

CYCLOPE

sous la direction de Philippe Chalmin et Yves Jégourel

Les Marchés Mondiaux

2022

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

“Le monde d’hier”

Stefan Zweig

CYCLOPE

2022

**Les Marchés
mondiaux**

« Le monde d'hier »

Sous la direction de Philippe CHALMIN

et Yves JÉGOUREL

 **ECONOMICA**

49, rue Héricart, 75015 Paris

Sommaire

Avant-propos	V
Les collaborateurs de CyclOpe 2022	VIII
Les entreprises qui ont soutenu CyclOpe en 2022	XIII
Première partie : « Le monde d’hier »	1
I « Le monde d’hier » : lendemains de pandémie et de guerre... ..	3
II Après la guerre, un nouvel ordre mondial ?.....	27
III Les chocs dans le monde	31
– Chine et Asie en 2021 : qui gagne, qui perd ? « à qui profite le crime ? »	32
– Inde : le nouveau dualisme indien	41
– Amérique du Sud : la crise de trop.....	47
– Russie : l’économie russe en « <i>terra incognita</i> »	55
– Afrique du Nord et Moyen-Orient : risques inflationnistes à tous les niveaux.....	59
– Point de bascule pour l’Afrique subsaharienne ?.....	67
IV Quelques petits pas... ..	75
– La guerre est aussi économique : vers une OTAN économique et commerciale ?.....	77
– Changements climatiques : conférence de Glasgow (COP-26), ni échec ni avancée miracle	85
Deuxième partie : Les marchés.....	97
Les marchés mondiaux en 2021	99
I Les marchés financiers.....	107
II Grains et agriculture tempérée.....	157
III Produits tropicaux	275
IV Produits aquatiques.....	369
V Minerais et métaux	385
VI Énergie.....	545
VII Grands marchés industriels.....	621
VIII Services.....	661

Les collaborateurs de CyclOpe 2022

Philippe CHALMIN	Professeur émérite 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 « Le monde d'hier » : lendemains de pandémie, Agriculture, Marchés dérivés, Art
Yves JÉGOUREL	Professeur du Conservatoire national des Arts et Métiers (Paris), <i>Senior Fellow</i> au <i>Policy Center for the New South</i> (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
BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières)		Petits métaux, Métaux « électriques »
Antoine BOUBAULT	Chercheur-ingénieur en écologie industrielle	
Gaétan LEFEBVRE	Géologue-économiste	
Maïté LE GLEUHER	Géologue-économiste	
Mathieu LEGUERINEL	Géologue-économiste	
Maxime PICAULT	Géologue-économiste	
Guillaume VIC	Géologue-économiste	
Benoît de CARBONNIÈRES	Consultant projets miniers Afrique République démocratique du Congo	Diamants
Jean-Yves CARFANTAN	Consultant associé société Celeres, Uberlândia Brésil et gérant du site IstoéBrésil (São Paulo)	Amérique du Sud

Éric CHAMPARNAUD	Associé C-Ways	Industrie, Automobile
Bénédicte CHATEL	Directrice associée de Commodafrica	Cacao, Café
Alfredo COELHO	Professeur à Bordeaux Sciences Agro, Chercheur associé Unité mixte de recherche Marchés, organisations, institutions et stratégies d'acteurs (UMR Moisa, Montpellier)	Vin
Sylvie CORNOT-GANDOLPHE	Présidente SCG Consulting	Charbon vapeur, Charbon à coke
Jean-Philippe DAUVIN	Chef économiste honoraire, STMicronics	Semi-conducteurs
Jean-François Di MEGLIO	Président d'Asia Centre, Centre d'expertise et d'études sur l'Asie	Chine
Myriam ENNIFAR	Chargée de mission, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation	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
Romain GIRARD	Chargé de mission, Observatoire de la Formation des Prix et des Marges, FranceAgriMer	Thé
Alessandro GIRAUDO	Professeur d'économie et de finance internationale - ISG, Paris	Changes et taux
Étienne GOETZ	Journaliste, <i>Les Échos</i>	Or
Carole GOMEZ	Directrice de recherche à l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Sport
Emmanuel GROUDEL	Économiste de la filière forêt et bois, Président de Wood & Logistics Expert (WALE), Membre de la Société des Experts Bois	Bois tempérés
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 Bois tropicaux
Alain KARSENTY	Économiste au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)	
Élisabeth LACOSTE	Directeur de la Confédération internationale des betteraviers européens, CIBE (Bruxelles, Belgique)	Sucre, Éthanol
Jean-Paul LEHMANN	Membre de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN)	Uranium
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
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, Minerai de fer et Acier, Certificats CO ₂ , Fret
Francis PERRIN	<i>Senior Fellow</i> au <i>Policy Center for the New South</i> (Rabat) et directeur de recherche à l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Pétrole, Produits pétroliers
Christian de PERTHUIS	Professeur émérite d'économie à l'Université Paris-Dauphine PSL, Fondateur de la chaire Économie du climat	Changement climatique

Simon QUEMIN	Ingénieur-Chercheur à EDF R&D, Chercheur associé au Grantham Research Institute (<i>London School of Economics</i>), au <i>Potsdam Institute for Climate Impact Research</i> et à la Chaire Économie du Climat (Université Paris-Dauphine)	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
Manon SAILLEY	Chargée d'études économiques, Groupe Avril	Oléoprotéagineux
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, Président de l'AIUTA et du WSTC <i>World Senior Tourism Congress</i>	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	Coordination et adaptation
Nadège GRANGÉ	
Claire MABILLE	Couverture
Isabelle TANGUY	Secrétariat et presse

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 fixé 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

Métaux « électriques » :

*un avenir radieux pour les producteurs,
un impératif de sécurisation pour les
industriels*

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 » (Li-ion). Ils sont, en cela, tout à fait essentiels pour nombre d'industries et d'économies.

Les batteries Li-ion, commercialisées pour la première fois à l'échelle industrielle en 1991 par le groupe japonais Sony, présentent des caractéristiques très intéressantes en matière de capacité d'accumulation d'énergie par unité de masse par rapport aux technologies précédentes et concurrentes. La réduction de leurs coûts de fabrication a également fortement joué dans leur expansion à grande échelle, d'abord dans les appareils électroniques portables, puis de manière croissante au sein des véhicules électrifiés. Ainsi, pour beaucoup de constructeurs automobiles, les technologies Li-ion semblent aujourd'hui l'un des meilleurs compromis pour les batteries de véhicules électriques en termes de puissance d'énergie embarquée, de légèreté, de fiabilité, de durée de vie, et de coût de fabrication.

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

Les besoins en métaux à usage des batteries sont 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.

Cobalt (Co)

Le cobalt est un élément ferromagnétique qui possède notamment le point de Curie le plus élevé à 1 111 °C – température à laquelle un élément perd son aimantation spontanée – et un point de fusion à 1 495 °C. 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 57 % de ses usages. Le cobalt entre dans la composition de trois types de cathodes de batteries Li-ion : «Lithium Cobalt Oxyde» (LCO), «Lithium Cobalt Aluminium» (NCA) et «Nickel Manganèse Cobalt» (NMC). Sa présence permet d'accroître leur densité énergétique, leur performance, mais aussi d'augmenter leur stabilité et leur longévité.

D'après Roskill, en 2020, les autres marchés du cobalt ont été, par ordre d'importance : les superalliages (13 %), les carbures cémentés et outils diamantés (8 %), les pigments (6 %), les catalyseurs au cobalt (5 %), les aimants permanents samarium-cobalt (4 %), les pneumatiques (2 %) et divers autres, dont l'usage comme agents séchants.

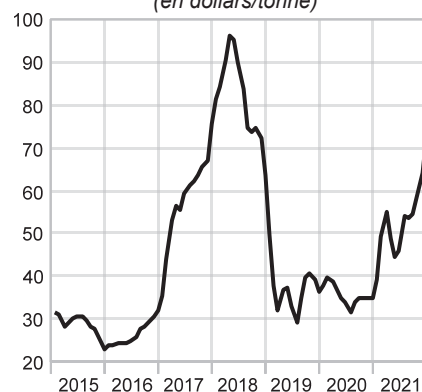
La consommation mondiale de cobalt s'oriente vers une forte croissance (7 % à 10 % par an), tirée par le secteur du stockage de l'énergie et plus

précisément par la mobilité électrique. Elle devrait ainsi atteindre 200 000 tonnes de cobalt contenu (t Co) à l'horizon 2025, contre 130 000 t Co en 2020. Toujours selon le consultant Roskill, la part du secteur des batteries est attendue entre 70 % et 80 % du total de la demande à cet horizon. 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 en raison de son prix élevé (le plus cher des métaux de cathodes) et des enjeux liés à son approvisionnement (dépendance à la République démocratique du Congo ainsi que la prise en compte des responsabilités sociales et environnementales). D'autre part, du fait du 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 t Co en 2020 à 73 000 t Co en 2025. L'explication réside dans la composition des cathodes équipant les batteries de ces appareils, privilégiant la typologie LCO avec une très forte teneur en cobalt (0,96 kg/kWh) dont les avantages sont une faible autodécharge,

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

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production minière						
Monde	111 000	120 100	148 000	144 000	142 000	170 000
Afrique du Sud	2 300	2 300	2 300	2 100		
Australie	5 500	5 030	4 880	5 740	5 630	5 600
Canada	4 250	3 870	3 520	3 340	3 690	4 300
Chine		3 100	2 000	2 500	2 200	2 200
Cuba	4 200	5 000	3 500	3 800	3 800	3 900
États-Unis	690	640	490	500	600	700
Indonésie					1 100	2 100
Madagascar	3 800	3 500	3 300	3 400	850	2 500
Maroc		2 200	2 100	2 300	2 300	2 300
Nouvelle-Calédonie	3 390		2 100			
Nouvelle-Guinée	2 190	3 310	3 280	2 910	2 940	3 000
Philippines	4 100	4 600	4 600	5 100	4 500	4 500
Rép. dém. du Congo	64 000	73 000	104 000	100 000	98 000	120 000
Russie	5 500	5 900	6 100	6 300	9 000	7 600
Autres pays	7 600	7 650	5 540	6 320	7 640	6 600

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

de bonnes performances en cyclage et, enfin, de faibles risques d'inflammabilité, primordiaux pour ce type d'usages. Avec l'augmentation attendue du nombre d'appareils connectés («Internet des objets»), passant de 2 milliards actuellement à plus de 5 milliards d'unités à l'horizon 2025, la demande en cobalt correspondante devrait fortement croître.

En 2021, le prix du cobalt métal sur le marché européen (qualité *alloy grade cut cathode* 99 %) a été en moyenne de \$53,3/kg contre \$35,5/kg en 2020, soit une progression de près de 50 %. Après avoir atteint un seuil pendant la pandémie mondiale, le prix est reparti à la hausse début 2021. La volatilité caractérise ce marché, avec de plus hauts historiques observés en mai 2018, à \$94 800/t (référence spot) sur le *London Metal Exchange* (LME).

La production minière mondiale de cobalt en 2021 s'est élevée à 170 000 tonnes selon les données préliminaires de l'*United States Geological Survey* (USGS), en hausse de 20 % par rapport à 2020. La quasi-totalité de cette production (97 %) provient de la récupération de cobalt comme coproduit lors de l'extraction métallurgique du cuivre et du nickel.

En 2021, près de 73 % de la production minière est toujours issue de la 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 provenant de ce pays sur un total potentiel d'environ 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 du fait de la structuration internationale des grands groupes exploitants. 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 18 % de la production primaire mondiale. En RDC, Glencore contrôle la mine de Kamoto/Katanga, représentant à elle seule près de 14 % de l'offre minière de cobalt en 2021, et la mine de Mutanda, rouverte en fin d'année. À cela s'ajoutent celle de Mopani en Zambie et ses opérations minières à Sudbury (Canada), ainsi que celle de Murrin Murrin (Australie), soit une capacité totale de près de 46 000 t Co.

Glencore a multiplié les contrats auprès de divers acteurs de la fabrication de batteries, s'assurant ainsi un rôle de maillon indispensable de la chaîne industrielle des productions de batteries Li-ion et rendant par la même occasion une partie du cobalt indisponible au «marché libre».

Parmi les principaux partenaires, le groupe chinois GEM (fournisseur du fabricant de batteries CATL) dès 2018, le coréen SK Innovation en 2019 (30 000 t Co à fournir jusqu'en 2025), Samsung SDI Co. Ltd pour 21 000 t Co, de 2020 à 2024. Puis, au mois de juin 2020, c'est un contrat de 6 000 t Co qui a été signé avec le constructeur automobile Tesla. En 2021, deux accords plus modestes d'approvisionnement en cobalt ont également été conclus avec le norvégien FREYR (1 500 t Co) et le canadien Electra Battery Materials (1 000 t Co). Parallèlement, la société a engagé des partenariats dans le domaine du recyclage, notamment avec Britishvolt en 2021 et avec le marocain Managem en janvier 2022.

Plusieurs compagnies chinoises sont aussi devenues des acteurs incontournables du marché par des investissements progressifs et conséquents en RDC. Ce sont en particulier Zheijang 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, et il est aussi le propriétaire du gisement de Kisanfu en cours de développement. Plus généralement, il est estimé que 50 % de la production de cobalt en RDC est liée à des financements chinois. Le cobalt n'est en revanche pas transformé sur place. Après un premier traitement hydrométallurgique conjoint à celui du cuivre, le cobalt est exporté sous forme d'hydroxydes pour être raffiné en Chine et intégrer le circuit de la production de batteries. La Chine raffine près de 70 % du cobalt mondial.

En 2021, des tensions sino-congolaises sont apparues concernant les revenus générés par l'exploitation du cobalt, le gouvernement congolais accusant China Molybdenum de malversation. Celle-ci sous-estimerait les réserves de la mine de Tenke-Fungurume dans l'objectif de diminuer les versements de royalties au pays. La compagnie est également suspectée de négliger la sécurité de

ses employés et de camouflage d'accidents. Début 2022, cette opposition a mené au retrait temporaire de la gestion de la mine au profit d'un administrateur congolais.

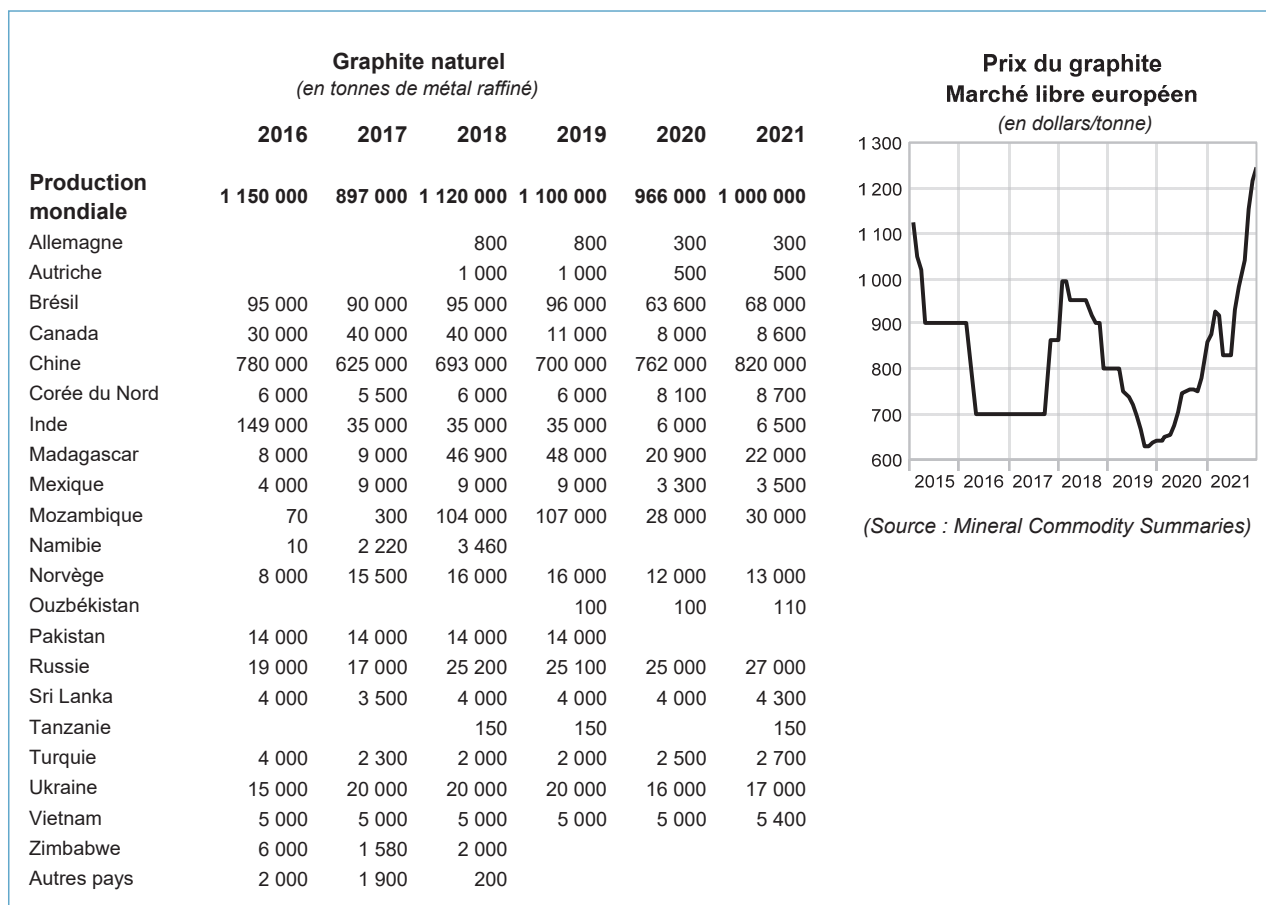
Plusieurs projets se développent dans le reste du monde. C'est notamment le cas en Australie avec la compagnie Cobalt Blue et celui de Broken Hill, avec la construction prochaine d'une usine pilote. En Amérique du Nord, deux projets présentent des alternatives crédibles pour la filière occidentale de production de batteries : la relance de la raffinerie de cobalt de l'entreprise First Cobalt, d'une capacité annuelle de 5 000 t Co, 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. D'autres projets moins avancés de type hautes teneurs et faibles volumes sont également en développement, dont NICO de Fortune Minerals dans les Territoires du Nord-Ouest et Castle de Canada Silver Cobalt Works en Ontario. En Finlande, la compagnie Terrafame envisage, elle, de produire 5 000 t Co/an de la mine de Sotkamo.

Enfin, de nombreuses unités de production de nickel de qualité batterie sont en développement en Indonésie et devraient pouvoir délivrer d'importantes quantités de cobalt en sous-produit, sous réserve du procédé métallurgique utilisé.

Des avancements dans le domaine de l'approvisionnement responsable en cobalt artisanal de RDC sont notables avec, entre autres, le projet Fair Cobalt Alliance de Glencore ou le partenariat Gécamines-Trafigura.

Graphite naturel et synthétique (C)

Le marché du graphite est opaque et cloisonné, si bien que les données chiffrées concernant l'offre, la demande, mais également 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 ainsi estimée entre 2,7 Mt et 3 Mt. Celle de graphite synthétique atteindrait près de 2 Mt, tandis que celle de graphite naturel approcherait 1 Mt. L'Asie



consomme environ les deux tiers du graphite produit dans le monde, suivie de l'Europe (12 %), de l'Amérique du Nord (10 %) et de l'Amérique du Sud (10 %). À l'échelle globale, le secteur de la sidérurgie utiliserait près de 60 % du graphite synthétique et naturel avec la fabrication d'électrodes, de réfractaires et la recarburation des aciers. Il est toutefois 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 11 % à celle de batteries. Cependant, cette part augmente progressivement.

Plus de la moitié de la demande de graphite du secteur des batteries et piles émane de l'Asie où se concentre la production des piles et accumulateurs. Plusieurs types de piles et batteries contiennent de faibles quantités de graphite naturel ou synthétique dans l'électrolyte ou dans le matériau d'électrodes (piles alcalines, plomb-acide, Ni-MH, etc.). Les anodes des batteries Li-ion peuvent, quant à elles, contenir des quantités considérables de graphite qui sont d'ailleurs bien plus importantes que celles de lithium (de 10 à 20 fois suivant la cathode utilisée) : 5 grammes (g) dans une batterie de smartphone, 90 g pour un ordinateur portable, une dizaine de kilogrammes (kg) en moyenne pour une voiture hybride (HEV) ou encore 70 kg dans un véhicule tout électrique. Le marché de la mobilité électrique est donc celui pour lequel les projections de croissance de la demande mondiale en graphite sont les plus optimistes d'ici 2030.

Les particules sphériques améliorant la performance de l'anode, le graphite sphérique a été développé dans le but d'obtenir une plus grande surface favorisant une meilleure conductivité et un meilleur rendement des anodes dans les batteries Li-ion. La Chine produit quasiment 100 % du graphite sphérique non revêtu mondial qui est essentiellement fabriqué à partir de paillettes de graphite naturel provenant de la province du Heilongjiang, au nord-est de la Chine. Une partie de cette production – qui est concentrée dans la province du Shandong – est consommée dans le pays par les producteurs d'anodes de batteries Li-ion et le reste vendu à des fabricants de batteries et des négociants japonais ou sud-coréens qui procèdent ensuite au revêtement des particules qui seront 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 en Chine.

Selon le consultant Benchmark Minerals Intelligence, si les capacités des usines de fabrication de batteries Li-ion étaient de 753 GWh en 2020, elles pourraient atteindre 2 656 GWh en 2025 et 3 883 GWh en 2030, tirant du même coup la demande en anodes et donc en graphite (multipliée par 10 et par 15 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. Les électrodes sont utilisées dans de nombreuses industries dont 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 2021, la production mondiale de graphite serait située entre 2,5 Mt et 3 Mt (60 % synthétique, 40 % naturel). 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. Elle possède plus de 100 mines de graphite, situées principalement au nord, dans les provinces du Heilongjiang, Shandong et en Mongolie intérieure. Si la production chinoise est très difficile à quantifier avec précision, l'USGS l'estime à 820 000 tonnes en 2021, soit 79 % du total mondial, et en forte hausse par

rapport à 2020 (+7,6 %). Ces volumes seraient cependant bien en deçà des capacités de production du pays qui se situeraient entre 1,2 Mt et 1,6 Mt, soit un taux d'utilisation compris entre 40 % et 50 %. Le deuxième producteur minier, loin derrière la Chine, est le Brésil (68 000 tonnes) ; il est suivi du Mozambique (30 000 tonnes) et de la Russie (27 000 tonnes). Après une année 2020 marquée par la pandémie et les fermetures de mines et usines, la production de graphite naturel a augmenté de 7,5 % en 2021, pour atteindre 1,038 Mt, toujours d'après les statistiques de l'USGS.

Le graphite synthétique est quant à lui issu du traitement à haute température d'un précurseur carboné amorphe. Ce précurseur dérive du pétrole, du charbon ou de matières organiques diverses et il s'agit typiquement de coke de pétrole (8 Mt soit un tiers de la production mondiale annuelle seraient utilisées dans ce but chaque année). 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 forme d'électrodes, de poudre ou en granulés. De fortes tensions sur la production de l'intermédiaire *needle coke* avaient cependant affecté les prix du graphite synthétique en 2019. Il existe une dizaine de fabricants de *needle coke* au monde, dont trois en Chine. Les autres sont situés aux États-Unis (Phillips 66, Seadrift) ou au Japon (C-Chem, Petrocokes, Mitsubishi Chemical, etc.). Les capacités mondiales sont estimées à 1,6 Mt et la Chine y contribuerait à hauteur de 60 % environ, et potentiellement 67 % d'ici 2025.

Les réserves mondiales de graphite sont d'environ 325 Mt selon l'USGS et sont localisées majoritairement en Turquie (90 Mt), en Chine (73 Mt) et au Brésil (70 Mt). Les trois autres pays ayant des réserves importantes sont Madagascar (26 Mt), le Mozambique (25 Mt) et la Tanzanie (18 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 graphitiques 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 % carbone, a été de \$984/t en 2021, contre \$728/t en 2020 (+35 % sur un an). Le prix du gra-

phite synthétique oscille toujours dans une fourchette large comprise entre \$7 000/t et \$20 000/t, selon les spécificités requises. La compétition entre le graphite naturel et synthétique permet, bien évidemment, 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 celui-ci est bien moins onéreux pour le consommateur que le graphite synthétique, la réalité est en fait plus compliquée. En effet, bien que la production de graphite naturel en paillettes soit assez peu coûteuse, ces paillettes doivent ensuite subir une purification (les paillettes 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*) et des acides, mais le produit est déjà pur.

Bien que la Chine continue toujours de dominer la production de graphite naturel et synthétique et reste de loin le premier consommateur mondial, on observe depuis plusieurs années une diversification de l'offre minière et métallurgique. En effet, de nombreux projets voient le jour en Afrique (Madagascar, Mozambique, Namibie, Tanzanie, mais également Malawi), en Australie (projets développés par Quantum Graphite, Renascor Resources, Minerals Commodities ou encore Hexagon Resources) ou en Europe (Talga Resources en Suède), bien soutenus par la demande croissante pour la fabrication de graphite sphérique à destination des batteries Li-ion. Cette hausse des capacités de production devrait permettre de limiter la volatilité des cours et d'éviter une substitution du graphite par d'autres matériaux dans les anodes. Néanmoins, la principale utilisation du graphite naturel et synthétique concerne la sidérurgie, et si ce secteur a subi de plein fouet la pandémie de Covid-19, il semblerait que la reprise économique mondiale, très demandeuse d'aciers, soit de nouveau d'actualité, tirant du même coup la consommation de graphite vers le haut.

Lithium (Li)

L'évolution des secteurs d'usage du lithium est l'une des caractéristiques principales de ce marché ces dernières années. Ainsi, la consommation to-

tales de lithium dans le secteur des batteries a bondi d'une part de marché de 20 % en 2008 à près de 74 % en 2021. 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 14 % en 2021), suivis par les graisses lubrifiantes au lithium (3 % en 2021), les fondants de moulage pour la production d'acier par coulée continue (2 %), la production de polymères (2 %), le traitement et le conditionnement de l'air (1 %), ou encore d'autres usages comprenant la métallurgie de l'aluminium, la production de ciment, la pyrotechnie, ou le traitement de l'eau.

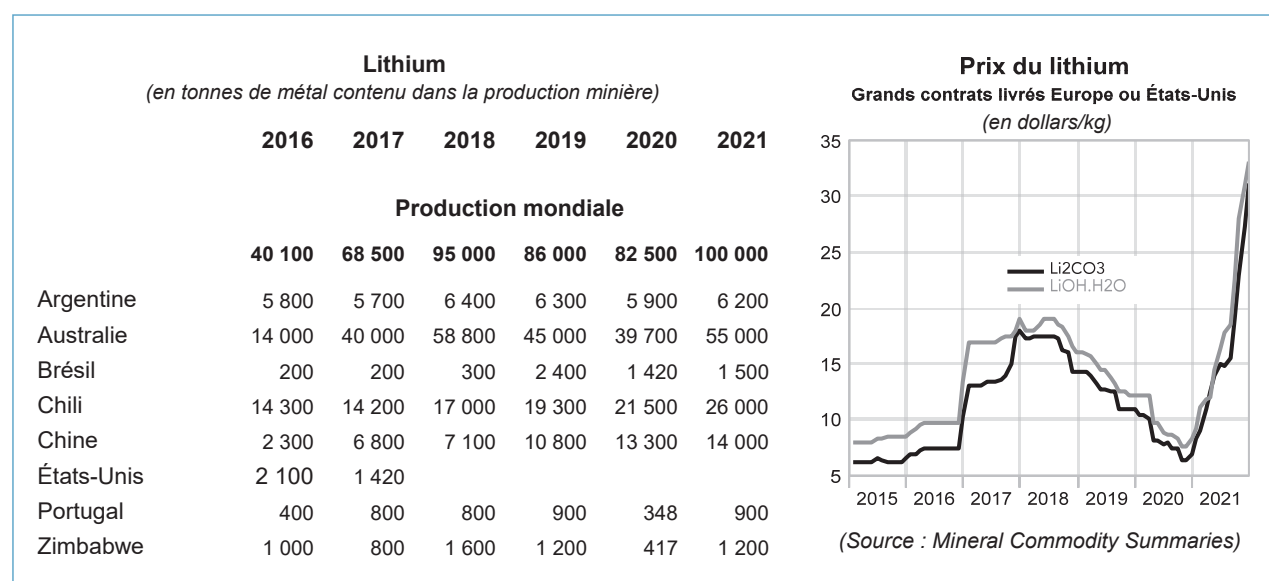
L'avènement des batteries Lithium-ion (Li-ion) a révolutionné ce marché en l'orientant vers des volumes croissants de produits de très haute qualité. En effet, dans les usages traditionnels du lithium (hormis ceux dits « de spécialité » où le lithium est utilisé sous forme métal), les degrés de pureté des composés de lithium étaient de manière générale assez faibles. À l'inverse, pour les composés de lithium employés 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 leurs performances, leur longévité, mais aussi leur sécurité.

Le composé de lithium initialement privilégié comme précurseur dans la production des

cathodes était le carbonate de lithium (Li_2CO_3) de pureté minimum 99,5 %. Or, pour des raisons techniques et de performance, l'évolution de la chimie des cathodes a modifié les besoins en favorisant l'hydroxyde de lithium (LiOH) pour cet usage. Par exemple, l'orientation récente du marché vers l'utilisation de batteries intégrant des proportions croissantes de nickel (en substitution du cobalt) favorisant 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.

Selon l'USGS, la production minière en 2021 aurait été de 100 000 tonnes de lithium contenu (t Li). Rappelons qu'en 2008 la production mondiale était de l'ordre de 20 000 tonnes. Elle pourrait dépasser 200 000 tonnes en 2025 d'après la plupart des prévisions. Les réserves évaluées à ce jour sont de 22 Mt de lithium contenu d'après l'USGS, tandis que les ressources mondiales identifiées seraient de l'ordre de 89 millions de tonnes.

Entre 2016 et 2020, l'Australie est devenue le premier producteur minier de lithium avec, entre autres, la mine de spodumène de Greenbushes, la plus grosse mine de lithium mondiale. 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 en



Chine, en particulier la transformation en précurseurs de batteries et la fabrication des batteries Li-ion elles-mêmes.

Ce phénomène est en train de s'inverser, le gouvernement australien aidant désormais les exploitants à valoriser une meilleure intégration verticale des différentes étapes sur le territoire national. Ainsi, plusieurs projets d'usines de transformation du lithium ont vu le jour. En 2021, c'est en particulier l'usine de Kwinana, liée à la mine de Greenbushes, qui a démarré sa production d'hydroxydes de lithium. Elle devrait atteindre une capacité maximum de 24 000 tonnes/an de LiOH à la fin de l'année 2022. Une seconde usine d'une capacité de 25 000 tonnes/an LiOH est également en construction dans la zone industrielle de Kemerton et devrait commencer à produire au second semestre 2022.

En 2021, les prix du lithium ont bondi par rapport à 2020. Le prix annuel du carbonate de lithium pour des contrats spot livrables à partir des États-Unis est ainsi passé d'une moyenne de \$ 8,16/kg en 2020 à \$ 16,72/kg en 2021, soit une augmentation de plus de 100 %. De même pour les hydroxydes de lithium, dont les prix ont évolué de \$ 9,54/kg à \$ 18,82/kg, soit une croissance de 97 %.

La relance de la demande mondiale en lithium est en particulier liée à la forte élévation de ventes de véhicules électriques, notamment sur le marché européen. Elle illustre les fondamentaux solides de la demande de long terme. Toutefois, il existe certaines inquiétudes naissantes sur la capacité de l'industrie minière à répondre à cette demande dans un temps très court, à l'instar de l'*International Energy Agency* (IEA) ayant alerté en octobre 2021 sur un potentiel déficit de l'offre pour un certain nombre de métaux nécessaires à la transition énergétique.

L'année 2021 a été propice aux investissements dans l'exploration et l'exploitation du lithium. L'Australie demeure très dynamique. Parmi les avancements notables hormis les usines d'hydroxyde de lithium de Kemerton et Kwinana décrits précédemment, figurent l'acquisition de la mine Ngungaju d'Altura par la société Pilbara Minerals propriétaire de la mine adjacente de Pilgangoora, ainsi que le début des travaux de construction de la mine de Mt Holland, développée par Wesfarmers et SQM, qui devrait se finir

en 2024. Enfin, l'avancement du projet Kathleen Valley (publication de l'étude de faisabilité par la compagnie Liontown Resources), permettant d'attendre le démarrage de la construction de la mine pour fin 2022.

L'Afrique semble également bien positionnée pour jouer un rôle significatif dans la production future avec plusieurs projets en développement. Le projet Manono en particulier, situé en République démocratique du Congo et mené par la compagnie australienne AVZ Minerals Ltd., a posé les premiers jalons d'une exploitation, avec notamment une demande de permis d'exploitation au ministère des Mines. Au Mali, la société Firefinch Minerals et son partenaire Ganfeng Lithium ont validé le développement du gisement de Goulamina, dont la construction est déjà commencée. Au Ghana, Atlantic Lithium a confirmé l'étude de pré-faisabilité du gisement d'Ewoyaa.

En Europe, deux projets au stade de pré-faisabilité présentent un potentiel en terre considérable. Il s'agit du projet Jadar en Serbie, pour lequel la compagnie Rio Tinto a annoncé un investissement en juillet 2021 de plus de deux milliards de dollars. Néanmoins, à la suite de nombreuses manifestations dans la capitale serbe en janvier 2022, le gouvernement serbe a révoqué l'ensemble des permis et le développement de la mine est à l'arrêt. 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. Ce dernier a annoncé fin 2021 plusieurs accords sur l'achat d'« enlèvement » (ou *offtake*) de quantités de lithium de qualité batterie à destination de constructeurs automobiles, en particulier Renault, et de fabricants comme Umicore ou LG Energy Solutions.

D'autres projets sont également à l'étude dont Cinovec en République tchèque, San Jose en Espagne, Keliber en Finlande, Zinnwald en Allemagne, Wolfsberg en Autriche et Mina do Barroso au Portugal, ce dernier souffrant néanmoins comme Jadar en Serbie d'une importante opposition locale.

En France, en décembre 2021, quelques kilogrammes de lithium ont été extraits des saumures géothermales de Soultz-sous-Forêts en Alsace à l'aide d'un nouveau procédé développé dans le cadre du projet européen EuGeLi (European

Geothermal Lithium). Dans l'Allier, la société Imerys entreprend des travaux d'exploration sur son gisement de kaolin de Beauvoir pour définir d'éventuelles réserves de lithium. Plusieurs permis d'exploration pour le lithium dans les eaux géothermales dans le Massif central et le Bassin rhénan sont actuellement en instruction.

En Amérique du Nord, les projets d'extraction de lithium se multiplient de la même façon, marqués par une grande diversité de sources potentielles, dont les argiles lithinifères à hectorite. Le pays a augmenté son budget d'exploration de 60 % en 2019, motivé par la volonté d'indépendance vis-à-vis de la Chine concernant l'approvisionnement en métaux stratégiques. Un des plus aboutis est celui de Thacker Pass dans le Nevada, propriété de la société Lithium Americas. D'autres projets sont en cours de développement ou en sommeil, tels que Rhyolite Ridge au Nevada ou les gisements de pegmatite de Piedmont en Caroline du Nord et de Wabouchi, La Corne et Authier au Québec. Dans sa démarche d'optimisation et de croissance, la société Rio Tinto a construit une usine de récupération du lithium à partir des *tailings* de sa mine de bore de Boron en Californie.

Un important gisement d'argiles à lithium est en développement au Mexique, Sonora, propriété de la société Bacanora Lithium en partenariat avec le chinois Ganfeng Lithium dont l'ouverture est prévue pour fin 2023. Cependant, la situation politique dans l'État de Sonora, fortement marquée par l'insécurité du fait d'un rôle important des cartels impliqués dans le trafic de stupéfiants, pourrait compliquer les avancées du projet.

En Amérique du Sud, un grand nombre de projets sont également mis en œuvre, en particulier en Argentine. Ce secteur reste, en 2021, l'emplacement privilégié pour l'exploration de lithium avec un budget supérieur à \$90 millions. Le projet le plus prometteur semble être celui de Cauchari-Olaroz détenu par Ganfeng Lithium à hauteur de 51 % et Lithium Americas, à 49 %, et dont la construction est très avancée avec un début de production prévu pour 2022. Au Chili, au-delà des producteurs actuels, seul le projet Salar de Maricunga se distingue avec la publication de la faisabilité définitive en janvier 2022. Il est mené par un groupement d'entreprises impliquant également le gouvernement, via l'entreprise d'État

Codelco. Toujours au Chili, la société Albermale a lancé un important investissement dans l'objectif d'augmenter considérablement le rendement de son exploitation de Salar de Atacama. Malgré des ressources nationales significatives grâce au Salar d'Uyuni (21 Mt de Li contenu), la Bolivie ne possède pas de production de lithium actuellement, bien que certains intérêts – notamment chinois et allemands – tentent de s'y implanter. Dans le contexte de l'exploitation des salars sud-américains dans le triangle du lithium, la prise en compte de l'impact socio-environnemental par les exploitants, et en particulier la gestion des ressources en eau dans ces régions désertiques, devient l'un des paramètres cruciaux pour la pérennité de ces projets. Au Brésil, Sigma Lithium Resources, propriétaire du gisement de spodumène de Grota do Cirilo dans le Minas Gerais, souhaiterait augmenter rapidement sa production d'ici fin 2022 et pourrait devenir un producteur majeur de lithium dans un délai court.

D'après certains experts, à l'avenir, les batteries sodium-ion (Na-ion) pourraient concurrencer les batteries Li-ion, car elles sont moins onéreuses et nécessitent moins de métaux rares. Elles ont toutefois une plus faible densité énergétique.

Manganèse (Mn)

Une fois le manganèse extrait de la mine, il est généralement réparti en 3 lots selon sa teneur : qualité métallurgique, qualité chimique et qualité batterie. La qualité métallurgique, qui représente la plus grande partie des concentrés, contient le plus souvent au minimum 48 % Mn et des teneurs variables en éléments traces (Fe, Al, As, P, etc.) qui vont impacter ses caractéristiques finales. Le manganèse de qualité métallurgique est destiné à la fabrication de ferro-alliages qui représente 90 % des usages. Le manganèse joue un double rôle dans la fabrication de l'acier : un tiers 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 deux tiers 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 % Mn à 7 % Mn. Les aciers au manganèse sont utilisés essentiellement pour les secteurs du bâtiment et de l'automobile pour leurs propriétés de dureté, d'élasticité, de résistance à l'usure et à l'abrasion.

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), soit sous forme métallique ou de composés chimiques manganésifères, sont 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, etc., qui rentrent dans la composition d'engrais et d'aliments pour animaux, dans l'électronique ou pour le traitement de surface des pigments et métaux, représentant une part minime des usages.

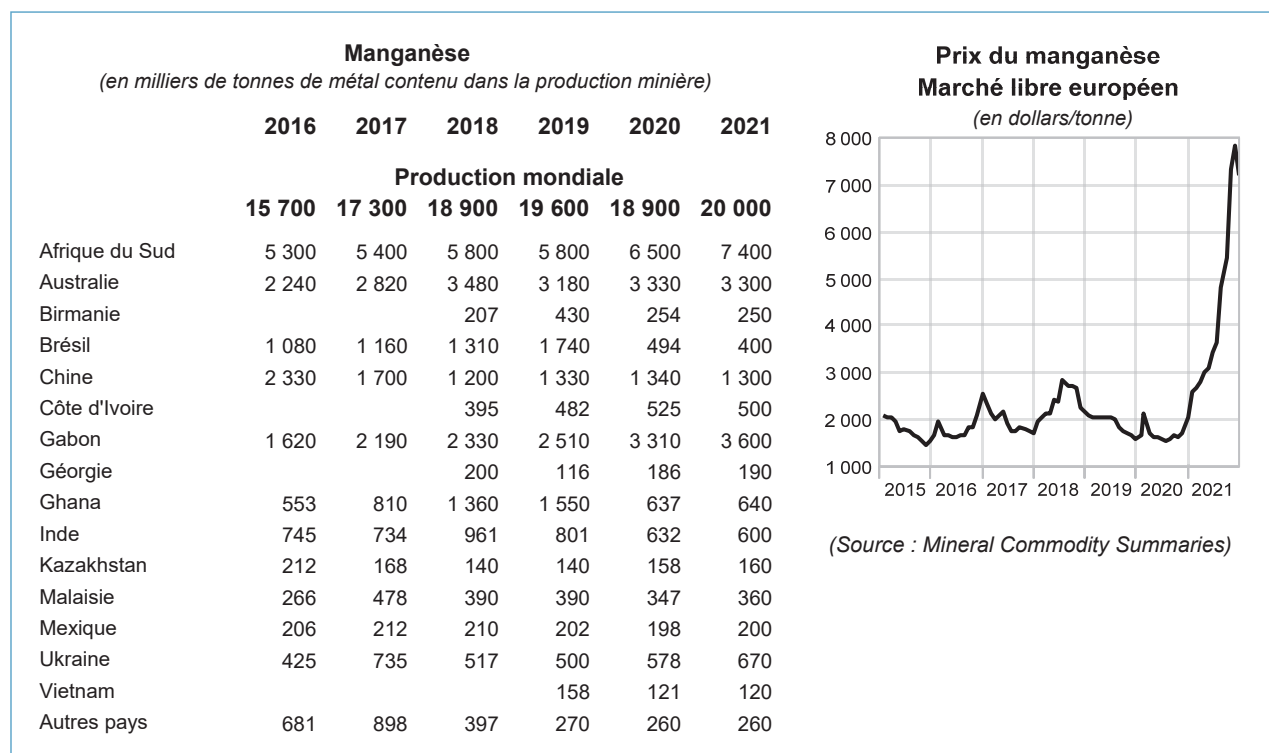
Le dioxyde de manganèse (MnO_2) rentre donc dans la composition des piles sèches (salines ou alcalines), ainsi que – de manière croissante – pour les technologies de batteries Li-ion. Il est utilisé comme matériau actif des cathodes de ces batteries pour en augmenter la conductibilité électrique. Il est présent dans les cathodes LMO (Oxyde de Lithium-Manganèse) à hauteur de 65 % en masse, dans certains cas (en fonction du précurseur) dans 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 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. Dès 2025, le type NMC 811 (4/5 Ni, 1/10 Mn et 1/10 Co) dominera (environ 25 % du marché) suivi du NMC 622 (3/5 Ni, 1/5 Mn et 1/5 Co), NMC 523 (1/2 Ni, 1/5 Mn et 3/10 Co). Les prévisions de croissance de la demande en Mn pour cet usage sont donc fortes (d'un facteur 10 d'ici 2030), pouvant conduire prochainement à des modifications des filières industrielles, notamment pour produire des sulfates de manganèse purifiés préférés par les fabricants de batteries.

En 2021, la production minière de manganèse a été de 19,95 Mt selon les données préliminaires de l'USGS, contre 18,88 Mt en 2020. Environ 72 % de la production mondiale de manganèse provient de trois pays : l'Afrique du Sud (7,4 Mt – 37 %), le Gabon (3,6 Mt – 18 %) et l'Australie (3,3 Mt – 17 %), suivis par la Chine, l'Ukraine, le Ghana et l'Inde.

Les ressources en Chine étant de médiocre qualité et proches de l'épuisement, le marché est devenu très dépendant de la production d'Afrique du Sud, multipliée par plus de 6 depuis l'année 2000. Cependant, le pays souffre de problèmes d'infrastructures, notamment ferroviaires et portuaires, et d'accès à l'électricité récurrents. Port Elizabeth est, par exemple, l'unique port permettant d'assurer les exportations de manganèse du pays, mais n'a qu'une capacité limitée et insuffisante pour faire face aux hausses récentes de production. Or, plus de la moitié de la demande issue de Chine a jusqu'ici été assurée en majeure partie par les exportations sud-africaines. La production de manganèse de l'Afrique du Sud devrait fortement augmenter, Roskill prévoyant que le pays fournira environ la moitié de la production mondiale supplémentaire de minerai de manganèse au cours de la prochaine décennie. En 2021, l'Afrique du Sud a exporté pour plus de 3 milliards de dollars de minerai de manganèse, soit son huitième produit le plus exporté.

Les gisements de manganèse sont de manière générale associés aux gisements de fer, car leurs modes de formation sont assez similaires. Les minéraux manganésifères (pyrolusite, rhodochrosite, etc.) ont précipité à partir de l'eau de mer pour former des roches sédimentaires stratifiées. Les minerais à haute teneur (>35 % Mn) sont principalement utilisés dans les alliages tandis que ceux



à plus basse teneur (<35 % Mn) sont ajoutés lors de la production de fonte. L'évaluation des ressources et réserves mondiales est difficile et très imprécise. En 2021, l'USGS indique que les réserves cumulées de l'Afrique du Sud (640 Mt, en hausse par rapport à 2020), du Brésil (270 Mt), de l'Australie (270 Mt, également en hausse) représentent 79 % des réserves mondiales, estimées à environ 1 492 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 et moyen termes. Toujours selon Roskill, la tendance positive pour le manganèse sud-africain devrait se poursuivre, en partie grâce à la montée en puissance de la mine Mokala de Ntsimbintle Holdings et Glencore (> 1 Mt/an).

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

Les prix du manganèse sont établis par contrats directs entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen du Mn métal en 2021 (*flakes* à 99,97 % Mn) a été de \$4 519/t, en forte hausse de 109 % par rapport à 2020 (\$2 157/t). Cette augmentation des prix est le reflet d'une très grande demande pour les alliages, dont la demande a été stimulée par la reprise économique post-Covid, notamment en Chine. Néanmoins, cette hausse des prix finaux cache des cours de minerais plutôt bas, en raison d'une production minière en progression en 2021, et de stocks relativement élevés. Cela n'empêche pas que la grande majorité des producteurs miniers continuent de produire en générant des bénéfices.

La demande future en manganèse sera tirée en grande partie par la croissance de l'urbanisation mondiale qui est repartie 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 de cobalt se réduire au profit du manganèse, mais ce changement n'est qu'à un stade de recherche et pourrait prendre quelques années pour s'implanter durablement.

Variations 2019-2021 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 2020	Production 2021	Variation de la production 2020/2019 (en %)	Réserves 2020	Réserves 2021	Variation des réserves 2021/2020 (en %)
Antimoine	kt	Sb	111	110	-0.90 %	1 900	>2 000	5.26%
Béryllium	t	Be	250	260	4.00 %	N/A	N/A	N/A
Bismuth	t	Bi	19 000	19 000	0.00 %	N/A	N/A	N/A
Cadmium	t	Cd	24 000	24 000	0.00 %	N/A	N/A	N/A
Chrome	kt	Chromite	37 000	41 000	10.81 %	570 000 ^a	570 000 ^a	0.00 %
Cobalt	t	Co	142 000	170 000	19.72 %	7 100 000	7 600 000	7.04 %
Gallium	t	Ga	327	430	31.50 %	N/A	N/A	N/A
Germanium	t	Ge	140	140	0.00 %	N/A	N/A	N/A
Graphite naturel	kt	Graphite	966	1 000	3.52 %	320 000	320 000	0.00 %
Hafnium	t	Hf	70-80	70-80	N/A	N/A	N/A	N/A
Indium	t	In	960	920	-4.17 %	N/A	N/A	N/A
Lithium	kt	Li	83	100	21.21 %	21 000	22 000	4.76 %
Magnésium	kt	Mg	1 000	950	-5.00 %	N/A	N/A	N/A
Manganèse	kt	Mn	18 900	20 000	5.82 %	1 300 000	1 500 000	15.38 %
Molybdène	kt	Mo	298.00	300	0.67 %	18 000	16 000	-11.11 %
Niobium	kt	Nb	67.7	75	10.78 %	>17 000	>17 000	0.00 %
Rhénium	t	Re	59	59	-0.51 %	2 400	> 2400	N/A
Scandium	t	Sc	<15	<15	N/A	N/A	N/A	N/A
Sélénium	t	Se	3 120	3 000	-3.85 %	100 000	100 000	0.00 %
Silicium	kt	Si	8 120	8 500	4.68 %	N/A	N/A	N/A
Tantale	t	Ta	2 100	2 100	0.00 %	>140 000	N/A	N/A
Tellure	t	Te	562	580	3.20 %	31 000	31 000	0.00 %
Terres rares	kt	Oxydes de terres rares	240	280	16.67 %	120 000	120 000	0.00 %
Titane métal	kt	Ti	230	210	-8.70 %	N/A	N/A	N/A
Tungstène	kt	W	78	79	0.77 %	3 400	3 700	8.82 %
Vanadium	kt	V	105	110	4.76 %	22 000	24 000	9.09 %
Zirconium	kt	Concentrés de zircon	1 200	1 200	0.00 %	64 000 ^b	70 000 ^b	9.38 %

a réserves exprimées en équivalent concentrés de chromite de qualité "shipping grade"

b réserves exprimées en ZrO₂

(Data source : USGS 2022 - Mineral Commodity Summaries)

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 2021, telles que publiées début 2022 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 doivent, en conséquence, aussi être appréhendées avec beaucoup de prudence, car les marchés de nombreux petits métaux sont opaques.

Données complémentaires

A	B	C	C	D
Matière première	Premier producteur mondial	Part de la production mondiale du premier producteur en 2021	Part de la production mondiale du premier producteur en 2020	Sous-produit
Antimoine	Chine	55 %	52 %	Partiellement : plomb, or, zinc
Béryllium	USA	66 %	62 %	Non
Bismuth	Chine	84 %	83 %	Essentiellement : plomb, tungstène
Cadmium	Chine	42 %	36 %	Essentiellement : zinc
Chromite (minerai de chrome)	Afrique du Sud	44 %	40 %	Rarement : platinoïdes
Cobalt (production minière)	République Dém. du Congo	73 %	70 %	Essentiellement : cuivre, nickel
Gallium	Chine	98 %	97 %	Exclusivement : aluminium
Germanium	Chine	68 %	66 %	Exclusivement : zinc, charbon
Hafnium	France	43 %	?	Exclusivement : zirconium
Indium	Chine	57 %	56 %	Exclusivement : zinc, cuivre, plomb, étain
Lithium	Australie	53 %	49 %	Rarement : potasse
Magnésium	Chine	85 %	87 %	Non
Manganèse	Afrique du Sud	37 %	28 %	Non
Molybdène	Chine	44 %	41 %	Partiellement : cuivre
Niobium	Brésil	88 %	91 %	Non
Rhénium	Chili	49 %	57 %	Exclusivement : molybdène
Scandium	Chine	66 %	66 %	Exclusivement : Terres Rares, fer, uranium
Sélénium	Chine	36 %	38 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc
Silicium	Chine	70 %	68 %	Non
Tantale	République Dém. du Congo	34 %	40 %	Partiellement : niobium, lithium, étain, Terres Rares
Tellure	Chine	59 %	62 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc, bismuth
Terres rares	Chine	61 %	58 %	Non
Titane (éponge)	Chine	58 %	48 %	Non
Tungstène	Chine	83 %	83 %	Non
Vanadium	Chine	68 %	62 %	Essentiellement : acier, titane
Zirconium	Australie	33 %	35 %	Non

(Data source : USGS 2022 - Mineral Commodity Summaries)

Le tableau p.478 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 de 2022 réalisée par l'USGS.

Le tableau ci-contre 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 2021, ainsi que le caractère de « sous-produit », ou non, de l'élément. En effet, nombre des petits métaux sont considérés comme des « 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 de celui de l'extraction métallurgique du ou des métaux contenus, ces derniers pouvant avoir des localisations géographiques très différentes.

Antimoine (Sb)

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

L'antimoine est un ignifugeant (43 %) et un stabilisateur à la chaleur (6 %), 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», c'est-à-dire l'oxyde d'étain-antimoine) et combiné à des halogénures (chlorures ou bromures).

En alliage avec le plomb sous sa forme «métal», l'antimoine permet d'augmenter la dureté, la résistance à la fatigue et à la corrosion du plomb (14 %), mais son utilisation majeure reste les batteries automobiles (32 %). Cet usage suit deux tendances antagonistes : reconnues pour leur fiabilité et leur faible coût, les batteries au plomb sont encore utilisées dans les pays en développement. Au contraire, les économies développées tendent à favoriser la substitution, par exemple avec des alliages au calcium-étain. Par ailleurs, le virage vers les véhicules électriques – qui ne nécessitent pas de batteries de démarrage au plomb – 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), 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 (AsSb, GaSb et InSb).

En 2020, l'Oeko-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). Pour ces usages, il existe en effet peu de substituts, ou alors ceux-ci posent des problèmes équivalents ou supérieurs. À l'inverse, certains produits antimoniés tels que les retardateurs de flamme ont été interdits dans d'autres régions du monde, comme en Alaska.

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.

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 de statistiques hétérogènes à fort risque de «double comptage». Pour illustration, l'USGS a réévalué à la baisse la production d'antimoine en 2020, de 153 000 tonnes à 111 000 tonnes (soit une surestimation de 38 %). Toujours d'après le service géologique américain, elle serait stable en 2021, à 110 000 tonnes.

En 2021, le premier producteur a été la Chine avec 66 000 tonnes d'antimoine métal (selon Argus Metals), en baisse de 16 % par rapport à 2020, suivi de la Russie et du Tadjikistan, avec respectivement 25 000 tonnes et 13 000 tonnes. Depuis 2010, la Chine fait face à des difficultés sur le plan minier, avec des réserves et des teneurs en baisse, et des impacts environnementaux importants. Le gouvernement a adopté des normes plus strictes dans ce dernier domaine et a arrêté de nombreux sites d'extraction. Le pays a importé de plus en plus de concentrés d'antimoine 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. Contrairement à la production d'antimoine métal qui a reculé, la production de trioxyde a, elle, augmenté de 12,5 % en Chine en 2021 selon la *China Nonferrous Metals Industry Association*. Elle est passée de 93 000 tonnes à 105 000 tonnes.

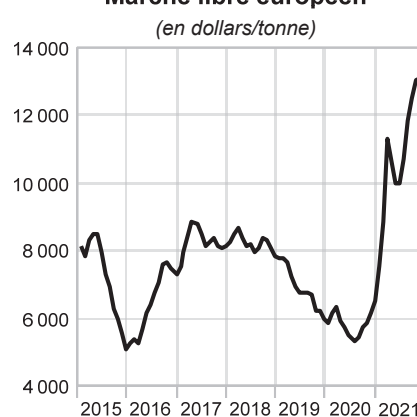
Au sultanat d'Oman, le «four à antimoine», détenu en partie par Tri-Star Resources, a été mis en opération et pourrait raffiner annuellement jusqu'à 20 000 tonnes d'antimoine métal et de trioxyde à pleine capacité. Le Tadjikistan prévoyait, pour 2021, l'ouverture d'un nouveau site de production d'une capacité de 16 000 tonnes par l'entreprise chinoise Huayu Mining, mais elle a été décalée à la fin 2022 en raison du Covid-19.

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, en 2021, à plus de 2 Mt. Le département américain

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

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale	148 000	137 000	147 000	162 000	111 000	110 000
Afrique du Sud	1 200					
Australie	5 000	3 120	2 170	2 030	3 900	3 400
Birmanie	3 000	1 000	2 640	6 000	2 200	2 000
Bolivie	2 670	2 700	3 110	3 000	2 600	2 700
Canada				1	2	2
Chine	108 000	98 000	89 600	89 000	61 000	60 000
Équateur			50	1	1	
Guatemala	25	25	25	25	80	80
Honduras			12	10		
Iran	200	300	600	500	400	400
Kazakhstan	573	700	300	300	100	100
Laos	242	340	300	140		
Mexique	196	243	260	300	700	700
Pakistan	114	60	28		17	20
Russie	8 000	14 400	30 000	30 000	25 000	25 000
Tadjikistan	14 000	14 000	15 200	28 000	13 000	13 000
Turquie	4 000	2 000	2 400	2 400	1 330	1 300
Vietnam	643	380	240	310	390	400

Prix de l'antimoine
Marché libre européen



(Source : Mineral Commodity Summaries)

de la Défense aurait des stocks stratégiques d'antimoine à hauteur de 90 tonnes en 2021, toujours selon l'USGS.

L'antimoine contenu dans les batteries au plomb et autres alliages est bien recyclé. 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 de l'antimoine métal a été de \$ 11 045/t en 2021, soit près du double du prix moyen enregistré en 2020. Ceci traduit la reprise économique post-Covid, couplée à des coupes de production en Chine dues aux mesures environnementales, mais aussi à la crise énergétique.

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 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 et des batteries, 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 approximativement 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.), du spatial 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, utilisés par exemple 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 2021, la reprise qui a fait suite à la pandémie a eu un impact très favorable 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 une augmentation record de 29 % de ses ventes de produits à base de béryllium pour cette année.

Les États-Unis demeurent le premier producteur mondial de béryllium en 2021 avec 170 tonnes, soit les deux tiers de la production minière totale. Ce pays en domine le marché 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 70 tonnes) et, pour une faible part, à partir du béryl extrait à Madagascar et au Brésil (de l'ordre

Béryllium						
<i>(en tonnes de métal contenu dans la production minière)</i>						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Production mondiale de minerai					
	220	214	240	250	250	260
États-Unis	155	150	165	160	165	170
Brésil	5	3	3	3	3	3
Chine	50	50	48	70	70	70
Madagascar	6	6	6	1	1	1
Mozambique			16	15	3	3
Nigeria	6	4	4	1	1	1
Rwanda	1	1	1	1	1	1
Ouganda					7	7

(Source : Mineral Commodity Summaries)

de quelques tonnes), ainsi qu'au Nigeria et au Mozambique. Il faut noter que les gisements de béryl sont également exploités pour les gemmes (l'émeraude est un béryl, c'est-à-dire un silicoaluminate de béryllium dans lequel une partie des ions Al^{3+} est substituée par des ions Cr^{3+} ou V^{3+}).

La production métallurgique et de raffinage de béryllium pour l'industrie est plus diversifiée avec, notamment, l'acteur japonais NGK 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. Son coût élevé et les risques de toxicité 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, en raison de la très faible teneur de Be dans les différentes applications. 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 de l'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 aérospatiale : \$350 à \$1 900/kg;

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

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

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 natio-

nale. Selon l'USGS, l'inventaire de ce stock au 30 septembre 2021 était de 57 tonnes de Be métal, de 7 tonnes sous forme de poudre métallique, et d'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 avec le gisement 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. Finalisée en août 2019, une étude économique préliminaire (*Preliminary Economic Assessment* ou PEA) envisage un début de production potentielle à l'horizon 2023, sous réserve des financements et validations techniques intermédiaires.

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.

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 le *technical grade* à 99,99 % Bi métal,

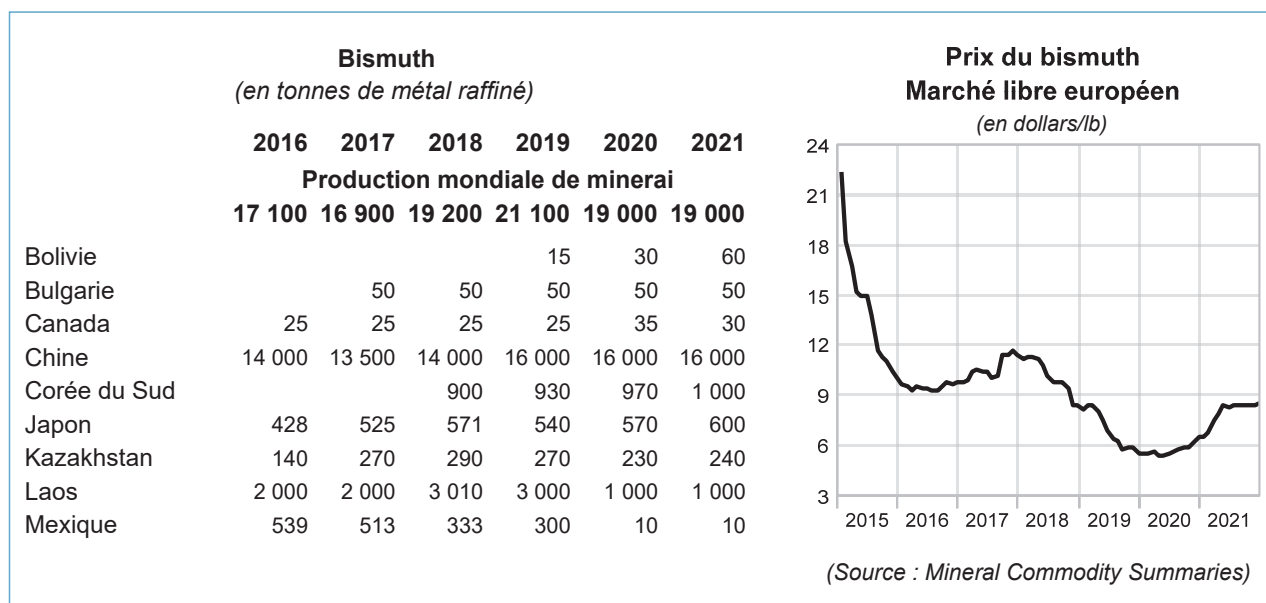
du *pharmaceutical grade* à 99,999 % Bi, destiné exclusivement aux utilisations humaines.

En 2021, la production mondiale de Bi raffiné estimée par l'USGS a été de 19 000 tonnes (cette quantité est toutefois exprimée en poids total et non en Bi contenu). Selon les chiffres de cette institution américaine, la Chine est toujours – de loin – le premier producteur mondial de bismuth avec 84 % de l'offre totale. 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. Jinwang dispose du principal centre de recherche sur le bismuth en Chine et a investi massivement dans le financement de cette recherche. Il s'est imposé comme fournisseur important de clients de la chimie comme DuPont, BASF et 5N Plus. Par la suite, cet acteur s'est étendu en Europe, rachetant par exemple les activités du groupe Orrion Chemicals en France en 2015, en particulier l'usine de la Voulte-sur-Rhône, en Ardèche.

Au Vietnam, la compagnie Masan Resources exploite la mine de tungstène de Nui Phao, 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 tonnes 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.

Le groupe chinois Vital Materials est également devenu un acteur important du marché du



bismuth raffiné, par le rachat en novembre 2019 des stocks de bismuth du *Fanya Metal Exchange*, stocks équivalents à plus d'un an de production mondiale (19 228 tonnes), ainsi que par l'acquisition en février 2019 des activités sur les sels de bismuth du groupe Orrion Chemicals en Espagne.

En 2021, les cours du bismuth ont augmenté pour la première fois depuis 2017 avec un prix moyen (Bi 99,99 % Europe) de \$8,01/kg contre \$5,75/kg en 2020, soit une hausse de 39,3 %. N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, ces prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs.

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

Le recyclage du bismuth s'effectue quasi exclusivement en «boucle fermée» à partir de chutes de production d'acteurs comme 5N Plus et Hunan Jinwang Bismuth. À partir des produits en fin de vie, le taux de recyclage est inférieur à 1 %, étant donné le caractère dispersif de ses principaux usages (pigments, produits pharmaceutiques, etc.).

La croissance de la consommation mondiale est portée par plusieurs secteurs. D'une part, celui

des pigments. En effet, ceux à base de vanadate de bismuth sont utilisés de manière croissante pour les revêtements en remplacement des formulations à base de Pb et Cr dans de nombreux secteurs. Les acteurs majeurs du secteur (par exemple BASF, DuPont, DCC Lansco, etc.) utilisent déjà largement ces formulations. D'autre part, de futures applications potentielles dans les domaines des semi-conducteurs, de la thermoélectricité ou pharmaceutiques pourraient porter le marché. Dans le dernier cas, des propriétés antivirales de la ranitidine bismuth citrate comme «agent anti-SARS-CoV-2» ont été testées et prouvées en 2020, avec des résultats probants à l'échelle du laboratoire (publication *Nature Microbiology* des chercheurs Yuan S. et Wang R.).

Les semi-conducteurs à base de bismuth sont développés depuis une dizaine d'années, avec l'existence d'une communauté scientifique active à l'échelle internationale. Cependant, des limitations techniques existent à ce jour pour leur applicabilité industrielle à grande échelle.

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

Cadmium (Cd)

Le cadmium est un métal malléable 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 Ni-Cd). On distingue souvent les batteries Ni-Cd grand public et de spécialité. Les premières, longtemps utilisées dans les équipements électriques portables sont de moins en moins usitées du fait des réglementations sur la toxicité du cadmium et de leur délaissement du fait du développement rapide des batteries nickel-hydrure métallique (Ni-MH) et Lithium-ion (Li-ion), aux performances nettement supérieures, et à des prix en baisse constante. En 2018, les batteries Ni-Cd représentaient moins de 2 % de la capacité du marché mondial des batteries rechargeables (environ 550 GWh). Les batteries Ni-Cd industrielles sont toujours utilisées, en tant que batteries de secours, en raison de leur grande fiabilité et de leur résistance aux fortes décharges. Un autre usage important du cadmium, mais lui aussi décroissant, est la production de pigments jaunes, oranges ou rouges, très utilisés pour le revêtement des engins de chan-

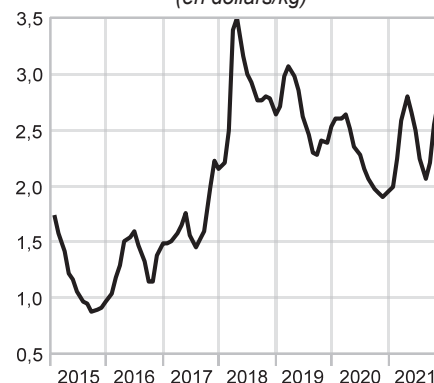
tier par exemple, car ils protègent l'acier de la corrosion. Datant de février 2017, un amendement du règlement REACH limitant très fortement la teneur en cadmium des peintures entraîne cependant la substitution des pigments au cadmium par des pigments à base de vanadate de bismuth ou sulfure de cérium, présentant peu ou pas de toxicité. Hors de l'Europe, le cadmium est parfois encore utilisé pour la stabilisation des plastiques. Les usages restants du cadmium comprennent les alliages à bas point de fusion et les applications dans le domaine de l'énergie et de l'électronique utilisant les propriétés semi-conductrices de plusieurs de ses composés. Le plus populaire est le tellure de cadmium (CdTe) pour les cellules photovoltaïques à couches minces, nécessitant environ 80 kg de Cd par MW de capacité électrique installée. Cet usage a un fort potentiel de développement, bien que le silicium domine largement le marché des cellules photovoltaïques en 2021 (voir la section consacrée au tellure). Dans les panneaux photovoltaïques, le semi-conducteur CdTe est séquestré entre plusieurs couches et ne présente donc pas de risques sanitaires.

Selon l'USGS, la production mondiale de Cd était de 24 000 tonnes en 2021 (sans la production américaine, tenue confidentielle depuis 2011), soit le niveau qu'elle avait atteint en 2020. Le cadmium

Cadmium
(en tonnes de métal raffiné)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale	23 900	25 400	25 100	24 400	24 000	24 000
Allemagne					450	500
Australie					348	300
Canada	2 310	1 800	1 680	1 803	1 800	1 800
Chine	8 200	8 200	8 200	8 200	10 000	10 000
Corée du Sud	3 600	5 600	5 000	4 400	3 000	3 000
États-Unis	400	400				
Japon	1 990	2 140	1 980	2 000	1 880	1 900
Kazakhstan	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
Mexique	1 190	1 160	1 360	1 395	978	800
Norvège					400	400
Ouzbékistan					400	400
Pays-Bas	630	600	1 100	1 100	880	900
Pérou	820	797	765	772	700	600
Russie	1 300	1 200	1 200	900	1 000	1 000
Autres pays	2 400	2 370	2 310	2 320	520	600

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

est majoritairement récupéré en sous-produit de la métallurgie du zinc. La Chine, premier métallurgiste sur ce dernier segment, demeure aussi le plus grand producteur mondial de cadmium, avec 42 % de l'offre totale, 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 %. À partir de fin 2019, l'offre s'est infléchi en raison des conséquences industrielles de la pandémie. Elle semble désormais commencer à se stabiliser. Les autres producteurs majeurs sont la Corée du Sud, le Japon et le Canada. En 2018, la Chine a instauré 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, comme évoqué précédemment, qu'en sous-produit du zinc. L'USGS indique que les minerais de zinc ont une teneur moyenne de l'ordre de 0,03 % de cadmium. Celle observée dans les gisements de phosphates sédimentaires peut atteindre plusieurs centaines de grammes par tonne (ppm). Par conséquent, les gisements de phosphates sédimentaires et de charbon représentent une ressource importante, peu valorisée à ce jour. Le cadmium peut être substitué dans la plupart des usages, mais à un coût plus élevé.

Le cadmium des batteries Ni-Cd est couramment recyclé. La société Retriev Technologies, basée dans l'Ohio (États-Unis), produit des lingots de cadmium secondaire à partir du recyclage des batteries par pyrométallurgie. Dans l'Union européenne, le rendement du recyclage des batteries Ni-Cd est supérieur à 80 % avec 99 % du Cd récupéré. En France, la société SNAM produit, *via* un procédé de distillation et raffinage, des lingots de cadmium issu du recyclage de ces batteries.

Le prix annuel moyen du cadmium de pureté 99,95 % en 2021 a été de \$2,46/kg, en hausse de 9,7 % par rapport à 2020. Après son rétablissement en début d'année, un effondrement notable du prix du cadmium a eu lieu au deuxième trimestre 2021. Celui-ci est imputable à la résurgence de la pandémie de Covid-19 en Inde, entraînant un recul de la demande en Cd de ce pays, parmi les plus grands importateurs.

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 en 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. En outre, en 2021, la réglementation européenne concernant les teneurs en métaux lourds dans l'alimentation a évolué avec un abaissement significatif du seuil de tolérance pour le cadmium.

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 50 % et 65 % 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 annuelle en chromite se situe autour des 40 Mt, mais après une croissance en baisse en 2020 liée à la pandémie de Covid-19, une hausse comprise entre 5 % et 10 % équivalente aux niveaux pré-pandémiques, est attendue sur les prochaines années. Plus de 95 % de la chromite est destinée à la production de ferrochrome, dont 77 % vont servir à la production des aciers inoxydables

pour lesquels le chrome est irremplaçable, et 23 % pour d'autres aciers et alliages au chrome. Les 5 % de la production de chromite restants sont utilisés sous forme de composés chimiques, de produits réfractaires et pour la confection de moules pour les fonderies. Sous sa forme métal, le chrome ne compte que pour moins de 1 % 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 la société DCX Chrome, filiale de Delachaux.

Selon les données de l'USGS, la production de chromite reste, en 2021, largement dominée par l'Afrique du Sud avec 18 Mt (soit 44 %), uniquement dans le complexe du Bushveld. Les autres pays producteurs majeurs sont le Kazakhstan (7 Mt), la Turquie (7 Mt), et l'Inde (3 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, notamment à l'ouest du complexe du Bushveld, en Afrique du Sud (soit le tiers de la production sud-africaine). Selon les données compilées par l'Élémentarium, environ 12,4 Mt de ferrochrome ont été produites en 2020. Les principaux producteurs de ferrochrome sont, de loin, la Chine (5,7 Mt) et l'Afrique du Sud (2,7 Mt).

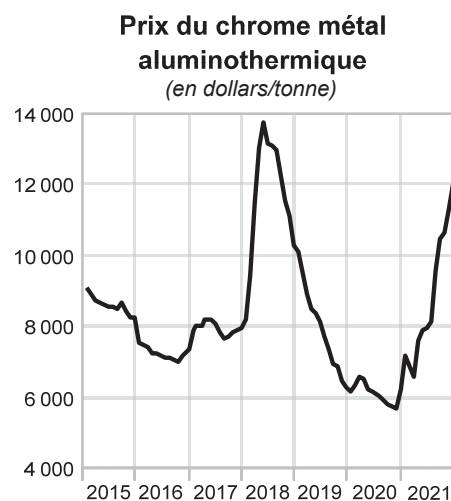
Toujours d'après l'USGS, les capacités de production mondiale de chrome métal (99,996 % Cr) étaient de 87 000 tonnes en 2019 et provenaient

principalement de Chine (52 %), de Russie (21 %), de France (13 %) et du Royaume-Uni (9 %). 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 2021. 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 de chromite)					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Production mondiale					
	30 200	35 700	43 100	44 800	37 000	41 000
Afrique du Sud	14 700	16 500	17 600	16 395	13 200	18 000
Finlande			2 210	2 415	2 290	2 300
Inde	3 200	3 500	4 300	4 139	2 500	3 000
Kazakhstan	5 380	4 580	6 690	6 700	7 000	7 000
Turquie	2 800	6 500	8 000	10 000	8 000	7 000
Autres pays	4 160	4 580	4 250	5 110	3 980	4 100



(Source : Mineral Commodity Summaries)

À l'instar de nombreux autres petits métaux, les cours du chrome ne sont pas établis sur les marchés boursiers, mais sont issus de négociations entre producteurs et utilisateurs. En raison de la diversité des produits se rapportant au chrome et de la variabilité de leur teneur en métal contenu, une grande diversité de prix peut être observée. Le prix moyen du chrome métal aluminothermique (99 % Cr) a été de \$ 8 856/t en 2021. Il affiche une augmentation de 45 % par rapport à 2020 (\$ 6 105/t), et se rapproche de son niveau de 2018 (\$ 11 710/t). Les prix du ferrochrome (HC 60 % Cr et 6-8 % C) ont, eux, connu une progression de 25 % entre 2020 et 2021, passant de \$ 1 886/t à \$ 2 508/t, en moyenne. Ces augmentations s'expliquent en grande partie par une reprise industrielle post-pandémie dynamique, mais également par une baisse de la production – très énergivore – de ferrochrome en Chine, et ce en raison de nombreuses restrictions d'alimentation en électricité mises en place dans les usines chinoises depuis l'été 2021.

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 mi-

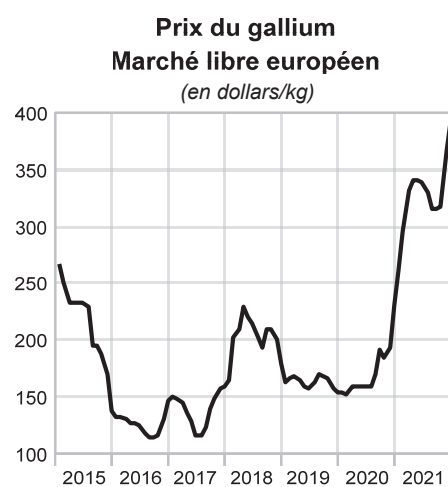
nerai de chrome pour encourager la production de ferrochrome domestique offrant une meilleure valeur ajoutée. Du côté de la demande, la reprise économique chinoise post-Covid s'est matérialisée par une production croissante d'acier inoxydable depuis avril 2020 et a donc bénéficié au marché du chrome dans son ensemble. Cette tendance haussière devrait se maintenir en 2022 et 2023.

Gallium (Ga)

Sur une consommation mondiale d'environ 350 tonnes, la grande majorité du gallium produit dans le monde a pour débouché la production des circuits intégrés en électronique et pour l'optoélectronique (diodes électroluminescentes – DEL –, diodes lasers, photodiodes). L'un des autres usages importants du gallium est celui des cellules photovoltaïques en couches minces CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium). Enfin, 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 semi-conducteur privilégié pour la production de circuits intégrés fonctionnant à des fréquences supérieures aux substrats à base de silicium. Le principal marché est la téléphonie mobile avec deux tiers des usages, devant les communications *wifi*.

Gallium (en tonnes de métal raffiné)						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale						
	194	320	413	351	327	430
Allemagne	4					
Chine	171	300	397	338	317	420
Corée du Sud		3	3	2	2	2
Japon	5	3	3	3	3	3
Russie	4	7	6	8	5	5
Ukraine	10	4	4			



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Le GaN est, quant à lui, un matériau particulièrement adapté à la fabrication de circuits intégrés hautes performances fonctionnant jusqu'à 100 GHz. Ces composants permettent notamment d'améliorer les performances des systèmes radars, d'antennes actives ou des systèmes de guerre électronique – ce qui le rend particulièrement important –, ainsi que dans le secteur de la défense. Du fait de ses propriétés de conversion de l'électricité en lumière, le GaN est également utilisé pour des applications satellites ou la technologie LiDAR. Ses applications grand public se trouvent en particulier au sein de certaines DEL et dans les diodes laser pour le stockage optique des DVD et *Blu-ray*. 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.

Si le gallium primaire (pureté de 99,99 % ou 4N) peut être récupéré en sous-produit du zinc (5 %), il est surtout issu de la production d'alumine (95 %) par le procédé Bayer. Lors de ce procédé, 70 % du gallium est lessivé de la bauxite et suit l'alumine dans la solution de soude caustique. La liqueur de soude obtenue est enrichie successivement et le gallium extrait par résine échangeuse d'ions. Par la suite, et en fonction des applications, le gallium doit être purifié à une pureté de 99,99999 %, ou 7N. On considère qu'à l'échelle mondiale moins de 10 % du Ga des bauxites est effectivement récupéré, faute d'investissements dans le domaine.

En 2021, la production primaire de gallium est estimée par l'USGS à 430 tonnes, la Chine produisant 98 % de ce volume à partir de bauxite d'origines diverses. Cela représente une augmentation globale de 31 % par rapport à 2020, en lien avec la relance post-pandémique de l'activité métallurgique de l'aluminium. Les capacités mondiales de production des deux différents niveaux de pureté (4N et 7N) sont bien supérieures aux quantités réellement produites puisqu'elles sont évaluées respectivement à 774 tonnes et 325 tonnes par

l'USGS. La Chine a produit la quasi-totalité du gallium primaire en 2021 (environ 98 %). Toujours selon le service géologique américain, les autres producteurs de gallium que sont la Russie, la Corée du Sud et le Japon n'ont produit que 2 à 5 tonnes de Ga primaire chacun, la production étant très limitée, car excédentaire depuis 2012. 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. Suite à l'accroissement récent des prix du gallium, l'Allemagne envisagerait une relance de son offre.

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 en moyenne 50 ppm de Ga représentant plus de 1 Mt de gallium (récupérable à 10 %). À ce chiffre, il faut ajouter les quantités de gallium contenues dans les minerais de zinc, voire dans certains gisements de phosphates et de charbon. Au Canada, la société Appia Rare Earths and Uranium souhaite récupérer comme coproduit le gallium contenu avec les terres rares de son « gisement » d'Alces Lake.

Le recyclage du gallium a surtout lieu en boucle courte par récupération des déchets (*scraps*) de fabrication du gallium raffiné et des plaquettes/galettes (*wafers*) 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 essentiellement au Canada, en Chine, en Allemagne, au Japon, en Slovaquie 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 \$ 329,1/kg en 2021, en hausse de 90,4 % par rapport à la moyenne des prix observée en 2020.

La demande en gallium est croissante, certains experts estiment même un doublement de la demande d'ici à 2025. La production chinoise, extrêmement monopolistique et à fortes variations,

associée à un phénomène de stockage/déstockage, génère d'importantes fluctuations sur ce marché.

En termes de recherche scientifique dans le domaine du changement climatique, des chercheurs ont récemment mis au point un procédé de réduction du CO₂ à base de gallium et de fluorure d'argent permettant d'éviter son émission dans l'atmosphère.

Germanium (Ge)

La répartition des usages du germanium est estimée comme telle : fibres optiques, 30 % (contre 20 % pour la période 2010-2015); panneaux photovoltaïques à haut rendement (terrestre et spatial), 20 %; systèmes de vision nocturne et optiques infrarouges, 20 %; catalyse de polymères (polytéréphtalate d'éthylène – PET – utilisé pour l'embouteillage de boissons gazeuses, les fibres textiles et certains films plastiques), 20 %; circuits électroniques hautement intégrés et autres applications (poudres luminophores, métallurgie et chimiothérapie), < 10 %. La plus forte croissance de la demande ces dernières années a été observée dans le secteur de la fabrication des fibres optiques, pour lequel le germanium est indispensable au cœur de la fibre optique, améliorant la vitesse de transmission de l'information. La télécommunication 5G, outre l'importante infrastructure en termes de fibre optique qu'elle mobilise, utilise des semi-conducteurs de haute performance (en termes

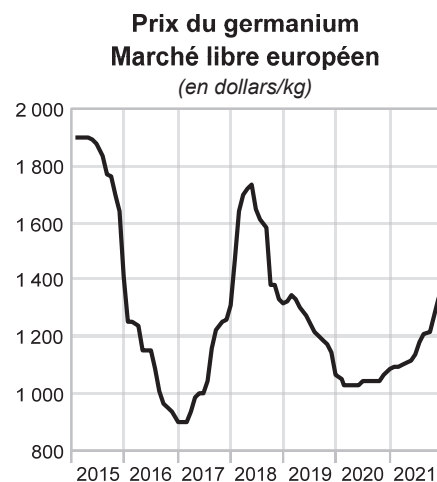
de fréquence), notamment à base de silicium-germanium (SiGe), qui devraient massivement se développer dans les années à venir et continuer de porter la croissance de la demande en germanium.

En 2021, la production mondiale de germanium est estimée par l'USGS à 140 tonnes, sans la production des États-Unis qui est tenue confidentielle. Le Ge est majoritairement 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 95 tonnes en 2021, selon l'USGS (soit 68 % de la production totale). 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 (et plus particulièrement du lignite). 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.

Le marché du germanium est caractérisé par des 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 – SRB*) constituerait des stocks stratégiques de germanium chaque année.

Le prix moyen du germanium a été de \$ 1 185/kg en 2021, affichant une hausse de 13 % par rapport à 2020. En 2021, la pénurie de semi-conduc-

Germanium (en kilogrammes de métal raffiné)						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale						
	126 000	106 000	130 000	131 000	140 000	140 000
Chine	80 000	60 000	94 600	85 700	95 000	95 000
Russie	6 000	6 000	6 000	5 000	5 000	5 000
États-Unis	3 000	2 000				
Autres pays	40 000	40 000	30 000	40 000	40 000	40 000



(Source : Mineral Commodity Summaries)

teurs n'a pas été résorbée, alors que la demande devrait continuer de croître dans de nombreux domaines en 2022 (automobile, électronique, etc.). La tension sur les prix du germanium pourrait donc persister, si le niveau des stocks et celui de la production restent inchangés.

Il n'existe pas d'estimation précise des réserves et des ressources en germanium en raison de son exploitation en tant que sous-produit. L'USGS estime que seulement 3 % du germanium contenu dans les minerais de zinc est récupéré, essentiellement pour des raisons technico-économiques. Des réserves importantes de germanium sont indiquées dans les mines de zinc situées en Alaska, au Tennessee, et dans l'État de Washington. La société canadienne Ivanhoe Mines a récemment validé son projet de réouverture de la mine de Kipushi en République démocratique du Congo. Les ressources en germanium du gisement seraient de 12 Mt à plus de 60 g/t de Ge. Les cendres volantes résultant de la combustion du charbon constitueraient également une ressource importante, notamment en Chine et en Russie, non quantifiée à ce jour. Néanmoins la récupération du germanium contenu dans les lignites est souvent difficile et incomplète (de l'ordre de seulement quelques pour cent).

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 (SiGe) peut être substitué par le phosphore d'indium ou par les composés au gallium (nitrure ou arséniure). Des substitutions sont également possibles dans le domaine de l'optique infrarouge, mais souvent au détriment de la performance.

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 60-70 % de la demande mondiale. Cette dernière serait de l'ordre de 1 600 tonnes à 1 800 tonnes par an (primaire et secondaire).

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 accélérer les ventes et tirer la demande d'indium vers le haut.

En 2021, ses autres utilisations se répartissaient 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-conducteurs 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 leurs utilisations sont très largement minoritaires 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* –, leur part demeure stable, à environ 5 %.

L'évolution des réseaux de télécommunications a créé une nouvelle demande d'indium, sous forme de phosphore 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 générations (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 2021, la production d'indium raffiné a été de 920 tonnes, selon les données préliminaires de l'USGS (contre 960 tonnes en 2020). 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 530 tonnes (57 % 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 chacun), ainsi que la France qui produit également de l'indium purifié à 99,998 % sur le site d'Auby exploité par Nyrstar (35 tonnes, selon les estimations du service géologique américain). 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 le contrôle de Nyrstar en 2019, ne publie plus la production d'indium dans son rapport annuel.

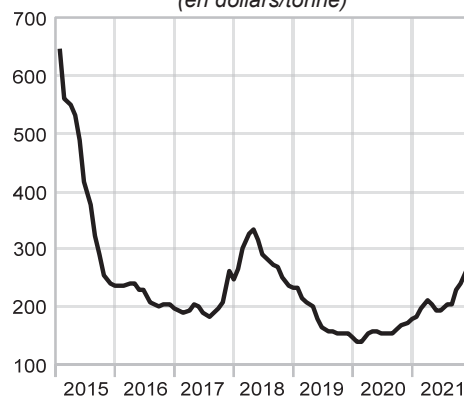
L'indium étant récupéré comme sous-produit minoritaire, il n'existe pas d'évaluation standardisée des réserves et ressources mondiales. Néanmoins, les chercheurs Werner, Mudd & Jowitt ont pu, en 2017, estimer les ressources en indium des gisements de zinc, cuivre et étain dont les teneurs en indium étaient 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 %). L'indium, en tant que sous-produit du zinc, est rarement analysé par les compagnies d'exploration minières. Les quelques projets ayant *a priori* un potentiel sont : Mount Pleasant d'Adex Mining (Nouveau-Brunswick, Canada), Ayawilka de Tinka Resources (Pérou), Iska Iska de Eloro Resources (Bolivie) et West Desert de American West Metals (Utah, États-Unis).

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

Indium
(en tonnes de métal raffiné)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale (en indium contenu)	680	714	741	968	960	920
Belgique	20	20	22	20	20	20
Canada	71	67	58	61	66	60
Chine	300	287	300	535	540	530
Corée du Sud	210	225	235	225	210	200
France		30	40	40	38	38
Japon	70	70	70	70	66	60
Pérou	10	10	11	12	12	10
Russie	5	5	5	5	5	5

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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 prix moyen de l'indium (99,99 % en Europe), établi directement entre producteurs et utilisateurs, a été de \$216,6/kg en 2021 (+38 % par rapport à 2020).

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 2019, de la manière suivante :

- 34 % 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 ;

- 34 % pour la production de moulages sous pression, contenant généralement 90 % Mg. Les moulages sont utilisés à 70 % dans le domaine de l'automobile et, dans une moindre proportion, dans la construction spatiale, 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 % comme réducteur pour la fabrication du titane métal, mais aussi du zirconium, hafnium, béryllium et uranium, à partir du procédé Kroll (principalement en Russie) dont une partie proviendrait de magnésium recyclé ;

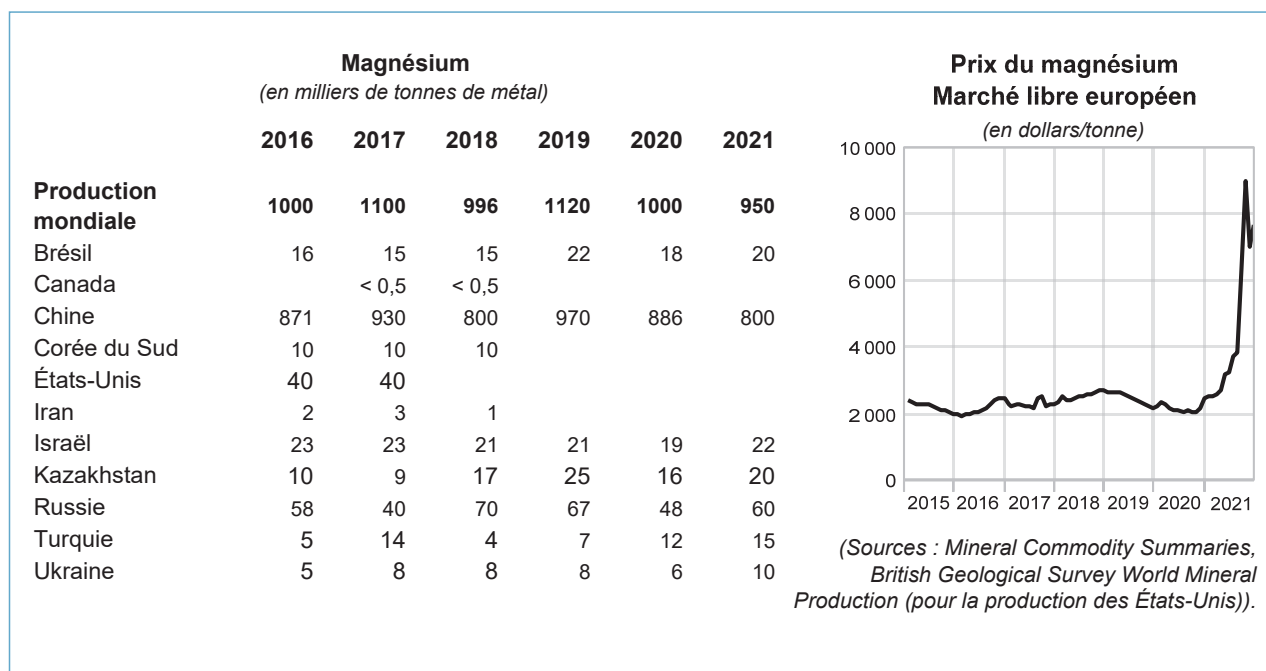
- 13 % pour la désulfuration de l'acier (principal débouché de la poudre de magnésium chinoise) ;

- 3 % 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. Les effets de la guerre pourraient, à cet égard, se faire sentir à très court terme sur cette filière. En 2021, la reprise industrielle mondiale post-pandémie a entraîné une forte hausse de la demande mondiale en magnésium, entraînant une pénurie qui fut logiquement suivie d'une forte augmentation des prix.

L'essentiel du marché du magnésium est en Chine, avec 84 % de la production mondiale de magnésium primaire en 2021. 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. Ces nouvelles réglemen-



tations, couplées aux pénuries d'électricité en Chine, ont entraîné des fermetures de fonderies qui ont contribué à une baisse notable des capacités de production. Ces tensions, accompagnées par des taux de fret maritimes élevés et une spéculation importante sur les stocks, sont les principales raisons de la contraction du marché du magnésium et de la hausse des prix. Ainsi, bien que le procédé *Pidgeon* soit peu à peu remplacé par d'autres procédés moins polluants, le retour des pleines capacités de production en Chine pourrait prendre quelques années. Par exemple, 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 Magnésium et l'australien Magontec en Chine (bassin de Qaidam).

En 2021, la production mondiale de magnésium métal est estimée à 950 000 tonnes (hors États-Unis) selon l'USGS, en baisse de 5 % par rapport à 2020. 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 2023 d'une production de 10 000 tonnes par an à partir du traitement de

cendres volantes issues de centrales à charbon. Selon Roskill, ce procédé conduirait à l'émission de 12 tonnes de CO₂ par tonne de magnésium, contre 25 tonnes de CO₂ par tonne de magnésium par le procédé *Pidgeon*. À terme, l'usine pourrait produire 100 000 tonnes de magnésium par an en 2026. 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 (69 000 tonnes en boucle courte – *new scrap* – et 29 000 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 \$ 2 492/t en 2021, en hausse de 15,4 % par rapport à 2020. Cette tendance à la hausse des prix pourrait perdurer sur plusieurs années en raison des nouvelles normes environnementales chinoises et de la progression de la consommation mondiale en magnésium.

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 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. Par ailleurs, des études sur l'utilisation de poudre métallique de magnésium comme combustible dans les transports sont actuellement menées par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Même si les perspectives sont encore hypothétiques, les plus optimistes suggèrent que cette technologie puisse remplacer les combustibles fossiles à terme. Enfin, 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

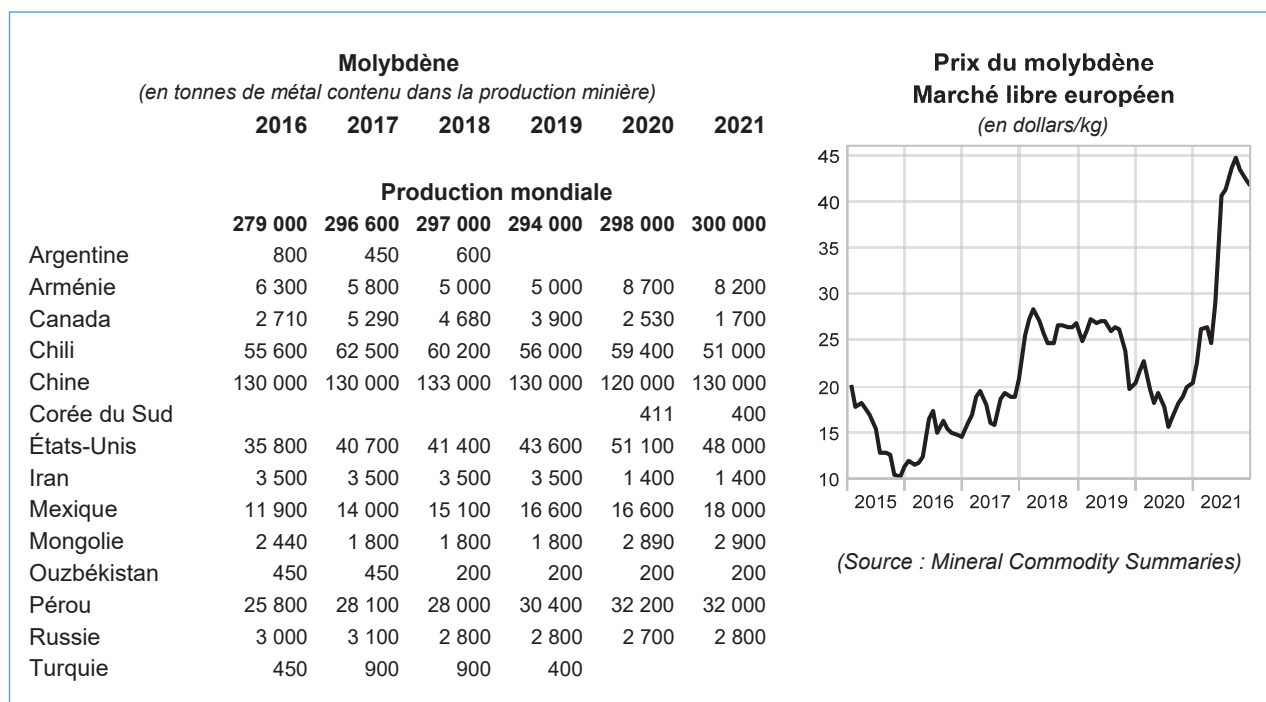
d'importants atouts dans le domaine des ferro-alliages, où il est largement utilisé pour renforcer la résistance des aciers.

Selon l'*International Molybdenum Association* (IMOA), la demande mondiale était de 244 800 tonnes de molybdène contenu en 2020. La répartition se décompose comme suit : 81 % pour les aciers, distingués en aciers dits d'ingénierie (39 %), aciers inoxydables (24 %) et aciers pour l'outillage (7 %), la production de fonte (8 %) 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 (6 %) 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. Après avoir souffert en 2020 pendant la crise sanitaire, elle a fortement rebondi en 2021, à la faveur de la reprise de l'activité économique. 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, systèmes 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 2021, la production minière de molybdène s'élevait à 300 000 tonnes, selon les données préliminaires de l'USGS. La production minière mondiale provient à 94 % de cinq pays : la Chine (130 000 tonnes, soit 44 %), le Chili (51 000 tonnes, soit 17 %), les États-Unis (48 000 tonnes, soit 16 %), le Pérou (32 000 tonnes, soit 11 %) et le Mexique (18 000 tonnes, soit 6 %).

Le molybdène est produit pour moitié en produit principal (Chine, États-Unis) 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 un 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 répercuter cette baisse sur les autres métaux associés.

L'USGS évalue les réserves mondiales de molybdène à 16 Mt, dont 8,3 Mt pour la Chine (52 % des réserves mondiales), suivie par les États-Unis (2,7 Mt), le Pérou (2,3 Mt), le Chili (1,4 Mt) et la Russie (430 kt). Les ressources en terre sont estimées à environ 25 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 rebondi en 2021 pour atteindre \$35,7/kg, alors qu'il s'élevait à \$19,0/kg en 2020, soit une hausse de 88 %. Cette augmentation est liée à la reprise de l'activité industrielle post-Covid, notamment en Chine avec une forte croissance de la production de ferromolybdène et le redémarrage de l'activité de forage du secteur pétrolier.

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. Parmi les projets avancés figure le gisement porphyrique de Malmbjerg au Groenland où le molybdène est le produit principal. Ce projet aurait le potentiel de fournir 30 % de la demande de ce métal de l'Union européenne.

Niobium (Nb)

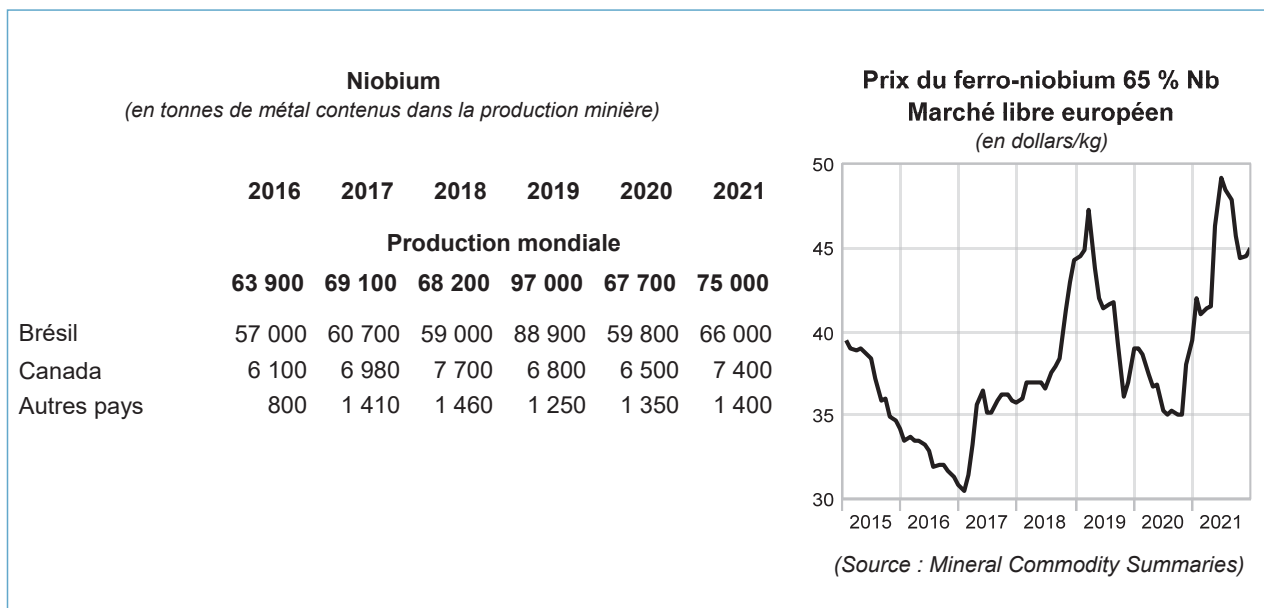
Le ferroniobium (FeNb) – un alliage qui a une teneur en niobium de 60 % à 65 % – représente environ 90 % des usages du niobium. Il est utilisé principalement dans les aciers à haute limite d'élasticité (HLE), aciers inoxydables, et réfractaires. Du ferroniobium très pur (99 % FeNb), produit sous vide, 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. 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 Nb 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 2021, la production mondiale du niobium est évaluée à 75 000 tonnes par l'USGS,

soit une augmentation de 11 % par rapport à 2020 (réévaluation par l'USGS à 67 700 tonnes en 2020, au lieu des 78 000 tonnes initialement annoncées). Le producteur dominant de ce marché est le Brésil qui compte pour 88 % de la production totale, suivi du Canada avec environ 10 %. L'industrie brésilienne du niobium est fortement intégrée, avec pour principal acteur la société CBMM. Sa mine principale est la mine d'Araxá, dans l'État du Minas Gerais, avec une capacité de 59 000 tonnes de Nb par an qui pourrait atteindre 90 000 tonnes de Nb par an dans un avenir proche, du fait d'augmentations de capacités envisagées. 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 tonnes de Nb par an. Au Canada, Magris Resources (ex Niobec) exploite une mine située au Québec, avec une production estimée à 6 200 tonnes de Nb par an, soit 8 % de la production mondiale. Aux États-Unis, la mine d'Elk Creek (Nebraska) est en passe de démarrer la production avec une étude de faisabilité finalisée en 2019 et une production envisagée de 7 220 tonnes par an de FeNb à 65 %, ce qui représenterait la première production de niobium du pays depuis 1959. L'étude de faisabilité du projet a été réalisée en 2019 et la construction de l'usine est prévue au cours de l'année 2022 pour un démarrage de la production courant 2023 selon la compagnie NioCorp. Ce projet est très important pour les États-Unis, car il permet de défendre leur indépendance sur une ressource minérale particulièrement critique, notamment pour le secteur de la défense et l'industrie aéronautique.

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 appelée coltan) en particulier au Nigeria, au Rwanda, en République démocratique du Congo et en Sierra Leone. Dans ces pays, l'exploitation quasi exclusivement artisanale du tantale et du niobium est associée à des risques socio-environnementaux, dont des conflits armés et du travail forcé, contre laquelle luttent un certain nombre d'initiatives. Les minerais 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 Morro Dos Seis Lagos, en cours de développement, dans l'État brésilien d'Amazonas, avec des ressources estimées à environ 75 Mt.

Des stocks stratégiques de 544 tonnes de ferro-niobium et de 10 tonnes de niobium métal seraient détenus par les États-Unis, toujours d'après les données du service géologique américain.

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 ferroniobium (65 % Europe) s'établissait à \$41,86/kg en 2021, en hausse de 13,7 % par rapport à 2020.

Le ferroniobium est substituable par le ferovanadium et l'utilisation de l'un ou de l'autre est, à quelques détails techniques près, une question de prix.

Le niobium présente un taux potentiel de recyclage élevé, mais n'est pas séparé lors du recyclage des aciers et superalliages pour des raisons économiques.

En 2022, CBMM pourrait étendre sa capacité de production à 150 000 tonnes de FeNb (soit environ 90 000 tonnes de Nb contenu). La compagnie envisagerait, par la suite, une nouvelle expansion à 225 000 tonnes de 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 du réacteur. La consommation de Re est ainsi largement conditionnée par la demande en superalliages de l'industrie aéronautique. La plupart des acteurs du marché s'attendent à ce que l'industrie aérospatiale connaisse une reprise progressive, la demande revenant aux niveaux d'avant la pandémie d'ici 2023. L'annonce des prévisions de production 2022-2023 des avionneurs a relancé la demande en superalliages dès le deuxième trimestre 2021. Celle de l'aviation militaire devrait également 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 naphtha lourd) en essence. La demande de rhénium dans cet usage reste stable, la part des substituts comme les catalyseurs à base de platine n'ayant pas augmenté significativement.

Il n'existe pas de production minière de rhénium à proprement parler. La production primaire est métallurgique puisque le rhénium est récupéré lors du traitement des fumées résultant du grillage de la molybdénite (sulfure de molybdène). La production de rhénium a été estimée à 59 tonnes en 2021 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 29 tonnes de rhénium récupérées dans les

résidus de fonderie de leurs opérations à travers le monde (incluant également celles de Belgique, du Mexique et du Pérou). En Pologne, l'acteur KGHM a produit 9,5 tonnes de rhénium en 2021, suivi par Freeport McMoran aux États-Unis avec 9,1 tonnes. Les producteurs de moindre importance 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 pour le Chili (53 % des réserves mondiales). Les autres pays détenteurs de réserves significatives sont les États-Unis avec 400 tonnes, la Russie avec 310 tonnes et le Kazakhstan avec 190 tonnes.

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

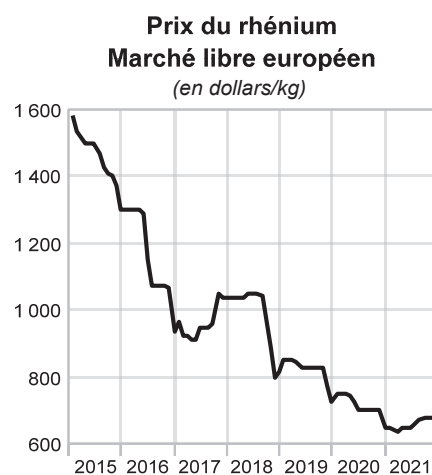
– rhénium métal (pellets à 99,9 % Re) : prix moyen en 2021 de \$ 980/kg, en baisse de – 5 % par rapport à 2020 ;

– perrhénate d'ammonium (APR), *basic grade* (69,2 % Re) : prix moyen en 2021 de \$ 660,1/kg, en baisse de – 7 % par rapport à 2020 (\$ 713,5/kg) ;

– perrhénate d'ammonium (APR), *catalyst grade* (> 69,2 % Re) : prix moyen en 2021 de \$ 1 000/kg, en baisse de – 12 % par rapport à 2020.

Les filières de recyclage du rhénium représentent désormais près de la moitié de l'approvisionnement total. Les principaux producteurs de

Rhénium						
(en kilos de métal contenu dans la production minière)						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale						
	51 600	48 700	48 600	53 200	59 300	59 000
Arménie	350	300	281	280	260	260
Chili	27 000	27 000	27 000	30 000	30 000	29 000
Chine	3 000	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
Corée du Sud				2 800	2 800	2 800
États-Unis	8 440	8 200	8 220	8 360	8 830	9 100
Kazakhstan	1 000	1 000	1 000	500	500	1 000
Ouzbékistan	1 000	460	460	460	4 900	4 900
Pologne	9 000	9 300	9 090	8 340	9 510	9 500



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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 vannes 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 perrhéate d'ammonium (APR) directement disponible 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 dans l'Ohio pour des raisons de rentabilité (capacité de 7 tonnes par 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 tonnes par an). Roskill estime que la production de rhénium secondaire a diminué de 40 % entre 2014 et 2019. La chute de l'activité de la construction aéronautique et spatiale en 2020 s'est accompagnée d'une diminution de la quantité de ferrailles générée, ce qui a resserré l'offre en métal recyclé.

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 teneur 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 7300 kg par an de Re et 5100 tonnes par an de 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 (1541 °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 former à elles seules des gisements exploitables. Il n'y a actuellement 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 tonnes à 25 tonnes serait produite mondialement, principalement sous forme d'oxyde de scandium (Sc_2O_3). Quelques dizaines de kilogrammes seraient effectivement transformés en scandium métal.

La production chinoise s'élèverait à 10 tonnes (Rongjia Scandium Industry) par an d'oxyde de scandium (Sc_2O_3), en tenant compte de la production de scandium *via* la récupération dans les résidus 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 de Taganito par un procédé de lixiviation acide sous haute pression (HPAL), récupère du scandium avec la production d'un concentré intermédiaire (oxalate de scandium), converti en oxyde à la raffinerie Harima au Japon. 12,5 tonnes d'oxalate de scandium auraient ainsi été produites sur les 9 premiers mois de 2021 selon le gouvernement philippin, soit une augmentation de 22,5 % par rapport à la même période 2020 (10,2 tonnes). Le Kazakhstan, l'Ukraine et la Russie produiraient quelques tonnes par an de Sc_2O_3 , principalement à partir des résidus miniers d'uranium et lors du traitement de phosphates.

Bien que le scandium soit très peu récupéré, ses ressources sont abondantes. C'est bien la faible concentration 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.

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. L'USGS estime le prix moyen de l'oxyde de scandium en 2021 à \$2 200/kg (contre \$3 800/kg en 2020), 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 les entreprises pour l'évaluation écono-

mique de leurs projets miniers est généralement comprise entre \$1 500 et \$2 000/kg Sc_2O_3 .

En 2021, les développements visant à augmenter la production de scandium semblent montrer que ce marché devient stratégique. Rio Tinto a commencé début 2021 la production de 3 tonnes par an d'oxydes de scandium de haute pureté (99,99 %) à partir de ses résidus de production de dioxyde de titane du complexe métallurgique de Sorel-Tracy au Québec. 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, l'usine de Rusal produit de l'oxyde de scandium ainsi que des alliages Al-Sc (Al-Sc 2 %). Aux États-Unis, Elk Creek (société NioCorp) espère démarrer la construction de sa mine de ferriobium début 2022, avec des réserves probables de près de 2 400 tonnes de Sc à extraire en coproduit du niobium. L'étude du gneiss alcalin à scandium et terres rares de La Paz en Arizona continue (société American Rare Earths). La rhyolite de Round Top (Texas) contient également du scandium. Ce projet est toujours à l'étude par la compagnie Texas Mineral Resources, qui a par ailleurs démontré la faisabilité technique de la production de terres rares, dont du scandium, à partir de résidus miniers du charbon. Ucore Rare Metals poursuit le développement de son projet Bokan en Alaska. Au Canada, la société Imperial Mining Group continue ses études sur le projet de syénite à scandium et terres rares de Crater Lake. 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 tonnes de 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 pro-

duction de Sc_2O_3 initiale de 20 tonnes par an pourrait monter à 150 tonnes par 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 2024, 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 investisseurs potentiels. Il est prévu une production de 20 à 40 tonnes par an de Sc_2O_3 extraites en coproduit du cobalt et du nickel par lixiviation acide sous haute pression (*High Pressure Acid Leaching* – HPAL). Les réserves seraient de 3 500 tonnes de Sc_2O_3 .

En Europe, le projet de recherche européen SCALE visait à développer un procédé de récupération du scandium dans la filière de fabrication du dioxyde de titane.

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 l'alimentation des humains et celle du 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. C'est notamment le cas en Finlande où 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 (2018), 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 et photovoltaïque,
- 5 % en usages divers.

La métallurgie du manganèse est le principal secteur d'utilisation du sélénium, dont la majeure partie a lieu en Chine. Son usage sous forme de dioxyde de sélénium permet d'accroître la vitesse de dépôt, tout en améliorant le rendement énergétique de la réaction électrolytique. Dans ce domaine, le dioxyde de sélénium peut éventuellement être remplacé par le dioxyde de soufre au détriment des performances énergétiques.

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), colorer les verres en rouge (feux de signalisation), mais également pour réduire la transmission thermique des vitres dans les voitures ou les bâtiments, un marché en constante augmentation à l'échelle mondiale. Dans certaines de ces applications, le sélénium peut éventuellement être substitué par l'oxyde de cérium (CeO_2).

Le sélénium rentre aussi dans la composition des cellules photoélectriques et des cellules photovoltaïques en couches minces (CIS – diséléniure de cuivre et d'indium ou « CuInSe_2 » – et CIGS – disulfoséléniure de cuivre, d'indium et de gallium ou « Cu(In,Ga)Se_2 »). 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 mondiale de sélénium raffiné a été estimée à 3 000 tonnes en 2021, soit un recul de 3,8 % par rapport à 2020 (3 120 tonnes). Les données concernant les États-Unis sont habituellement confidentielles. Néanmoins, le service géologique du pays indique que l'unique producteur de sélénium a stoppé temporairement ses activités

Sélénium
(en tonnes de métal raffiné)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale de métal	3 270	2 700	2 810	2 880	3 120	3 000
Allemagne	700	300	300	300	300	300
Belgique	200	200	200	200	200	200
Canada	176	49	61	57	60	60
Chine	920	930	930	1 100	1 200	1 100
Finlande	96	105	100	115	84	100
Inde					14	10
Japon	752	729	768	740	740	750
Pérou	45	45	45	40	35	40
Pologne	87	88	76	64	74	65
Russie	145	150	150	150	340	300
Suède	100	20	90	19	10	20
Turquie		50	50	50	50	50
Autres pays	47	47	44	45	14	25

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

de raffinage en 2021, mais que les producteurs de boues anodiques riches en sélénium ont continué leurs activités de production. Les principaux producteurs mondiaux sont la Chine (1 100 tonnes), le Japon (750 tonnes), l'Allemagne et la Russie (300 tonnes). Ces quatre pays représentent plus des 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 et, de manière plus anecdotique, de plomb ou de zinc. Cependant, il n'existe pas de production minière de sélénium. Il est majoritairement récupéré lors du traitement des boues anodiques issues du raffinage du cuivre, et minoritairement en sous-produit des gisements de plomb-zinc. Ce phénomène explique la corrélation entre les pays producteurs de sélénium et les fonderies/raffineries de cuivre. Dans la plupart des cas, la production est assurée par traitement des boues résiduelles s'accumulant dans les cellules d'électrolyse à la suite du raffinage des anodes de cuivre. La Chine et le Japon sont les acteurs dominants du raffinage du cuivre, certains acteurs européens étant également importants : l'Allemagne (Aurubis), la Belgique (Umicore), la Finlande (Boliden), la Pologne (KGHM) et la Suède (Boliden).

L'USGS évalue avec de grandes incertitudes les réserves mondiales de sélénium, les teneurs

en sélénium dans les minerais n'étant que rarement renseignées et variables (0,5-12 ppm). Celles-ci s'établiraient à 100 000 tonnes Se, dont 26 000 tonnes en Chine (soit 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 % du total mondial. Les charbons contiendraient également des quantités importantes de sélénium, mais la récupération ne semble pas économique pour l'instant.

Le prix du sélénium est établi par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen du sélénium (teneur de 99,5 %) en 2021 a été de \$ 18,4/kg, en hausse de 25 % par rapport à 2020 (\$ 14,7/kg). Cette élévation est liée à une raréfaction de la disponibilité du sélénium brut concomitamment à une diminution de l'écoulement des stocks de métal de la part des producteurs de cuivre. L'abaissement de la production de manganèse électrolytique en Chine, qui requiert du sélénium, a entraîné une diminution du volume des importations et a donc permis de maintenir cette augmentation des tarifs à un taux relativement bas.

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, etc. n'est pas économiquement récupérable. Ainsi, le taux de recyclage du sélénium est estimé à moins de 5 %.

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.

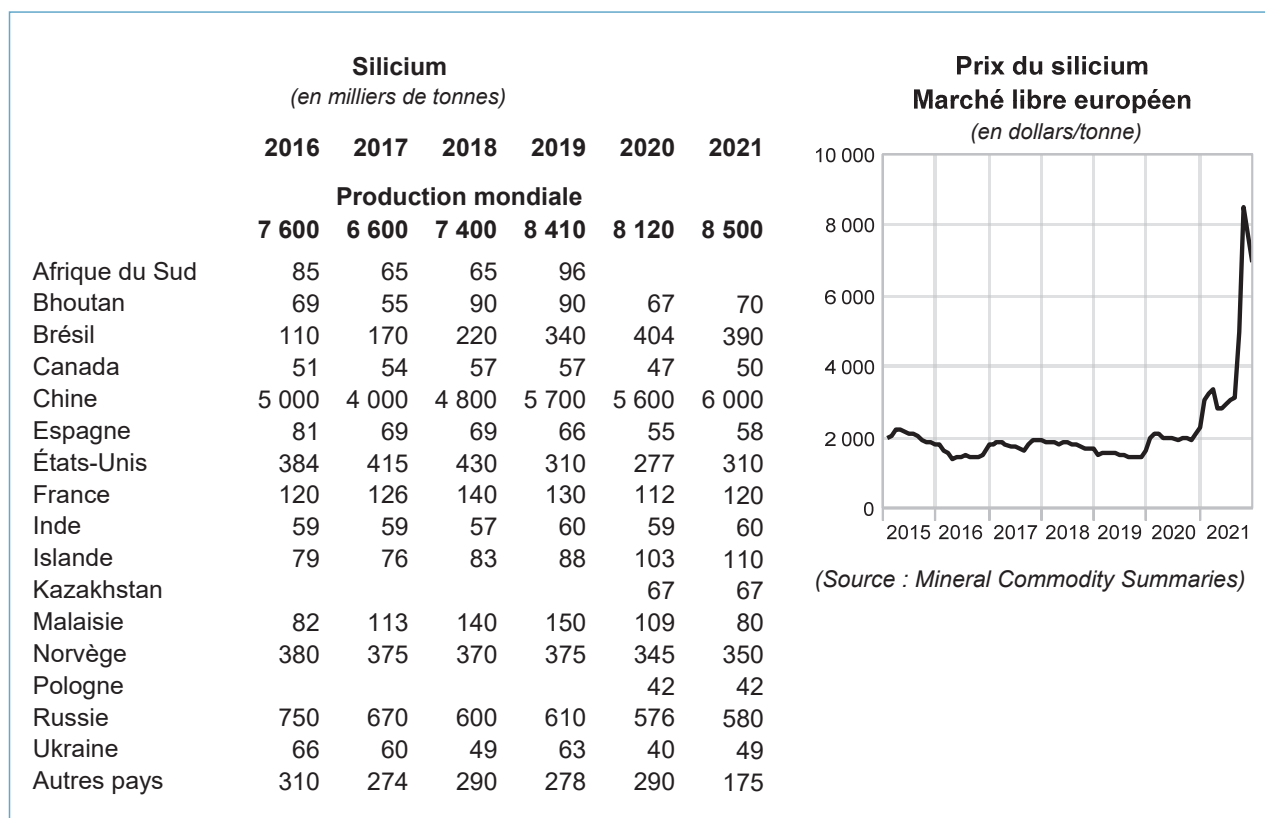
En 2021, le silicium métal est principalement utilisé dans les alliages d'aluminium Al-Si (42 %) et les silicones (33 %). Il est aussi connu comme étant l'élément phare des cellules photovoltaïques (15 %) et des semi-conducteurs (2 %), dont les croissances ont été très fortes et sont amenées à se maintenir au cours des années à venir. Les 8 % restants correspondent aux usages minoritaires et aux pertes. 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 pur permettent l'effet photoélectrique nécessaire à la production d'électricité. Dans la microélectronique, ces mêmes propriétés sont fondamentales pour le fonctionnement des circuits intégrés, le

stockage et la transmission d'informations. La faiblesse de son coût relatif lui a permis de devenir majoritaire par rapport à d'autres semi-conducteurs tels que le germanium, bien que ce dernier soit préféré dans certaines techniques de pointe (aérospatiale). La consommation de silicium métal a été en forte hausse dans toutes les filières sur la période 2010-2019 (+6,3 % par an). Elle est en augmentation de 24 % en 2021, à 3,8 Mt, par rapport à 2020 à la faveur de la reprise économique mondiale post-Covid.

Le silicium est produit par la réduction de la silice (SiO_2) dans un four à arc électrique en présence de charbon et 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) ; 99,99999 %, ou «7N», pour la qualité solaire (SoG) ; et jusqu'à 99,9999999 %, ou «9N», voire 10N pour la qualité électronique (EG). Le silicium de qualité solaire et microélectronique s'obtient après distillation du trichlorosilane (SiHCl_3), puis décomposition en présence d'hydrogène (procédé Siemens). Il peut également être obtenu en lit fluidisé et de manière très minoritaire par affinage métallurgique (qualité métallurgique améliorée). Le silicium polycristallin («polysilicium») produit est ensuite transformé en lingots multi ou monocristallins. En 2021, la production de cellules solaires au Si monocristallin a continué sa croissance fulgurante et devient très majoritaire. Le silicium EG est nécessairement sous une forme monocristalline (méthode de Czochralski ou zone fondue flottante).

La production de silicium métal est en forte augmentation en 2021, à près de 3,8 Mt. Cependant, cela n'a pas empêché une pénurie de silicium métal en raison d'une demande très forte et de divers événements ayant joué sur la production en Chine : période de sécheresse, crise énergétique et incidents techniques. Les premiers producteurs de silicium métal ont été la Chine, le Brésil, la Norvège, et la France. De nombreuses usines chinoises à l'arrêt ont néanmoins repris leur activité afin de bénéficier de la hausse des prix.

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 gisements fournissent une roche de qualité pour la carboréduction en four à arc électrique. Les réserves de silicium ne sont généralement pas communiquées par les carriers (exploitants des carrières).

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, coproduit de la métallurgie du silicium, sert de charge minérale améliorant les propriétés de certains bétons. Dans les cellules photovoltaïques et les composants électroniques, le recyclage du silicium est au stade de la recherche.

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. En 2021, le *Guangzhou Futures*

Exchange a émis la possibilité d'instaurer un marché de contrats à terme pour le silicium et le polysilicium afin de protéger les consommateurs des hausses de prix et d'asseoir sa position dans le marché mondial. Le prix annuel moyen du silicium métallurgique (MG) a été de \$4381/t en 2021, en hausse spectaculaire de 116 % par rapport à 2020. La pénurie de silicium métal a généré une très forte hausse des prix au cours du mois d'octobre 2021 : le prix européen du silicium MG a franchi la barre des \$8000/t alors que le prix chinois a, lui, frôlé la barre des \$10000/t. Les prix se sont détendus en début d'année 2022 pour redescendre vers les \$4000/t. Ces prix devraient largement profiter à l'industrie chinoise qui projette encore de nouvelles extensions de capacités de production.

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 der-

nière 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).

La fabrication de condensateurs électroniques mobilise 34 % de la consommation mondiale de tantale. Par ordre décroissant, les autres usages du tantale sont les composés chimiques (20 %), les superalliages (18 %), les cibles de pulvérisation, en particulier le dépôt de couches minces de nitrure de tantale pour lutter contre la corrosion (14 %), la métallurgie pour la fabrication de creusets, prothèses ou échangeurs thermiques (9 %) et, enfin, les carbures pour outils de découpe ou revêtement de moules en acier (5 %). Plus marginalement, le tantale sous sa forme oxydée (Ta_2O_5) est utilisé dans la fabrication de lentilles de verre d'appareil photo pour améliorer leur légèreté et leur luminosité.

L'industrie aéronautique ayant été fortement touchée par la crise sanitaire en 2020 et 2021, 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 brève échéance.

En revanche, la consommation accrue des technologies de l'information et de la communication

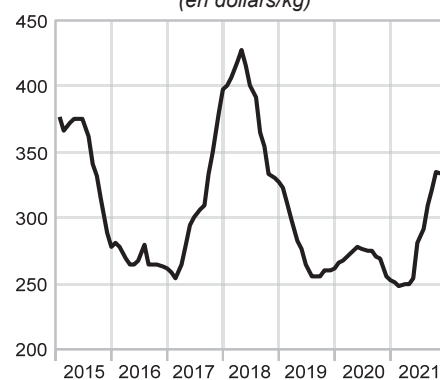
(TIC) (en raison de la pandémie de Covid-19) a eu une incidence très favorable sur la demande adressée au secteur de l'électronique. Si les condensateurs multicouches en céramiques (MLCC) continuent de dominer assez largement le marché grâce à des coûts moindres et à leur disponibilité, la demande en condensateurs au tantale a augmenté avec la hausse de l'utilisation des appareils portables (ordinateurs, tablettes, etc.). À moyen terme et selon le *Tantalum-Niobium International Study Center* (TIC), le déploiement massif des réseaux de communication 5G et des usages qui en dépendent (comme l'électronique automobile ou le stockage de données) vont continuer de tirer la demande en tantale vers le haut. Les consultants Prismark Partners estiment même une croissance de 15 % par an, d'ici 2024, des ventes d'appareils électroniques portatifs utilisés dans de nombreux secteurs.

En 2021, la production mondiale serait de 2 100 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, le Nigeria et le Rwanda sont les principales sources mondiales de tantale en 2021. En effet, il existe une part importante d'exploitation artisanale et d'exportation de colombo-tantalite (aussi appelé coltan) à partir de

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

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale	1 220	1 800	1 890	1 850	2 100	2 100
Australie	60	83	23	67	34	62
Bolivie					7	7
Brésil	103	110	250	430	470	470
Burundi			23	38	24	32
Chine	94	110	90	76	74	76
Éthiopie	63	65	70	70	69	52
Mozambique					43	43
Nigeria	192	153	200	180	260	260
Ouganda					38	40
Rép. du Congo	370	760	740	580	780	700
Russie					49	39
Rwanda	350	441	421	336	254	270
Autres pays	45	83	40	45		

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

la région des Grands Lacs africains. Les données estimées sont de 700 tonnes de Ta contenu pour la RDC (33 %) et 270 tonnes de Ta pour le Rwanda (13 %). Le Brésil (22 %) reste le deuxième producteur mondial, suivi du Nigeria (12 %) et de la Chine (3,5 %). En France, la production de tantale Ta_2O_5 est d'environ 10 tonnes par an en tant que sous-produit d'une exploitation de kaolin dans l'Allier.

La production mondiale est restée stable en 2021 après avoir diminué de 8 % en 2020 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 également pesé sur la production mondiale et notamment celle de l'Australie où plusieurs mines de lithium ont été placées en sommeil (*care & maintenance*) pour quelque temps.

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 2021, le prix annuel moyen du tantale métal (Ta 99,8 % EU) s'est établi à \$249/kg, en baisse de -6 % par rapport à 2020 (\$269/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 un certain temps en faveur des sources artisanales d'Afrique centrale, l'exploitation de pegmatites géantes en Australie et au Brésil 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 rivale 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. La situation australienne pourrait créer de nouvelles tensions sur ce marché.

Un autre facteur de tension potentielle est le développement accéléré de restrictions sur l'approvisionnement pour les entreprises de produits

électroniques, notamment. Ainsi, le département américain de la Défense a publié une loi provisoire interdisant aux entreprises américaines d'acquiescer des composés du tantale ou du métal en provenance de Chine, d'Iran, de Corée du Nord et de la 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*), produits durant la fabrication de produits électroniques et de matériaux utilisant le tantale. En fin de vie, ce recyclage est plus compliqué, mais reste un axe de développement, notamment celui des cartes électroniques. De manière générale, le recyclage du tantale compte pour environ 20 % de la consommation mondiale.

Les réserves mondiales de tantale dépassent 140 000 tonnes, les seules données accessibles et vérifiables ne concernent que l'Australie (99 000 tonnes de Ta selon l'USGS) et le Brésil (40 000 tonnes de 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. Celles 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 principal 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,

les superalliages 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)

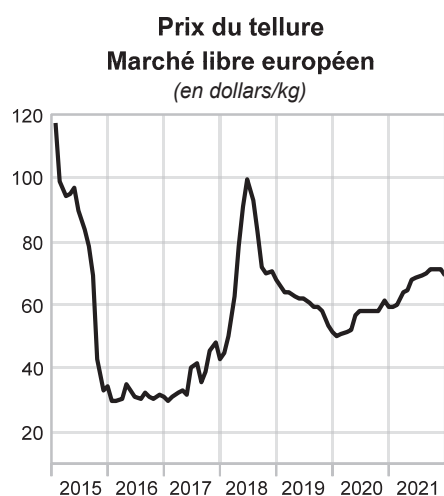
Le tellure est un élément très rare dans l'écorce terrestre (1 ppb – 1 partie par milliard). Il est essentiellement extrait en sous-produit de la métallurgie du cuivre. Il est souvent associé au sélénium avec lequel il partage des propriétés chimiques voisines. Le tellure est utilisé pour ses propriétés 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 2021. Le tellure est aussi utilisé dans les générateurs thermoélectriques (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 déplacer la chaleur en présence d'un courant électrique (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 2020, soit 6 GWc (gigawatt-crête). L'américain First Solar a été un des moteurs de cette augmentation et devrait continuer son expansion en visant une production de 16 GWc par an de modules à l'horizon 2024. L'entreprise 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 de Covid-19, 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, concurrençant directement la technologie CdTe. Il faudrait actuellement une quarantaine de tonnes de tellure pour produire 1 GW de modules photovoltaïques CdTe (contre 100 tonnes il y a 10 ans). Une fabrication annuelle de 6 GWc de modules (First Solar et CNBM) demanderait donc environ 250 tonnes de tellure, pour le seul secteur du solaire. Une hausse de la demande pourrait être couverte partiellement ou en totalité grâce à l'expansion des capacités de ré-

Tellure (en tonnes de métal raffiné)						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale						
	410	518	460	520	562	580
Afrique du Sud		7	6	8	2	3
Bulgarie	4	5	5	4	3	5
Canada	18	49	25	40	44	45
Chine	280	290	280	325	330	340
États-Unis	50	50				
Japon	33	38	58	50	70	75
Russie	35	44	42	52	71	70
Suède	39	35	45	41	42	40



(Source : Mineral Commodity Summaries)

cupération du tellure dans les résidus de raffinage du cuivre. Le taux de récupération actuel estimé est de 30 % à 50 %, et certains experts avancent la possibilité d'atteindre 80 %.

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 de l'écumage des raffineries de plomb, ainsi que des poussières et des gaz générés lors de la fusion des minerais de bismuth, de cuivre et de plomb-zinc. D'autres sources de tellure comprennent le tellure de bismuth et certains minerais d'or, comme à Kankberg (Suède) qui produit 40 tonnes de Te par an et d'autres gisements au Canada.

En 2021, la production de tellure mondiale (hors États-Unis) a été estimée par l'USGS à 580 tonnes en faible augmentation par rapport à 2020 (562 tonnes). Les producteurs de tellure sont principalement les pays producteurs de cuivre raffiné : la Chine (59 %), le Japon (13 %), la Russie (12 %), les États-Unis, la Suède (7 %), le Canada (8 %), 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 annuellement 96 tonnes de tellure. Le canadien 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) en Colombie-Britannique. S'il se concrétisait, ce projet serait un candidat possible pour approvisionner First Solar en CdTe *via* son partenaire canadien 5N Plus. La société canadienne First Tellurium continue l'exploration de son gisement polymétallique à tellure et métaux précieux de Deer Horn en Colombie-Britannique. Au troisième trimestre 2021, la société Rio Tinto a entamé la construction d'une raffinerie d'une capacité de 20 tonnes, permettant la récupération de tellure provenant de sa mine de cuivre de Kennecott – Bingham.

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 telles que les pigments, le tellure est recyclable en petites quantités en fin de vie des panneaux solaires ou dans certains photocopieurs. Actuellement, la quantité de panneaux solaire disponible pour le recyclage est très limitée, car cette technologie est relativement récente. 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 2021, le prix spot du tellure (99,99 % Europe) a augmenté d'approximativement 5 % par rapport à 2020, avec un prix annuel moyen de \$ 59,5/kg. Un engouement sur le marché des cellules à CdTe semble être le principal moteur de la croissance de consommation du tellure à court terme.

Terres rares

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 4 f, située à proximité du noyau. Cette caractéristique atomique est à l'origine de propriétés remarquables de ces éléments, en particulier optiques (en absorption [coloration] comme en émission [luminescence]) et magnétiques.

En 2020, d'après le gouvernement canadien, les principaux secteurs d'utilisation des TR dans leur ensemble, en termes de volumes, étaient : les aimants permanents (29,4 %), les catalyseurs (20,2 %), le polissage (13,6 %), la métallurgie (8,6 %), les batteries (7,8 %), les verres (7,8 %), les céramiques (2,7 %) et d'autres usages divers (dont les luminophores, les pigments, etc.).

91 % de la valorisation du marché, soit environ \$ 1,7 milliard par an, est portée par quatre éléments de TR en particulier : néodyme (Nd), praséodyme (Pr), dysprosium (Dy) et terbium (Tb),

utilisés pour la production d'aimants permanents de haute performance de la technologie néodyme-fer-bore (NdFeB). Les principaux moteurs de cette demande qui progresse de 8 % à 10 % par an sont l'essor des véhicules électriques, de l'éolien *offshore*, ainsi que celui de l'électronique et de la robotique, utilisant de grandes quantités d'aimants permanents NdFeB. En ce qui concerne les véhicules électrifiés (tout électriques et hybrides), avec une masse d'aimants permanents NdFeB embarquée comprise entre 0,5 kg et 3,5 kg d'aimants dans 90 % des technologies actuelles de motorisations des véhicules électrifiés, ce nouveau marché atteindrait entre 15 000 tonnes et 28 500 tonnes d'alliage Nd-Pr en 2030, contre 3 000 tonnes en 2018.

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 2021, exprimés sous forme métal 99 % en référence «Franco à bord (Fob) Chine», les prix des TR ont tous augmenté en valeur absolue. 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 augmenté de 10 % en 2021, s'établissant à \$6,4/kg en moyenne tandis que les prix des TR utilisés dans les aimants permanents ont explosé. Le prix du terbium, la plus chère des terres rares, s'est établi à \$1 709,5/kg contre \$660,8/kg en 2020, soit une hausse de 158 %, tout comme le dysprosium (+55,7 %) à \$527,1/kg, tandis que le praséodyme et le néodyme sont passés respectivement de \$93,6/kg à \$122,9/kg (+31,3 %) et de \$61,3/kg en 2020 à \$120,9/kg en 2021 (+97,2 %).

Ce phénomène s'explique tout d'abord par des niveaux de stocks faibles des producteurs d'aimants chinois face à la reprise de la demande mondiale post-Covid qui s'est engagée début 2021. D'autre part, elle semble être une réponse du marché à l'introduction par la Chine de plusieurs mesures réglementaires, en particulier la nouvelle norme chinoise d'efficacité énergétique pour les moteurs électriques (plan 2021-2023), dont la mise en œuvre entraînerait une demande supplé-

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

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Production mondiale					
	129 000	132 000	190 000	220 000	240 000	280 000
Australie	15 000	19 000	21 000	20 000	21 000	22 000
Birmanie			19 000	25 000	31 000	26 000
Burundi			630	200	300	100
Brésil	2 200	1 700	1 100	710	600	500
Chine	105 000	105 000	120 000	132 000	140 000	168 000
États-Unis			18 000	28 000	39 000	43 000
Inde	1 500	1 800	2 900	2 900	2 900	2 900
Madagascar			2 000	4 000	2 800	3 200
Malaisie	300	180	200			
Russie	2 800	2 600	2 700	2 700	2 700	2 700
Thaïlande	1 600	1 300	1 000	1 900	3 600	8 000
Vietnam	220	200	920	1 300	700	400
Autres pays			60	66	100	300

(Source : Mineral Commodity Summaries)

mentaire d'aimants NdFeB pour ce seul secteur pouvant atteindre 20 000 tonnes par an.

En 2021, la production minière mondiale de terres rares est estimée à 280 000 tonnes selon l'USGS (exprimée en Oxydes de Terres Rares ou OTR), contre 240 000 tonnes en 2020. La production chinoise officielle, régulée par des «quotas de production» par région et par producteur, a augmenté de 20 %, s'élevant à 168 000 tonnes d'OTR contre 140 000 tonnes en 2020. Pour la plupart des analystes, cette augmentation des quotas était quasiment inévitable étant donné la situation actuelle de l'offre en Chine et la croissance de la demande des fabricants de NdFeB.

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 2021, 43 000 tonnes d'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 2022, afin d'aboutir à la production d'oxydes Nd-Pr et de précurseurs d'aimants permanents sur le sol américain.

La société australienne Lynas a une production totale de l'ordre de 22 000 tonnes d'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. L'entreprise répond à 65 % de l'approvisionnement japonais pour la fabrication d'aimants. En 2021, Lynas a avancé son projet d'extension en Australie (Kalgoorlie) avec une usine de purification qui sera opérationnelle en 2023, ainsi qu'aux États-Unis, avec un financement du Pentagone pour la construction d'une usine de séparation des terres rares légères au Texas : 5 000 tonnes par an, dont 1 250 tonnes d'oxydes NdPr. À cela s'ajoute 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.

Dans le reste du monde, des productions modestes peuvent être mentionnées, notamment en Russie où la société Solikamsk produit 2 700 tonnes d'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.

L'événement marquant de l'année 2021 est la création fin décembre d'une nouvelle entreprise d'État chinoise, conglomérat géant issu de la fusion de trois des principales sociétés d'exploitation des terres rares du pays, à savoir Aluminum Corporation of China (Chinalco), China Minmetals et China Southern Rare Earth Group. La nouvelle entité, nommée China Rare Earth Group, a pour principal actionnaire la Commission de contrôle et d'administration des biens de l'État du Conseil d'État, avec une participation de 31,2 %. Les trois sociétés citées précédemment détiennent chacune 20,3 %. Enfin, deux sociétés de recherche, le *China Iron & Steel Research Institute Group* et *Grimm Group Corp.*, détiennent chacune une participation de 3,9 %. La fusion vise à intégrer les ressources en amont, à augmenter le pouvoir de tarification de la Chine sur le marché mondial et à utiliser les terres rares à l'avantage stratégique du pays. China Minmetals avait négocié en septembre la restructuration de son activité terres rares avec Chinalco et la ville de Ganzhou, qui contrôle 94 % de China Southern Rare Earth. La nouvelle entité serait ainsi en mesure de produire environ 45 000 tonnes d'oxydes de terres rares par an, plaçant l'acteur China Rare Earth Group comme deuxième producteur de terres rares du pays après China Northern Rare Earth Group, exploitant le gisement de Bayan Obo. Ce dernier a d'ailleurs également annoncé en 2021 un partenariat de coopération étroite avec China Rare Earth Holdings (enregistrée à Hong Kong).

Par ses mesures, la Chine continue la restructuration de son industrie de terres rares autour de deux grands pôles, au Sud et au Nord, afin notamment de mieux contrôler ses exportations, mais aussi d'améliorer les conditions de production des terres rares en général, paramètre très sensible de cette exploitation. Outre la production minière, le pays est responsable de plus des 4/5^e du raffinage mondial de ces éléments et vise à être incontournable sur la capacité à répondre à la demande mondiale d'aimants permanents NdFeB sur la période 2025-2030.

Face à ce constat, un certain nombre de pays tente de valoriser la montée en puissance de fi-

lières de production de terres rares pour réduire les risques de dépendance aux importations chinoises. Ainsi, en 2021, une dizaine d'usines sont en construction à travers le monde, visant soit à purifier les concentrés de TR (extraire les éléments radioactifs), soit à raffiner le concentré pour séparer des oxydes purs. Ces projets sont concentrés en Australie, aux États-Unis, au Canada et en Europe.

L'Australie semble le prochain relais de croissance de la production occidentale de terres rares. Plusieurs projets miniers ayant déjà résisté à la crise de 2010 sont désormais proches d'une mise en production :

- L'entreprise Arafura resources, avec le projet de Nolans Bore : 7 000 tonnes par an d'OTR. La décision finale d'investissement est prévue au deuxième semestre 2022.

- L'entreprise Iluka resources envisage deux opérations minières et une usine de séparation à Eneabba (Western Australia) et Wimmera (Victoria). À terme, une capacité de 15 000 tonnes par an de concentrés est envisagée. Techniquement, les premiers concentrés de monazite ont été envoyés en 2020 (Eneabba Phase 1). Les capacités cumulées des projets Eneabba Phase 2 et Wimmera seraient de l'ordre de 800 000 tonnes de concentrés (à partir de monazite et de xénotime). Le gouvernement australien soutient le développement de l'usine de séparation, qui aurait pour finalité de pouvoir traiter des concentrés d'autres gisements également.

- L'entreprise Australian Strategic Minerals, avec le projet Dubbo en Nouvelle-Galles du Sud. La particularité du projet (coût total estimé à \$ 800 millions) est de ne pas dépendre uniquement des TR. En effet, 43 % des revenus proviendraient du zirconium devant les TR (30 %), assurant ainsi une moindre exposition aux risques de mouvements de prix.

- L'entreprise Northern minerals, avec le projet de Browns Range, qui s'étend de la mine à la production d'OTR séparés, notamment riches en yttrium et dysprosium. La mise en production est attendue à l'horizon 2025, mais la présence d'investisseurs chinois pourrait entraîner des tensions localement.

Aux États-Unis, 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. Aux États-Unis toujours, la compagnie Energy Fuels a déclaré fin 2020 avoir produit des 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 et continuent le développement du gisement Round Top au Texas.

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.

En Russie, le gisement de Tomtor s'approche progressivement d'une mise en production. Un atout supplémentaire est la prise d'intérêts du groupe minier russe Polymetal en mars 2020, producteur d'or et d'argent dont la capitalisation boursière est estimée à \$ 6 milliards. Celle-ci s'élève à 9,1 % du projet. Les ressources du projet étaient évaluées en 2018 à 30,5 Mt de minerai avec des teneurs de 10,6 % de OTR et 4 % de Nb. Les opérations comprendront une mine à ciel ouvert avec une usine de traitement (coût total estimé à \$ 259 millions). La position stratégique de cette usine, à proximité de la ville de Krasnokamensk, près de la frontière de la Russie avec la Chine en fait un projet particulièrement important, d'autant plus dans un contexte de tensions géopolitiques accrues.

En Suède, le projet Norra Kärr, en phase d'exploration, mis à l'arrêt entre 2017 et 2020 pour des raisons environnementales a obtenu une extension du permis d'exploration jusqu'en août 2025. Une étude de faisabilité a été menée au cours de l'été 2021 par le nouvel exploitant (Leading Edge Materials) afin de revoir le modèle d'exploitation et convaincre de la viabilité de l'exploitation minière.

Un autre projet est porté par l'entreprise LKAB en Suède, exploitant de la mine de fer de Kiruna et dont l'objectif est de prouver la faisabilité de traiter les TR contenues dans les résidus miniers. De la même manière, l'entreprise Yara, en Norvège, étudie la possibilité de récupérer des TR à partir de l'exploitation d'engrais phosphatés.

En Grande-Bretagne, l'entreprise Pensana Rare Earths développant un projet de purification en Angola s'est engagée à construire une usine de purification sur le territoire britannique. Cet objectif est similaire pour l'entreprise britannique Rainbow Rare Earths, produisant au Burundi des concentrés de TR et ayant annoncé relever ses objectifs à 6 000 tonnes de concentrés par an, avec une purification en Grande-Bretagne.

Enfin, en Pologne, le groupe Azoty Pulawy, acteur majeur des produits chimiques, s'est associé à Talaxis limited, qui développe un projet minier au Malawi avec l'entreprise canadienne Mkango Resources pour la construction d'une installation de traitement des TR (purification et séparation) sur le sol polonais.

L'Union européenne se distingue également par un fort accent mis sur la valorisation des ressources secondaires (résidus miniers et recyclage en fin de vie des aimants permanents), avec la création d'un cluster dédié au sein de l'ERMA (*European Raw Materials Alliance*) visant à consolider les acteurs du secteur et faire émerger une ou des filières européennes de production d'aimants permanents NdFeB.

Il est à noter que les TR sont difficilement substituables puisque leurs alternatives entraînent généralement une baisse de la performance ou une augmentation du prix. Épisodiquement, la presse se fait le relais de progrès en R&D qui pourraient permettre de meilleures perspectives de substitution, bien que le chemin vers l'industrialisation semble toujours long. Par exemple, en mai 2021,

le groupe allemand Mahle a communiqué sur des aimants permanents sans TR et sans contact physique (à l'échelle du laboratoire).

Titane (Ti)

Le titane est utilisé pour deux usages principaux : la production d'oxyde de titane (TiO_2) 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 (TiO_2) en tant que pigment. Les données de 2013 indiquent que le TiO_2 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.

En 2021, les productions mondiales d'ilménite (FeTiO_3) et de rutil (TiO_2), les deux principaux minerais de titane, ont évolué à la hausse par rapport à 2020, atteignant respectivement 8,4 Mt (+4,7 %) et 0,629 Mt (+4 %), d'après les estimations de l'USGS. La production d'oxyde de titane

Titane (en milliers de tonnes)						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale d'ilménite						
	5 500	5 000	6 870	7 700	8 000	8 400
Afrique du Sud	1 020	550	765	1 100	1 020	1 000
Australie	780	730	720	840	480	480
Brésil	48	50	66	25	34	66
Canada	595	840	630	680	595	600
Chine	840	300	2100	2300	2 800	3 000
États-Unis	100	100	100	100	100	100
Inde	180	300	319	162	174	180
Kenya	280	280	272	210	201	190
Madagascar	92	110	228	280	254	310
Mozambique	540	600	575	590	965	970
Norvège	260	220	236	400	444	440
Sénégal	250	300	297	310	300	360
Ukraine	210	230	373	490	464	430
Vietnam	240	200	105	160	138	220
Autres pays	71	150	83	74	67	67
Production mondiale de rutile						
	800	770	594	654	605	630
Afrique du Sud	67	95	103	110	86	90
Australie	380	290	141	200	190	200
Inde	19	10	15	11	11	11
Kenya	84	87	90	74	73	71
Madagascar					8	10
Mozambique	7	9	8	6	6	9
Sénégal	9	10	9	9	9	10
Sierra Leone	130	160	114	129	114	120
Ukraine	95	95	94	94	95	95
Autres pays	8	13	21	21	13	13
Production mondiale d'éponge de titane métal						
	170	193	205	200	230	210
Arabie saoudite				0	3	4
Chine	60	72	75	85	123	120
États-Unis	13	13	13	13		
Inde	1	1	1	0	0	0
Japon	54	51	49	49	49	35
Kazakhstan	9	9	16	16	15	16
Russie	38	40	44	44	31	27
Ukraine	8	8	8	8	5.0	5.4

Prix de l'éponge de titane métal
Marché libre européen
(en dollars/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

découle de ces deux exploitations, ainsi que de la fabrication de rutiles synthétiques. Les capacités de production d'oxyde de titane TiO_2 , quant à elles, ont été évaluées à 8,4 Mt en 2021, soit un niveau identique à celui de 2020. Les réserves de titane sont considérables. En 2021, les réserves d'ilménite et de rutile estimées par l'USGS étaient

de 700 Mt (exprimées en contenu TiO_2), soit environ 75 ans de production au rythme actuel, mais en baisse par rapport aux dernières estimations (90 ans).

Toujours en 2021, la production mondiale d'éponges de titane métal est estimée par l'USGS à 210 000 tonnes, en baisse de 8,6 % par rapport

à 2020. 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 sur le territoire qui sont de 500 tonnes. Le niveau de la production mondiale reste relativement loin du niveau atteint en 2014 à 239 000 tonnes, même si l'USGS indique une production de 230 000 tonnes en 2020. 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 (350 000 tonnes en 2021, contre 340 000 tonnes en 2020), menant à des taux d'utilisation faibles. La Chine accroît sa domination sur le marché puisque sa production est passée de 85 000 tonnes en 2019 à 120 000 tonnes en 2021. 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. En 2021, le prix annuel moyen de l'éponge de titane de qualité TG-Tv, contenant au minimum 97,75 % de titane, a augmenté de 19 % par rapport à 2020, s'établissant à \$7,5/kg sur le marché *spot* contre \$6,4/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 % par an d'ici 2030, voire davantage. L'impact du Covid-19 sur l'industrie aéronautique a toutefois freiné son développement puisque le trafic aérien aurait chuté de plus de 60 % entre 2019

et 2020. Si la durée des effets de la pandémie sur le secteur aérien reste très difficile à prévoir, en fonction de l'apparition de nouveaux variants et des politiques menées, les spécialistes s'accordent à dire que la reprise n'est à envisager qu'à partir de 2023-2024. Néanmoins, l'activité combinée des deux poids lourds de l'aviation, Airbus et Boeing (surtout Airbus), devrait continuer de tirer la demande en titane vers le haut dès 2022, sans toutefois atteindre le niveau de 2019 à court terme. 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 qui reste 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 a été en déficit en 2021, en raison d'une demande soutenue du fait de la reprise économique et d'une production chinoise ayant subi des fermetures en raison de la crise énergétique, entre autres.

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 TA₆V à partir de chutes et de copeaux issus du façonnage des pièces par les constructeurs et sous-traitants aéronautiques. Dans un souci d'indépendance européenne de cette filière hautement stratégique, plusieurs projets pourraient voir le jour d'ici 2024 en France et en Autriche, par exemple (voir le rapport «étude de veille sur le marché du titane 2018-2020» publié en 2021 par Pierre-François Louvigné).

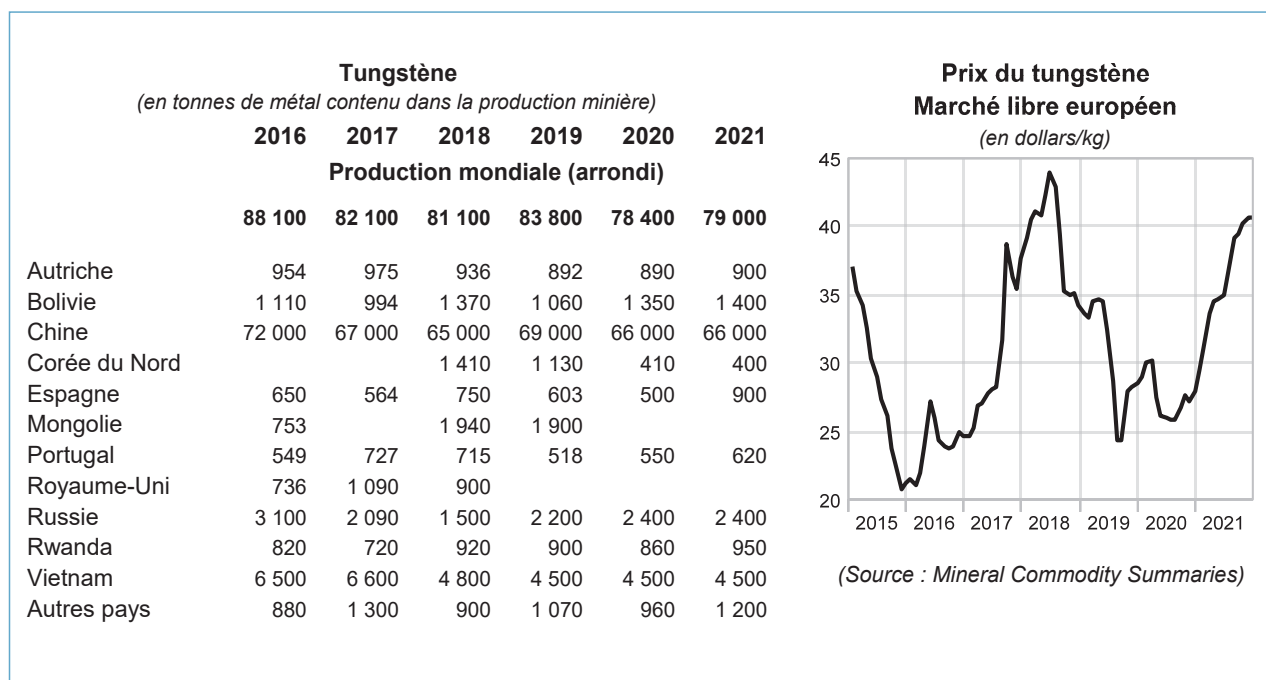
Tungstène (W)

Le tungstène pur se caractérise par le 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 (par exemple, le 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 lorsque 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 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 (diodes électroluminescentes). 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 2021, la production mondiale de tungstène était de 79 000 tonnes (en W contenu). Elle a légèrement diminué par rapport à 2020 selon les chiffres de l'USGS, tandis que la consommation a poursuivi son redressement après les baisses enregistrées en 2020 en raison de la pandémie de Covid-19. La Chine représente 83 % de la production mondiale, assurée en majorité par le producteur étatique China MinMetals. À l'instar d'autres productions minières, comme celle des terres rares, la production chinoise de tungstène est réglementée depuis 2015 par le gouvernement central sous forme de quotas d'extraction. Pour 2021, ils étaient de 80 820 tonnes (exprimées en concentrés contenant 65 % WO₃) pour l'extraction primaire, soit une augmentation de 2,86 % par rapport à 2020. Le Vietnam, à la deuxième place, ne concentre que 6 % de la production mondiale, soit 4 500 tonnes *via* le producteur australien Masan Resources.

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 ont continué de monter en 2021. Pour cette année, la moyenne annuelle s'est établie à \$29,73/kg, soit une hausse de 8,1 % par rapport à 2020. Cette augmentation est expliquée par l'arrêt temporaire de certaines mines chinoises pour des raisons environnementales, par l'allongement des délais d'approvisionnement et par la diminution des stocks. L'USGS indique également des stocks gouvernementaux aux États-Unis



de 6 850 tonnes de minerais et concentrés, et de 5 tonnes d'alliages.

Les réserves connues de tungstène sont estimées par l'USGS à 3,7 Mt, dont 51 % en Chine. Un certain dynamisme est à noter quant à leur renouvellement. Le consultant Roskill identifie ainsi quatorze projets au stade de développement à l'horizon 2028. Des gisements de grandes tailles sont toujours à l'étude ou mis provisoirement « sous cocon » en 2022, essentiellement en Chine, au Kazakhstan, ainsi qu'en Australie et au Canada. L'une des dix plus grosses mines de tungstène était en construction au Kazakhstan et devrait être opérationnelle fin 2022. En Europe, après la mise en production des mines de Barruecopardo et La Parilla en Espagne, une nouvelle mine a ouvert en 2021 au Portugal, Santa Comba (société Rafaella Resources). D'autres projets sont à l'étude, dont la mine de Drakelands (ex-Hemerdon) au Royaume-Uni qui espère une remise en production pour 2023.

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

Les perspectives de croissance de la demande à moyen terme sont fortement corrélées aux dynamiques industrielles mondiales en particulier des secteurs minier, pétrolier, automobile, aéronautique et aérospatiale, étant donné l'importance des carbures de tungstène dans les outils de découpe et de forage. Roskill anticipe ainsi une croissance annuelle moyenne de 1,2 % par an d'ici à 2030. 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.

Vanadium (V)

Le marché du vanadium a été impacté en 2021 par la mise en œuvre de mesures de relance économique post-pandémie en Chine, marquées par une production et une consommation d'acier en forte augmentation. En effet, la production d'acier y 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 (1 910 °C), et possédant quatre états d'oxydation, ce qui lui confère des propriétés très intéressantes dans plusieurs de ses applications.

La principale utilisation du vanadium est dans la production d'aciers microalliés à haute limite d'élasticité (aciers HSLA – *High Strength Low Alloyed*). Les applications dans la production de divers types d'aciers représentent environ 91 % de la consommation mondiale, dont environ 46 % pour les aciers HSLA. Dans les applications hors industrie sidérurgique, on trouve la fabrication d'alliages de titane et d'aluminium (4,5 %), la chimie (3,5 %) avec la fabrication d'acide sulfurique, d'anhydride maléique et de caoutchouc synthétique, et enfin les batteries à flux redox (1 %).

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 vanadium (V_2O_5), utilisé comme précurseur pour le ferrovandium, mais également comme pigment jaune pour les céramiques et le verre, comme catalyseur dans certaines réactions chimiques, dont l'acide sulfurique, 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 limite élastique et 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 (haute limite d'élasticité), 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 110 000 tonnes de vanadium contenu en 2021 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 ne représente que 20 % du vanadium produit. Elle est issue principalement de titanomagnétites vanadifères avec des minerais dont la teneur en oxyde de vanadium est comprise entre 1 % et 3 %. La coproduction de vanadium à partir de laitiers d'aciérie constitue 72 % de la production mondiale, tandis que les 12 % restants proviennent d'une production secondaire issue du trai-

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

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production minière	79 000	71 200	71 200	86 800	105 000	110 000
Afrique du Sud	10 000	7 960	7 700	8 030	8 580	9 100
Brésil	8 000	5 210	5 500	5 940	6 620	6 700
Chine	45 000	40 000	40 000	54 000	70 000	73 000
États-Unis				460	17	
Russie	16 000	18 000	18 000	18 400	19 500	19 000

Prix du vanadium pentoxide
Caf Europe
(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

tement 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, de charbon, de sables bitumineux 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 environ 90 % des 110 000 tonnes de la production mondiale de vanadium : la Chine (66 %), la Russie (17 %) et l'Afrique du Sud (8 %). Le Brésil complète le tableau avec près de 6 700 tonnes provenant de la mine de magnétite de haute qualité de Maracas, dans l'État de Bahia, exploitée par la compagnie canadienne Largo Resources qui a par ailleurs annoncé, en 2021, la mise en service d'une usine de traitement de trioxyde de vanadium.

L'industrie du vanadium chinoise est concentrée entre quelques grands groupes sidérurgiques, dont Pangang Group Vanadium Titanium & Resources Co. et Hebei Iron & Steel Group Co. La production primaire à partir de magnétite devrait également se développer avec des groupes tels que Xining Special Steel Co., Zhejiang Hailiang Co., China Vanadium Titano-Magnetite Mining Company, et Shanghai Dingli Technology Development Group. En Russie, l'essentiel de la production est assuré par le groupe Evraz, numéro deux mondial avec 13 % de la production mondiale. 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, d'autre part, la compagnie Bushveld Minerals qui ambitionne de devenir un important producteur intégré, incluant la production de batteries redox au vanadium avec la mine et l'usine de Vametco (4 570 tonnes par an de 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 se trouve l'Australie, qui compte dix-neuf 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 \$ 30,7/kg en 2021, contre \$ 27,9/kg en 2020, soit une hausse de 10 %.

Le marché du vanadium devrait se tendre au cours de l'année 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. Cependant, cette contraction du marché devrait s'inverser à l'horizon 2024-2025 avec la mise en production des projets australiens.

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 – constituent 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 que d'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 été 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 moyenne 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.

Selon les données de la société Iluka, la demande mondiale en zircon s'est élevée, en 2020, à environ 0,95 Mt. Les principaux usages du zircon sont la production de céramiques (47 %), de produits chimiques et zircone (21 %), de matériaux réfractaires (17 %), de sables de fonderies (12 %) et celle d'éponge de zirconium métal (3 %). La zircone (*zirconia* en anglo-saxon) est un oxyde de zirconium (ZrO_2). Elle 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 les propriétés optiques remarquables s'en rapprochent.

L'élaboration du zirconium métal à partir du zircon ou de la zircone ne représente que 3 % de la consommation de zircon mondiale; 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, incluant l'hafnium, dont il faut limiter les quantités, car celui-ci a des propriétés inverses au zirconium quant à l'absorption 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 (*Titanium Zirconium Minerals International*), 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 est corrélée à l'industrie du nucléaire. Selon l'Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA), il y avait, à fin 2021, 444 réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde. 51 réacteurs étaient en construction, dont 16 en Chine, et l'on comptait 98 projets bien avancés, augurant ainsi d'une croissance soutenue de la demande.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production de concentré de zircon a été estimée à 1,2 Mt en 2021, un chiffre inférieur à celui de 2020 (1,4 Mt). Quatre pays représentent plus des trois quarts de la production mondiale de zircon, à savoir : l'Australie avec 33 % de la production mondiale (400 kt), l'Afrique du Sud (270 kt), la Chine (140 kt) et le Mozambique (110 kt). L'USGS évaluait à 70 Mt les réserves mondiales d'oxyde de zirconium en 2021, en hausse de 8,5 % par rapport à 2020 (64 Mt), dont 70 % en Australie et 8,5 % en Afrique du Sud.

En raison de sa forte densité (entre 3,9 et 4,8 g/cm³), le zircon se concentre dans des sables de type placers. Il est souvent associé à d'autres minéraux lourds, comme le rutile, le leucoxène 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 zircon 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 zircon, soit du zircon, puis par réduction des chlorures *via* le procédé Kroll. Les éponges de zirconium métal obtenues contiennent jusqu'à 5 % de hafnium. Dans le cas où le métal est utilisé pour l'industrie nucléaire, d'autres traitements complexes et très coûteux doivent avoir lieu pour séparer le zirconium de l'hafnium.

La production de zirconium métal était estimée à environ 7 000 tonnes en 2012 par la *Minor Metals Trade Association* (MMTA), dont 3 000 tonnes pour les États-Unis, 1 800 tonnes pour la France, 1 000 tonnes pour la Russie, 800 tonnes pour la Chine et 400 tonnes pour l'Inde. En France, les éponges de zirconium sont produites à partir de zircon sur le site de Jarrie, par la société Framatome, filiale d'Orano (ex-Areva). Ces éponges sont ensuite livrées à l'usine d'Ugine pour y être transformées en alliages sous différentes formes utilisées dans 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 du hafnium) a été, en 2021, de 135 yuans par kg soit \$21/kg, un prix en repli de 23 % par rapport à 2020 (\$27/kg).

Cette baisse des prix observée pour tous les produits issus du zircon a été causée en grande partie par une reprise importante de la production mondiale de zircon depuis le dernier trimestre 2020 et sur l'année 2021, et par une demande mondiale qui n'est pas revenue à son niveau d'avant-pandémie. Les restrictions d'alimentation en électricité en Chine perturbant de nombreux secteurs d'activités, dont la production de céramiques et de tuiles, n'ont pas permis d'écouler les stocks accumulés. Toutefois, Iluka estime que les usines européennes ont surperformé durant le second semestre 2021 et la demande ainsi que les prix du zircon devraient augmenter dès le début de l'année 2022.

Étant donné le contexte actuel, il est peu probable de voir de nouveaux projets miniers rentrer en production en 2022, d'autant plus que la fermeture des frontières australiennes depuis le début de la pandémie a fortement impacté les effectifs expatriés sur sites et, en conséquence, l'avancement

Zirconium
(en milliers de tonnes de concentré)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale (arrondi)	1 320	1 600	1 480	1 420	1 200	1 200
Afrique du Sud	360	377	350	370	280	270
Australie	450	505	560	470	400	400
Chine	140	140	140	140	140	140
États-Unis	50	80	100	100	30	30
Inde	40					
Indonésie	110	110			64	55
Kenya		44	45	29	29	30
Mozambique	68	74	48	100	110	110
Sénégal	53	82	64	65	60	70
Autres pays	96	138	170	112	117	110

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

des projets miniers en cours de développement. Le seul projet en passe de rentrer en production est le projet Dubbo en Australie, détenu conjointement par Australian Strategic Materials Ltd et par la société sud-coréenne Zirconium Technology Corporation, tandis que plusieurs mines ailleurs dans le monde 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)

Le 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 de hafnium pour 50 parts de zirconium. Le 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 à NiCo, comme stabilisateur haute température dans les moteurs d'avion et les moteurs de fusée. Le hafnium est également utilisé comme catalyseur dans la production de produits chimiques et pharmaceutiques ou encore sous forme d'anode dans les torches à plasma. Il est aussi retrouvé en dépôts pour différentes applications optiques ou encore en nanoélectronique. 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 15 prochaines années), nucléaire et spatial devraient considérablement tirer la croissance de la demande mondiale en hafnium

dans un futur proche. De plus, de nombreuses applications en cours de développement dans les domaines médicaux (traitement de certains cancers), dans le remplacement des systèmes de climatisation grâce à des revêtements extérieurs isolant de la chaleur, mais aussi dans l'optimisation de la production d'énergie thermoélectrique dans l'automobile notamment, sont des secteurs potentiels d'augmentation de la demande en hafnium dans des proportions encore indéterminées.

La production d'éponges de 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 du hafnium ultra pur sur le site de Jarré pour les applications aéronautiques principalement. Selon les données du commerce extérieur, la France a exporté 26 tonnes de hafnium en 2021 (contre 21 tonnes en 2020) dont 15 tonnes vers l'Allemagne, 5 tonnes vers les États-Unis et 2 tonnes vers la Grande-Bretagne.

Il n'existe pas de calcul normalisé des ressources et réserves de hafnium. Néanmoins, l'USGS estime les réserves de zirconium à 70 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 1,4 Mt de hafnium. Du fait des très faibles quantités utilisées, le recyclage du hafnium est seulement de l'ordre de 10 tonnes par an. Dans certains superalliages, le hafnium peut être substitué par le zirconium.

Les prix du hafnium sont établis par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Ils dépendent très fortement de ceux du zirconium. En 2021, le prix moyen du hafnium (99 %) a été de \$ 786/kg selon Argus Media (+1,7 % par rapport à 2020) et est d'environ \$ 1 770/kg pour le hafnium ultra pur (99,8 %). L'offre et la demande affichent depuis plusieurs années un certain équilibre. Les réserves et ressources en minéraux contenant du 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.