateur mondial de TR, en plus d'être le premier exportateur. Les raisons sont doubles, à la fois environnementales et stratégiques : protéger les ressources en TR sur son sol tout en assurant les besoins d'une demande intérieure toujours croissante. Cette dernière est orientée vers des solutions de hautes technologies à base d'aimants permanents à terres rares. La transition énergétique et le rôle joué par la Chine à cet égard sont d'importants moteurs. Pour exemple, l'industrie des véhicules électriques *Made in China* repose sur l'intégration verticale de toute la chaîne de production, afin de disposer d'une force de frappe accrue, tout en maintenant des coûts de production bas. Dans ce contexte, la production d'aimants permanents NdFeB est un avantage compétitif majeur.

Titane (Ti)

Le titane est produit à partir de deux principaux minéraux, l'ilménite et le rutil, dont la produc-

Titane*(en milliers de tonnes)***2013 2014 2015 2016 2017 2018****Production mondiale d'ilménite**

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	6 630	5 570	6 190	5 500	5 000	4 800
Afrique du Sud	1 190	600	1 280	1 020	550	500
Australie	960	720	720	780	730	700
Brésil		100	48	48	50	50
Canada	770	480	595	595	840	850
Chine	1 020	960	850	840	300	300
États-Unis	200	100	200	100	100	100
Inde	340	190	180	180	300	300
Kenya		100	267	280	280	280
Madagascar	264	300	140	92	110	100
Mozambique	430	510	460	540	600	600
Norvège	498	440	258	260	220	200
Russie		110	116			
Sénégal		60	257	250	300	250
Sri Lanka	32	32				
Ukraine	150	250	375	210	230	230
Vietnam	720	560	360	240	200	200
Autres pays	60	90	77	71	150	150

Production mondiale de rutile

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	667	470	760	800	770	750
Afrique du Sud	59	53	67	67	95	100
Australie	423	190	380	380	290	250
Inde	24	17	18	19	10	10
Kenya		22	71	84	87	90
Madagascar	8	9	5			
Malaisie	14					
Mozambique				7	9	8
Sénégal				9	10	8
Sierra Leone	81	100	113	130	160	170
Ukraine	50	63	90	95	95	100
Autres pays	8	17	14	8	13	10

Production mondiale d'éponge de titane métal

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	224	206	180	170	193	192
Chine	105	110	62	60	72	70
États-Unis	15	13	19	13	13	13
Inde				1	1	1
Japon	42	25	42	54	51	52
Kazakhstan	12	9	9	9	9	9
Russie	44	42	40	38	40	40
Ukraine	6	7	8	8	7.5	7.5

**Prix de l'éponge de titane métal
Marché libre européen***(en dollar/kg)**(Source : Mineral Commodity Summaries)*

tion cumulée a été estimée par l'USGS à 6,1 Mt en 2018. 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 était de 180 000 t en 2018, 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 TZMI (Titanium Zirconium Minerals International), 95 % du titane produit est utilisé sous forme d'oxyde de titane (TiO_2) dont plus de 90 % en tant que pigment. Les données de 2013 indiquent la répartition suivante : 56 % du TiO_2 rentre dans la composition des peintures et revêtements, des matières plastiques et des caoutchoucs (24 %), du papier (8 %), de l'encre (4 %), des fibres textiles et synthétiques (2 %). 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 la 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 %/an en moyenne pour la période 2013-2025. 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.

En 2018, les productions mondiales d'ilménite (FeTiO_3) et de rutile (TiO_2), les deux minerais de titane, ont baissé par rapport à 2017, atteignant respectivement 5,4 Mt (-2,5 %) et 0,75 Mt (-2,6 %) 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 7,7 Mt en 2018 (équivalent

à environ 4,6 Mt de titane contenu), en hausse de 4,9 % par rapport à 2017. Cette augmentation est largement due à la croissance économique mondiale, la majeure part de l'oxyde de titane étant utilisée dans la construction.

Les réserves de titane sont considérables. En 2018, les réserves d'ilménite et de rutile estimées par l'USGS étaient de 940 Mt (exprimées en contenu TiO_2), soit plus de cent cinquante ans de production au rythme actuel.

La production mondiale d'éponges de titane métal est estimée par l'USGS à 180 000 t en 2018, un volume inchangé par rapport à 2017. Par suite d'obligations de confidentialité, l'USGS ne publie cependant pas les données des États-Unis. Selon les données de la société UKTMP (producteur kazakh de titane), la production s'établissait à 180 200 t en 2017 en incluant la production des États-Unis qui serait de l'ordre de 10 700 t. Ces niveaux de production restent toutefois sensiblement inférieurs au niveau atteint en 2014 à 239 000 t. 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, 62 % seulement 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. Le prix annuel moyen de l'éponge de titane de qualité TG-Tv, contenant au minimum 97,75 % de titane, a diminué en 2018 de 8 % par rapport à 2017, s'établissant à \$ 6,67/kg sur le marché spot contre \$ 7,25/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 la section consacrée au cobalt). Le taux de croissance moyen de la demande dans ce secteur est évalué entre 3 % et 5 %/an d'ici 2021, voire davantage.

À terme, l'usage du titane pourrait cependant, 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 un peu de demandes nouvelles.

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'application sur les marchés.

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. Il dote l'industrie aéronautique d'une capacité autonome de production de titane de qualité aéronautique à partir de sources secondaires.

Tungstène (W)

En 2018, la production mondiale de tungstène a été de 82 000 t selon l'USGS. Ce marché est éva-

lué à \$ 3,2 milliards et se caractérise par une omniprésence 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 cémentés, de superalliages et d'aciers extrêmement résistants.

Les principaux usages du tungstène peuvent être considérés par type de produits ou par secteurs industriels. La forme des carbures cémentés est la plus représentée avec 55 % des usages. Les carbures cémentés 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 21 % 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. 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 cha-

Tungstène

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale (arrondi)	81 400	86 800	89 400	88 100	82 100	81 800
Australie	320	600				
Autriche	850	870	861	954	975	980
Bolivie	1 250	1 250	1 460	1 110	994	1 000
Canada	2 130	2 340	1 680			
Chine	68 000	71 000	73 000	72 000	67 000	67 000
Espagne			835	650	564	770
Mongolie				753		
Portugal	692	671	474	549	727	770
Royaume-Uni			150	736	1 090	900
Russie	3 600	2 800	2 600	3 100	2 090	2 100
Rwanda	730	1 000	850	820	720	830
Vietnam	1 660	4 000	5 600	6 500	6 600	6 000
Autres pays	1 290	2 060	1 910	880	1 300	1 400

Prix du tungstène

Marché libre européen

(en dollar/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

leur, 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.

18 % 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 élec-

trodes 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 d'utiliser du W métal pour le revêtement du « divertor » qui constitue le « plancher » du réacteur).

Les 6 % restants de la consommation de tungstène à l'échelle mondiale sont sous forme de composés chimiques, essentiellement retrouvés au sein de catalyseurs et de pigments.

En 2018, la production mondiale de tungstène était de 82 000 tonnes (en W contenu) selon l'USGS, soit une production équivalente à celle de 2017 (82 100 t). La Chine reste le premier producteur mondial de tungstène avec 67 000 t estimées, soit plus de 80 % 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 quatre-vingt-dix et deux mille a permis à la Chine d'inonder le marché international et de ré-

aliser 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 le premier consommateur mondial de tungstène avec plus de 60 % du total.

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 le paratungstate d'ammonium (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 sur le marché européen ont connu une forte remontée jusqu'à mi-2018, avant de baisser en fin d'année. La moyenne annuelle est ainsi en hausse (+ 27,7 %) à \$ 39,15/kg sur l'année 2018 contre \$ 30,65/kg en 2017 avec un plus haut à \$ 44,13/kg en juin.

Cette hausse de prix jusqu'à mi-2018 trouve son explication en particulier par deux événements majeurs en Chine :

- l'arrêt ponctuel d'un certain nombre de mines de tungstène pour motif environnemental, c'est-à-dire des interdictions de produire dans certaines provinces chinoises imposées de manière drastique ;

- la résorption progressive des stocks massifs accumulés en contexte de prix bas par de nombreux producteurs chinois.

Cependant, le recul des prix sur la seconde moitié de l'année 2018 est en partie dû à trois facteurs :

- l'impact de la guerre économique entre les États-Unis et la Chine. Les États-Unis ont instauré une taxe de 10 % sur les importations de produits contenant du tungstène sous la forme de trioxyde, APT, carbures et ferrotungstène. La part des exportations chinoises vers ce pays est très importante et correspond à environ la moitié de tungstate d'ammonium hydraté exporté mondialement, 20 % des carbures de tungstène, 16 % du ferrotungstène et 7 % d'APT ;

- la réduction, par le fabricant de poudres de tungstène Zhangyuan Tungsten, de son prix

d'achat d'APT et de concentré de tungstène en réponse à la hausse de la production minière et la baisse de la demande ;

- la possible décision du tribunal populaire de Kunming (Chine) de mettre aux enchères tout ou une partie du tungstène suite au scandale de la bourse Fanya (les stocks ont été estimés à 18 000 t d'APT).

Les réserves de tungstène publiées par l'USGS sont de 3,3 Mt. Selon ces données, 57 % des réserves sont situées en Chine.

Le recyclage de tungstène dépend des filières, certaines étant particulièrement efficaces (pour certains carbures de tungstène et superalliages en fin de vie). La substitution de 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 portées par les secteurs des industries minières et pétrolières, étant donné l'importance des carbures de tungstène dans les outils de forage, ainsi que dans la construction aéronautique et aérospatiale. 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 du secteur aéronautique.

Du côté de l'offre, les politiques chinoises dans le domaine resteront le principal moteur et pourraient jouer comme variable d'ajustement pour les producteurs hors Chine. La stratégie de la Chine sur la chaîne de valeur du tungstène s'apparente également à celle pour les Terres Rares. Les acteurs chinois se sont ainsi concentrés progressivement sur l'augmentation des exportations de produits à base de tungstène à haute valeur ajoutée plutôt que de concentrés ou de produits intermédiaires tels que l'APT. La proportion des exportations chinoises d'APT a diminué depuis 2008, ainsi que les exportations d'oxyde de tungstène et de tungstène métal. Parallèlement, la production et l'exportation de biens tels que les carbures métalliques mixtes et les carbures cimentés ont grandement augmenté. Le pays s'est ainsi repositionné en tant que fournisseur mondial privilégié de produits à haute valeur ajoutée contenant du tungstène, effaçant les producteurs traditionnels.

En Europe cependant, un certain dynamisme est à noter. En aval, certains acteurs se sont consolidés par plusieurs rachats, comme Plansee en Autriche et Umicore en Belgique (rachat de la filiale d'Eramet Eurotungstène en 2016). En amont, on assiste à un certain renouveau minier sur ce métal, avec les mines actives en Espagne et au Portugal ainsi que de projets prometteurs, en particulier en Espagne :

- Le projet de Barruecopardo – une *joint-venture* entre OCM Tungsten Holdings et Ormonde Mining – dont la mise en production, initialement prévue au cours du second semestre de 2017, devrait débuter en février 2019. Il devrait fournir 2 600 t WO₃/an (2 060 t W) pour une durée de vie de neuf ans. La totalité de la production des cinq premières années est déjà allouée par des contrats d'enlèvements de long terme à la société Noble.

- En décembre 2018, le projet La Parrilla, de la compagnie W Resources, a commencé à produire. La production devrait atteindre 200 t/mois d'ici fin 2019. À l'instar de nombreux projets, une grande partie de la production (80 %) est achetée à l'avance (ici par la compagnie autrichienne Wolfram Bergbau und Hütten (WBH) et une compagnie américaine, encore inconnue).

Ce dynamisme a en revanche été terni par la fermeture provisoire de la mine de Drakelands, au Royaume-Uni, suite à des difficultés financières de son exploitant, la société australienne Wolf Minerals. La production minière était en pleine expansion avec 1 123 t en 2017, contre 575 t en 2016.

Vanadium (V)

Avec une hausse des prix de 155 % sur un an, le vanadium est le métal phare de l'année 2018. La production de vanadium s'est élevée à 73 000 t en 2018 selon l'USGS, soit un marché de l'ordre de \$ 3 milliards. La production est en légère hausse par rapport à celle de 2017 (+ 2,5 %). Le vanadium est un métal ductile, à point de fusion élevée (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 (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 en 2018. Dans les applications hors industrie sidérurgique, on trouve la fabrica-

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

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production minière	74 000	82 700	77 800	79 000	71 200	73 000
Afrique du Sud	19 500	21 000	14 000	10 000	7 960	9 100
Brésil				8 000	5 210	6 300
Chine	39 000	45 000	42 000	45 000	40 000	40 000
États-Unis	272					
Russie	15 000	15 100	16 000	16 000	18 000	18 000
Autres pays	600	580	5 800			

**Prix du vanadium pentoxide
Caf Europe**
(en dollar/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

tion 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 ferrovandium, 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 ferrovandium, 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 ($-40\text{ }^\circ\text{C}$). 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 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 offrent des caractéristiques prometteuses pour le stockage stationnaire d'énergie, bien qu'elles ne représentent 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 oxydo-réduction, 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, 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 sont 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 2018, la première estimation de la production mondiale de vanadium par l'USGS était de 73 000 t de vanadium contenu. Trois pays représentent 92 % de la production mondiale de vanadium : la Chine (55 %), la Russie (25 %) et l'Afrique du Sud (12 %). Le Brésil complète le tableau avec près de 9 830 t/an en équivalent V_2O_5 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. Par ailleurs, Largo Resources prévoit une augmentation de la production de vanadium en 2019 à 10 000-11 000 t.

En Chine, l'augmentation progressive de l'offre depuis les années deux mille résulte principalement de la croissance de la coproduction dans les activités sidérurgiques existantes, mais aussi par la hausse constante des niveaux de production secondaire. Au cours du « super-cycle » des matières premières 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 t en 2014). L'industrie du vanadium chinoise est concentrée entre quelques grands groupes sidérurgiques, dont Pangang Group Vanadium Titanium & Resources et Hebei Iron & Steel Group. La production primaire à partir de magnétite devrait également se développer avec des groupes tels que Xining Special Steel, Zhejiang Hailiang, 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 t/an V_2O_5 en 2018), et, d'autre part, la compagnie Bushveld Minerals ambitionnant de devenir un important producteur intégré, incluant la production de batteries redox au vanadium, avec non

seulement la mine et l'usine de Vametco (4 570 t/an V_2O_5), rachetée à Evraz en 2017, mais également les projets Mokopane et Brits Vanadium.

Aux États-Unis, la société Energy Fuels, 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 environ 440 t/mois de V_2O_5 entre 2019 et 2020 et les ressources ont été estimées à 70 000 t. De plus, la société possède plusieurs autres mines d'uranium susceptibles de fournir du vanadium (La Sal Complex, Whirlwind, etc.).

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 réserves conformes aux standards internationaux atteindrait 73 Mt de vanadium. En tête de file des pays attractifs figure 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.

En tout, près de 886 000 t V de ressources indiquées et mesurées ont été annoncées pour la seule année 2017, illustrant le dynamisme des recherches et des découvertes, équivalant ici à près de dix ans au rythme de production actuel, si ces ressources étaient converties en réserves. Néanmoins, ce rythme de découverte pourrait se réduire par la suite, les grands gisements de magnétite affleurant étant connus depuis longtemps, ce qui diminue *a priori* les probabilités de trouver

de nouveaux gisements en surface. Des sources alternatives, voire secondaires, pourraient ainsi être nécessaires, avec un enjeu de coûts de production, indispensable pour l'adoption à plus grande échelle des batteries à flux redox. Un des systèmes novateurs consiste en un système de « leasing » de l'électrolyte au vanadium pour une réutilisation indéfinie et un amortissement sur le long terme. Il a été lancé en juin 2018 par la compagnie VRB Energy, en partenariat avec le producteur Pu Neng.

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 pentoxyde de vanadium (V_2O_5) a été de \$ 40,5/kg en 2018, contre seulement \$ 15,9/kg en 2017. La remontée du cours du vanadium depuis son creux en décembre 2015 (\$ 5/kg) ne semble pas fléchir. Il a même frôlé les \$ 64/kg en novembre 2018.

Depuis 2015 et surtout en 2017-2018, deux événements majeurs ont entraîné la hausse des prix du pentoxyde de vanadium et du ferrovandium :

- l'arrêt provisoire de l'activité de nombreux producteurs métallurgiques chinois de vanadium du fait des mesures environnementales drastiques menées par les autorités chinoises pour limiter la pollution intérieure ;

- la demande accrue pour des aciers de meilleure qualité en Chine, c'est-à-dire contenant plus de vanadium.

Plusieurs arguments laissent à penser que la demande en vanadium restera soutenue en 2019, en grande partie avec la poursuite de la construction en Chine à des normes plus strictes pour les aciers, renouvelées en novembre 2018. Cette hausse de la demande est par ailleurs couplée à l'interdiction d'importations de laitiers de vanadium de sources secondaires produits hors de Chine. Cette nouvelle réglementation est entrée en vigueur en août 2017. Les producteurs de vanadium chinois étant pour partie dépendants de ces sources extérieures, cette mesure est propice à créer des tensions sur l'offre. Cette interdiction montre également la résolution de Pékin dans sa guerre contre la pollution.

À plus long terme, le secteur du stockage de l'énergie pourrait tirer la demande en vanadium avec le développement d'énergies décarbonées. 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. Les perspectives de croissance de la consommation mondiale sont évaluées à 3 %/an d'ici 2025.

Zirconium (Zr) et hafnium (Hf)

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.

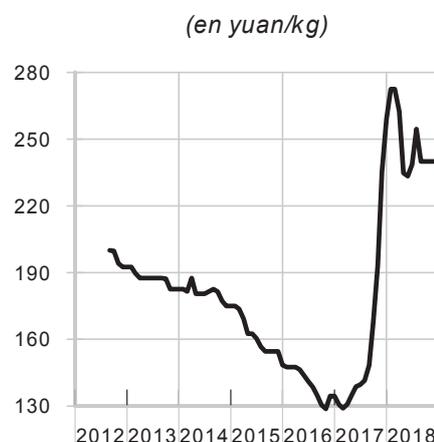
La demande mondiale en zircon s'est élevée en 2017 à 1,2 Mt selon les données de la société TZMI (Titanium Zirconium Minerals International). Près de 80 % de la demande mondiale est concentrée dans trois zones géographiques : la Chine (47 %), l'Europe (21 %) et l'Inde (10 %). Les principaux usages du 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

Zirconium
(en milliers de tonnes de concentré)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production mondiale (arrondi)	1 510	1 420	1 520	1 320	1 600	1 500
Afrique du Sud	170	387	380	360	377	350
Australie	850	551	567	450	505	500
Chine	150	150	140	140	140	150
États-Unis			80	50	80	100
Inde	41	40	40	40		
Indonésie	110	110	110	110	110	100
Kenya					44	45
Mozambique	47	51	52	68	74	80
Sénégal				53	82	80
Autres pays	140	130	150	96	138	125

Prix de l'éponge de zirconium + Hafnium métal



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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, mais elle reste 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 TZMI, la demande en zircon devrait afficher une hausse d'environ 2,8 %/an d'ici 2030. Celle-ci est portée principalement par la consommation du secteur de la céramique pour les produits sanitaires. Concernant la demande pour le zirconium métal, elle va être corrélée à l'indus-

trie du nucléaire. Selon l'Association mondiale du nucléaire, il y avait, à fin 2017, 448 réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde. En outre, 59 réacteurs étaient en construction, dont 40 en Asie, 6 en Russie et en Inde, ainsi que 158 projets de construction de réacteurs, dont 39 en Chine, 26 en Russie et 19 en Inde prouvant la poursuite dynamique 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 1,5 Mt en 2018, un chiffre proche par rapport à 2017 (1,55 Mt). Trois pays représentent plus des deux tiers de la production mondiale de zircon. Ce sont l'Australie, avec 33 % de la production mondiale (500 000 t), l'Afrique du Sud (350 000 t) et la Chine (150 000 t). L'USGS évalue à 73 Mt les réserves mondiales d'oxyde de zirconium dont 58 % se trouvent en Australie et 19 % 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 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 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 zircone 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 zircone 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 zircone, 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 t en 2012 par la *Minor Metals Trade Association* (MMTA), dont 3 000 t pour les États-Unis, 1 800 t pour la France, 1 000 t pour la Russie, 800 t pour la Chine et 400 t pour l'Inde. En France, les éponges de zirconium sont produites à partir de zircone 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 différents 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 performance. Le zircon peut être rem-

placé par de la chromite ou de l'olivine dans les fonderies, 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 de CNY 249/kg en 2018, soit \$ 37/kg. Ce prix s'est inscrit en hausse de 58 % par rapport à 2017 (\$ 23/kg) du fait de la forte demande des industries céramique et nucléaire et des craintes sur les approvisionnements. Ces dernières sont liées à la mise en place de régulations environnementales plus sévères sur les producteurs en Chine et de potentielles ruptures potentielles d'approvisionnement issues d'Afrique du Sud (notamment la mine RBM exploitée par Rio Tinto).

À plus long terme (2021-2025), plusieurs grands projets devraient rentrer en production en Australie (Boonanarring, Goondicum, Cylone ou Thunderbird) ou en Afrique (Mutamba, Toliara ou Kamiesberg).

La filière du zirconium, à l'instar de celle du titane, 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. 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 cinquante 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 t. 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 t à 80 t 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 ultra pur sur le site de

Jarrie pour les applications aéronautiques principalement. Selon les données du commerce extérieur, la France a exporté 30 t d'hafnium en 2018, dont 12 t vers les États-Unis, 9 t vers l'Allemagne et 5 t vers le Royaume-Uni.

Il n'existe pas de calcul normalisé des ressources et réserves d'hafnium. Néanmoins, l'USGS estime les réserves de zirconium à 73 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 1,5 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 2018, 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 zircon) sont conséquentes et devraient faire face à une hausse de la demande soutenue par l'industrie aéronautique.

Table des matières

Avant-propos	VII
• Les collaborateurs de Cyclope 2019	XI
• Les auteurs de Cyclope ont publié en 2018 et 2019	XVI
• Les entreprises et institutions qui ont soutenu Cyclope 2019	XXI
 Première partie : Les illusions perdues	 1
I Les illusions perdues	3
II Le grand jeu	33
III De rêves en illusions	41
– Chine, Belt and road initiative, saison 2 : « tenir la route et serrer la ceinture »	42
– Inde 2019 : le Modi Raj en question	52
– Amérique du Sud : économie en berne et risques politiques	53
– La Russie et ses nouvelles alliances	74
– Afrique du Nord et Moyen-Orient : l'eau ne coule plus sous les ponts	80
– Afrique subsaharienne : sur un fil	91
IV Tempêtes commerciales et climatiques	105
– Avis de tempête sur le commerce mondial	106
– Changements climatiques : Katowice et l'enjeu de la sortie du charbon	121
– Le climat en 2018 : la tendance au réchauffement sur le long terme se poursuit	136
 Deuxième partie : Les marchés	 143
Les marchés mondiaux en 2018, perspectives 2019	145
I Les marchés financiers	163
• Les taux et les changes :	164
– Entre Tchekov et Ponzi	164
– Du dollar super-star à la crise du Bitcoin	177
• Les marchés boursiers	186
– Pluie de records avant la chute	186
• Les marchés dérivés et le négoce international	201
II Grains et agriculture tempérée	215
• Politiques agricoles et alimentaires : entre élections et enjeux de société	217
– Céréales	233
– Riz	246
– Oléoprotéagineux	253
– Viandes	267
– Lait et produits laitiers	301
– Pommes de terre	316
– Fruits et légumes tempérés	321
– Concentré de jus de pommes	331

– Miel	334
– Fruits à coque	338
– Vin	345
– Coton	355
– Laine	363
– Tabac	368
III Produits tropicaux	369
• À la recherche de produits durables et équitables	371
– Sucre	375
– Café	392
– Cacao	400
– Thé	409
– Huile de palme	413
– Poivre et autres épices	418
– Vanille & clous de girofle	423
– Bananes	426
– Ananas	433
– Fruits tropicaux	436
– Agrumes et jus d'orange	439
– Caoutchouc	443
– Jute	449
– Sisal et fibres dures	453
– Bois tempérés	457
– Bois tropicaux	465
IV Produits aquatiques	471
V Minerais et métaux	491
• Une conjoncture difficile incitant aux concentrations minières	493
• Fer et acier	498
– Minerai de fer	498
– Ferrailles	504
– Charbon à coke	511
– Acier	517
• Les grands métaux non ferreux	527
– Aluminium	527
– Cuivre	539
– Étain	549
– Nickel	553
– Plomb	561
– Zinc	567
• Les petits métaux	571
– Antimoine	576
– Béryllium	579
– Bismuth	581
– Cadmium	583
– Chrome	585
– Cobalt	588
– Gallium	593
– Germanium	594
– Indium	596
– Lithium	599
– Magnésium	602

	– Manganèse	604
	– Mercure	607
	– Molybdène	607
	– Niobium	610
	– Rhénium	612
	– Scandium	614
	– Sélénium	615
	– Silicium	617
	– Tantale	620
	– Tellure	623
	– Terres rares	624
	– Titane	627
	– Tungstène	630
	– Vanadium	633
	– Zirconium et hafnium	636
	• Les métaux précieux	640
	– Argent	640
	– Or	644
	– Platinoïdes	649
	– Diamants	655
VI	Énergie	659
	• 2018 : « année zéro » de la transition énergétique « bas carbone » ?	661
	– Pétrole	669
	– Produits pétroliers	681
	– Gaz naturel et GNL	689
	– Charbon vapeur	701
	– Électricité	713
	– Nucléaire	722
	– Uranium	727
	– Bioéthanol	737
VII	Grands marchés industriels	747
	• Un temps de « pause » industrielle	749
	– Marché automobile mondial	753
	– Engrais	759
	– Pâtes et papier-carton	767
	– Papiers et cartons à recycler	779
	– Industrie électronique et semi-conducteurs	786
	– Textiles	791
VIII	Services	795
	– Transport aérien	797
	– Fret maritime	801
	– Marché du carbone	817
	– Marché du sport et du football - Le sport, nouvel « or noir » ? comme les autres	826
	– Marché de l'art - Art : le temps des illusions perdues ?	839



33^e Rapport
sur les Cycles
et les Orientations
des Produits et
des Échanges

En quelques mois, l'euphorie a cédé la place à l'anxiété: anxiété face au ralentissement de la croissance économique mondiale, face à la crise de certaines économies émergentes, face aux doutes à propos de la Chine ou de l'Inde. Anxiété aussi face aux incertitudes géopolitiques et commerciales, face à cette nouvelle logique de conflits dans laquelle se sont engagés les États-Unis de Donald Trump. Anxiété, doutes aussi quant au désordre d'une mondialisation sans gouvernance si ce n'est celle des rapports de force.

C'est bien le temps des « *Illusions perdues* », pour reprendre le titre de l'œuvre de Balzac, qui résume bien la problématique du rapport Cyclope 2019 et que le lecteur retrouvera au fil des analyses consacrées aux grands marchés de la planète, au monde des commodités au sens le plus large qui reste une des meilleures clés de lecture des tensions géopolitiques mondiales.

Rédigé depuis 1986 par une équipe d'une soixantaine d'experts sous la direction de **Philippe Chalmin** (Université de Paris-Dauphine) et d'**Yves Jégourel** (Université de Bordeaux), publié en français, anglais et chinois, Cyclope propose une vision exhaustive des marchés mondiaux, de l'ananas au zirconium, de l'art au marché du sport !



ISBN 2-7178-7069-5
139 €



www.economica.fr