

CYCLOPE

sous la direction de Philippe Chalmin et Yves Jégourel

Les Marchés Mondiaux

2021

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

*"Cette obscure clarté
qui tombe des étoiles"*

Corneille - Le Cid

CYCLOPE

2021

**Les Marchés
mondiaux**

**« Cette obscure clarté
qui tombe des étoiles »**

Sous la direction de Philippe CHALMIN

et Yves JÉGOUREL

 **ECONOMICA**

49, rue Héricart, 75015 Paris

Cercle CYCLOPE

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

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

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

LES MARCHÉS TRAITÉS

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

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

LES SERVICES

1. Le Cercle

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

2. Le Cercle des Experts

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

2. La Synthèse

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

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

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

Conditions d'adhésion

Il existe deux formules d'adhésion au Cercle CycloPe :

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

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

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

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

www.cercle-cyclope.com

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

Sommaire

Avant-propos	VII
Les collaborateurs de CyclOpe 2021	X
Les entreprises qui ont soutenu CyclOpe en 2021	XV
Première partie : Une crise à nulle autre pareille...	1
I Une crise à nulle autre pareille.....	3
II Une nouvelle donne géopolitique	17
III Le monde à l'épreuve du Covid	21
– Chine : et à la fin, c'est toujours la Chine qui gagne	22
– Inde : la diplomatie du double V et ses limites	29
– Amérique du Sud : le Covid-19 accroît la pauvreté	35
– Russie : la Russie cherche sa voie	41
– Afrique du Nord et Moyen-Orient : une nouvelle décennie éprouvante à l'horizon.....	45
– Afrique subsaharienne : résistance sanitaire, mais plongeon économique	49
IV Conflits et convergences	57
– Une nouvelle donne commerciale ?	59
– Changements climatiques : Covid-19 et CO ₂ , la convergence des luttes ?.....	65
– Climat : en 2020, la hausse des températures ne faiblit pas .	76
Deuxième partie : Les marchés.....	83
Les marchés mondiaux en 2020, perspectives 2021	85
I Les marchés financiers.....	95
II Grains et agriculture tempérée.....	135
III Produits tropicaux	239
IV Produits aquatiques.....	315
V Minerais et métaux	337
VI Énergie.....	484
VII Grands marchés industriels.....	551
VIII Services.....	589

Les collaborateurs de CyclOpe 2021

Philippe CHALMIN	Professeur d'histoire économique à l'université Paris-Dauphine PSL, Président de l'Observatoire de la formation des Prix et des Marges des Produits Alimentaires	Coordination générale Une crise à nulle autre pareille, Agriculture, Marchés dérivés, Thé, Bois tempérés, Art
Yves JÉGOUREL	Professeur d'économie à l'Université de Bordeaux, Senior Fellow au Policy Center for the New South (Rabat)	Coordination minerais et métaux, Métaux, Engrais

Sébastien ABIS	Directeur du Club DEMETER et chercheur associé à Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Méditerranée-Moyen-Orient
Patrick AIGRAIN	Chef du service évaluation, prospective et analyses transversales de FranceAgriMer, Coordinateur du comité de pilotage statistique de l'Organisation internationale de la Vigne et du Vin (OIV)	Vin
Stéphanie AYRAULT	Journaliste agricole	Jute
Jean-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'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Géopolitique mondiale
Antoine BOUBAULT	Chercheur-ingénieur en écologie industrielle au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)	Petits métaux, « Métaux électriques »
Benoît de CARBONNIÈRES	Directeur général Groupe Forrest International République démocratique du Congo	Cuivre, Platinoïdes, Diamants
Jean-Yves CARFANTAN	Consultant associé société Celeres, Uberlândia Brésil et gérant du site IstoeBresil (São Paulo)	Amérique du Sud

Éric CHAMPARNAUD	Associé - C-Ways	Industrie, Automobile
Bénédicte CHATEL	Directrice associée de Commodafrica	Cacao, Café
Alfredo COELHO	Professeur à Bordeaux Sciences Agro Chercheur associé Unité mixte de recherche Marchés, organisations, institutions et stratégies d'acteurs (UMR Moisa, Montpellier)	Vin
Sylvie CORNOT-GANDOLPHE	Présidente SCG Consulting	Charbon vapeur, Charbon à coke
Jean-Philippe DAUVIN	Chef économiste honoraire STMicroelectronics	Semi-conducteurs
Pierre-Marie DECORET	Responsable des Études économiques, Groupe Avril	Oléoprotéagineux
Jean-François Di MEGLIO	Président d'Asia Centre, Centre d'expertise et d'études sur l'Asie	Chine
Myriam ENNIFAR	Chargée d'études filière lait FranceAgriMer	Lait et produits laitiers
Gérald ESTUR	Consultant	Coton
Patrice GEOFFRON	Professeur à l'Université Paris-Dauphine-PSL, Directeur du Centre de Géopolitique de l'Energie et des Matières Premières (CGEMP)	Énergie
Alessandro GIRAUDO	Professeur d'économie et de finance internationale - ISG, Paris	Changes et taux
Étienne GOETZ	Journaliste, <i>Les Echos</i>	Or
Carole GOMEZ	Directrice de recherche 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 de mission, Centre d'études et de prospective Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation	Sisal et fibres dures
Ralph ICHTER	Président Euroconsultants, (Washington, États-Unis)	Politique agricole et commerciale américaine

Dominique JACOMET	Professeur à l'Institut français de la mode (IFM)	Textiles
Helga JOSUPEIT	Chercheur, marché des produits de la mer (Rome, Italie)	Produits aquatiques
Félix KANE	Consultant Agriculture et filières agricoles - AND International	Fruits et légumes tempérés, Pommes de terre, Fruits secs
Alain KARSENTY	Économiste au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)	Bois tropicaux
Élisabeth LACOSTE	Directeur de la Confédération internationale des betteraviers européens, CIBE (Bruxelles, Belgique)	Sucre, Éthanol
Gaétan LEFEBVRE	Géologue-économiste au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)	Petits métaux, Métaux « électriques »
Mathieu LEGUERINEL	Géologue-économiste au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)	Petits métaux, Métaux « électriques »
Jean-Paul LEHMANN	Membre de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN)	Uranium
Julien LEMOND	Weather Data Manager GEOSYS (Toulouse)	Climat : 2020
Denis LOEILLET	Responsable de l'Observatoire des marchés du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad-Persyst UR 26) et rédacteur en chef de la revue <i>FruiTrop</i> (Montpellier)	Agrumes, Bananes, Ananas, Fruits tropicaux
Bernard LOMBARD	Trade & Industrial Policy Director Confederation of European Paper Industries (CEPI) (Bruxelles)	Pâtes et papiers, Papiers et cartons à recycler
François LUGUENOT	Analyste de marchés de matières premières agricoles Directeur de FL Consultant	Céréales
Patricio MENDEZ DEL VILLAR	Économiste au Centre de coopération internationale en recherche agronomique (Cirad), Éditeur de l'Observatoire Osiriz/InfoArroz (Montpellier)	Riz

Gildas MINVIELLE	Directeur de l'Observatoire économique Institut français de la mode (IFM)	Textiles
Étienne MONTAIGNE	Professeur émérite d'économie Institut Agro - 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	Docteur en économie, Université de Bordeaux	Acier, Ferrailles, Plomb
Evariste NYOUKI	Responsable Recherche économique de ENGIE Global Markets	Gaz naturel
Olivia PARODI	Chargée d'études économiques FranceAgrimer	Laine
Guillaume PERRET	Directeur, Perret Associates (Londres, Royaume-Uni)	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'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Pétrole, Produits pétroliers
Christian de PERTHUIS	Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine PSL, Fondateur de la chaire Économie du climat	Changement climatique
Simon QUEMIN	Docteur en économie, de l'Université Paris-Dauphine PSL, Chercheur postdoctoral au Grantham Research Institute (<i>London School of Economics</i>) et à la chaire Économie du climat	Marchés du carbone
François ROCHE	Directeur des Ateliers de la Volga et du Don, Conseiller éditorial de <i>La Tribune</i> Auteur, éditeur	Russie
Jérôme SAINTE-BEUVE	Correspondant de la filière hévéa au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)	Caoutchouc

Dolio SFASCIA	Collaborateur Cercle CyclOpe	Poivre et autres épices
Jean-Paul SIMIER	Économiste, spécialiste des marchés agricoles et agroalimentaires	Viandes
Marie-Christine SIMONET	Journaliste indépendante	Fret maritime
Boris SOLIER	Maître de conférences à l'Université de Montpellier, Directeur du Master économie de l'énergie	Électricité, Nucléaire
Raphaël TROTIGNON	Économiste au Pôle Énergie Climat de Rexecode	Marchés du carbone
François VELLAS	Professeur à l'Université de Toulouse Directeur du master économie du tourisme international	Transport aérien
Tancrede VOITURIEZ	Chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad, Nigeria)	Produits tropicaux Huile de palme

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

Métaux « électriques »

Qualifiés d'« électriques » dans une référence peut-être trop simple, les métaux présentés dans ce chapitre – et dans lequel le nickel aurait pu trouver sa place – jouent un rôle majeur dans le stockage d'énergie sous forme d'électricité au sein de batteries rechargeables des technologies appelées « Lithium-ion ». Ils sont, en cela, tout à fait essentiels pour nombre d'industries et d'économies. L'année 2020 a confirmé ce fait, la mobilité électrique se positionnant comme l'un des piliers majeurs de la relance économique post-Covid dans bon nombre de pays. Selon le consultant spécialisé IHS Markit, les ventes mondiales de véhicules électriques auraient atteint près de 2,5 millions d'unités en 2020, et devraient augmenter d'environ 70 % en 2021. Les deux principales régions où ces ventes ont bondi sont la Chine et l'Europe. La première avait annoncé, dès le mois d'avril, une prolongation de deux ans de ses subventions pour les véhicules dits « à énergie nouvelle », et des exemptions de taxe à l'achat jusqu'à fin 2022. Pour l'Union européenne, des primes à l'achat se sont multipliées, à la fois de la part des États et des constructeurs, ces derniers étant soumis à des « objectifs CO₂ » de plus en plus contraignants. La révolution électrique est donc en marche et les besoins en métaux à usage des batteries en croissance soutenue. Par exemple, une usine produisant 30 GWh de batteries consomme environ 33 000 tonnes de graphite, 25 000 tonnes de lithium, 19 000 tonnes de nickel et 6 000 tonnes de cobalt, chacun sous forme de « matériaux actifs de qualité batterie ». Le marché des matériaux actifs de batteries a été évalué à \$ 7,45 milliards en 2017 et pourrait représenter \$ 26 milliards en 2025. Pour beaucoup de constructeurs automobiles, les technologies Lithium-Ion (Li-ion) semblent aujourd'hui l'un des meilleurs compromis pour les batteries de véhicules électriques en termes de puissance d'énergie embarquée, de légèreté, de fiabilité, de durée de vie, et de coût de fabrication. Le choix des métaux utilisés à la cathode influence à la fois les performances, les coûts et les quantités de matières utilisées. Il s'agit principalement du nickel, du lithium, du cobalt et du manganèse, ces trois derniers métaux faisant l'objet, avec le graphite, du présent chapitre.

Cobalt (Co)

Le cobalt joue un rôle fondamental pour le stockage d'énergie, sa consommation au sein des batteries rechargeables – en particulier de type Li-ion – représentant désormais plus de 50 % de ses usages. Le cobalt entre dans la composition de trois types de cathodes de batteries Li-ion. La présence de cobalt permet d'accroître leur densité d'énergie, mais aussi d'augmenter leur stabilité et leur longévité. 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 divers autres, dont l'usage pour agents séchants et pneumatiques. Ces différents usages sont détaillés sur la fiche de criticité du cobalt, disponible sur le site www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite.

La consommation mondiale de cobalt s'oriente vers une forte croissance (de 7 % à 10 % par an), tirée par le secteur du stockage de l'énergie et des superalliages en aéronautique. Elle devrait ainsi atteindre 200 000 tonnes de cobalt contenu (tonnes

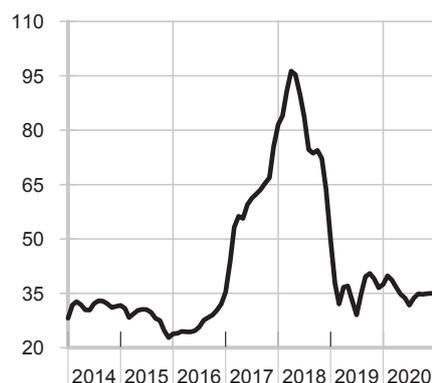
Co) à l'horizon 2025, contre 130 000 tonnes en 2020. Selon le consultant Roskill, la part du secteur des batteries est attendue entre 70 % et 80 % du total de la demande à cet horizon, et ce, pour deux raisons essentielles : d'une part, le marché du véhicule électrique continuera d'utiliser des volumes croissants de cobalt malgré une tendance aux recherches de substitution d'un certain nombre de fabricants de batteries et de constructeurs automobiles du fait de son prix élevé (le plus cher des métaux de cathodes) et des enjeux liés à son approvisionnement (et notamment la dépendance aux minerais de la République démocratique du Congo) ; d'autre part, elle sera alimentée par le développement à grande échelle des technologies de réseaux d'Internet 5 G. Le consultant CRU estime ainsi que la demande en cobalt pour les batteries d'appareils électroniques portables (représentant 60 % de la demande du cobalt dans le stockage d'énergie) passera de 45 000 tonnes Co en 2020 à 73 000 tonnes Co en 2025. L'explication réside dans la composition des cathodes équipant les batteries de ces appareils, privilégiant la typologie dite « LCO » (Lithium Cobalt Oxyde) avec une très

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production minière	126 000	111 000	120 100	148 000	144 000	140 000
Afrique du Sud	3 000	2 300	2 300	2 300	2 100	1 800
Australie	6 000	5 500	5 030	4 880	5 740	5 700
Brésil						
Canada	6 900	4 250	3 870	3 520	3 340	3 200
Chine	7 700		3 100	2 000	2 500	2 300
Cuba	4 300	4 200	5 000	3 500	3 800	3 600
États-Unis	760	690	640	490	500	600
Madagascar	3 700	3 800	3 500	3 300	3 400	700
Maroc			2 200	2 100	2 300	1 900
Nouvelle-Calédonie	3 680	3 390		2 100		
Papouasie Nouvelle-Guinée		2 190	3 310	3 280	2 910	2 800
Philippines	4 300	4 100	4 600	4 600	5 100	4 700
Rép. dém. du Congo	63 000	64 000	73 000	104 000	100 000	95 000
Russie	6 200	5 500	5 900	6 100	6 300	6 300
Zambie	4 600	3 000				
Autres pays	11 600	7 600	7 650	5 540	6 320	6 400

Prix du cobalt
Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

forte teneur en cobalt (0,96 kg/kWh) pour réduire les risques d'inflammabilité. Avec l'augmentation attendue du nombre d'appareils connectés (« Internet des objets »), passant de 2 milliards en 2020 à plus de 5 milliards d'unités à l'horizon 2025, la demande en cobalt correspondante est attendue en forte hausse.

En 2020, le prix du cobalt métal sur le marché européen (qualité *alloy grade cut cathode* 99 %) a été en moyenne de \$ 35,5/kg contre \$ 37,1/kg en 2019, soit une chute relative de 4,4 %. Après avoir atteint des plus hauts historiques à \$ 94 800/t en référence *spot* sur le *London Metal Exchange* (LME) en mai 2018, un seuil d'équilibre semble donc avoir été atteint. Cependant, plusieurs facteurs pèsent encore sur l'évolution à court terme des prix du cobalt.

En 2020, la production minière mondiale de cobalt s'est élevée à 140 000 tonnes selon les données préliminaires de l'*United States Geological Survey* (USGS), en légère baisse par rapport à 2019. 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. En 2020, près de 70 % de cette offre minière émane de République démocratique du Congo (RDC). À l'horizon 2030, selon *Bloomberg New Energy Finance*, cette proportion a de fortes chances de rester identique, avec plus de 200 000 tonnes issues de RDC sur un total potentiel de près de 300 000 tonnes.

La répartition de la production mondiale de cobalt est à analyser au regard des entreprises productrices plutôt qu'en termes de pays producteurs. Ainsi, le principal acteur individuel de ce marché est Glencore, multinationale suisse spécialisée dans le négoce de matières premières. Très active dans le domaine minier, ses actifs sur le cobalt équivalent à plus de 30 % de la production primaire mondiale. En RDC, Glencore contrôle la mine de Mutanda, représentant à elle seule près de 15 % à 20 % de la production minière de cobalt, momentanément à l'arrêt depuis août 2019. À cela s'ajoutent les mines de Kamoto et KOV ayant repris la production en 2018, avec une capacité de 11 000 tonnes de cobalt. S'ajoutent également ses opérations minières à Sudbury (Canada) et Murrin Murrin (Australie), soit une capacité totale de près de 46 000 tonnes de Co contenu.

Glencore a multiplié les contrats auprès de divers acteurs de la fabrication de batteries. En 2018, un accord avec le groupe chinois GEM – fournisseur du fabricant de batteries CATL – portait sur 61 200 tonnes d'hydroxydes de cobalt (soit environ 20 000 tonnes Co) sur cinq ans. Un autre a été signé en 2019 avec le Coréen SK Innovation pour une capacité pouvant atteindre 30 000 tonnes Co jusqu'en 2025. Enfin, début février 2020, c'était au tour de Samsung SDI Co. Ltd d'annoncer la signature d'un accord de cinq ans pour 21 000 tonnes de cobalt contenu, de 2020 à 2024. Par ces contrats, Glencore s'est assuré un rôle de maillon indispensable de la chaîne industrielle des productions de batteries Li-ion, rendant par la même occasion une partie du cobalt produit indisponible au marché libre.

Plusieurs compagnies chinoises sont aussi devenues des acteurs incontournables du marché grâce à des investissements progressifs et conséquents en RDC. Ce sont en particulier Zhejiang Huayou Cobalt (également intégré en tant que fabricant de matériaux actifs de batteries), et les groupes Jinchuan et China Molybdenum Co. Ltd. Ce dernier opère la mine de Tenke Fungurume, représentant 15 % de la production primaire de cobalt. Plus généralement, il est estimé que 50 % de la production de cobalt en RDC est liée à des financements chinois. L'état des lieux 2020 confirme ce constat, avec la mise en production de deux nouveaux projets :

- le Projet Deziwa, détenu par China Nonferrous Metal Corporation (CNMC) à hauteur de 51 % et par la Gécamines (49 %), visant en phase 1 la production de 80 000 tonnes de cuivre et 8 000 tonnes de cobalt ;

- le projet de la fonderie Lualaba, piloté par une joint-venture entre CNMC (60 %) et China Copper (40 %), avec une capacité de 10 000 t/an d'alliage cuivre-cobalt.

Plusieurs projets se développent dans le reste du monde. C'est notamment le cas en Australie avec la compagnie Cobalt Blue et son projet Broken Hill, dont une usine pilote est attendue en 2021. En Amérique du Nord, des alternatives crédibles sont également présentes : la relance de la raffinerie de cobalt de l'entreprise First Cobalt, d'une capacité annuelle de 5 000 tonnes de cobalt contenu, ainsi que le projet d'exploration dans

l'Idaho mené par Jervois Mining ayant mis à jour les ressources mesurées et indiquées de 5,24 Mt de minerai titrant 0,44 % de cobalt. En Finlande, la compagnie Terrafame envisage également d'extraire 5 000 t Co/an de la mine de Sotkamo. Enfin, de nombreux projets de production de nickel de qualité batterie sont en développement en Indonésie et devraient pouvoir produire d'importantes quantités de cobalt en sous-produit, sous réserve du procédé métallurgique utilisé.

Graphite naturel et synthétique (C)

Le marché du graphite est opaque et cloisonné, si bien que les données chiffrées concernant l'offre et la demande, ainsi que les échanges commerciaux, restent très approximatives et variables en fonction des sources, en particulier dans le secteur très confidentiel du graphite synthétique.

La consommation mondiale de graphite est estimée à environ 2,5 Mt. Celle de graphite synthétique atteindrait 1,5 Mt à 1,6 Mt, tandis que

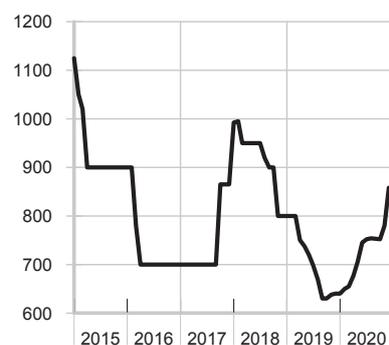
celle de graphite naturel approcherait 1 Mt. L'Asie consomme approximativement les deux tiers du graphite produit dans le monde, suivie de l'Europe (14 %), de l'Amérique du Nord (9 %) et de l'Amérique du Sud (8 %). À l'échelle globale, le secteur de la sidérurgie consommerait environ 60 % du graphite artificiel et naturel avec la fabrication d'électrodes, de réfractaires et la recarburation des aciers. Il est cependant difficile de connaître les parts respectives du graphite naturel et synthétique pour chaque application. Environ la moitié du graphite naturel mondial est destinée à la fabrication de réfractaires, et moins de 15 % à celle de batteries. Cependant, cette part augmente progressivement.

Plus de la moitié de la demande de graphite du secteur des batteries et piles émane de l'Asie où se concentre la production des piles et accumulateurs. Plusieurs types de piles et batteries contiennent de faibles quantités de graphite naturel ou synthétique dans l'électrolyte ou dans le matériau d'électrodes (piles alcalines, plomb-acide, Ni-MH, etc.). Les anodes des batteries Li-

Graphite naturel
(en tonnes de métal raffiné)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	1 190 000	1 150 000	897 000	1 120 000	1 100 000	1 100 000
Allemagne				800	800	800
Autriche				1 000	1 000	1 000
Brésil	80 000	95 000	90 000	95 000	96 000	95 000
Canada	30 000	30 000	40 000	40 000	11 000	10 000
Chine	780 000	780 000	625 000	693 000	700 000	650 000
Corée du Nord	30 000	6 000	5 500	6 000	6 000	5 000
Inde	170 000	149 000	35 000	35 000	35 000	34 000
Madagascar	5 000	8 000	9 000	46 900	48 000	47 000
Mexique	22 000	4 000	9 000	9 000	9 000	8 000
Mozambique	70	70	300	104 000	107 000	120 000
Namibie	9	10	2 220	3 460		
Norvège	8 000	8 000	15 500	16 000	16 000	15 000
Ouzbékistan					100	100
Pakistan		14 000	14 000	14 000	14 000	13 000
Russie	15 000	19 000	17 000	25 200	25 100	24 000
Sri Lanka	4 000	4 000	3 500	4 000	4 000	3 500
Tanzanie				150	150	150
Turquie	32 000	4 000	2 300	2 000	2 000	1 500
Ukraine	5 000	15 000	20 000	20 000	20 000	19 000
Vietnam		5 000	5 000	5 000	5 000	4 500
Zimbabwe	7 000	6 000	1 580	2 000		
Autres pays		2 000	1 900	200		

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

ion peuvent, quant à elles, contenir des quantités considérables de graphite qui sont d'ailleurs bien plus importantes que celles de lithium (de dix à vingt fois suivant la cathode utilisée) : 5 grammes (g) dans une batterie de smartphone, 90 g dans un ordinateur portable, une dizaine de kilogrammes – en moyenne – pour une voiture hybride (HEV) ou encore 70 kg dans un véhicule tout électrique. L'enjeu est donc de taille et le marché de la mobilité électrique est l'un des marchés sur lesquels reposent les projections de croissance les plus optimistes de la demande mondiale en graphite au cours des prochaines années.

Le graphite sphérique a été développé dans le but d'améliorer le rendement des anodes dans les batteries Li-ion. Une plus grande surface favorisant une meilleure conductivité et un meilleur rendement, les particules sphériques améliorent la performance de l'anode. La Chine produit quasiment 100 % du graphite sphérique non revêtu mondial qui est essentiellement fabriqué à partir de paillettes de graphite naturel provenant de la province du Heilongjiang, au nord-est de la Chine. Une partie de cette production – concentrée dans la province du Shandong – est consommée dans le pays par les producteurs d'anodes de batteries Li-ion, tandis que le reste est vendu à des fabricants de batteries et des négociants japonais ou sud-coréens qui procèdent ensuite au revêtement des particules utilisées dans la fabrication des anodes. Le graphite sphérique revêtu mondial est également produit en Chine pour environ 90 %, en raison d'une main-d'œuvre peu onéreuse et de restrictions environnementales assez souples, du moins jusqu'à récemment. Hors Chine, plusieurs compagnies « juniors » projettent de produire du graphite sphérique (revêtu ou non), comme Hexagon Resources ou Syrah aux États-Unis, afin de ne plus simplement exporter leurs concentrés vers la Chine.

Selon le consultant Benchmark Mineral Intelligence, si les capacités des usines de fabrication de batteries Li-ion étaient de 742 GWh en 2020, elles pourraient atteindre 2 340 GWh en 2025 et 3 150 GWh en 2030, tirant du même coup la demande en anodes et donc en graphite (qui serait multipliée par dix voire quinze sur les dix prochaines années).

La sidérurgie demeure toutefois l'usage majoritaire du graphite, en particulier synthétique, avec

60 % destinés à la production d'électrodes pour les fours électriques des installations sidérurgiques. L'utilisation de ces électrodes se répartit à 61 % pour la fabrication d'acier, 26 % pour celle du silicium, 8 % pour celle du phosphore et 5 % pour d'autres secteurs comme l'aluminium ou le corindon, selon la société Ark of China. L'industrie des réfractaires absorbe environ 40 % de la production mondiale de graphite naturel. La fabrication de briques de fours et creusets utilise principalement des paillettes de graphite de haute pureté (>85 % C) et de moyenne à grande taille (150 à 300 µm), dont la morphologie contribue à améliorer la cohésion des briques.

En 2020, la production mondiale de graphite serait de l'ordre de 2,2 Mt (50 % naturel, 50 % synthétique). Le graphite naturel résulte du métamorphisme (haute température et haute pression) de composés carbonés organiques (charbons, bitumes) contenus dans les roches. On en distingue trois types : paillettes, amorphe ou microcristallin, et en veine. La Chine est non seulement le plus gros consommateur de graphite, mais également le premier producteur et exportateur mondial de graphite naturel. Le pays possède environ 130 mines de graphite, situées principalement au nord du pays, dans les provinces de Heilongjiang, Shandong et en Mongolie intérieure. Si la production chinoise est très difficile à quantifier avec précision, l'USGS l'estime à 650 000 tonnes en 2020, soit 62 % du total mondial. Cette production serait bien en deçà des capacités de production du pays qui se situeraient entre 1,2 Mt et 1,6 Mt, soit un taux d'utilisation de 40 % à 60 %.

Le graphite synthétique est issu du traitement à haute température d'un précurseur carboné amorphe. Ce précurseur dérive du pétrole, du charbon ou de matières organiques diverses et il s'agit typiquement de coke de pétrole (8 Mt soit un tiers de la production mondiale annuelle qui serait utilisée dans ce but chaque année). Le procédé de fabrication mis au point et breveté en 1896 par E.G. Acheson a été amélioré par la suite. À l'issue de sa transformation, le graphique synthétique se présente sous la forme d'électrodes, de poudre ou en granulés. Toutefois, de fortes tensions sur la production de l'intermédiaire *needle coke* ont affecté les prix du graphite synthétique en 2019. Il existe une dizaine de fabricants de ce produit au

monde, dont trois en Chine. Les autres fabricants sont situés aux États-Unis (Phillips 66, Seadrift) et au Japon (C-Chem, Petrocokes, Mitsubishi Chemical, etc.). Les capacités mondiales sont estimées à 1,6 Mt et la Chine y contribuerait à hauteur de 600 000 tonnes à 1 Mt.

Les réserves mondiales de graphite sont d'environ 320 Mt selon l'USGS et sont situées majoritairement en Turquie (90 Mt), en Chine (73 Mt) et au Brésil (70 Mt).

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Compte tenu de la grande variété des produits graphiteux échangés, il est difficile de donner un prix de référence. Néanmoins, le prix pour une tonne de paillettes moyennes de graphite naturel, ayant une teneur comprise entre 94 % et 97 % de carbone, a été de \$ 727/t en 2020, contre \$ 709/t en 2019 (+2,5 % sur un an). Le prix du graphite synthétique oscille toujours dans une fourchette large comprise entre \$ 7 000/t et \$ 20 000/t, selon les spécificités requises. Naturellement, la compétition entre le graphite naturel et synthétique permet aux utilisateurs de jouer sur les prix. Si les sociétés « juniors » détenant des permis d'exploration ou d'exploitation de graphite naturel clament généralement que le graphite naturel est bien moins onéreux pour le consommateur que le graphite synthétique, la réalité est plus compliquée. En effet, bien que la production de graphite naturel en paillettes soit assez peu coûteuse, ces paillettes doivent ensuite subir une purification (car elles contiennent de nombreuses impuretés) consommatrice d'énergie et donc relativement cher. À l'inverse, la production de graphite synthétique est coûteuse du fait du prix des précurseurs (par exemple le *needle coke*) mais le produit est déjà pur.

La diminution de la disponibilité des produits en graphite en provenance de Chine due à la forte consommation intérieure, elle-même associée à l'augmentation des coûts de transport dans le contexte de la pandémie de Covid-19, a suscité un intérêt pour les matériaux provenant d'autres sources, comme Madagascar ou le Mozambique, qui prévoient d'augmenter considérablement leur production pour faire face à cette demande. Néanmoins, certains producteurs craignent que l'indé-

pendance vis-à-vis de la Chine ne soit de courte durée. Une fois l'hiver passé, on peut s'attendre à ce que la production en Chine augmente à nouveau, et la baisse des prix des matériaux chinois qui en résultera pourrait inciter les clients à revenir, fragilisant alors potentiellement les nouvelles mines et usines avec des coûts d'exploitation élevés.

Lithium (Li)

L'évolution des secteurs d'usages du lithium est l'une des caractéristiques principales de ce marché ces dernières années. Ainsi, la consommation totale de lithium dans le secteur des batteries est passée d'une part de marché de 20 % en 2008 à près de 58 % en 2018. Selon les prévisions, cette part pourrait passer à 85 % entre 2025 et 2030. Jusqu'ici, les usages « hors batteries » du lithium étaient relativement diversifiés. Parmi ces derniers, les verres et céramiques étaient les plus importants (37 % en 2008, contre 27 % en 2018), suivis par les graisses lubrifiantes au lithium (7 % en 2018), le traitement et le conditionnement de l'air (3 %), les fondants de moulage pour la production d'acier par coulée continue (4 %), la production de produits pharmaceutiques et de polymères (1 %), la métallurgie de l'aluminium (1 %), ainsi que d'autres usages comprenant la production de ciment, la pyrotechnie, ou le traitement de l'eau.

L'avènement des batteries Li-ion, présentant actuellement la plus grande capacité d'accumulation d'énergie par unité de masse, a révolutionné ce marché en l'orientant vers des volumes croissants de produits de très haute qualité. En effet, dans les usages traditionnels du lithium (hormis ceux dits « de spécialité » où le lithium est utilisé sous forme « métal »), les degrés de pureté des composés de lithium étaient de manière générale assez faibles. À l'inverse, pour les composés de lithium utilisés comme précurseurs pour la fabrication des batteries Li-ion, la notion de pureté est cruciale. Ceci s'explique par les enjeux de réactivité à l'échelle micrométrique des matériaux actifs intégrés dans ces batteries. Le degré de pureté des composés est fondamental pour assurer les performances, la longévité, mais aussi la sécurité des batteries.

Le composé de lithium privilégié qui s'est imposé est le carbonate de lithium (Li_2CO_3) de pureté

minimum 99,5 %. Or, l'évolution de la chimie des cathodes peut également modifier cette demande au cours du temps. Par exemple, l'orientation récente du marché vers l'utilisation de batteries intégrant des proportions croissantes de nickel privilégie l'hydroxyde de lithium (LiOH) aux dépens du carbonate. Pour les producteurs miniers, l'enjeu est donc d'adapter leurs procédés pour répondre à cette demande croissante en différents produits de lithium de haute pureté (carbonate ou hydroxyde).

Selon l'USGS, la production minière en 2020 aurait été de 82 000 tonnes de lithium contenu. Rappelons qu'en 2008, la production mondiale était de l'ordre de 20 000 tonnes. Elle pourrait dépasser 200 000 tonnes en 2030 selon la plupart des prévisions. En quelques années, l'Australie est devenue le premier producteur minier de lithium. Cependant, le modèle de développement des compagnies australiennes a d'abord été l'exportation massive de lithium faiblement transformé vers la Chine pour une purification ultérieure. Cette structuration a conduit à une concentration de plusieurs étapes à haute valeur ajoutée de la chaîne de valeur dans ce pays, en particulier la transformation en précurseurs de batteries et la fabrication des batteries Li-ion elles-mêmes. Un des paradoxes de ce phénomène a été une situation de surproduction qui a conduit à la chute des prix

du lithium entre 2018 et 2020. En effet, les usines chinoises de conversion du lithium se sont avérées en déficit technologique pour s'adapter aux nouvelles sources de lithium à traiter, et dépassées par la hausse soudaine de la production provenant d'Australie. Le marché s'est trouvé surchargé de stocks en attente d'être traités aux portes des usines de conversion chinoises.

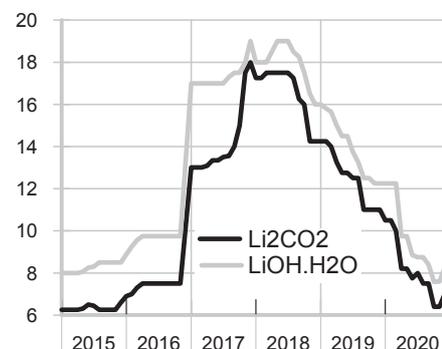
En 2020, les prix ont ainsi poursuivi leur chute. Le prix annuel du carbonate de lithium pour des contrats *spot* livrables à partir des États-Unis est ainsi passé d'une moyenne de \$ 12,5/kg en 2019 à \$ 8,2/kg en 2020, soit une baisse de 35 %. De même pour les hydroxydes de lithium dont les prix se sont repliés de \$ 14/kg à \$ 9,5/kg (- 32 %). Cette chute s'est arrêtée début 2021, les prix du carbonate de lithium ayant repassé la barre des \$ 10/kg au début du mois de février, avec une hausse de 40 % des prix en Chine sur le mois de janvier. Ces résultats s'expliquent par la réduction progressive des stocks accumulés (accélérée par les difficultés logistiques liées à la pandémie de Covid-19) et illustrent les fondamentaux solides de la demande de long terme.

De même, le deuxième semestre 2020 a vu les dépenses d'investissements repartir à la hausse, après avoir marqué un coup d'arrêt lié au contexte morose des prix. Le principal événement est le

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	33 500	40 100	68 500	95 000	86 000	82 000
Argentine	3 600	5 800	5 700	6 400	6 300	6 200
Australie	14 100	14 000	40 000	58 800	45 000	40 000
Brésil	200	200	200	300	2 400	1 900
Canada				2 400	200	
Chili	10 500	14 300	14 200	17 000	19 300	18 000
Chine	2 000	2 300	6 800	7 100	10 800	14 000
États-Unis	2 000	2 100	1 420			
Portugal	200	400	800	800	900	900
Zimbabwe	900	1 000	800	1 600	1 200	1 200

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



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

rachat par la compagnie australienne IGO Ltd. de 49 % de la filiale australienne du producteur chinois Tianqi Lithium. Cette opération, avec un investissement annoncé de \$ 1,4 milliard, permettra à IGO d'acquérir 25 % de la mine de Greenbushes (exploitée conjointement avec l'Américain Albemarle) et 49 % de la raffinerie de Kwinana.

L'Australie demeure très dynamique en termes d'exploration et d'exploitation du lithium. En outre, afin de faire évoluer un modèle marqué par une forte dépendance à la Chine pour les exportations de concentrés de spodumène, le pays a lancé, en 2019, un « Plan stratégique pour les minéraux critiques », visant notamment davantage de construction d'usines de transformation du lithium en Australie. Il s'agit également de relocaliser certaines étapes de la chaîne de valeur des batteries Li-ion afin de bénéficier de la valeur ajoutée créée.

L'Afrique semble également bien positionnée pour jouer un rôle significatif dans la production future avec quatre projets à l'étape de faisabilité. C'est en particulier le projet Manono en République démocratique du Congo, développé par la compagnie australienne AVZ Minerals Ltd., qui présente les meilleures chances de réussite à court terme.

En Europe, deux projets au stade de préfaisabilité présentent un potentiel en terre considérable. Il s'agit du projet Jadar en Serbie avec 1 Mt de ressources évaluées, pour lequel la compagnie Rio Tinto a annoncé en juillet 2020 lancer une étude de faisabilité complète sur dix-huit mois pour \$ 200 millions. Le second est le projet Vulcan, en Allemagne, dont les ressources inférées contenues dans des saumures géothermales sont de 2,5 Mt Li à une teneur de coupure de 100 mg/L.

En Amérique du Nord, les projets d'extraction de lithium se multiplient de la même façon, marqués par une grande diversité de sources potentielles, dont les argiles lithinifères à hectorite. En Amérique du Sud, un grand nombre de projets se développent également, en particulier en Argentine. Le plus prometteur semble être celui de Cauchari-Olaroz, détenu par le Chinois Ganfeng Lithium à 51 % et Lithium Americas à 49 %, et dont les premières étapes de construction ont commencé.

À travers le monde, la gestion des impacts socio-environnementaux associés à l'exploitation du

lithium devient l'un des paramètres cruciaux pour le développement et la pérennité des projets miniers. Il s'agit en particulier de la gestion des ressources en eau dans les régions désertiques dans le cas des salars sud-américains, mais également de la réduction globale des émissions de gaz à effet de serre des exploitants. Cette tendance devrait s'imposer à l'avenir comme un facteur différenciant.

Manganèse (Mn)

Le manganèse n'est pas, à proprement dit, un « petit métal » ni un métal « de spécialité ». Avec une production de l'ordre de 18 Mt/an (similaire à celle du cuivre ou du chrome), le manganèse est indissociable de la production sidérurgique mondiale, avec 90 % de ses usages destinés à la fabrication de ferro-alliages.

Le manganèse joue un double rôle dans la fabrication de l'acier : 30 % de la demande dans ce secteur concerne la désulfuration et la désoxydation de l'acier lors de la fabrication de la fonte et son affinage. Le manganèse se combinant très bien au soufre et à l'oxygène, son ajout permet d'éviter que le soufre ne s'associe au fer, ce qui fragiliserait l'acier par accumulation de cémentite aux joints de grains. Aux dires de nombreux producteurs, le manganèse est « insubstituable » dans cet usage. Les 70 % de la demande restante concernent la fabrication de ferro-alliages rentrant dans la composition finale d'un grand nombre d'aciers. Si les teneurs en manganèse dans les aciers sont très variables et peuvent atteindre 14 %, un acier « classique » contient 6 % à 7 % Mn. Les aciers au manganèse sont utilisés essentiellement dans les secteurs du bâtiment et de l'automobile pour leurs propriétés de dureté, d'élasticité, de résistance à l'usure et à l'abrasion.

On distingue toutefois trois qualités de manganèse au sortir de la mine, selon sa teneur : qualité métallurgique, qualité chimique et qualité batterie. La qualité métallurgique, qui contient le plus souvent au minimum 48 % Mn et des teneurs variables en éléments traces (Fe, Al, As, P, etc.) qui vont impacter ses caractéristiques finales, représente donc la plus grande partie des concentrés.

La qualité chimique doit contenir environ 35 % Mn, tandis que la qualité batterie affiche des

teneurs situées entre 44 % Mn et 54 % Mn. Les débouchés du manganèse de qualité chimique et de qualité batterie (environ 10 % des usages mondiaux) sont sous forme métallique ou de composés chimiques manganésifères. Ces débouchés comprennent : les alliages spéciaux, le secteur des piles et batteries, et la chimie. Cependant, chaque usage demande une forme et une qualité spécifiques du manganèse. 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 (comme le permanganate de potassium, les sulfates, les chlorures de manganèse) et rentrent dans la composition d'engrais et d'aliments pour animaux, dans l'électronique ou pour le traitement de surface des pigments et métaux, représentant une part minime des usages.

Le dioxyde de manganèse (MnO_2) entre donc dans la composition des piles sèches (salines ou alcalines), ainsi que – de manière croissante – dans les technologies de batteries Li-ion. Il est utilisé comme matériau actif des cathodes de ces batte-

ries pour en augmenter la conductibilité électrique. Il entre 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 Asie et en Europe, 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 encore, mais 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, pouvant conduire prochainement à des modifications des filières industrielles, notamment pour produire des sulfates de manganèse purifiés préférés par les fabricants de batteries.

En 2020, la production minière de manganèse a été de 18,5 Mt selon les données préliminaires

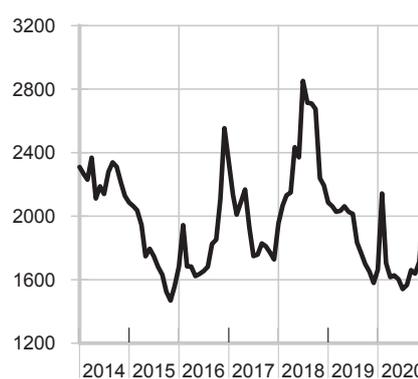
Manganèse

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	17 500	15 700	17 300	18 900	19 600	18 500
Afrique du Sud	5 900	5 300	5 400	5 800	5 800	5 200
Australie	2 450	2 240	2 820	3 480	3 180	3 300
Birmanie				207	430	400
Brésil	1 090	1 080	1 160	1 310	1 740	1 200
Chine	3 000	2 330	1 700	1 200	1 330	1 300
Côte d'Ivoire				395	482	460
Gabon	2 020	1 620	2 190	2 330	2 510	2 800
Géorgie				200	116	150
Ghana	416	553	810	1 360	1 550	1 400
Inde	900	745	734	961	801	640
Kazakhstan	222	212	168	140	140	130
Malaisie	201	266	478	390	390	350
Mexique	220	206	212	210	202	190
Ukraine	410	425	735	517	500	550
Vietnam					158	150
Autres pays	678	681	898	397	270	270

Prix du manganèse Marché libre européen

(en dollars/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

de l'USGS, contre 19,6 Mt en 2019. Environ 60 % de la production mondiale de manganèse provient de trois pays : l'Afrique du Sud (5,2 Mt – 28 %), l'Australie (3,3 Mt – 18 %) et le Gabon (2,8 Mt – 15 %). Les autres pays producteurs sont le Ghana, la Chine, le Brésil et l'Inde.

Les ressources en Chine étant de médiocre qualité et proches de l'épuisement, le marché est devenu très dépendant de la production d'Afrique du Sud, multipliée par six depuis l'année deux-mille. 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 en majeure partie par les exportations sud-africaines.

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. En 2020, l'USGS indique que les réserves cumulées de l'Afrique du Sud (520 Mt), du Brésil (270 Mt), de l'Australie (230 Mt) représentent 78 % des réserves mondiales, estimées à environ 1 300 Mt. 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 terme et à moyen terme.

Le manganèse n'est pas substituable dans ses principaux usages (sidérurgie, alliages, etc.). Les aciers, ferrailles et alliages contenant du manga-

nèse 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 en 2020 (flakes à 99,97 % Mn) a été de \$ 1 711/t, en baisse de 10 % par rapport à 2019 (\$ 1 904/t). Cette baisse des prix est le reflet d'un double levier : une demande en baisse sur la première moitié de l'année 2020 et une production en hausse sur la seconde partie de l'année, amenant une situation de surproduction globale. En effet, la production mondiale d'acier, principal secteur consommateur de manganèse, a affiché un recul de 1,5 % en 2020. Ce recul global cache néanmoins des divergences géographiques et temporelles sur 2020. Contrairement au reste du monde où la production d'acier est en forte baisse, la Chine s'est bien relevée au second semestre avec l'application de son plan de relance industrielle et elle a fini l'année avec une hausse de production de 5,4 % par rapport à 2019. D'autre part, l'offre minière mondiale de manganèse a subi, comme de nombreux métaux, les effets du confinement lié à la pandémie de Covid-19 au premier semestre 2020, mais s'est bien relevée à partir de juillet, notamment en Afrique du Sud. L'augmentation des exportations sud-africaines a d'ailleurs permis à la Chine de reconstituer des stocks dans les entrepôts portuaires, équivalant à environ douze semaines de consommation, ce qui contribue également à la baisse des prix.

La demande future en manganèse sera tirée en grande partie par la croissance de l'urbanisation mondiale qui devrait repartir à la hausse en 2021, ainsi qu'en moindre mesure par l'électromobilité et le développement des technologies de batteries Li-ion. Cet usage devrait rester très minoritaire en volumes (au maximum quelques dizaines de milliers de tonnes de manganèse, soit moins de 10 % du marché) sauf si la technologie de cathodes NMC voit la part de nickel et cobalt se réduire au profit du manganèse. Cependant, ce changement n'est qu'à un stade de recherche et pourrait prendre quelques années pour s'implanter durablement.

Petits métaux

Les métaux – ou assimilés – traités dans ce chapitre appartiennent à des groupes différents du tableau périodique des éléments. 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. Ils sont souvent liés aux domaines de l'énergie, des technologies de l'information et de la communication (TIC), ou des transports. Certains grands regroupements peuvent être faits parmi ces petits métaux, où l'on retrouve :

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

Cependant, ce classement n'est pas exhaustif et cache de plus grandes spécificités. Les statistiques de production présentées ici comportent une première estimation des productions pour l'année 2020, telles que publiées début 2021 par l'*United States Geological Survey* (USGS) – le Service géologique des États-Unis – dans son analyse annuelle de l'industrie minière mondiale « Mineral Commodity Summaries ». Ces données sont à considérer comme des estimations provisoires, susceptibles de révisions 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. Les effets de la pandémie de Covid-19 ont par ailleurs été très variables du fait de la grande diversité des marchés considérés.

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 2019	Production 2020	Variation de la production 2020-2019 (en %)	Réserves 2019	Réserves 2020	Variation des réserves 2020-2019 (en %)
Antimoine	kt	Sb	162	153	-5.56%	1 500	1 900	26.67%
Béryllium	t	Be	250	240	-4.00%	N/A	N/A	N/A
Bismuth	t	Bi	21 100	17 000	-19.43%	N/A	N/A	N/A
Cadmium	t	Cd	24 400	23 000	-5.74%	N/A	N/A	N/A
Chrome	kt	Chromite	44 800	40 000	-10.71%	570 000	570 000	0.00%
Cobalt	t	Co	144 000	140 000	-2.78%	7 000 000	7 100 000	1.43%
Gallium	t	Ga	351	300	-14.53%	N/A	N/A	N/A
Germanium	t	Ge	131	130	-0.76%	N/A	N/A	N/A
Graphite naturel	kt	Graphite	1 100	1 100	0.00%	300 000	320 000	6.67%
Hafnium	t	Hf	70-80	70-80	N/A	N/A	N/A	N/A
Indium	t	In	968	900	-7.02%	N/A	N/A	N/A
Lithium	kt	Li	86	82	-4.65%	17 000	21 000	23.53%
Magnésium	kt	Mg	1 120	1 000	-10.71%	N/A	N/A	N/A
Manganèse	kt	Mn	19 600	18 500	-5.61%	810 000	1 300 000	60.49%
Molybdène	kt	Mo	294.00	300	2.04%	18 000	18 000	0.00%
Niobium	kt	Nb	97.0	78	-19.59%	>13000	>17000	30.77%
Rhénium	t	Re	53	53	-0.38%	2 400	2 400	0.00%
Scandium	t	Sc	<15	<15	N/A	N/A	N/A	N/A
Sélénium	t	Se	2 880	2 900	0.69%	99 000	100 000	1.01%
Silicium	kt	Si	8 410	8 000	-4.88%	N/A	N/A	N/A
Tantale	t	Ta	1 850	1 700	-8.11%	>110000	>140000	27.27%
Tellure	t	Te	520	490	-5.77%	31 000	31 000	0.00%
Terres rares	kt	oxydes de terres rares	220	240	9.09%	120 000	120 000	0.00%
Titane métal	kt	Ti	200	210	5.00%	N/A	N/A	N/A
Tungstène	kt	W	84	84	0.24%	3 300	3 400	3.03%
Vanadium	kt	V	87	86	-0.92%	22 000	22 000	0.00%
Zirconium	kt	Concentrés de zircon	1 420	1 400	-1.41%	62 000	64 000	3.23%

(Source : USGS 2021 - Mineral Commodity Summaries)

Le tableau ci-dessus permet une vue synthétique des chiffres de production de l'ensemble de ces éléments, de même que ceux des réserves géologiques (lorsqu'ils sont disponibles), ainsi que l'évolution de ces chiffres sur un an, sur la base de la première estimation 2021 de l'USGS.

Le tableau ci-après synthétise quelques informations complémentaires relatives aux petits métaux de ce chapitre – ainsi que ceux du chapitre « Métaux électriques » de ce rapport CyclOpe –, en particulier la part du premier pays producteur mondial en 2020 et son évolution depuis 2019, ainsi que le caractère de « sous-produit », ou non, de l'élément. En effet, nombre des petits métaux sont caractérisés de sous-produits car récupérés uniquement lors de l'extraction métallurgique d'un métal porteur. Il est également important de distinguer le lieu de l'extraction minière d'un minerai et l'extraction métallurgique du métal ou des métaux contenus, ces derniers pouvant avoir des localisations géographiques très différentes, détaillées pour chaque élément.

Antimoine (Sb)

La consommation d'antimoine a atteint un pic à 192 000 tonnes en 2010. Elle baisse depuis en raison de législations visant à réduire le niveau de toxicité des produits antimoniés.

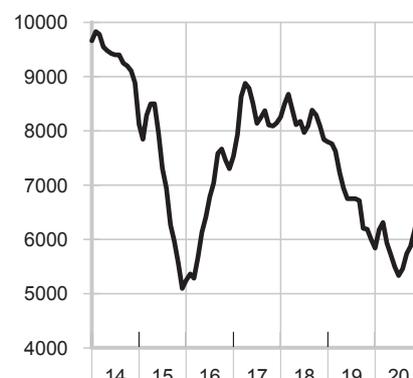
L'antimoine est un ignifugeant et un stabilisateur à la chaleur, dans les plastiques, le caoutchouc, les textiles et les peintures. Il est alors sous forme de trioxyde d'antimoine Sb_2O_3 dit «ATO» (à ne pas confondre avec l'«antimony-tin-oxide», i.e. l'oxyde d'étain-antimoine) et combiné à des halogénures (chlorures ou bromures). Lorsqu'il est utilisé sous sa forme «métal» en alliage avec le plomb, il sert à la fabrication de batteries automobiles. Ces deux usages représentent plus de 80 % de la demande mondiale selon le consultant Roskill. Sous sa forme métallique, l'antimoine

permet en effet d'augmenter la dureté, la résistance à la fatigue et à la corrosion du plomb. Cet usage, représentant environ 35 % du marché, suit deux tendances opposées : reconnues pour leur fiabilité et leur faible coût, les batteries au plomb sont utilisées dans les pays en développement économique. Au contraire, les économies développées tendent à favoriser la substitution, par exemple avec des alliages au calcium-étain. Par ailleurs, ces dernières se tournent vers les véhicules électriques qui ne nécessitent pas de batteries de démarrage au plomb, ce qui devrait à moyen terme réduire la demande en antimoine dans ce secteur. Le reste de la demande se répartit dans diverses applications, notamment dans les verres ultra-transparents (panneaux photovoltaïques), des émaux et céramiques, mais également des munitions au plomb, du caoutchouc (vulcanisation des caoutchoucs rouges),

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	141 000	148 000	137 000	147 000	162 000	153 000
Afrique du Sud		1 200				
Australie	3 700	5 000	3 120	2 170	2 030	2 000
Birmanie	3 000	3 000	1 000	2 640	6 000	6 000
Bolivie	4 200	2 670	2 700	3 110	3 000	3 000
Chine	110 000	108 000	98 000	89 600	89 000	80 000
Équateur				50	1	1
Guatemala		25	25	25	25	25
Honduras				12	10	
Iran		200	300	600	500	500
Kazakhstan		573	700	300	300	300
Kirghizistan				370		
Laos		242	340	300	140	100
Mexique		196	243	260	300	300
Pakistan		114	60	28		
Russie	9 000	8 000	14 400	30 000	30 000	30 000
Tadjikistan	8 000	14 000	14 000	15 200	28 000	28 000
Turquie	2 500	4 000	2 000	2 400	2 400	2 000
Vietnam		643	380	240	310	300
Autres pays	1 000					

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Données complémentaires

A	B	C	C	D
Matière première	Premier producteur mondial	Part de la production mondiale du premier producteur en 2020	Part de la production mondiale du premier producteur en 2019	Sous-produit
Antimoine	Chine	52%	63%	Partiellement : plomb, or, zinc
Béryllium	USA	62%	65%	Non
Bismuth	Chine	83%	73%	Essentiellement : plomb, tungstène
Cadmium	Chine	36%	33%	Essentiellement : zinc
Chromite (minerai de chrome)	Afrique du Sud	40%	39%	Rarement : platinoïdes
Cobalt (production minière)	République dém. du Congo	70%	70%	Essentiellement : cuivre, nickel
Gallium	Chine	97%	96%	Exclusivement : aluminium
Germanium	Chine	66%	65%	Exclusivement : zinc, charbon
Graphite naturel	Chine	62%	62%	Non
Hafnium	France	?	43%	Exclusivement : zirconium
Indium	Chine	56%	40%	Exclusivement : zinc, cuivre, plomb, étain
Lithium	Australie	49%	54%	Rarement : potasse
Magnésium	Chine	87%	85%	Non
Manganèse	Afrique du Sud	28%	29%	Non
Molybdène	Chine	41%	45%	Partiellement : cuivre
Niobium	Brésil	91%	88%	Non
Rhénium	Chili	57%	55%	Exclusivement : molybdène
Scandium	Chine	66%	66%	Exclusivement : terres rares, fer, uranium
Sélénium	Chine	38%	34%	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc
Silicium	Chine	68%	64%	Non
Tantale	République dém. du Congo	40%	41%	Partiellement : niobium, lithium, étain, terres rares
Tellure	Chine	62%	62%	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc, bismuth
Terres rares	Chine	58%	62%	Non
Titane (éponge)	Chine	48%	37%	Non
Tungstène	Chine	83%	83%	Non
Vanadium	Chine	62%	54%	Essentiellement : acier, titane
Zirconium	Australie	35%	38%	Non

(Source : USGS 2021 - Mineral Commodity Summaries)

ainsi que de la catalyse pour la production de fibres de polyester et du polytéréphtalate d'éthylène (PET), largement utilisées pour la production des bouteilles en plastique. Une application émergente est celle de l'oxyde d'antimoine-étain comme matériau conducteur transparent pour les écrans tactiles et la microélectronique.

Fin 2019, l'Öko-Institut allemand s'est prononcé en défaveur d'une restriction de l'ATO dans les équipements électriques et électroniques dans le cadre de la directive européenne Restriction of Hazardous Substances (RoHS). Cet avis devait être réexaminé courant 2021.

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 coproduit ou sous-produit du traitement de minerais de plomb-zinc ou d'or comme en Russie et au Tadjikistan.

La production mondiale d'antimoine primaire en 2020 a décliné de 5,6 % après une croissance nulle en 2019 par rapport à 2018. Les chiffres de l'USGS annoncés dans l'édition 2020 du rapport Cyclope ont donc été nettement revus à la baisse. Il existe 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». En 2020, le premier producteur a été la Chine avec 80 000 tonnes, suivie de la Russie et du Tadjikistan, avec des productions d'environ 30 000 tonnes. Depuis 2010, la Chine fait face à des difficultés sur le plan minier, avec des réserves en baisse, des teneurs faibles, ainsi qu'un fort impact environnemental. Le gouvernement a adopté des normes environnementales plus strictes et a fermé de nombreuses mines. Le pays a importé de plus en plus de concentrés d'antimoine à bas coût en provenance du Tadjikistan, de Russie, d'Australie, du Canada et d'Amérique du Sud afin d'assurer sa production d'antimoine métal et d'ATO. En dépit de la pandémie de Covid-19, la Chine a augmenté sa production d'ATO de 1 %, alors que sa production d'antimoine métal a baissé de 6 % par rapport à 2019. Les contrôles aux frontières se sont maintenus et les exportations illégales d'antimoine ont continué de baisser, ce qui s'est répercuté en une

hausse des statistiques d'exportations officielles (légales).

Au sultanat d'Oman, le «four à antimoine» détenu en partie par Tri-Star Resources a été mis en opération et pourrait raffiner annuellement jusqu'à 20 000 tonnes d'antimoine métal et de trioxyde à pleine capacité, à condition qu'il sécurise ses apports de matière première en provenance de Turquie (Goynuk) et/ou du Canada. Le Tadjikistan prévoyait pour 2021 l'ouverture d'un nouveau site de production d'une capacité de 16 000 tonnes par l'entreprise chinoise Huayu Mining.

En dépit du rééquilibrage géographique qui est à l'œuvre depuis plus de quinze ans, la Chine dispose toujours des plus grosses réserves mondiales d'antimoine prouvées à ce jour. L'USGS a réévalué les réserves d'antimoine à la hausse, à 1,9 Mt en 2020, en raison de nouvelles données disponibles pour le Canada et le Kirghizstan. Selon Seeking Alpha, le Département américain de la Défense serait également intéressé par la constitution de stocks stratégiques d'antimoine. Ces stocks stratégiques seraient passés de 73,5 t en 2019 à 90 t en 2020, toujours selon l'USGS.

L'antimoine contenu dans les batteries au plomb et autres alliages est bien recyclé. À ce titre, Roskill prévoit que, dans les prochaines années, la filière métallurgique de l'antimoine devienne «autosuffisante» grâce à l'apport d'antimoine secondaire, sans échéance précise toutefois. Cela n'est pas le cas pour les autres usages (ignifugeants, verre), qui ont tendance à être dispersifs. L'agence d'information *Fastmarkets* estime qu'en moyenne, un taux de 20 % d'antimoine secondaire est intégré dans la production de nouveaux produits antimoniés.

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 2020 de l'antimoine métal a été de \$ 5 880/t, en nette baisse (- 15 %) par rapport à 2019. Le second semestre 2020 a vu une remontée du prix européen au-dessus des \$ 6 000/t à la faveur de la première vague de reprise économique mondiale.

La demande future en antimoine devrait stagner, se situant au milieu de plusieurs tendances contraires illustrées par des normes de sécurité incendie plus strictes, une faible substituabilité

Arsenic (trioxyde)
(en tonnes de trioxyde produit)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	36 500	37 000	34 500	33 400	32 300	32 000
Belgique	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
Bolivie	50	40	40	40	120	100
Chine	25 000	25 000	24 000	24 000	24 000	24 000
Iran				110	110	
Japon	45	45	45	45	45	40
Maroc	6 900	7 600	6 000	6 000	5 500	5 500
Namibie		1 900	1 900	700		
Russie	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
Autres pays	1 960					

(Source : Mineral Commodity Summaries)

pour les retardateurs de flamme, la réduction de la quantité d'antimoine dans les produits, l'abandon progressif des batteries au plomb antimonie, et les éventuelles réglementations sanitaires et commerciales à venir. Pour rappel, l'antimoine est un métalloïde toxique et serait cancérigène par inhalation. À plus long terme, les propriétés semi-conductrices de l'antimoine pourraient offrir de nouveaux débouchés à ce métal dans le domaine de l'électronique, ainsi que dans celui du raffinage électrolytique de métaux rares. Enfin, des cellules photovoltaïques multijonctions, dont l'une des couches contient de l'antimoine, pourraient permettre d'atteindre un taux de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique de 50 %.

Béryllium (Be)

Le coût élevé du béryllium et ses difficultés de mises en œuvre industrielles – dues à une forte toxicité – en font un métal réservé à des usages très spécifiques. Les propriétés uniques du béryllium comprennent la légèreté, la rigidité, la très forte résistance à la corrosion, une très bonne transparence aux rayons X, ainsi que celle de réflexion des neutrons.

Certaines formes sont privilégiées en fonction des secteurs d'usages. La principale est l'alliage cuivre-béryllium (contenant environ 2 %

Be) qui représente près de 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. Enfin, 5 % de la consommation du Be est sous forme d'oxyde et de céramiques, par exemple utilisés dans le secteur de la construction (substrats isolants, blindages, etc.).

Les besoins en connectique d'alliages CuBe sont le principal facteur d'évolution de la demande. En 2020, la pandémie a eu un impact à la baisse important sur les débouchés traditionnels et à haute valeur ajoutée du béryllium (aérospatiale et défense, domaine de l'énergie). Le principal producteur américain, Materion, a ainsi constaté

Béryllium						
<i>(en tonnes de métal contenu dans la production minière)</i>						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	Production mondiale de minerai					
	230	220	214	240	250	240
États-Unis	205	155	150	165	160	150
Brésil		5	3	3	3	3
Chine	20	50	50	48	70	70
Madagascar		6	6	6	1	1
Mozambique				16	15	15
Nigeria		6	4	4	1	1
Rwanda		1	1	1	1	1
Autres pays	6					

(Source : Mineral Commodity Summaries)

une réduction de 24 % de ses ventes de produits à base de béryllium au premier semestre 2020.

Les États-Unis demeurent le premier producteur mondial de ce métal en 2020 avec 150 tonnes, soit les deux tiers de la production minière totale. 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 à 70 tonnes) et, pour une faible part, à partir du béryl extrait à Madagascar et au Brésil (de l'ordre de quelques tonnes), ainsi qu'au Nigeria et au Mozambique. Il faut noter que les gisements de béryl sont également exploités pour les gemmes (l'émeraude est un béryl).

La production métallurgique et de raffinage de béryllium pour l'industrie 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 pour 2020 établie à 20 000 tonnes de Be contenu. Les ressources mondiales (non normées) sont estimées par l'USGS à plus de 100 000 tonnes de Be contenu, dont 60 % aux États-Unis.

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

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix du béryllium sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Il existe donc une certaine opacité sur la variation des prix dans le temps. L'association de producteurs BeST (www.beryllium.eu) donne des fourchettes de prix en fonction des qualités recherchées :

– Be métal pur de qualité aéronautique : \$ 350 à \$ 1 900/kg ;

– alliage AlBe (39 % Be) pour composant aéronautique : \$ 250 à \$ 650/kg ;

– alliage CuBe (2 % Be) : \$ 25 à \$ 65/kg.

L'USGS publie également des moyennes annuelles du prix du béryllium, correspondant à la valeur du béryllium contenu dans les importations américaines pour un alliage CuBe à 4 % Be. Or, en 2020, ce dernier est inchangé à \$ 620/kg Be, ce qui ne semble pas représenter la baisse de la demande observée au premier semestre 2020 dans le contexte de développement de la pandémie.

Aux États-Unis, en mai 2018, le département de l'Intérieur en coordination avec d'autres agences fédérales a publié une liste de trente-cinq minéraux critiques, dont le béryllium. Dans ce cadre, la *Defense Logistics Agency* a eu pour mission de constituer un stock de défense nationale s'élevant à 47 t de Be métal. Selon l'USGS, l'inventaire de ce stock au 30 septembre 2020 était de 64 tonnes de Be métal, 7 tonnes sous forme de poudre métallique et une tonne 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 celui de terres rares de Round Top (Texas). Le modèle économique du projet repose sur la diversification de l'exploitation, visant la production non seulement

de terres rares, mais également de minéraux industriels à haute valeur ajoutée et de métaux dits technologiques, tels que le béryllium. Une étude économique préliminaire (*Preliminary Economic Assessment* ou PEA), finalisée en août 2019, envisage un début de production potentielle à l'horizon 2023, sous réserve des financements et validations techniques intermédiaires. Mené conjointement par les compagnies USA Rare Earths LLC et Texas Mineral Resources Corp, ce projet a franchi plusieurs étapes en 2020, notamment l'ouverture d'une usine pilote dans le Colorado, en avril, pour valider la technologie de séparation des terres rares et un contrat avec le Département américain de la Défense.

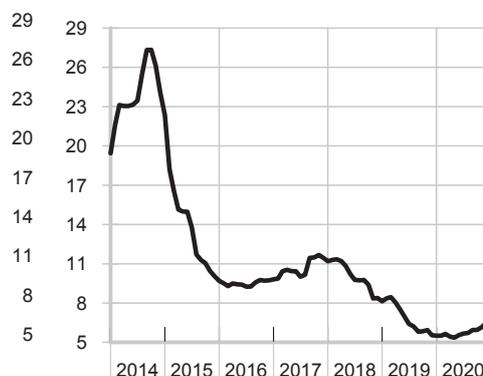
Bismuth (Bi)

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.

Bismuth (en tonnes)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale de minerai	10 300	17 100	16 900	19 200	21 100	17 000
Bulgarie			50	50	50	40
Canada	3	25	25	25	25	20
Chine	7 500	14 000	13 500	14 000	16 000	14 000
Corée du Sud				900	930	830
Japon		428	525	571	540	480
Kazakhstan		140	270	290	270	240
Laos		2 000	2 000	3 010	3 000	1 000
Mexique	700	539	513	333	300	270
Vietnam	2 000					
Russie	40	4				

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

L'un des principaux avantages du bismuth dans ses usages est qu'il est considéré comme le moins toxique des métaux lourds pour l'homme, ce qui explique son utilisation dans de nombreux produits pour ses propriétés antibactériennes, notamment pour le traitement de l'eau, en cosmétique et dans l'industrie pharmaceutique.

Le bismuth n'existe que très rarement sous forme de petites concentrations économiquement exploitables dans la croûte terrestre. 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 la pureté « technique » à 99,99 % Bi métal (*technical grade*) de la pureté « pharmaceutique » à 99,999 % Bi (*pharmaceutical grade*), destinée exclusivement aux utilisations humaines.

En 2020, la production mondiale de Bi raffiné estimée par l'USGS a été de 17 000 tonnes (cette quantité est toutefois exprimée en poids total et non en Bi contenu). Selon les chiffres de l'USGS, la Chine est toujours de loin le premier producteur mondial de bismuth avec 83 % 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 2020, les prix du bismuth ont continué leur chute, entamée en 2015 et particulièrement marquée depuis 2018. Le prix moyen (Bi 99,99 % Europe) a été de \$ 5,75/kg sur l'année contre \$ 6,94/kg en 2019, soit une baisse de 17 %. N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, ces prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs.

Déjà marquée par d'importantes surcapacités liées au statut de sous-produit du bismuth, l'offre en provenance de Chine a souffert de l'arrivée sur le marché des stocks de bismuth du *Fanya Metal Exchange* revendus aux enchères en novembre 2019. Ces stocks, équivalents à plus d'un an de production mondiale (19 228 tonnes), ont été entièrement acquis par le groupe chinois Vital Materials.

La compagnie Masan Resources exploite la mine de tungstène de Nui Phao, au Vietnam, avec

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

5N Plus est une compagnie canadienne, leader mondial de la purification et de 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. La société raffine annuellement environ 3 000 à 3 500 tonnes de bismuth. Le bismuth vendu par 5N 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 des réserves mondiales de Bi, auparavant estimées à partir des réserves connues des gisements primaires de plomb contenant du bismuth. Cette absence de référence mondiale sur l'état des réserves s'explique par le manque de données nécessaires pour une telle estimation.

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

Certaines perspectives pourraient transformer le marché du bismuth. 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 phéno-

mène 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 Ni-Co situé dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. Le projet envisage une mine d'or-cuivre-bismuth-cobalt, actuellement au stade de la faisabilité. Les réserves probables et prouvées sont de l'ordre de 40 000 tonnes de bismuth pour une durée de vie de vingt ans.

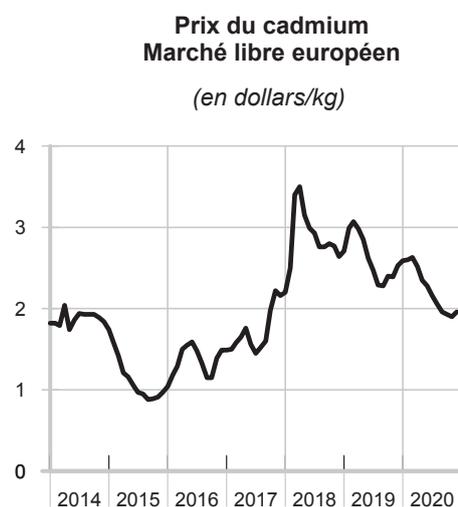
Cadmium (Cd)

Le cadmium est un métal tendre, à basse température de fusion (321 °C) et d'ébullition (767 °C). C'est un métal toxique pour l'environnement et la santé humaine, ce qui en restreint fortement l'utilisation.

Le principal usage du cadmium est la production d'accumulateurs rechargeables au nickel-cadmium (batteries NiCd). On distingue souvent les batteries NiCd grand public et de spécialité. Les

premières, longtemps utilisées dans les équipements électriques portables, sont de moins en moins utilisées du fait des réglementations sur la toxicité et du développement rapide des batteries NiMH et Lithium-ion (Li-ion), aux performances nettement supérieures, et à des prix en baisse constante. En 2018, les batteries NiCd représentaient moins de 2 % de la capacité du marché mondial des batteries rechargeables (environ 550 GWh) selon le consultant Avicenne Energy. Les batteries NiCd industrielles sont toujours utilisées, souvent en tant que batteries de secours, en raison de leur grande fiabilité et de leur résistance aux fortes décharges. Un autre usage important, mais lui aussi décroissant, est la production de pigments jaunes, oranges ou rouges, très utilisés pour le revêtement des engins de chantier par exemple, car ils protègent l'acier de la corrosion. Datant de février 2017, un amendement du règlement REACH limitant très fortement la teneur en cadmium des peintures entraîne cependant la substitution des pigments au cadmium par des pigments à base de vanadate de bismuth ou sulfure de cérium, présentant peu ou pas de toxicité. Les usages restants du cadmium comprennent les alliages à bas

Cadmium (en tonnes de métal raffiné)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale						
	23 200	23 900	25 400	25 100	24 400	23 000
Australie	380					
Bulgarie	360					
Canada	1 160	2 310	1 800	1 680	1 803	1 800
Chine	7 600	8 200	8 200	8 200	8 200	8 200
Corée du Sud	4 200	3 600	5 600	5 000	4 400	3 000
États-Unis	500	400	400			
Inde						
Japon	1 960	1 990	2 140	1 980	2 000	1 800
Kazakhstan	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
Mexique	1 300	1 190	1 160	1 360	1 395	1 300
Pays-Bas	640	630	600	1 100	1 100	1 100
Pérou	760	820	797	765	772	700
Pologne	630					
Russie	1 300	1 300	1 200	1 200	900	900
Autres pays	1 410	2 400	2 370	2 310	2 320	2 300



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

point de fusion et les applications dans le domaine de l'énergie et de l'électronique utilisant les propriétés semi-conductrices de plusieurs de ses composés. Le plus populaire est le tellure de cadmium (CdTe) pour les cellules photovoltaïques à couches minces, nécessitant environ 80 kg de Cd par MW de capacité électrique installée. Cet usage a un fort potentiel de développement bien que le silicium domine largement le marché des cellules photovoltaïques en 2020 (voir la section consacrée au tellure). Dans les panneaux photovoltaïques, le CdTe est encapsulé et ne présente pas de risques sanitaires.

Selon l'USGS, la production mondiale de Cd en 2020 était de 23 000 tonnes (sans la production américaine, tenue confidentielle depuis 2011), en légère baisse par rapport à 2019 (24 400 tonnes). Le cadmium est essentiellement récupéré en sous-produit de la métallurgie du zinc. La Chine, premier métallurgiste du zinc, demeure aussi le premier producteur mondial de cadmium, avec 36 % de la production mondiale, une place qu'elle occupe depuis 2008. Au cours de la période 2007-2017, la croissance annuelle moyenne de la production de Cd a suivi celle du zinc, à 2 %. Les autres producteurs majeurs sont la Corée du Sud, le Japon et le Canada. La Chine a placé en 2018 une taxe de 25 % sur les importations de cadmium brut en provenance des États-Unis.

Il n'existe pas d'estimation des réserves en cadmium, celui-ci n'étant récupéré qu'en sous-produit du zinc. 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. Les gisements sédimentaires de phosphates et de charbon représentent également une ressource importante, peu valorisée à ce jour.

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

Le prix annuel moyen du cadmium de pureté 99,95 % en 2020 a été de \$ 2,25/kg, en baisse de - 15 % par rapport à 2019.

En 2017, les institutions européennes ont initié la révision de la Réglementation européenne relative aux engrais datant de 2003. La réglementation révisée, qui a été adoptée fin 2018, a fixé une teneur maximale en cadmium admissible à 60 mg Cd/kg d'engrais phosphatés (P_2O_5), avec une évolution possible vers 40 mg Cd/kg puis 20 mg Cd/kg. Cette réglementation – qui entrera en vigueur d'ici 2022 – pourrait, à terme, forcer les producteurs d'engrais à «décadmirer» l'acide phosphorique servant à la production des engrais, ce qui ferait apparaître un stock considérable de cadmium dans les pays producteurs de phosphates. Certains producteurs d'engrais phosphatés à faibles teneurs de cadmium comme le Russe PhosAgro espèrent bénéficier de cette réglementation pour gagner des parts de marché en Europe, au détriment des producteurs d'Afrique du Nord. Il faut noter que, hors Europe, les réglementations sont très hétérogènes avec des limites fixées sur les quantités épandues par hectare plutôt que sur la teneur des engrais en Cd. 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, des batteries de spécialité, et les normes environnementales pourraient ouvrir de nouvelles perspectives dans ce marché potentiellement excédentaire.

Chrome (Cr)

Le chrome est, en volume, le quatrième métal le plus produit et consommé au monde après le fer, l'aluminium et le cuivre. La chromite est le principal minéral porteur du chrome, contenant entre 40 % et 60 % de chrome sous forme d'oxyde de chrome (Cr_2O_3). Par ses caractéristiques de résistance au ternissement et à la corrosion, l'usage principal du chrome est de loin la fabrication des aciers inoxydables. Cet usage ne nécessite pas la production de chrome métal, mais d'un alliage, le ferrochrome, nettement plus facile à produire.

La demande mondiale en chromite se situe autour des 30-35 Mt annuellement, mais après une croissance annuelle comprise entre 5 % et 10 % sur les dernières années, la demande en chrome devrait afficher une hausse plus raisonnable, entre 2 % et 4 % par an, notamment du fait du recul du secteur aéronautique. Plus de 90 % de la chromite

est destinée à la production de ferrochrome, dont 85 % vont servir à la production des aciers inoxydables et 15 % pour d'autres aciers et alliages au chrome. Le chrome en composés chimiques et sous forme de métal ne compte que pour environ 3 % de la demande en chromite et cette dernière forme est utilisée pour plus de moitié dans les superalliages pour l'aéronautique (parties chaudes des réacteurs d'avion) et pour la production d'énergie (turbines à gaz).

Selon les données de l'USGS, la production de chromite reste largement dominée par l'Afrique du Sud avec 16 Mt (soit 40 %). Les autres pays producteurs majeurs sont le Kazakhstan (6,7 Mt), la Turquie (6,3 Mt) et l'Inde (4 Mt). Bien que la plupart de la chromite soit extraite en tant que substance principale, environ 15 % de la production mondiale est un sous-produit de l'exploitation de platinoïdes dans le complexe du Bushveld, en Afrique du Sud (soit le tiers de la production sud-africaine). Selon les données compilées par l'Élémentarium, environ 15 Mt de ferrochrome ont été produites en 2019. Les principaux producteurs de ferrochrome sont de loin la Chine (6,6 Mt) et l'Afrique du Sud (4,8 Mt).

Les capacités de production mondiale de chrome métal (99,996 % Cr) étaient de 57 000 tonnes en 2017 et provenaient principalement de Russie (33 %), de Chine (28 %), de France

(21 %) et du Royaume-Uni (14 %). Deux types de chrome métal sont commercialisés : le chrome métal aluminothermique, qui est produit à partir d'oxydes de chrome, et le chrome métal électrolytique, qui est fabriqué à partir du ferrochrome ou de l'acide chromique. En France, la production de chrome aluminothermique est assurée par la société DCX Chrome sur son site de Marly.

L'USGS évalue à approximativement 570 Mt les réserves mondiales de chromite (45 % Cr₂O₃) en 2020. Le Kazakhstan et l'Afrique du Sud possèdent respectivement 40 % et 35 % de ces réserves. Les ressources en chromite sont considérables puisqu'elles atteindraient 12 Gt et se trouveraient à 95 % au Kazakhstan et en Afrique du Sud.

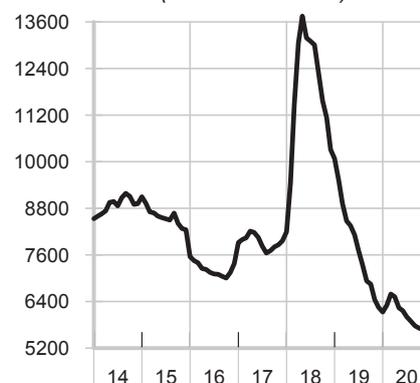
Du fait de ses qualités et de son abondance géologique, les industriels n'ont pas cherché à remplacer le chrome par un autre élément dans son usage principal, l'acier inoxydable.

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

Chrome
(en milliers de tonnes)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	30 400	30 200	35 700	43 100	44 800	40 000
Afrique du Sud	14 000	14 700	16 500	17 600	16 395	16 000
Finlande				2 210	2 415	2 400
Inde	3 200	3 200	3 500	4 300	4 139	4 000
Kazakhstan	5 490	5 380	4 580	6 690	6 700	6 700
Turquie	3 500	2 800	6 500	8 000	10 000	6 300
Autres pays	4 220	4 160	4 580	4 250	5 110	4 800

Prix du chrome métal aluminothermique
(en dollars/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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 \$ 6 105/t en 2020. Il affiche une baisse de 23 % par rapport à 2019 (\$ 7 916/t), et loin de son niveau de 2018 (\$ 11 710/t). Les prix du ferrochrome (HC 60 % Cr et 6-8 % C) ont également connu une baisse de 5,5 % entre 2019 et 2020, passant de \$ 1 975/t à \$ 1 886/t en moyenne. Ces replis s'expliquent en grande partie par un excès de chromite et de ferrochrome sur le marché, matérialisé par des stocks importants dans les entrepôts portuaires chinois, en raison d'une production plus soutenue des producteurs de platine en Afrique du Sud. En effet, les prix bas du platine ont fortement incité les producteurs à valoriser le chrome contenu dans les résidus miniers (donc en tant que sous-produit) pour continuer à être rentable.

Le marché du chrome, actuellement 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 (*Nickel Pig Iron* ou 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). Par ailleurs, l'Afrique du Sud pourrait imposer une taxe à l'exportation de minerai de chrome pour encourager la production de ferrochrome domestique offrant une meilleure valeur ajoutée. Du côté de la demande, la reprise économique chinoise «post Covid-19» s'est matérialisée par une production croissante d'acier inoxydable depuis avril 2020 et a donc bénéficié au marché du chrome dans son ensemble. Cette tendance haussière devrait se maintenir en 2021.

Gallium (Ga)

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.

Sur une consommation mondiale d'environ 300 tonnes, une majeure partie est utilisée pour les circuits intégrés en électronique et pour l'optoélectronique (diodes électroluminescentes – DEL –, diodes lasers, photodiodes). Plusieurs dizaines de tonnes sont utilisées ponctuellement pour la recherche sur les neutrinos en physique des particules. Les principaux composés utilisés sont l'arséniure de gallium (GaAs) et le nitrure de gallium (GaN). Le GaAs est utilisé comme substrat privilégié pour la production de circuits intégrés fonctionnant à des fréquences supérieures aux substrats à base de silicium. Ils sont consommés par les DEL, la téléphonie mobile (environ deux tiers de la demande), les communications wifi, ainsi que dans le secteur de la défense (avions de combat et missiles). La propriété de conversion de l'électricité en lumière du GaN fait qu'il est utilisé dans certaines DEL et dans les diodes lasers pour le stockage optique des DVD et Blu-ray, mais également pour des applications satellites ou de télévision par câble. Depuis quelques années, le GaN est également utilisé comme semi-conducteur dans les circuits intégrés, en remplacement du silicium et du GaAs, car il affiche de meilleures performances avec une bande interdite plus large. De plus en plus de fabricants de semi-conducteurs adoptent le GaN pour accélérer les télécommunications dans l'électronique embarquée et les objets communicants. En 2020, la consommation accrue des technologies de l'information et de la communication liée à la crise sanitaire et à l'arrivée de la 5G a généré une demande plus forte en gallium. Cette tendance devrait s'accroître, d'autant que le silicium des semi-conducteurs est de plus en plus délaissé pour des substrats en GaN. Un autre usage du gallium est celui des cellules photovoltaïques en couches minces CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium).

Si le gallium peut être valorisé en sous-produit du zinc (5 %), il est surtout récupéré lors de la production d'alumine (95 %) par le procédé Bayer. Par la suite, et en fonction des applications, le gallium doit être purifié à une pureté de 99,99999 %, ou 7N. On considère que moins de 5 % des raffineries mondiales d'alumine sont équipées pour récupérer le gallium et que moins de 1 % du gallium physiquement extrait est effectivement récupéré. La plupart des raffineries équipées sont en Chine en rai-

son d'une bauxite à plus haute teneur en gallium.

En 2020, la production de gallium est estimée par l'USGS à 300 tonnes de qualité > 4N (99,99 % Ga) dont 220 tonnes de qualité 6 à 7N (pureté supérieure à 99,9999 % Ga). Cela représente une baisse globale de 14 % par rapport à 2019 en raison du Covid-19 et des inspections environnementales chinoises. Les capacités mondiales de production de ces deux niveaux de pureté sont bien supérieures aux quantités réellement produites puisqu'elles sont évaluées respectivement à 724 tonnes et 325 tonnes par l'USGS. Cela laisse la possibilité à la Chine de produire quand les conditions sont favorables et d'arrêter les modules de récupération lorsque les prix sont trop bas. La Chine a produit la quasi-totalité du gallium primaire en 2020 (97 %). Selon l'USGS, les autres producteurs de gallium que sont la Russie, la Corée du Sud et le Japon n'ont produit que trois à quatre tonnes de Ga primaire chacun. Seuls quelques producteurs maîtrisent les techniques de purification 6N à 8N, notamment en Chine, au Japon, en Slovaquie et aux États-Unis. Ces dernières années, plusieurs pays tels que l'Allemagne, le Kazakhstan, la Hongrie, l'Ukraine, le Royaume-Uni ont arrêté soit la production soit le raffinage du gallium en raison des surcapacités chroniques et des prix bas sur ce marché.

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 (dont moins de 10 % seraient récupérables). À ce chiffre, il faut ajouter les quantités de gallium contenues dans les minerais de zinc, voire dans certains gisements de phosphates et de charbon.

Le recyclage du gallium a surtout lieu en boucle courte par récupération des déchets de fabrication du gallium raffiné et des gallettes de GaN ou GaAs. Il y aurait une capacité totale de traitement de 273 tonnes par an selon l'USGS, la production secondaire ayant lieu au Canada, en Chine, en Allemagne, au Japon et aux États-Unis.

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 99,99 %) a été de \$ 173/kg en 2020, en hausse de

5,8 % par rapport à la moyenne des prix observée en 2019.

La demande en gallium devrait être croissante en moyenne, mais la production chinoise à fortes variations, associée à un phénomène de stockage/déstockage, génère des remous sur ce petit marché monopolisé par la Chine.

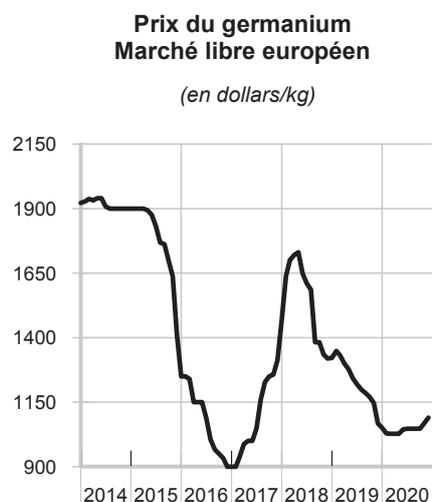
Germanium (Ge)

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

Le germanium est un sous-produit de la métallurgie du zinc (75 %) et du charbon (25 %). La Chine est le premier producteur mondial de germanium depuis plus de dix ans avec une offre de 86 tonnes en 2020 selon l'USGS et plus de 100 tonnes selon Argus Media. Elle tient cette place grâce à sa position dominante dans la métallurgie du zinc et la valorisation des cendres volantes issues de la combustion du charbon. Depuis 2014, année à laquelle la production chinoise a atteint 120 tonnes, de nombreux sites de production de petite et moyenne tailles ont fermé en raison de fortes surcapacités de production et des impacts environnementaux conséquents (rejets d'arsenic, de fer, d'acide sulfurique) que le gouvernement veut réduire.

Le germanium étant un sous-produit du zinc et du charbon, il est caractérisé par l'existence de cycles de stockage et déstockage qui évoluent selon les prix et les besoins des consommateurs (par exemple pour le secteur de la défense). Depuis 2015, le Bureau des réserves d'État chinois (State Reserve Bureau ou SRB) constituerait des stocks stratégiques de germanium chaque année. En

Germanium (en kilogrammes de métal raffiné)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale						
	165 000	126 000	106 000	130 000	131 000	130 000
Chine	115 000	80 000	60 000	94 600	85 700	86 000
Russie	5 000	6 000	6 000	6 000	5 000	5 000
États-Unis	3 000	3 000	2 000			
Autres pays	40 000	40 000	40 000	30 000	40 000	40 000



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

2020, l'État chinois a encouragé les producteurs à produire et stocker pendant la première vague de la pandémie de Covid-19, ce qui a été une stratégie payante lorsque la demande est repartie en forte hausse lors du second semestre 2020.

Le prix moyen du germanium a été de \$ 1 046/kg en 2020, affichant sur l'année une baisse de 15 % par rapport à 2019.

Il n'existe pas d'estimation précise des réserves et des ressources en germanium en raison de son exploitation en sous-produit. L'USGS estime que seulement 3 % du germanium contenu dans les minerais de zinc est récupéré. Il indique des réserves importantes de germanium dans les mines de zinc situées en Alaska, au Tennessee, et dans l'État de Washington. Les cendres volantes résultant de la combustion du charbon constitueraient une ressource importante, notamment en Chine et en Russie, non quantifiée à ce jour. Environ 30 % de la consommation mondiale de germanium proviendrait du recyclage. Il s'agit principalement de recyclage en boucle courte (chutes, limailles, poussières liées aux procédés de fabrication), mais le recyclage du germanium dans les produits en fin de vie est également pratiqué, notamment aux États-Unis. Dans les semi-conducteurs, l'alliage silicium-germanium peut être substitué par le phosphore d'indium ou par les composés au gallium (nitrure ou arséniure).

Indium (In)

La principale utilisation de l'indium est sous forme d'ITO, oxyde mixte d'étain-indium (ou *indium-tin-oxide*) pour l'industrie des écrans plats, avec 56 % de la demande mondiale. Cette dernière est de l'ordre de 1 000 t/an.

L'ITO est un très bon conducteur électrique, transparent sous forme de couche mince (quelques microns), très stable, adhérant parfaitement aux substrats sur lesquels il est déposé (plastiques, verres, etc.). Son utilisation a permis la révolution des écrans tactiles en tout genre. Il est aujourd'hui indispensable dans les écrans plats (LCD, plasma ou OLED) et est également utilisé pour la production de matériaux d'interface thermique (verres architecturaux, etc.). Le marché de l'indium est donc fortement corrélé au marché des écrans plats, qui devrait croître d'environ 5 % à 7 % d'ici à 2030. 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.

Ses autres utilisations se répartissent comme suit : soudures sans plomb (10 %), cellules photovoltaïques en couches minces (8 %), matériaux d'interface thermique (6 %), piles et batteries (5 %), alliages et composés (4 %), semi-conduc-

teurs et LED (3 %), et diverses autres applications (8 %).

Deux technologies de cellules photovoltaïques en couches minces utilisent de l'indium : CIS (cuivre, indium, sélénium) et CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Si l'utilisation de ces technologies en couches minces est très largement minoritaire vis-à-vis de cellules photovoltaïques au silicium qui représentent 95 % du marché photovoltaïque mondial – selon les chiffres du rapport annuel 2020 du Fraunhofer Institute –, sa part demeure stable, à environ 5 %.

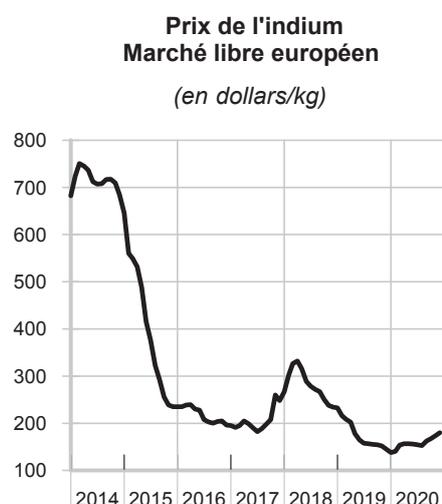
Les nouveaux réseaux de télécommunications ont créé une nouvelle demande d'indium, sous forme de phosphure d'indium (InP) pour des lasers et des récepteurs. Les lasers InP sont utilisés dans les télécommunications pour les réseaux à fibres optiques qui ont des connexions entre les antennes sans fil de troisième, quatrième et cinquième génération (3G, 4G et 5G). Ils permettent une vitesse de transmission de données de plus de 10 téraoctets par seconde et des distances de transmission totales de plus de 5 000 kilomètres. Cet usage pourrait à terme tirer la demande en indium vers le haut.

En 2020, la production d'indium raffiné a été de 900 tonnes selon les données préliminaires de l'USGS (contre 968 tonnes en 2019). 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 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 3N (99,9 %) ou 4N (99,99 %) et peut être purifié jusqu'à 6 ou 7N (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 un gros tiers 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 500 tonnes (56 % de la production mondiale) et la Corée du Sud avec 200 tonnes (22 %). Les autres pays produisant plus de 50 tonnes sont le Japon et le Canada (60 tonnes et 50 tonnes, respectivement), ainsi que la France qui produit également de l'indium purifié à 99,998 % sur le site d'Auby exploité par Nyrstar (50 tonnes selon les estimations USGS). Si la production du site était de 41 tonnes en 2015, les capacités annuelles ont depuis été portées à 72 tonnes, même si la société Trafigura, qui a pris

Indium (en tonnes de métal raffiné)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale (en indium contenu)	759	680	714	741	968	900
Allemagne						
Belgique	20	20	20	22	20	20
Brésil						
Canada	70	71	67	58	61	50
Chine	350	300	287	300	535	500
Corée du Sud	195	210	225	235	225	200
France	41		30	40	40	50
Japon	70	70	70	70	70	65
Pérou	9	10	10	11	12	10
Russie	4	5	5	5	5	5



(Source : Mineral Commodity Summaries)

le contrôle de Nyrstar en 2019, ne publie plus la production d'indium dans son rapport annuel.

L'indium étant récupéré comme sous-produit minoritaire, il n'existe pas d'évaluation standardisée des réserves et ressources mondiales. Néanmoins, les chercheurs Werner, Mudd & Jowitt ont pu, en 2017, estimer les ressources en indium des gisements de zinc, cuivre et étain dont les teneurs en indium étaient documentées ou supposées. Ils ont abouti à des ressources d'environ 380 000 tonnes d'indium, soit plus de 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 un tiers 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, les stocks atteignaient 3 609 tonnes, soit quasiment trois années de demande. Le *State Reserve Bureau*, réserve stratégique chinoise, détiendrait également des stocks d'indium comme le suggère l'achat de plus de 200 tonnes de métal déclaré en 2013.

Le 28 janvier 2019, à la surprise générale, le tribunal populaire de Kunming (province du Yunnan) a pris la décision de vendre deux lots d'indium métal (respectivement 7,6 tonnes et 27,04 tonnes) aux enchères sur le site internet Alibaba, dans le but d'indemniser les investisseurs lésés lors de la chute de la bourse Fanya. Or, cette vente établie à un prix de base de CN¥ (yuan) 1 200/kg (le prix *spot* était d'environ CN¥ 1 430-1 480/kg à cette période) n'a suscité aucune offre et s'est soldée par un échec. Plusieurs mois plus tard, le tribunal de Kunming a remis en vente plusieurs métaux et c'est une compagnie chinoise n'ayant aucun lien avec les métaux (Kunming Rongke New Materials) qui a acquis de nombreux lots, dont la totalité des stocks de gallium, de germanium, de sélénium, de bismuth et d'indium métal. Le 22 janvier 2020, la société Vital Materials, qui fournit du métal et

des composants pour de nombreuses industries, dont l'électronique, la pharmacie ou les énergies renouvelables, a admis avoir été derrière les achats effectués par Kunming Rongke New Materials.

Le prix moyen de l'indium (99,99 % Europe), établi directement entre producteurs et utilisateurs, a été de \$ 158/kg en 2020 (- 11 % par rapport à 2019), mais est remonté à \$ 180/kg sur le mois de décembre.

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 de 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.

Magnésium (Mg)

Si l'ion magnésium est un élément chimique nécessaire à la vie de la quasi-totalité des êtres vivants, le magnésium sous forme métallique intervient dans certains alliages pour leur donner légèreté, résistance et usinabilité. La consommation de magnésium se répartissait, en 2018, de la manière suivante :

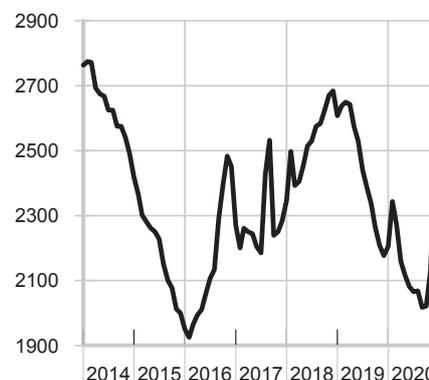
- 37 % pour des alliages Mg-Al, contenant en moyenne 0,8 % Mg. Ces alliages sont utilisés dans les infrastructures de transport et dans la construction ou pour la fabrication de canettes de boissons ;
- 32 % pour la production de moulages sous pression, contenant généralement 90 % Mg. Les moulages sont utilisés dans le domaine de la

Magnésium
(en milliers de tonnes de métal)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	972	1000	1100	996	1120	1000
Brésil	15	16	15	15	22	20
Canada			<0,5	<0,5		
Chine	852	871	930	800	970	900
Corée du Sud	10	10	10	10		
États-Unis	40	40	40			
Iran		2	3	1		
Israël	19	23	23	21	21	20
Kazakhstan	8	10	9	17	25	20
Russie	60	58	40	70	67	60
Turquie		5	14	4	7	11
Ukraine	8	5	8	8	8	8

Prix du magnésium
Marché libre européen

(en dollars/tonne)



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

construction spatiale, l'automobile, l'aéronautique et dans les applications de défense ainsi que pour la production de châssis d'appareils électroniques haut de gamme (appareils photo, ordinateurs portables, tablettes, etc.);

- 15 % pour la désulfuration de l'acier (principal débouché de la poudre de magnésium chinoise);

- 10 % comme réducteur pour la fabrication du titane métal à partir du procédé Kroll (principalement en Russie) dont une partie proviendrait de magnésium recyclé;

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

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

Le principal potentiel de croissance de la demande est l'allègement des équipements automobiles et aéronautiques. Les secteurs des alliages d'aluminium et des moulages sous pression connaissent ainsi des taux de croissance allant de 3 % à 5 % par an, selon Roskill. Le magnésium reste également très utilisé par les principaux producteurs de titane pour l'aéronautique, à savoir la Russie, le Kazakhstan et l'Ukraine. Subissant les effets de la crise sanitaire en particulier sur les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique, la

demande mondiale en magnésium a ainsi montré un fort ralentissement au premier semestre 2020, avant une amélioration au second semestre, tirée par la reprise de l'économie chinoise.

L'essentiel du marché du magnésium est en Chine, avec 87 % de la production mondiale de magnésium primaire en 2020. Dans ce pays, une grande part de la production est toujours réalisée par le procédé «Pidgeon», très énergivore et polluant. Cependant, le gouvernement chinois a intensifié les mesures environnementales en imposant de nouvelles normes sur les émissions de particules et de CO₂. Le procédé Pidgeon sera peu à peu remplacé par d'autres procédés moins polluants. Le procédé Dow permet d'obtenir du magnésium à partir de l'électrolyse du chlorure de magnésium provenant de saumures ou d'eau de mer. Ce procédé est utilisé par l'Israélien Dead Sea Magnesium et l'Australien Magontec en Chine (bassin de Qaidam).

En 2020, la production mondiale de magnésium métal est estimée à 1 Mt (hors États-Unis) selon l'USGS, en baisse de 9 % par rapport à 2019. Des capacités de production se sont toutefois développées hors Chine. Nevada Clean pourrait récupérer 35 000 tonnes par an de Mg de son gisement de dolomie aux États-Unis. L'Australien Latrobe Magnesium a, pour sa part, terminé une étude de

faisabilité en 2019. Il a commencé la construction d'une usine en 2020 et prévoit le démarrage en 2021 d'une production annuelle de 3 000 tonnes à partir du traitement de cendres volantes issues de centrales à charbon. Selon Roskill, ce procédé conduirait à l'émission de 12 tonnes de CO₂ par tonne de magnésium, contre 25 tonnes de CO₂ par tonne de magnésium par le procédé Pidgeon. À terme, l'usine pourrait produire 40 000 tonnes de magnésium par an. Le Canadien Alliance Magnesium a annoncé lui aussi la construction d'une usine en 2020 et la production de 11 700 tonnes par an en 2021 allant vers 50 000 tonnes à terme. Elle serait approvisionnée en énergie par une centrale hydroélectrique.

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

Le magnésium est bien recyclé, avec une production secondaire d'environ 200 000 tonnes à 250 000 tonnes, dont la moitié viendrait des États-

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

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le prix *spot* moyen annuel du magnésium métal sur le marché européen a été de \$ 2 160/t en 2020 en baisse de 12 % par rapport à 2019. Cependant, il avait remonté à plus de \$ 2 400/t fin 2020 en raison du redémarrage de l'économie chinoise puis mondiale.

Malgré une offre de plus en plus diversifiée et une demande solide pour les besoins d'allègement des structures, plusieurs freins industriels demeurent pour étendre encore l'utilisation du

Mercure

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	Production mondiale					
	3 270	2 500	3 800	4 060	3 900	3 700
Argentine			25	25	50	50
Chili						
Chine	2 800	2 000	3 380	3 600	3 600	3 400
Espagne						
États-Unis	15	15	15			
Kirghizistan	40	50	20	20	15	15
Mexique	300	300	197	234	63	60
Norvège			20	20	20	20
Pérou	35	40	40	40	40	40
Russie						
Tadjikistan	30	30	100	100	100	100
Autres pays	60	60	12	20	12	20

(Sources : Mineral Commodity Summaries,

British Geological Survey World Mineral Production pour la production des États-Unis)

magnésium, tels que son inflammabilité et sa corrosion rapide à l'air. 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. Le marché chinois du magnésium devrait rapidement évoluer vers des techniques de production moins polluantes au risque de perdre peu à peu des parts de marché.

Molybdène (Mo)

Par sa température de fusion élevée (2 617 °C), le molybdène 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 sont d'importants atouts dans le domaine des ferro-alliages, où il est largement utilisé pour renforcer la résistance des aciers.

Selon l'Association internationale du molybdène (IMO), la demande mondiale était de

265 000 tonnes de molybdène contenu en 2018. La répartition se décompose comme suit : 82 % pour les aciers, distingués en aciers dits d'ingénierie (42 %), aciers inoxydables (23 %), aciers pour l'outillage (7 %), la production de fonte (7 %) et les superalliages (3 %). Les autres usages du molybdène concernent les composés chimiques (13 %) utilisés principalement pour la fabrication de catalyseurs dans l'industrie du raffinage d'hydrocarbures, des pigments et des peintures et, enfin, le molybdène sous forme métallique (5 %) pour les applications électriques.

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

La consommation de Mo est largement conditionnée par la demande des industries pétrolière, automobile et de construction, qui ont beaucoup souffert en 2020 avec la crise sanitaire causée par le Covid-19. Néanmoins, ces secteurs, en particulier le secteur automobile, devraient retrouver

Molybdène

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

2015 2016 2017 2018 2019 2020

Production mondiale

235 000 279 000 296 600 297 000 294 000 300 000

Argentine		800	450	600		
Arménie	7 200	6 300	5 800	5 000	5 000	7 000
Canada	2 300	2 710	5 290	4 680	3 900	2 700
Chili	52 600	55 600	62 500	60 200	56 000	58 000
Chine	83 000	130 000	130 000	133 000	130 000	120 000
États-Unis	47 400	35 800	40 700	41 400	43 600	49 000
Iran	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500
Mexique	11 300	11 900	14 000	15 100	16 600	17 000
Mongolie	2 000	2 440	1 800	1 800	1 800	1 800
Ouzbékistan	450	450	450	200	200	200
Pérou	20 200	25 800	28 100	28 000	30 400	30 000
Russie	4 500	3 000	3 100	2 800	2 800	2 800
Turquie	900	450	900	900	400	400

Prix du molybdène Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

rapidement une activité normale, soutenant la reprise de la demande mondiale en molybdène. Il existe également un fort potentiel de développement des usages du molybdène avec l'exploitation croissante du gaz naturel liquéfié (GNL). En parallèle, la diminution de l'utilisation des carburants d'origine fossile pourrait jouer à la baisse sur la demande globale dans les années à venir (utilisations dans les aciers de certains composants du moteur et de la transmission).

Les domaines d'utilisation des aciers et alliages au Mo sont extrêmement variés, comprenant également 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. C'est un atout pour la stabilité générale du marché, dont les fondamentaux sont robustes, en particulier sur le marché des aciers inoxydables. La demande dans ce domaine est en particulier tirée par l'amélioration de la qualité des aciers chinois et indiens, 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 2020, la production minière de molybdène a été de 300 000 tonnes selon les données préliminaires de l'USGS. La production minière mondiale provient à 90 % de cinq pays : la Chine (120 000 tonnes, soit 40 %), le Chili (58 000 tonnes, soit 19 %), les États-Unis (49 000 tonnes, soit 16 %), le Pérou (30 000 tonnes, soit 10 %) et le Mexique (17 000 tonnes, soit 5,6 %).

Le molybdène 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. Il peut également être sous-produit ou coproduit 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. De manière générale, les mines exploitant le molybdène en produit principal servent de variables d'ajustement de l'offre face aux baisses de prix du marché, les

mines exploitant en sous-produit pouvant repercuter cette baisse sur les autres métaux associés.

L'USGS évalue les réserves mondiales de molybdène à 18 Mt, dont 8,3 Mt pour la Chine (46 % des réserves mondiales), suivie par les États-Unis (2,7 Mt), le Pérou (2,8 Mt), le Chili (1,4 Mt) et la Russie (1 Mt). 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 depuis 2010. Le prix moyen de l'oxyde technique de molybdène (concentré grillé, 57 % Mo) a été de \$ 19,1/kg en 2020 contre \$ 25,1/kg en 2019, en baisse de 24 %. Du fait de ses usages dans l'industrie de l'énergie, le prix du molybdène est relativement corrélé à ceux du pétrole et du gaz, ainsi qu'aux activités des activités d'exploration (*offshore* et en puits horizontaux), connaissant un certain recul.

En termes d'exploration, à moyen terme, l'ouverture de nouvelles mines de cuivre, stimulée par la demande croissante pour la mobilité électrique et la distribution d'énergie, devrait induire une hausse de la production mondiale de molybdène en sous-produit de ces mines. La tendance semble s'accélérer, en particulier en Amérique du Sud. En revanche, l'un des gros projets emblématiques – Pebble dans le sud-est de l'Alaska – subit de nombreux rebondissements et s'éloigne progressivement d'une mise en production. En novembre 2020, le *US Army Corps of Engineers* a rendu sa

décision finale refusant un permis environnemental clé, mettant en doute l'avenir du projet.

Niobium (Nb)

Le ferroniobium (FeNb) – un alliage qui a une teneur en niobium de 60 % à 65 % – représente environ 90 % des usages du niobium. Il est utilisé principalement dans les aciers à haute limite d'élasticité (HLE), aciers inoxydables, et réfractaires. Du ferroniobium très pur (99 % FeNb), produit sous vide, est utilisé pour les supraconducteurs et les superalliages composant les parties chaudes des réacteurs d'avion et des turbines à gaz, ainsi que des réacteurs nucléaires. Les superalliages et les supraconducteurs représentent respectivement 9 % et 2 % du marché selon Niobec. Le niobium métal n'est utilisé que de manière très minoritaire pour la catalyse, les céramiques et en joaillerie.

De nouveaux usages sont en développement, notamment dans le secteur des batteries. Selon Roskill, le marché du niobium dans les batteries pourrait atteindre 3 000 tonnes de niobium contenu d'ici 2025. Un autre marché potentiel de croissance est celui du niobium nanocristallin, actuellement estimé à 1 200 tonnes de Nb contenu.

Pour l'année 2020, la production mondiale du niobium est estimée à 78 000 tonnes par l'USGS, soit une réduction de – 20 % par rapport à 2019

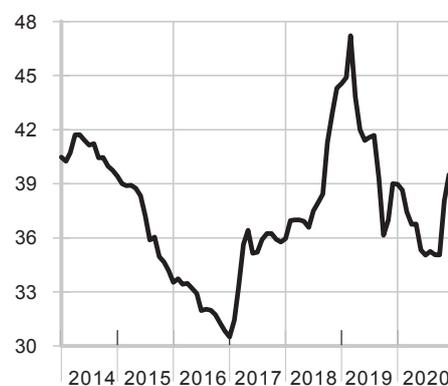
(réévaluation par l'USGS à 97 000 tonnes en 2019 au lieu des 74 000 tonnes initialement annoncées). Le producteur dominant de ce marché est le Brésil qui compte pour 91 % de la production totale. L'industrie du niobium est fortement intégrée, avec pour principal acteur la société brésilienne CBMM. Sa mine principale est la mine d'Araxá, dans l'État du Minas Gerais, avec une capacité de 59 000 t Nb/an. Deuxième source mondiale, la mine de Boa Vistas est également située au Brésil, dans l'État de Goiás. Elle est exploitée depuis 2016 par la société d'État China Molybdenum, avec une capacité d'environ 9 000 t Nb/an. Au Canada, Magris Resources (ex Niobec) exploite une mine située au Québec, avec une production estimée à 6 200 t Nb, soit 8 % de la production mondiale. Aux États-Unis, la mine d'Elk Creek (Nebraska) est en passe de démarrer la production avec 7 220 t/an de FeNb à 65 %, ce qui représenterait la première production de niobium du pays depuis 1959. Ce projet est très important pour les États-Unis, car il permet de défendre leur indépendance sur une ressource minérale particulièrement critique. Le complément de l'offre minière mondiale est issu de l'exploitation artisanale – où le niobium et le tantale sont portés par une association colombite-tantalite (coltan) –, en particulier au Nigeria, au Rwanda, en République démocratique du Congo et en Sierra Leone. Les minerais

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	64 300	63 900	69 100	68 200	97 000	78 000
Brésil	58 000	57 000	60 700	59 000	88 900	71 000
Canada	5 750	6 100	6 980	7 700	6 800	6 200
Autres pays	570	800	1 410	1 460	1 250	1 000

Prix du ferro-niobium 65 % Nb
Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

issus du Nigeria contiennent une part de radioactivité qui crée de lourdes contraintes pour l'exportation de concentrés.

Selon l'USGS, les réserves connues de niobium seraient supérieures à 17 Mt. Le plus grand gisement mondial connu est Seis Lagos, dans l'État brésilien d'Amazonas, avec une ressource d'environ 57 Mt.

Des stocks stratégiques de 542 tonnes de ferri-niobium et de 10 tonnes de niobium métal seraient détenus par les États-Unis selon l'USGS.

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 ferri-niobium (65 % Europe) s'établissait à \$ 36,82/kg, en baisse de 11,4 % par rapport à 2019. Il est remonté à plus de \$ 40/kg début 2021.

Le ferri-niobium est substituable par le ferrovandium et l'utilisation de l'un ou de l'autre est à quelques détails techniques près une question de prix. Le niobium est recyclé, mais n'est pas séparé lors du recyclage des aciers et superalliages.

En 2021, CBMM devrait étendre sa capacité de production à 150 000 t de FeNb (soit environ 90 000 t de Nb contenu). La compagnie envisagerait par la suite une nouvelle expansion à 225 000 t FeNb, si la croissance de la demande de l'industrie sidérurgique se poursuit.

Rhénium (Re)

Le rhénium n'est obtenu qu'en sous-produit du molybdène, lui-même en grande partie sous-produit du cuivre. C'est un métal très réfractaire avec une température de fusion de 3 180 °C, la plus élevée des métaux après le tungstène. Les principales applications du rhénium sont de deux types : au sein de superalliages et en catalyse dans l'industrie pétrolière. L'une des particularités de ce marché est la quasi-absence d'acteurs chinois le long de la chaîne de valeur, fait rare dans le monde des petits métaux.

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

Le 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 entre 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 et la longévité de ces pièces, tout en diminuant la consommation en kérosène. La consommation de Re est ainsi largement conditionnée par la demande en superalliages de l'industrie aéronautique. Cette dernière ayant été fortement touchée par la crise sanitaire en 2020, une baisse de la consommation mondiale est à attendre à court terme. Une reprise peut être espérée d'ici trois à quatre ans, malgré une tendance à l'abaissement de la teneur en rhénium des superalliages monocristallins. La demande de l'aviation militaire devrait être un fort moteur de reprise de la croissance de la demande mondiale.

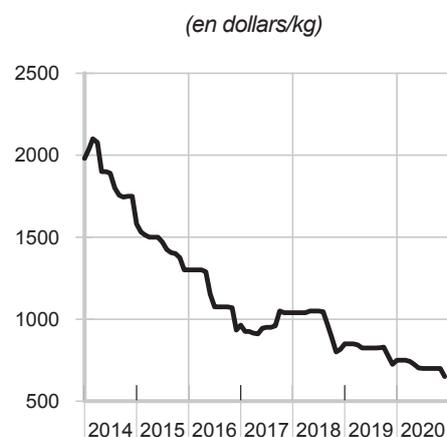
En pétrochimie, le rhénium est l'un des catalyseurs clés dans les réactions de reformage catalytique du pétrole, opération chimique servant à valoriser une fraction du pétrole (le naphta lourd) en essence. La demande de rhénium dans cet usage reste stable, la part des substituts comme les catalyseurs à base de platine n'ayant pas augmenté significativement.

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). La production de rhénium a été estimée à 53 tonnes en 2020, selon les données préliminaires de l'USGS. L'industrie est fortement concentrée. Les principaux producteurs de rhénium sont en effet Molymet et Codelco au Chili. Ils totalisent une offre de 27 tonnes de rhénium récupérées dans les résidus de fonderie de leurs opérations à travers le monde (incluant également celles de Belgique, du Mexique et du Pérou). En Pologne, l'acteur KGHM a produit 8,3 tonnes de rhénium en 2020, suivi par Freeport McMoran, aux États-Unis, avec 7,8 tonnes. Les producteurs de moindre impor-

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	49 400	51 600	48 700	48 600	53 200	53 000
Arménie	350	350	300	281	280	280
Chili	26 000	27 000	27 000	27 000	30 000	30 000
Chine	2 400	3 000	2 500	2 500	2 500	2 500
Corée du Sud					2 800	2 700
États-Unis	7 900	8 440	8 200	8 220	8 360	7 800
Kazakhstan	1 000	1 000	1 000	1 000	500	1 000
Ouzbékistan	1 000	1 000	460	460	460	460
Pologne	8 900	9 000	9 300	9 090	8 340	8 300
Autres pays	1 800	1 800				

Prix du rhénium
Marché libre européen



(Source : Mineral Commodity Summaries)

tance sont situés en Chine, en Corée du Sud et au Kazakhstan, notamment.

L'USGS évalue avec de grandes incertitudes les réserves mondiales de rhénium à 2 500 tonnes, dont 1 300 tonnes pour le Chili (53 % des réserves mondiales). Les autres pays détenteurs de réserves significatives sont les États-Unis avec 400 tonnes, la Russie (310 t) et le Kazakhstan (190 t).

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

- rhénium métal (pellets à 99,9 % Re) : prix moyen en 2020 de \$ 1 000/kg, en baisse de 30 % par rapport à 2019 ;

- perrhénate d'ammonium (APR), *basic grade* (69,2 % Re) : prix moyen en 2020 de \$ 714,2/kg, en baisse de 13 % par rapport à 2019 (\$ 820,8/kg) ;

- perrhénate d'ammonium (APR), *catalyst grade* (>69,2 % Re) : prix moyen en 2020 de \$ 1 100/kg, en baisse de 15 % par rapport à 2019.

Les filières de recyclage du rhénium représentent désormais près de la moitié de l'approvisionnement total. Les principaux producteurs de rhénium secondaire se situent au Japon, en Allemagne, aux États-Unis ainsi qu'au Kazakhstan, en Ouzbékistan et en Arménie. En France, un acteur est concerné avec l'entreprise Eurotungstène Poudres, désormais filiale d'Umicore. Les pièces contenant du rhénium dans des superalliages à base

de nickel sont recyclées en boucle courte et en fin de vie. Le recyclage des superalliages concerne donc principalement les turbines d'avions ainsi que les pales et vanes de turbines à gaz, ce qui représente entre 15 et 20 tonnes de composés de rhénium par an. Seul le recyclage de superalliages fournit du rhénium métal ou du perrhénate d'ammonium (APR), directement disponibles sur le marché.

Cependant, la baisse continue des prix met en péril jusqu'aux filières de recyclage. Ainsi, l'entreprise Umicore a fermé en juin 2020 ses activités de recyclage du rhénium dans son usine de Wickliffe (Ohio) pour des raisons de rentabilité (capacité de 7 t/an), suivant les exemples précédents de l'entreprise Hootech en Chine ainsi que Nordmet et KLS en Estonie ayant cessé leur production de rhénium secondaire en 2018 (environ 3 t/an). Roskill estime que la production de rhénium secondaire a diminué de 40 % entre 2014 et 2019.

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

neur en rhénium des superalliages monocristallins à 1,4 %-1,6 % Re. Cette tendance à l'abaissement de la teneur en rhénium des superalliages ainsi que l'importance croissante des filières de recyclage du rhénium pourraient créer un contexte défavorable à la croissance de la production primaire.

L'un des seuls projets d'exploration avancée est le projet Merlin dans le nord-ouest du Queensland (Australie), développé par Chinova Resources. Le potentiel serait une production de 7 300 kg/an Re et 5 100 t/an Mo. Le projet semble néanmoins à l'arrêt depuis 2014.

Scandium (Sc)

Souvent classé parmi les terres rares, le scandium a pourtant des caractéristiques géologiques et industrielles distinctes, en particulier du fait de son très faible rayon ionique. Ses autres particularités sont une faible densité (2,99 g/cm³, proche de celle de l'aluminium) et un haut point de fusion (1 541 °C).

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

Les concentrations naturelles de scandium dans la croûte terrestre sont trop faibles pour for-

mer, 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 (acier, tungstène, titane, nickel, cobalt, zirconium, étain, uranium), voire dans les filières de transformation du charbon et des phosphates. Les chiffres de production sont très incertains et ne sont pas directement estimés par l'USGS. Une quantité de 15 à 20 tonnes serait produite mondialement, principalement sous forme d'oxyde de scandium (Sc₂O₃). Quelques dizaines de kilogrammes seraient effectivement transformés en scandium métal.

La production chinoise s'élèverait à 10 tonnes par an d'oxyde de scandium (Sc₂O₃), en tenant compte de la production de scandium *via* la récupération des déchets issus de la fabrication des oxydes de titane, de terres rares, et de l'acier. Aux Philippines, l'opérateur japonais Sumitomo, exploitant le cobalt et le nickel latéritique par un procédé de lixiviation acide à haute pression (HPAL), a commencé la récupération du scandium avec la production d'un concentré intermédiaire (oxalate de scandium), converti en oxyde à la raffinerie Harima au Japon. 5,7 tonnes d'oxalate de scandium auraient été produites en 2020 selon l'USGS, allant vers une production annuelle de 7,5 tonnes de Sc₂O₃. Le Kazakhstan, l'Ukraine et la Russie produiraient quelques tonnes par an de Sc₂O₃, principalement à partir des résidus miniers d'uranium et lors du traitement de phosphates.

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

Le scandium peut être substitué par l'yttrium pour certaines applications, notamment les piles à combustible. Une très faible quantité de scandium se retrouve dans l'aluminium recyclé, sans qu'il soit séparé. En Europe, le projet de recherche européen SCALE vise à développer un procédé de récupération du scandium dans la filière de fabrication du dioxyde de titane.

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. Investing News estime le prix de l'oxyde de scan-

dium entre \$ 3 000/kg et \$ 5 000/kg, alors que le prix du scandium métal pur s'élèverait à plus de \$ 100 000/kg, soit deux fois plus cher que l'or. Enfin, l'hypothèse moyenne prise par l'entreprise CleanTeQ pour l'évaluation économique de son projet Sunrise en Australie est de \$ 1 500/kg Sc_2O_3 .

En 2020, les développements visant à augmenter la production de scandium montraient que le marché se préparait à éclore. Rio Tinto devrait commencer fin 2021 la production de 3 t/an d'oxydes de scandium de haute pureté (99,99 %) à partir de ses résidus de production de dioxyde de titane. En Russie, les recherches pour la récupération du scandium sont concentrées sur le traitement des boues rouges issues du raffinage de l'alumine, notamment par la compagnie Rusal, l'un des premiers producteurs d'aluminium au monde. Dans les monts Oural, une usine pilote a engagé une étude de faisabilité pour la production annuelle de 3 tonnes de Sc_2O_3 . Aux États-Unis, Elk Creek (Société Niocorp) est sur le point de démarrer la production de ferroniobium en 2021, avec des réserves probables de près de 2 400 tonnes de Sc à extraire en coproduit. La rhyolite de Round Top (Texas) contient également du scandium. Ce projet pourrait être relancé par la compagnie Texas Mineral Resources, qui a par ailleurs démontré la production de terres rares, dont du scandium, à partir de résidus miniers du charbon. Ucore Rare Metals continue le développement de son projet Bokan en Alaska. En Australie, s'il n'y a aucune production minière de scandium à ce jour, une petite dizaine de projets sont à des stades très avancés et pourraient faire de l'Australie le premier producteur mondial dans les prochaines années. Parmi ces derniers, quatre se distinguent par leur avancement :

- le projet Nyngan de la compagnie Scandium International Mining Corp, ayant reçu un jugement favorable dans un conflit foncier. Dans les années qui viennent, ce projet pourrait produire 38,5 t/an Sc_2O_3 ;

- le projet Sunrise (anciennement Syerston), de la compagnie Clean Teq, ayant finalisé une étude de faisabilité définitive permettant d'entamer la période de financement du projet. La production de Sc_2O_3 initiale de 20 t/an pourrait monter à 150 t/an, en sous-produit du nickel et du cobalt. Les réserves prouvées et probables seraient de 6 700 tonnes de Sc contenu, soit la plus grande

ressource mondiale en scandium publiquement documentée à ce jour. La récupération du scandium devrait démarrer quelques années après la mise en place des circuits principaux de traitement du minerai de nickel-cobalt, en fonction de l'évolution de la demande ;

- le projet SCONI (Scandium-Cobalt-Nickel) de la compagnie Australian Mines Limited qui borde un terrain militaire, ayant reçu une autorisation d'accès à la ressource fin 2020. Une production annuelle de 74 tonnes était prévue en 2019, pour une durée de vie de trente ans ;

- le projet Owendale de Platina Resources, ayant terminé une étude de faisabilité en 2018. Platina recherche maintenant des clients potentiels. Il est prévu une production de 20 à 40 t/an Sc_2O_3 extraites en coproduit du cobalt et du nickel par HPAL. Les réserves seraient de 3 500 t Sc_2O_3 .

Sélénium (Se)

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 3 000 tonnes et se répartit 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,
- 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. C'est son principal secteur d'utilisation, dont la majeure partie a lieu en Chine.

L'autre usage important du sélénium concerne l'industrie du verre. Le sélénium y est utilisé pour décolorer les verres (neutralisation des teintes verdâtres due 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, marché en constante augmentation à l'échelle mondiale.

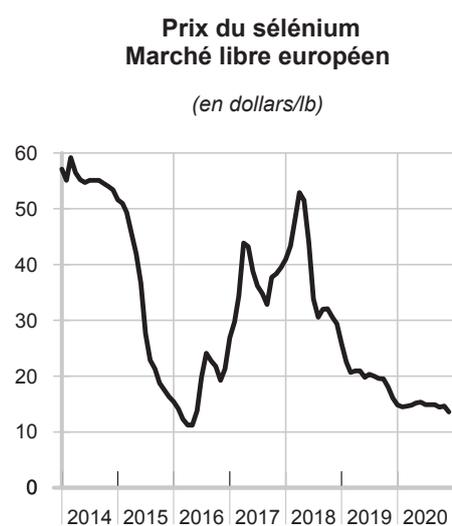
Le sélénium rentre aussi dans la composition des redresseurs de courant, des cellules photoélectriques et des cellules photovoltaïques en couches minces (CIS – diséléniure de cuivre et d'indium – et CIGS – disulfoséléniure de cuivre, d'indium et de gallium). Malgré une utilisation aujourd'hui très minoritaire des technologies photovoltaïques en couches minces vis-à-vis de cellules photovoltaïques au silicium, ces dernières continuent néanmoins à être utilisées pour les applications requérant une plus grande flexibilité et un plus haut rendement. Le sélénium est enfin utilisé comme

oligo-élément et ajouté dans les engrais et dans l'alimentation animale.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production raffinée de sélénium mondiale a été estimée à 2 900 tonnes en 2020, quasiment égale à 2019 (2 880 t). Les données concernant les États-Unis sont gardées confidentielles. Les principaux producteurs mondiaux sont la Chine (1 100 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 sulfurés, de plomb ou de zinc. Cependant, il n'existe pas de production minière de sélénium. Il est récupéré essentiellement lors du retraitement des boues anodiques issues du raffinage du cuivre, et minoritairement en sous-produit des gisements de plomb-zinc. Ce phénomène explique la corrélation entre les pays producteurs de sélénium et les fonderies/raffineries de cuivre. Dans la plupart des cas, la production est assurée par traitement des boues

	Sélénium (en tonnes)					
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	Production mondiale de métal					
	2 200	3 270	2 700	2 810	2 880	2 900
Allemagne	660	700	300	300	300	300
Belgique	200	200	200	200	200	200
Canada	154	176	49	61	57	60
Chili						
Chine		920	930	930	1100	1100
États-Unis	90	116	122			
Finlande	94	96	105	100	115	100
Inde						
Japon	773	752	729	768	740	750
Pérou	40	45	45	45	40	40
Philippines						
Pologne	90	87	88	76	64	65
Russie	135	145	150	150	150	150
Serbie						
Suède		100	20	90	19	20
Turquie			50	50	50	50
Autres pays	50	47	47	44	45	45



(Source : U.S. Geological Survey Minerals Yearbook)

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 et le Japon sont les acteurs dominants du raffinage du cuivre, certains acteurs européens étant également importants : Allemagne (Aurubis), Belgique (Umicore), Finlande (Boliden), Pologne (KGHM), 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 100 000 t Se, dont 26 000 tonnes en Chine (26 % des réserves mondiales). Les autres pays détenteurs de réserves significatives sont la Russie, le Pérou et les États-Unis avec respectivement 20 %, 13 % et 10 % des réserves mondiales, selon ces données.

Lors de la chute de la bourse du *Fanya Metal Exchange* en 2015, le gouvernement chinois avait reporté des stocks de sélénium de 337,8 tonnes, soit environ un mois de la production mondiale de 2018. Ces stocks ont été acquis par la société chinoise Vital Materials fin 2019 (voir la section consacrée à l'indium).

Le prix du sélénium est établi par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen du sélénium (teneur de 99,5 %) en 2020 a été de \$ 14,7/kg, en baisse de 28 % par rapport à 2019 (\$ 20,4/kg). Il semblerait que l'augmentation de la production de manganèse électrolytique en Chine ait été un facteur significatif de hausse des prix entre 2016 et 2018. Ces prix haussiers ont conduit à une surproduction ponctuelle de sélénium. L'écoulement progressif de ces stocks explique un retour à des niveaux de prix bas en 2019 et 2020. Comme de nombreux autres secteurs en Chine, la pandémie de Covid-19 a stoppé la production de dioxyde de sélénium début janvier 2020 pour une reprise relativement rapide, fin février. Depuis, les utilisateurs de sélénium ont diminué leurs achats au profit des stocks accumulés précédemment auprès des producteurs de cuivre, ce qui devrait peser sur les prix encore quelques mois.

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, en pigmentation (et autres) n'est pas récupérable.

Les risques sur le marché du sélénium apparaissent aujourd'hui faibles avec un approvisionnement plus que 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 qui maintiennent la croissance, notamment portée par l'urbanisation et le développement du parc automobile mondial.

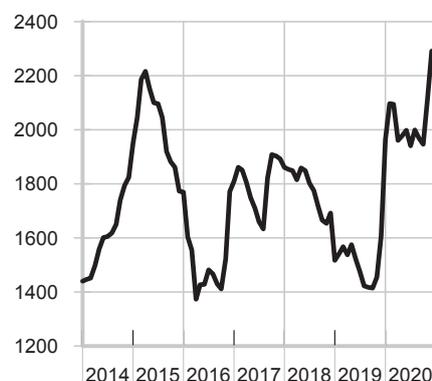
Silicium métal (Si)

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant dans l'écorce terrestre après l'oxygène (concentration de 28 %). Il est utilisé dans de très nombreux domaines où il se trouve soit sous forme oxydée, soit en combinaison avec d'autres éléments chimiques. Dans ce chapitre, seul le marché de la forme pure (> 98 % Si) dite silicium « métal » est abordé.

Le silicium métal est principalement utilisé dans les alliages d'aluminium Al-Si (43 %) et les silicones (32 %). Cependant, il est aussi connu comme l'élément phare des cellules photovoltaïques (17 %) et des semi-conducteurs (6 %), dont les croissances ont été très fortes et sont amenées à se maintenir au cours des années à venir. Les alliages Al-Si sont très utilisés dans tous les types de véhicules, qu'ils soient terrestres, marins, ou aériens, mais également dans le bâtiment, les équipements ménagers, les câbles électriques, et les emballages. Allié à l'aluminium, le silicium améliore la coulabilité et réduit le coefficient de dilatation thermique. Pour la fabrication des silicones, le silicium métal est transformé en gaz pour former des chaînes Si-O qui donnent un polymère ayant une consistance de gel, de résine ou de gomme. Dans les cellules photovoltaïques, les propriétés semi-conductrices du silicium permettent l'effet photoélectrique nécessaire à la production d'électricité. Dans la microélectronique, les propriétés semi-conductrices du silicium sont fondamentales pour le fonctionnement des circuits intégrés, le stockage et la transmission d'informations. Son coût réduit lui a permis de devenir

Silicium (en milliers de tonnes)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale						
	7 630	7 600	6 600	7 400	8 410	8 000
Afrique du Sud	84	85	65	65	96	96
Bhoutan	78	69	55	90	90	85
Brésil	117	110	170	220	340	340
Canada	54	51	54	57	57	57
Chine	5 000	5 000	4 000	4 800	5 700	5 400
Espagne	81	81	69	69	66	66
États-Unis	411	384	415	430	310	290
France	121	120	126	140	130	130
Inde	60	59	59	57	60	55
Islande	75	79	76	83	88	87
Malaisie		82	113	140	150	130
Norvège	375	380	375	370	375	330
Russie	747	750	670	600	610	540
Ukraine	59	66	60	49	63	60
Autres pays	368	310	274	290	278	290

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

majoritaire par rapport à d'autres semi-conducteurs tels que le germanium, bien que ce dernier revienne peu à peu dans les techniques de pointe. La consommation de silicium métal a été en forte hausse sur la période 2010-2019 (+ 6,3 % par an), notamment en raison d'une demande forte pour les cellules solaires. Elle est légèrement inférieure à 3 Mt en 2020.

Le silicium est produit par la réduction de la silice (SiO_2) dans un four à arc électrique en présence de charbon et, parfois, de copeaux de bois. En fonction de la technicité de l'application, le silicium métal doit être raffiné à différents niveaux de pureté : 98-99 %, pour la qualité métallurgique (MG) ; 99,9999 %, ou «6N», pour la qualité solaire (SoG) ; et jusqu'à 99,9999999 %, ou «9N», pour la qualité électronique (EG). La majorité des cellules photovoltaïques utilisent du silicium SoG. Celui-ci s'obtient à partir de silicium MG, après distillation du trichlorosilane (SiHCl_3), puis décomposition en présence d'hydrogène (procédé Siemens). Il peut également être obtenu en lit fluidisé ou par affinage métallurgique (qualité métallurgique améliorée). Le polysilicium est ensuite transformé en lingot multi ou monocristallin. En 2020, les cellules au Si monocristallin deviennent

majoritaires et leur développement continue. Le silicium EG, quant à lui, passe nécessairement par une forme monocristalline (méthode de Czochralski ou zone fondue flottante).

L'USGS estime une production de matériaux à base de silicium de 8 Mt tous matériaux confondus, avec un recul global de 5 % en 2020. La production de silicium métal n'est, à ce stade, pas connue, mais devrait se situer aux alentours des 3 Mt, proche du niveau de 2019, tout comme la production de polysilicium autour de 520-530 kt. Les premiers producteurs de silicium métal ont été la Chine, le Brésil, la Norvège et la France. La Chine continue de développer ses capacités de production massivement et étend encore son pouvoir sur ce marché. Selon Roskill, elle a produit près de 73 % du silicium métal mondial en 2020.

Les ressources en silicium sont considérées comme très importantes en raison de l'omniprésence de la silice et des minéraux silicatés sur Terre. En revanche, toutes les sources de silicium ne sont pas exploitables et seuls quelques rares gisements fournissent une roche adaptée à la carboréduction en four. Les réserves de silicium ne sont généralement pas communiquées par les opérateurs.

Le silicium métal est très peu recyclé dans les produits en fin de vie. Une partie du polysilicium est recyclée en boucle courte lors de la découpe des lingots et des wafers. La fumée de silice, co-produit de la métallurgie du silicium sert de charge minérale améliorant les propriétés de certains bétons. Dans les cellules photovoltaïques et les composants électroniques, le silicium n'est pour l'instant 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 \$ 2029/t en 2020, en hausse spectaculaire de 35 % par rapport à 2019. Ces prix devraient inciter les acteurs hors Chine à redémarrer les nombreuses usines mises à l'arrêt, au risque que la Chine, forte de ses surcapacités, fasse de même et casse à nouveau les prix.

Tantale (Ta)

Le tantale fait partie du groupe des métaux réfractaires avec une température de fusion de 3017 °C. C'est aussi un métal particulièrement dense (16,7), très résistant à la corrosion par les acides, et doté d'une permittivité élevée. Cette dernière propriété permet la fabrication de condensateurs électroniques de très faibles volumes et robustes, principale application mondiale du tantale. Sa dureté et sa résistance à la chaleur sont également prisées pour les superalliages et les outils de coupe (carbures).

Le tantale est utilisé dans des secteurs variés. Environ 43 % du tantale est consommé sous forme de poudre à destination des condensateurs (34 %) et de la métallurgie pour la fabrication de creusets, prothèses ou échangeurs thermiques (9 %). Les autres principaux usages du tantale sont les composés chimiques (20 %) utilisés pour la protection galvanique des bateaux, les superalliages (18 %), les cibles de pulvérisation et notamment le dépôt

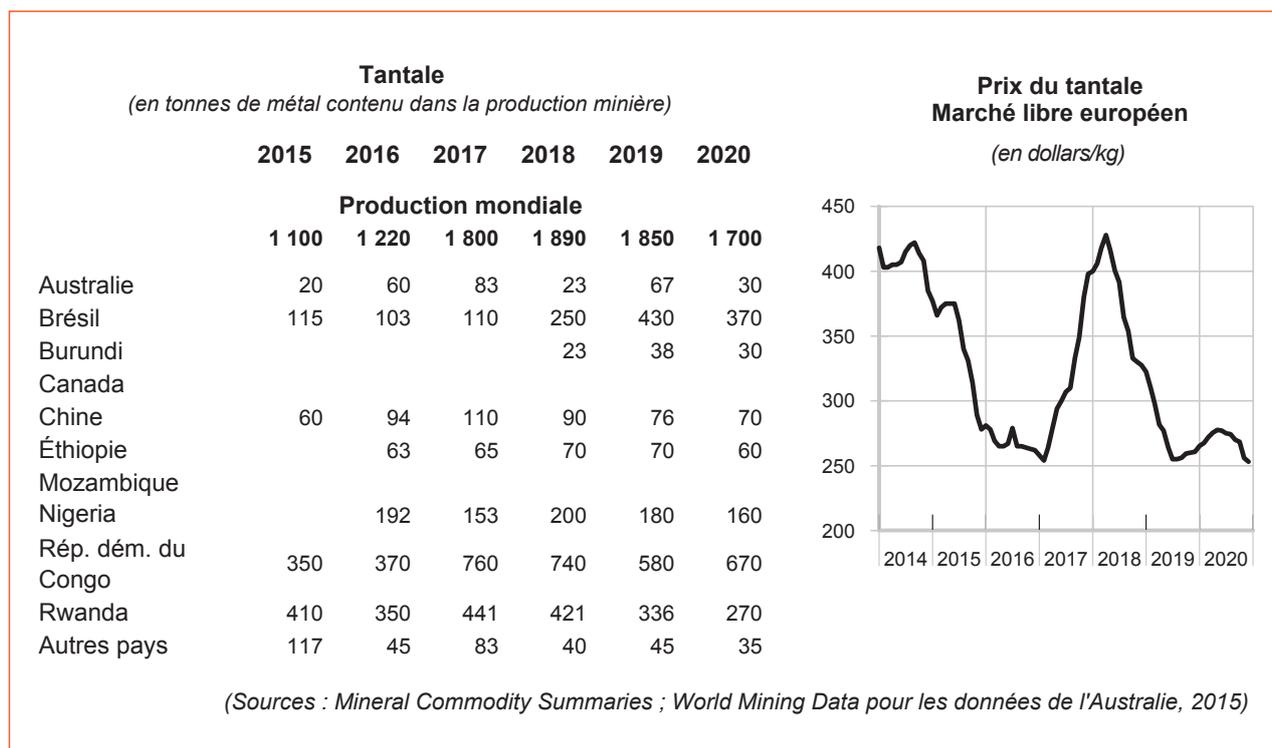
de couches minces de nitrure de tantale pour lutter contre la corrosion (14 %), et enfin les carbures pour outils de découpe ou revêtement de moules en acier (5 %).

L'industrie aéronautique ayant été fortement touchée par la crise sanitaire en 2020, une baisse de la consommation de tantale dans ce secteur est à attendre à court terme. Une reprise peut être espérée d'ici trois à quatre ans. La demande de l'aviation militaire pourrait également être un moteur de reprise à plus court terme.

En revanche, la consommation accrue des technologies de l'information et de la communication liée à la pandémie de Covid-19 a eu un fort impact sur le secteur de l'électronique. Si les condensateurs multicouches en céramiques (MLCC) continuent de dominer assez largement le marché pour des critères de coûts et de disponibilité, la demande en condensateurs au tantale a augmenté avec l'utilisation accrue des appareils nomades (ordinateurs, tablettes, etc.). À moyen terme, le déploiement des réseaux de communication 5G et des usages qui en dépendent comme l'électronique automobile ou le stockage de données va continuer de tirer la demande en tantale vers le haut. Les consultants Prismark Partners estiment même une croissance de 15 %/an d'ici 2024 des ventes d'appareils électroniques portatifs utilisés dans de nombreux secteurs.

En 2020, la production mondiale serait de 1 700 tonnes de Ta métal contenu, selon l'USGS. Cependant, les statistiques concernant l'extraction minière du tantale sont très peu précises. Selon les données de l'USGS, la République démocratique du Congo (RDC), le Brésil et le Rwanda sont les principales sources de tantale mondiales en 2020. 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 670 tonnes de Ta contenu pour la RDC (40 %) et 270 tonnes de Ta pour le Rwanda (16 %). Le Brésil (22 %) reste le deuxième producteur mondial, suivi du Nigeria (9 %) et de la Chine (4 %).

La production mondiale a diminué de 8 % sur un an en partie à cause des fermetures temporaires de mines au Brésil et au Rwanda, en conséquence de la crise sanitaire. En outre, les prix relativement bas du tantale et du lithium ont pesé sur la pro-



duction mondiale, et notamment celle de l'Australie où plusieurs mines de lithium ont été placées en sommeil (*care & maintenance*) pour quelque temps. Néanmoins, la production de tantale a bien repris au troisième trimestre 2020, même si les livraisons maritimes en provenance d'Afrique et à destination de l'Asie restent compliquées dans un contexte de pandémie.

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 2020, le prix annuel moyen du tantale métal (Ta 99,8 % EU) s'est établi à \$ 269/kg, en baisse de - 2 % par rapport à 2019 (\$ 275/kg).

Cette baisse, qui se poursuit depuis plusieurs années, s'explique entre autres par la disponibilité plus importante de tantale sur le marché international depuis 2018. En effet, si la répartition de la production mondiale de tantale penchait depuis quelque temps en faveur des sources artisanales d'Afrique centrale, l'exploitation de pegmatites géantes en Australie a connu un regain du fait de la croissance très rapide de la demande en lithium. Or, les minerais concernés sont des sources importantes de tantale en sous-produit, voire en coproduit. L'offre australienne est ainsi devenue

une compétition grandissante à la production de tantale du Rwanda et de RDC, en défaveur de ces derniers. En effet, les crédits obtenus par la coproduction du lithium permettent des coûts de production très bas. De plus, l'avantage du minerai australien, malgré des contraintes de radioactivité, est d'être indéniablement estampillé « sans-conflit », critère pénalisant les sources d'Afrique centrale.

Par ailleurs, des restrictions sur l'approvisionnement pourraient se développer. Ainsi, le Département américain de la Défense a publié une loi provisoire interdisant aux entreprises américaines d'acquérir des composés du tantale ou du métal en provenance de Chine, d'Iran, de Corée du Nord et de Russie.

Le tantale ne peut pas être substitué dans les microcondensateurs sans une forte perte de performances. Les condensateurs MLCC ou au niobium sont cependant des alternatives moins coûteuses. Les superalliages peuvent être recyclés par des entreprises spécialisées, en particulier aux États-Unis et en Europe du fait du poids de l'industrie aéronautique. Il existe aussi du recyclage de tantale à partir des déchets en boucle courte (*new scrap*), générés durant la fabrication de produits électroniques et de matériaux utilisant le tantale.

En fin de vie, ce recyclage est plus compliqué, mais reste un axe de développement, notamment celui des cartes électroniques.

Les réserves mondiales de tantale dépassent 140 000 t, les seules données accessibles et vérifiables ne concernant que l'Australie (99 000 t Ta selon l'USGS) et le Brésil (40 000 t Ta). Les ressources en terre sont donc vraisemblablement bien supérieures, notamment au Canada et aux États-Unis (55 000 tonnes identifiées par l'USGS). Leur mise en production potentielle dépendra des conditions économiques du marché.

À l'échelle mondiale, les perspectives pour la demande en tantale sont positives, avec une croissance moyenne de 5 à 6 % par an d'ici 2027. 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 du tantale. Le développement futur de ces derniers sera axé sur le remplacement de plusieurs MLCC par un seul condensateur au tantale pour un gain de performance et de poids. 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)

Le tellure est un élément très rare dans l'écorce terrestre (1 ppb – 1 partie par milliard). Il est essentiellement extrait en sous-produit de la métallurgie du cuivre. Il est souvent associé au sélénium avec lequel il partage des propriétés chimiques voisines. Le tellure est utilisé pour ses propriétés semi-conductrices, photosensibles et photoélectriques.

Le principal usage est la production de panneaux photovoltaïques à couches minces au tellure de cadmium (CdTe). Selon l'USGS, il représentait 40 % de la consommation en 2020. Le tellure est aussi utilisé dans les générateurs ther-

moélectriques (30 %) et en métallurgie (15 %) en tant qu'additif pour accroître l'usinabilité de métaux comme l'acier ou le cuivre. Le tellure de bismuth a la particularité de pouvoir transformer la chaleur en électricité (effet Peltier). Cette propriété est utile dans les systèmes réfrigérants portables (utilisés pour le séquençage de l'ADN, par exemple). Les autres procédés ou produits consommant du tellure incluent la vulcanisation du caoutchouc (5 %), l'imagerie thermique, les capteurs pour l'imagerie spatiale, les détecteurs de rayons X, les colorants pour l'industrie céramique, les capteurs biologiques et les biocides (10 %).

Selon le Fraunhofer ISE, la technologie photovoltaïque à couches minces CdTe représentait près de 4 % de la puissance photovoltaïque fabriquée dans le monde en 2019, soit 5,7 GWc (gigawatt-crête) ou deux fois plus qu'en 2018. L'Américain First Solar a été un des moteurs de cette augmentation et devrait continuer son expansion en 2021 en visant une production de 8 à 9 GWc/an de modules (augmentation de 25 %). Il a cependant vendu ses activités de production d'électricité à NovaSource en 2020 pour se focaliser sur la vente de modules et de centrales. Le marché des modules au CdTe est donc dynamique, à l'image de la construction d'une centrale de 300 MW fin 2021 par le Chinois CNBM. Début 2020 et avant la pandémie, l'Allemand Calyxo (seul Européen) s'est de manière surprenante déclaré en faillite. Ceci était probablement lié aux prix en chute libre des panneaux au silicium en 2019. Il faudrait actuellement de 70 tonnes à 90 tonnes de tellure pour produire 1 GW de modules photovoltaïques CdTe. Une fabrication annuelle de 9 GW de modules (First Solar et CNBM) demanderait donc entre 630 et 810 tonnes de tellure, uniquement pour le secteur du solaire. Une hausse de la demande pourrait être couverte partiellement ou en totalité grâce à l'expansion des capacités de récupération de tellure dans les résidus de métallurgie du cuivre.

Le tellure, possédant des propriétés chimiques similaires à celles du soufre, se concentre préférentiellement dans les sulfures des gisements de cuivre, nickel-cuivre sulfurés ou plomb-zinc. Plus de 90 % du tellure est produit à partir de boues anodiques collectées lors du raffinage électrolytique du cuivre. Le reste provient des écrémages des

Tellure					
<i>(en tonnes de métal raffiné)</i>					
	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale					
	410	518	460	520	490
Afrique du Sud		7	6	8	5
Bulgarie	4	5	5	4	5
Canada	18	49	25	40	35
Chine	280	290	280	325	300
États-Unis	50	50			
Japon	33	38	58	50	50
Russie	35	44	42	52	50
Suède	39	35	45	41	40

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

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) ou au Canada.

Alors qu'en 2020 la production de tellure mondiale (hors États-Unis) a été estimée par l'USGS à 490 tonnes, la *Minor Metals Trade Association* (MMTA) indiquait, elle, une production mondiale annuelle de plus de 835 tonnes, incluant de nombreux pays producteurs ne publiant pas leur production annuelle (Australie, Belgique, Chili, Colombie, Allemagne, Kazakhstan, Mexique, les Philippines, et la Pologne selon l'USGS). Les producteurs de tellure sont principalement les pays producteurs de cuivre raffiné : la Chine, le Japon, la Russie, les États-Unis, la Suède, le Canada, l'Afrique du Sud et la Bulgarie.

Certains projets de récupération du tellure sont en cours. On peut citer, par exemple, le projet indien de raffinerie de cuivre Mundra porté par Adani Enterprises, qui pourrait récupérer 96 tonnes de tellure par an. GGX Gold, quant à lui, a mesuré de fortes teneurs de tellure (avec une concentration entre 0,5 kg/t et 4 kg/t selon Argus Metals) sur son projet de Gold Drop (cuivre, or, argent) dans la province canadienne

de Colombie-Britannique. S'il se concrétisait, ce projet serait un candidat possible pour approvisionner First Solar en CdTe *via* son partenaire canadien 5N Plus.

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

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

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. En 2020, le prix *spot* du tellure (99,99 % Europe) a continué de baisser avec un prix annuel moyen de \$ 56/kg. Un engouement sur le marché des cellules à CdTe semble être le prin-

principal moteur de la croissance de consommation du tellure à court terme.

Terres rares

Les terres rares (TR) sont un ensemble de seize éléments métalliques : les lanthanides et l'yttrium, en excluant le scandium (voir la section consacrée à cet élément), 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.

Le principal moteur de la demande mondiale en TR est leur utilisation au sein d'aimants permanents de haute performance néodyme-fer-bore (NdFeB), représentant 91 % de la valeur totale du marché. En moyenne, la demande en TR progresse de 8 % à 10 % par an et devrait se poursuivre à ce rythme, tirée en particulier par l'essor des véhicules électriques et de l'éolien *offshore*, ainsi que celui de l'électronique et de la robo-

tique, utilisant de grandes quantités d'aimants permanents.

Le cas des véhicules électriques seul est éloquent. Selon Roskill, ce secteur devrait représenter 60 % de la demande totale en aimants NdFeB en 2030, contre 10 % actuellement. Ce phénomène est directement lié à l'augmentation exponentielle des ventes de véhicules électrifiés d'ici 2030, attendus entre 20 millions par an et 38 millions par an selon l'Agence internationale de l'énergie (scénarios *New Policies Scenarios* et *EV30@30*), contre 2,5 millions d'unités vendues en 2020. Avec une valeur moyenne de 2 kg d'aimants permanents NdFeB embarqués dans 90 % des technologies actuelles de motorisations des véhicules électrifiés, ce nouveau marché attendrait entre 15 000 tonnes et 28 500 tonnes d'alliage Nd-Pr contre 3 000 t en 2018 – les éléments de terres rares néodyme (Nd) et praséodyme (Pr) sont les principaux utilisés pour la fabrication de ces aimants.

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 2020, exprimés sous forme métal

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	Production mondiale					
	130 000	129 000	132 000	190 000	220 000	240 000
Australie	12 000	15 000	19 000	21 000	20 000	17 000
Birmanie				19 000	25 000	30 000
Burundi				630	200	500
Brésil	880	2 200	1 700	1 100	710	1 000
Chine	105 000	105 000	105 000	120 000	132 000	140 000
États-Unis	5 900			18 000	28 000	38 000
Inde	1 700	1 500	1 800	2 900	2 900	3 000
Madagascar				2 000	4 000	8 000
Malaisie	500	300	180	200		
Russie	2 800	2 800	2 600	2 700	2 700	2 700
Thaïlande	760	1 600	1 300	1 000	1 900	2 000
Vietnam	250	220	200	920	1 300	1 000
Autres pays				60	66	100

(Source : *Mineral Commodity Summaries*)

99 % en référence «Franco à bord (Fob) Chine», les prix des TR ont légèrement baissé en valeur absolue, tout en restant à des niveaux stables par rapport aux années précédentes. Ces prix sont à considérer de manière individuelle par élément de TR, une grande disparité existant entre les terres rares légères, très abondantes, et les terres rares lourdes réservées à des applications de niche du fait de leur rareté et de leur prix. Ainsi, le lanthane et le cérium ont perdu 5 % en 2019, à \$ 5,8/kg en moyenne. Le prix du terbium, la plus chère des terres rares, s'est quant à lui établi à \$ 660,8/kg, en hausse de 29 % par rapport à 2019, tout comme le dysprosium (+ 15,6 %) à \$ 338,4/kg, tandis que le praséodyme et le néodyme, utilisés pour les aimants permanents NdFeB, s'établissaient respectivement à \$ 93,6/kg et \$ 61,3/kg en 2020.

Début 2021, une forte hausse des prix du néodyme et du praséodyme a été observée. Elle est liée à plusieurs facteurs. Elle traduit d'une part des niveaux de stocks faibles des producteurs d'aimants chinois face à la reprise de la demande mondiale. D'autre part, elle semble être une réponse du marché à l'introduction par la Chine d'une loi sur le contrôle des exportations, annoncée fin octobre 2020.

En 2020, la production minière mondiale de terres rares est estimée à 240 000 tonnes selon l'USGS (exprimée en Oxydes de Terres Rares ou OTR) contre 220 000 tonnes en 2019. Selon les quotas de production officiels, la production chinoise s'élèverait à 140 000 tonnes. Toutefois, une importante production illégale subsiste au-delà de ces quotas, en particulier dans le sud du pays concernant l'extraction de TR lourdes (dysprosium et terbium en particulier), et s'étant déplacée en Birmanie sous la forme de flux illégaux, qui pourraient représenter jusqu'à 15 % de la production chinoise totale de TR lourdes.

En termes d'opérations minières, les États-Unis sont aujourd'hui le deuxième producteur mondial avec la reprise de la mine de Mountain Pass en Californie par l'opérateur MP Materials. En 2020, 38 000 t OTR ont été extraites, destinées à produire des concentrés de terres rares, exportés et revendus par le partenaire chinois Shenghe. Des extensions de capacités sont prévues en 2021 et 2022, afin d'aboutir à la production d'oxydes Nd-Pr et de pré-curseurs d'aimants permanents sur le sol américain.

La société australienne Lynas a une production totale de l'ordre de 17 000 t OTR. Environ un quart de cette production est sous forme d'oxydes Nd-Pr à haute valeur ajoutée, en grande partie destinée à assurer la production japonaise d'aimants permanents NdFeB.

Dans le reste du monde, des productions modestes peuvent être mentionnées, notamment en Russie avec la société Solikamsk qui produit 2 700 t OTR sous forme de concentrés de terres rares. D'autres productions mineures ont lieu au Burundi (Rainbow Rare Earths), au Brésil (CBMM), en Inde (Indian Rare Earths Ltd.), ou encore en Malaisie et en Thaïlande, en sous-produit des mines d'étain.

En 2020, de nombreux événements ont contribué à restructurer le marché des terres rares, à la fois en Chine et hors de Chine. De nouvelles réglementations chinoises sur les terres rares ont été proposées. Rendues disponibles sur le site du ministère de l'Industrie et des Technologies de l'Information (MIIT) début 2021, elles illustrent la détermination du gouvernement chinois à renforcer davantage la gestion de l'ensemble de la chaîne de l'industrie des terres rares. Trois éléments notables ressortent de cette stratégie de long terme :

- encourager les importations de terres rares extraites hors de Chine, car les volumes importés ne seront pas inclus dans le système de quotas ;
- renforcer la protection de l'environnement dans les zones d'exploitation des terres rares ;
- faire évoluer la fonction du State Reserve Bureau, avec un rôle renforcé sur la gestion des stocks de terres rares sur le marché intérieur (en plus de ses fonctions d'achats et de stockage).

Par ailleurs, la création en 2020 d'une joint-venture entre le raffineur Shenghe Resources et les producteurs Chinalco Jiangsu et Jiangsu Baoli illustre une volonté de consolidation supplémentaire des acteurs locaux, notamment dans le Jiangsu, l'une des principales provinces d'extraction des terres rares lourdes.

Dans le reste du monde, c'est en particulier aux États-Unis qu'une nouvelle stratégie a émergé, suivant les accords passés à l'été 2019 entre les gouvernements américain et australien notamment, pour des collaborations renforcées sur le sujet des TR.

En novembre 2020, le Département américain de la Défense a accordé trois subventions liées aux terres rares d'une valeur de \$ 13 millions aux sociétés MP Materials, TDA Magnetics Inc et Urban Mining pour aider à la construction d'une ou de plusieurs usines de séparation des terres rares, point clé de l'enjeu industriel associé à ces métaux, ainsi que pour stimuler la production nationale d'aimants permanents à terres rares.

En avril, la société Lynas Rare Earths Ltd a reçu une promesse d'investissement de \$ 30,4 millions du Pentagone pour travailler sur la faisabilité économique de la séparation de terres rares lourdes aux États-Unis, ainsi que pour la construction d'une usine de traitement pilote de terres rares légères au Texas, d'une capacité de 5 000 t/an. Lynas a également lancé une levée de fonds de \$ 330 millions pour élargir ses capacités de traitement des terres rares en Australie (site de Kalgoorlie), qui a reçu le soutien du gouvernement australien par un statut spécial.

Aux États-Unis toujours, la compagnie Energy Fuels a déclaré le 3 novembre avoir produit de premiers concentrés de terres rares à partir de sables monazitiques de Géorgie. Un accord a été conclu avec la société canadienne Neo Performance, opérant l'usine de séparation Silmet en Estonie pour la transformation ultérieure en matériaux avancés à base de terres rares. Energy Fuels envisage de traiter au moins 15 000 tonnes de monazite par an.

Les compagnies USA Rare Earths LLC et Texas Mineral Resources Corp ont également officialisé l'ouverture d'une usine pilote dans le Colorado pour valider leur technologie de séparation des terres rares, pour un budget de \$ 10 à 12 millions.

Au Canada, le gouvernement de la Saskatchewan a annoncé, en juillet 2020, un financement de \$ 31 millions pour une installation de traitement de terres rares à Saskatoon qui appartiendra et sera exploitée par le *Saskatchewan Research Council* (SRC) et la société Search Minerals. L'usine aura la capacité de traiter des concentrés de terres rares pour les séparer en utilisant un procédé d'extraction par solvant.

Enfin, au Groenland, l'acteur Greenland Minerals a récemment franchi une étape importante dans la progression de l'autorisation pour son projet de terres rares de Kvanefjeld, l'un des plus im-

portants au monde, avec l'évaluation de l'impact sur l'environnement (EIE) acceptée pour consultation publique.

L'ensemble de ces mesures laisse envisager un élargissement de la production de terres rares hors de Chine et une compétition d'autant plus grande pour la sécurisation de ressources de qualité à travers le monde.

Titane (Ti)

Le titane est utilisé pour deux usages principaux : la production d'oxyde de titane (TiO₂) et l'élaboration du titane métal sous forme d'éponges. Le titane est un métal léger, abondant dans l'écorce terrestre, aux excellentes propriétés mécaniques, résistant à la corrosion et biocompatible, ce qui en fait un métal de choix pour de nombreuses applications.

Selon les données de la compagnie TZMI (Titanium Zirconium Minerals International), 90 % du titane produit est utilisé sous forme d'oxyde de titane (TiO₂) en tant que pigment. Les données de 2013 indiquent que le TiO₂ est utilisé pour 56 % dans la composition des peintures et revêtements, 24 % dans les matières plastiques et caoutchoucs, 8 % pour le papier, 4 % pour l'encre et 2 % dans des fibres textiles et synthétiques. Le reste des applications comprend entre autres la pharmacie, les cosmétiques, la céramique et la purification de l'air.

Seulement 5 % du titane mondial est utilisé sous forme d'éponges de titane métal. Ces éponges sont produites pour près de moitié (49 %) pour la fabrication de pièces pour l'aéronautique civile (éléments de réacteurs, pylônes d'attache du réacteur, trains d'atterrissage, etc.). 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 d'éponges de titane. Les biens de consommation (lunetterie, bijouterie, prothèses, etc.) et les équipements de défense (construction d'avions, missiles, bateaux) sont responsables respectivement de 8 % et 4 % de la demande totale en titane métal. Les 5 % restants sont utilisés dans les soudures à l'arc électrique.

Titane*(en milliers de tonnes)***2015 2016 2017 2018 2019 2020****Production mondiale d'ilménite**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	6 190	5 500	5 000	6 870	7 700	7 600
Afrique du Sud	1 280	1 020	550	765	1 100	1 000
Australie	720	780	730	720	840	800
Brésil	48	48	50	66	25	25
Canada	595	595	840	630	680	680
Chine	850	840	300	2100	2 300	2 300
États-Unis	200	100	100	100	100	100
Inde	180	180	300	319	162	160
Kenya	267	280	280	272	210	190
Madagascar	140	92	110	228	280	300
Mozambique	460	540	600	575	590	600
Norvège	258	260	220	236	400	400
Russie	116					
Sénégal	257	250	300	297	310	310
Sri Lanka						
Ukraine	375	210	230	373	490	470
Vietnam	360	240	200	105	160	160
Autres pays	77	71	150	83	74	70

Production mondiale de rutile

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	760	800	770	594	654	630
Afrique du Sud	67	67	95	103	110	100
Australie	380	380	290	141	200	200
Brésil						
Inde	18	19	10	15	11	11
Kenya	71	84	87	90	74	74
Madagascar	5					
Mozambique		7	9	8	6	6
Sénégal		9	10	9	9	9
Sierra Leone	113	130	160	114	129	120
Ukraine	90	95	95	94	94	94
Autres pays	14	8	13	21	21	20

Production mondiale d'éponge de titane métal

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	180	170	193	205	200	210
Arabie saoudite					0	1
Chine	62	60	72	75	85	110
États-Unis	19	13	13	13	13	13
Inde		1	1	1	0	0
Japon	42	54	51	49	49	50
Kazakhstan	9	9	9	16	16	15
Russie	40	38	40	44	44	33
Ukraine	8	8	8	8	8.0	6.0

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

En 2020, les productions mondiales d'ilménite (FeTiO_3) et de rutile (TiO_2) – les deux principaux minerais de titane – ont relativement peu évolué par rapport à 2019, atteignant respectivement 7,6 Mt (– 1,3 %) et 0,63 Mt (– 3,7 %) selon l'USGS. La production d'oxyde de titane découle de ces deux exploitations, ainsi que de la fabrication de rutilés synthétiques. Les capacités de production d'oxyde de titane TiO_2 , quant à elles, ont été estimées à 8,4 Mt en 2020, en hausse de 10 % par rapport à 2019.

Les réserves de titane sont considérables. En 2020, les réserves d'ilménite et de rutile estimées par l'USGS étaient de 740 Mt (exprimées en contenu TiO_2), soit environ 90 ans de production au rythme actuel.

En 2020, la production mondiale d'éponges de titane métal est estimée par l'USGS à 210 000 tonnes, en hausse de 5 % par rapport à 2019. Or, par suite d'obligations de confidentialité, l'USGS ne publie pas les données relatives à la production des États-Unis, mais uniquement les capacités qui sont de 13 100 tonnes. Ce niveau de production reste toutefois sensiblement inférieur au niveau atteint en 2014, à 239 000 tonnes. Une part de l'explication est à rechercher dans la progressive maturité des circuits de recyclage du titane métal, offrant une disponibilité croissante de matériaux d'origine secondaire. D'autre part, les capacités mondiales de production d'éponges de titane sont très importantes (340 000 tonnes en 2020), menant à des taux d'utilisation faibles. La Chine accroît sa domination sur le marché puisque sa production d'éponges de titane est passée de 85 000 tonnes en 2019 à 110 000 tonnes en 2020. Même s'il est généralement admis que seule la moitié de la production totale d'éponges de titane est certifiée par l'industrie aéronautique, les entreprises chinoises font de gros efforts pour améliorer la qualité finale chaque année.

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 en 2020 de l'éponge de titane de qualité TG-Tv, contenant au minimum 97,75 % de titane, a diminué de 1,4 % par rapport à 2019, s'établissant à \$ 6,34/kg sur le marché *spot* contre \$ 6,43/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. Le taux de croissance moyen de la demande dans ce secteur était évalué entre 3 et 5 %/an d'ici 2030, voire davantage, mais l'impact du Covid-19 sur l'industrie aéronautique va évidemment freiner son développement jusqu'à fin 2021, voire 2022. Du fait de son prix élevé et de sa complexité d'élaboration à partir de minéraux, l'usage du titane pourrait, au moins partiellement, être remis en cause par la compétition avec des alliages d'aluminium dont les propriétés pour améliorer la légèreté et la résistance des appareils pourraient être comparables. Il s'agit en particulier de l'alliage aluminium-scandium, néanmoins dépendant d'une production future de scandium en quantité suffisante (voir la section consacrée au scandium). Le développement de l'utilisation de l'aluminure de titane dans la construction des réacteurs d'avion pourrait de son côté créer une demande nouvelle. Le titane est l'un des métaux se prêtant particulièrement bien aux méthodes de fabrication additive. C'est en effet un métal très dur et difficile à usiner, ce qui se traduit par des chutes de production pouvant atteindre 70 % du poids du titane à mettre en œuvre pour obtenir une pièce déterminée. Les profondes évolutions en cours de ces techniques pourraient permettre des gains considérables d'efficacité dans l'usinage du titane par rapport aux techniques d'usinage classique, ouvrant de nouvelles potentialités d'applications de marché.

Concernant les pigments, principal débouché des minéraux titanifères, Eramet estime que le marché est resté relativement stable en 2020. En effet, comme pour quasiment tous les métaux, la contraction de la demande pour ses principaux débouchés (construction ou automobile) n'a pas énormément impacté le marché puisque dans le même temps, la pandémie et de mauvaises conditions météorologiques ont mené à la fermeture momentanée de plusieurs mines dans le monde.

Le titane et les alliages de titane sont recyclables selon des conditions précises de reconditionnement, en particulier pour la filière aéronautique. En France, le complexe industriel de production de titane de qualité aéronautique de Saint-Georges-de-Mons, en Auvergne, intégrant l'unité de recyclage d'Ecotitanium, a été inauguré en septembre 2017. Ce complexe dote l'industrie aéronautique d'une capacité autonome de production de titane de qualité aéronautique en développant des alliages de titane à partir de chutes et de copeaux issus du façonnage des pièces par les constructeurs et sous-traitants aéronautiques.

Tungstène (W)

Le tungstène pur se caractérise par son plus haut point de fusion connu (3 422 °C), sa dureté exceptionnelle et sa très grande densité (19,25), équivalente à celle de l'or.

Les carbures cémentés sont l'usage le plus courant avec 59 % de la demande, selon Roskill. Les carbures cémentés sont des matériaux très durs, très résistants et réfractaires (ex. : carbure de tungstène-cobalt). Ils sont indispensables pour la production d'outils de découpe ou de forage lorsque les matériaux à traiter sont très résistants (aéronautique, automobile, industrie minière et pétrolière) ou que les outils sont de très petite taille (électronique). Les aciers et alliages au tungstène représentent 20 % de la demande mondiale. Là aussi, le tungstène intervient comme agent résistant à la chaleur, à la corrosion et à la fatigue (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). 13 % de la demande en tungstène est sous la forme de métal pur, dont une application phare a été les filaments des ampoules à incandescence. Cet usage ne représente plus que 4 % de la consommation mondiale et est en constante diminution, au profit des DEL. Les autres usages de tungstène métal comprennent les électrodes des lampes à décharge lumineuse haute pression et basse pression, certains contacts électriques et électroniques, des anodes dans les tubes à rayons X pour l'imagerie

médicale et l'imagerie de sécurité dans les aéroports notamment, les résistances chauffantes de fours industriels de haute température, ainsi que la recherche pour la fusion thermonucléaire civile. Le projet ITER prévoit ainsi d'utiliser du W métal pour le revêtement du « divertor » qui constitue le « plancher » du réacteur. Les 8 % restants de la consommation de tungstène à l'échelle mondiale sont sous forme de composés chimiques, que l'on retrouve essentiellement dans les catalyseurs et pigments.

En 2020, la production mondiale de tungstène de 84 000 tonnes (en W contenu) s'est maintenue par rapport à 2019, bien que la consommation se soit effondrée en raison de la crise sanitaire. La Chine représente 82 % de la production mondiale, assurée presque en totalité par seul producteur : China MinMetals. Le Vietnam, à la deuxième place, ne produit que 5 % de la production mondiale, soit 4 300 tonnes. À l'instar de nombreux autres petits métaux, les prix du tungstène ne sont pas déterminés 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), 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 métallurgie des poudres. Les prix de l'APT n'ont pas connu de fortes variations en 2020. La moyenne annuelle s'établit à \$ 27,5/kg soit une baisse de 9,7 % par rapport à 2019.

Les réserves de tungstène sont de 3,4 Mt, dont 56 % en Chine. De nouveaux gisements de grande taille sont toujours à l'étude en 2021, dont une ressource de 33 000 tonnes dans l'Hubei en Chine. L'USGS indique également des stocks gouvernementaux aux États-Unis de 107 tonnes de poudre métallique, 7 660 tonnes de minerais et concentrés et 6 tonnes d'alliages.

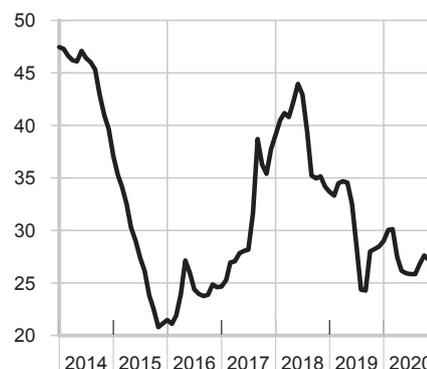
Le recyclage du tungstène dépend des filières, certaines étant particulièrement efficaces (pour certains carbures de tungstène et superalliages en fin de vie). La substitution du tungstène est généralement possible dans ces deux principaux usages, notamment par des carbures au titane (TiC) ou au tantale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

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale (arrondi)						
	89 400	88 100	82 100	81 100	83 800	84 000
Autriche	861	954	975	936	892	890
Bolivie	1 460	1 110	994	1 370	1 060	1 400
Canada	1 680					
Chine	73 000	72 000	67 000	65 000	69 000	69 000
Corée du Nord				1 410	1 130	500
Espagne	835	650	564	750	603	800
Mongolie		753		1 940	1 900	1 900
Portugal	474	549	727	715	518	680
Royaume-Uni	150	736	1 090	900		
Russie	2 600	3 100	2 090	1 500	2 200	2 200
Rwanda	850	820	720	920	900	1 000
Vietnam	5 600	6 500	6 600	4 800	4 500	4 300
Autres pays	1 910	880	1 300	900	1 070	1 000

Prix du tungstène
Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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

Du côté de l'offre, un certain dynamisme est à noter. Le consultant Roskill identifie quatorze projets au stade de développement à l'horizon 2028. Une des 10 plus grosses mines de tungstène était en construction au Kazakhstan et devrait être opérationnelle fin 2022. En Europe, quelques projets ont démarré la production en 2019 et 2020, notamment en Espagne et au Portugal.

Vanadium (V)

Le marché du vanadium a été impacté en 2020 par le découplage économique entre la Chine et le reste du monde, visible en particulier sur la production et la consommation d'acier. En Chine, poussée par des mesures de relance et des dé-

penses d'infrastructure, la production d'acier a atteint un plus haut historique, franchissant la barre symbolique du milliard de tonnes, ce qui a fortement bénéficié à la consommation de vanadium.

Le vanadium est un métal ductile, à point de fusion élevé (1910 °C), et possédant quatre états d'oxydation, ce qui lui confère des propriétés très intéressantes dans plusieurs de ses applications. La principale utilisation du vanadium est dans la production d'aciers microalliés à haute limite d'élasticité (aciers HLE). Les applications dans la production de divers types d'acier représentent environ 91 % de la consommation mondiale, dont environ 46 % pour les aciers HLE. Dans les applications hors industrie sidérurgique, on trouve la fabrication d'alliages de titane et d'aluminium (4 %), la chimie (3 %) avec la fabrication d'acide sulfurique, d'anhydride maléique et de caoutchouc synthétique, et enfin les batteries à flux redox (2 %).

Le vanadium est commercialisé sous deux formes principales : d'une part, le 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 ; d'autre part, sous forme de pentoxyde de vana-

dium (V_2O_5), utilisé comme précurseur pour le ferrovandium, mais également 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 (aussi appelées VRB).

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, particulièrement 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 2020, la mise en œuvre de ces nouvelles normes de construction et le retour à la parité des prix entre le ferrovandium et le ferroniobium (voir la section consacrée au niobium) ont fortement bénéficié à la hausse de la demande et l'importation de volumes substantiels de pentoxyde de vanadium par la Chine, devenant importateur net.

La production mondiale de vanadium s'est élevée à 86 000 tonnes de vanadium contenu en

2020 selon l'USGS. Elle émane de trois sources : la production primaire, la coproduction (désignant ici la récupération de vanadium à partir de laitiers d'aciérie) et la production secondaire. Celle à partir de sources primaires représente 14 % du vanadium produit. Elle est issue principalement de magnétite titanifère avec des minerais dont la teneur en oxyde de vanadium est comprise entre 1 % et 2 %. La coproduction de vanadium à partir de laitiers d'aciérie constitue 74 % de la production mondiale, tandis que les 12 % restants proviennent d'une production secondaire issue du traitement de cendres volantes, de résidus pétroliers, de scories de fonte et de catalyseurs usagés riches en vanadium. Le vanadium est caractérisé par sa forte affinité avec le carbone, ce qui explique sa concentration naturelle dans certains gisements pétroliers ou dans des schistes noirs riches en matière organique, ainsi que dans les résidus industriels (laitiers d'aciérie, cendres volantes, résidus pétroliers).

Trois pays représentent 90 % de la production mondiale de vanadium : la Chine (62 %), la Russie (21 %) et l'Afrique du Sud (9,5 %). Le Brésil complète le tableau avec près de 7 000 tonnes provenant de la mine de magnétite de haute qualité de Maracas, dans l'État de Bahia, exploitée par la compagnie Largo Resources.

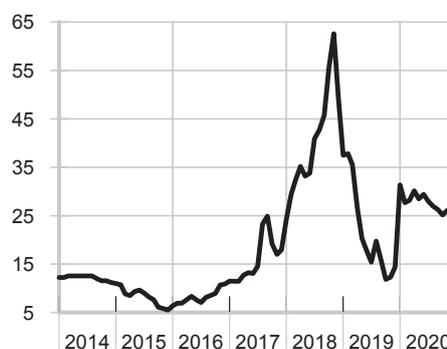
L'industrie du vanadium chinoise est concentrée entre quelques grands groupes sidérurgiques,

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

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production minière	77 800	79 000	71 200	71 200	86 800	86 000
Afrique du Sud	14 000	10 000	7 960	7 700	8 030	8 200
Brésil		8 000	5 210	5 500	5 940	6 600
Chine	42 000	45 000	40 000	40 000	54 000	53 000
États-Unis					460	170
Russie	16 000	16 000	18 000	18 000	18 400	18 000
Autres pays	5 800					

Prix du vanadium pentoxide
Caf Europe

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

dont Pangang Group Vanadium Titanium & Resources Co. et Hebei Iron & Steel Group Co. La production primaire à partir de magnétite devrait également se développer avec des groupes tels que Xining Special Steel Co., Zhejiang Hailiang Co. et Shanghai Dingli Technology Development Group. En Russie, l'essentiel de la production est assuré par le groupe Evraz. 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, et la compagnie Bushveld Minerals d'autre part, qui ambitionne de devenir un important producteur intégré, incluant la production de batteries redox au vanadium avec la mine et l'usine de Vametco (4 570 t/an V_2O_5), rachetée à Evraz en 2017, ainsi que les projets Mokopane et Brits Vanadium. En mai 2019, la société a acquis la société Vanchem pour \$ 68 millions, dans le prolongement de sa stratégie de croissance.

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

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) européen a été de \$ 27,9/kg en 2020, contre \$ 22,1/kg en 2019, soit une hausse de 26 %.

Le marché du vanadium devrait se tendre au cours de l'année 2021, et plus encore en 2022, sous l'effet d'une demande plus élevée, mais aussi d'un resserrement de l'offre, les producteurs chinois semblant proches d'atteindre leur capacité maximale.

Les sources secondaires en particulier par récupération du vanadium contenu dans les aciers rapides, les superalliages et les catalyseurs usés de l'industrie du pétrole représentent des voies très intéressantes de diversification des approvisionnements pour les pays consommateurs. Ce recyclage représente aujourd'hui environ 10 % de la consommation, mais

l'on peut s'attendre à une augmentation progressive de ces capacités de récupération, notamment aux États-Unis ou encore en Arabie saoudite.

Ainsi, en mai 2020, la compagnie allemande Schmid Group et l'institution d'investissement d'Arabie saoudite Nusaned Investment ont formé une joint-venture ayant pour objectif la construction d'une station de stockage d'énergie équipée de batteries à flux redox au vanadium, ainsi qu'un centre de R&D. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la stratégie « Vision 2030 » du Royaume saoudien, visant à installer 57,5 GW de capacités renouvelables d'ici à 2030. Parallèlement, le groupe Saudi Aramco a également formé une coentreprise travaillant sur la faisabilité économique du recyclage des catalyseurs pétroliers comme source de vanadium secondaire pour l'utilisation de batteries à flux redox.

Les batteries à flux redox au vanadium (VRB) présentent des caractéristiques prometteuses pour le stockage stationnaire d'énergie, bien que ne représentant que 2 % de la demande ces dernières années. Leur fonctionnement utiliserait environ 7 kg de pentoxyde de vanadium par kWh d'énergie stockée. Elles fonctionnent par oxydoréduction, mettant à profit les quatre différents degrés d'oxydation du vanadium au sein de l'électrolyte. Or, la technologie VRB a connu des revers ces dernières années, notamment du fait du trop fort impact de la volatilité des prix du vanadium sur la rentabilité des projets. Ainsi, l'un des principaux projets à grande échelle en Chine, Rongke Power, a rapidement stoppé après la flambée des prix de fin 2018, car les coûts de l'électrolyte au vanadium s'avéraient prohibitifs. Cependant, les progrès en termes de recyclage et les réflexions sur les chaînes d'approvisionnement intégrées devraient permettre d'améliorer l'économie et la durabilité de cette forme de stockage.

Zirconium (Zr)

Le zirconium est un élément relativement abondant dans la croûte terrestre avec une concentration de 0,028 %, deux fois plus importante que celle du zinc et quatre fois plus importante que celle du cuivre. 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 2020 à environ 0,95 Mt, selon les données de la société australienne Iluka. 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 («zirconia» en anglo-saxon) qui est 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.

L'élaboration du zirconium métal à partir du zircon ou de la zircone ne représente que 3 % de la consommation de zircon ; elle est cependant un secteur à haute valeur ajoutée. Le zirconium métal est utilisé pour plus de deux tiers dans l'industrie nucléaire, vu son excellente transparence aux neutrons. Il peut être sous forme d'alliages Zircalloy 1, Zircalloy 2 ou Zircalloy 4. Ces derniers servent de gaines isolantes autour de l'uranium enrichi dans les réacteurs nucléaires. Ces alliages contiennent différents métaux en essayant d'utiliser le moins possible d'hafnium, car celui-ci a des propriétés inverses au zirconium quant à l'absorp-

tion des neutrons. 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 3 % par an d'ici 2030. Celle-ci est portée principalement par la consommation du secteur de la céramique pour les produits sanitaires. L'urbanisation massive en Inde devrait également tirer la consommation de zircon vers le haut. Concernant la demande pour le zirconium métal, elle va être corrélée à l'industrie du nucléaire. Selon l'Association mondiale du nucléaire, il y avait, à fin 2020, 442 réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde. 53 réacteurs étaient en construction, dont 16 en Chine, ainsi que 98 projets bien avancés.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production de concentré de zircon a été estimée à 1,4 Mt en 2020, un chiffre proche de celui de 2019 (1,42 Mt). Quatre pays représentent plus des trois quarts de la production mondiale de zircon ; ce sont : l'Australie avec 35 % de la production mondiale (480 kt), l'Afrique du Sud (320 kt), la Chine (140 kt) et le Mozambique (125 kt). L'USGS évalue à 64 Mt les réserves mondiales d'oxyde de zirconium en 2020, en hausse de 3 % par rapport à 2019 (62 Mt), dont 67 % en Australie et 10 % en Afrique du Sud.

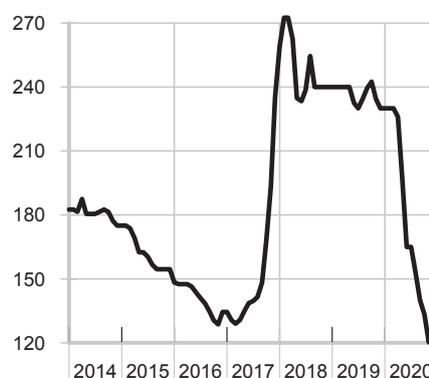
Zirconium

(en milliers de tonnes de concentré)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production mondiale (arrondi)	1 520	1 320	1 600	1 480	1 420	1 400
Afrique du Sud	380	360	377	350	370	320
Australie	567	450	505	560	470	480
Chine	140	140	140	140	140	140
États-Unis	80	50	80	100	100	100
Inde	40	40				
Indonésie	110	110	110			
Kenya			44	45	29	25
Mozambique	52	68	74	48	100	125
Sénégal		53	82	64	65	65
Autres pays	150	96	138	170	112	110

Prix de l'éponge de zirconium + Hafnium métal

(en yuans/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

En raison de sa forte densité (entre 3,9 et 4,8 g/cm³), le zircon se concentre dans des sables de types 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). 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.

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 tonnes en 2012 par la MMTA (*Minor Metals Trade Association*), dont 3 000 tonnes pour les États-Unis, 1 800 tonnes pour la France, 1 000 tonnes pour la Russie, 800 tonnes pour la Chine et 400 tonnes pour l'Inde. En France, les éponges de zirconium sont 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 performances. Le zircon peut être remplacé par de la chromite ou de l'olivine dans les fonderies, du spinelle et de la dolomite dans les réfractaires, du niobium, du tantale et de l'acier inoxydable dans l'industrie nucléaire.

Les prix du zirconium sont établis par négociation entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen de l'éponge de zirconium (teneur de 99,4 % et contenant de l'hafnium) a été en 2020

de CN¥ 177/kg soit \$ 27/kg, un prix en baisse de 26 % par rapport à 2019 (\$ 37/kg).

Cette baisse des prix observée a été causée en grande partie par une diminution de la demande mondiale évaluée à 17 % en 2020 pour cause de pandémie, et notamment du secteur de la céramique en Chine avec de nombreuses fermetures d'usines entre février et mars. Le redémarrage des usines au cours du second semestre a permis d'endiguer en partie la chute de la demande en zircon, même si Iluka estime que les usines chinoises ne tournent qu'à 60 % de leur niveau pré-pandémique, contre 80-90 % pour celles situées en Europe, Inde et Amérique du Sud. Comme pour de nombreux autres métaux, la demande en zircon devrait continuer de remonter la pente en 2021, sans toutefois atteindre les niveaux de 2019. Du côté de l'offre, l'urgence sanitaire a également provoqué des fermetures plus ou moins longues de mines. Eramet rapporte une baisse de production mondiale de 11 % en 2020, mais le marché affiche toujours un niveau excédentaire, autre cause de la baisse des prix sur l'année. Étant donné le contexte actuel, il est peu probable de voir de nouveaux projets miniers rentrer en production en 2021-2022, hormis peut-être Thunderbird en Australie, détenu conjointement par Sheffield Resources et une filiale australienne de Yangang (Hong Kong) tandis que plusieurs mines voient la qualité des zircons récupérés baisser en quantité et en qualité. Cela pourrait amener à un déficit important sur le marché du zircon d'ici 2030.

Hafnium (Hf)

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

La demande mondiale en hafnium est d'environ 70 tonnes. Il est utilisé pour près de moitié 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, même si le Covid-19 a évidemment fait chuter la demande en 2020, mais dans une proportion indéterminée.

La production d'éponges d'hafnium est de l'ordre de 70 à 80 tonnes par an et provient essentiellement de France et des États-Unis (entre 40 et 45 % chacun). Comme pour le zirconium, c'est la société Framatome, filiale d'Orano (ex-Areva) qui produit de l'hafnium ultrapur sur le site de Jarrie pour les applications aéronautiques principalement. Selon les données du commerce extérieur, la France a exporté 21 tonnes d'hafnium en

2020 (contre 35 tonnes en 2019), dont 10 tonnes vers l'Allemagne, 8 tonnes vers les États-Unis et 1,6 tonne vers la Grande-Bretagne.

Il n'existe pas de calcul normalisé des ressources et réserves d'hafnium. Néanmoins, l'USGS estime les réserves de zirconium à 64 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 1,3 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 2020, le prix moyen de l'hafnium (99 %) a été de \$ 773/kg selon Argus Media (- 7 % par rapport à 2019). L'offre et la demande affichent depuis plusieurs années un certain équilibre. Les réserves et ressources en minéraux contenant de l'hafnium (et du zirconium) sont conséquentes et devraient faire face à une hausse de la demande soutenue par l'industrie aéronautique, une fois les effets de la pandémie passés.