

CYCLOPE



sous la direction de Philippe Chalmin et Yves Jégourel

Les Marchés Mondiaux

2023

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

“Les Cavaliers
de l’Apocalypse”
Apocalypse de Jean

CYCLOPE

2023

**Les Marchés
mondiaux**

« Les cavaliers de l'Apocalypse »

Sous la direction de Philippe CHALMIN
et Yves JÉGOUREL

 **ECONOMICA**

49, rue Héricart, 75015 Paris

CyclOpe et la « littérature »

Depuis 2007, nous avons choisi de donner un sous-titre au rapport CyclOpe publié chaque année au printemps. Cédant à une forme de coquetterie, celui-ci est en général une paraphrase littéraire empruntée à un grand auteur ou au moins au titre d'une de ses œuvres. Nous avons donc eu :

2007 <i>Le temps du monde fini commence</i> (Paul Valéry)	2016 <i>À la recherche des sommets perdus</i> (Marcel Proust)
2008 <i>Stupeur et tremblements</i> (Amélie Nothomb)	2017 <i>Vent d'Est, Vent d'Ouest</i> (Pearl Buck)
2009 <i>Vertiges et déboires</i> (Paul Bairoch)	2018 <i>Der Himmel lacht ! Die Erde jubilieret</i> (Jean-Sébastien Bach)
2010 <i>La renaissance du Palais d'été</i> (Pierre-Jean Rémy)	2019 <i>Les illusions perdues</i> (Honoré de Balzac)
2011 <i>Le printemps des peuples et la malédiction des matières premières</i>	2020 <i>Allegoria ed effetti del Cattivo Governo</i> (Ambrogio Lorenzetti)
2012 <i>En la forêt de grande instabilité</i> (Charles d'Orléans)	2021 <i>« Cette obscure clarté qui tombe des étoiles »</i> (Corneille - <i>Le Cid</i>)
2013 <i>Crises et châtiments</i> (Fiodor Mikhaïlovitch Dostoïevski)	2022 <i>« Le monde d'hier »</i> (Stefan Zweig)
2014 <i>Dans le rêve du pavillon rouge</i> (Ts'ao Hsueh-ch'in)	... et donc en 2023 <i>« Les cavaliers de l'Apocalypse »</i> (Apocalypse de Jean)
2015 <i>Pour qui sonne le glas ?</i> (Ernest Hemingway)	

In memoriam

Philippe Tillous-Borde
1946-2022



Philippe Tillous-Borde est décédé dans les derniers jours de 2022. Il était un ami et un soutien de la première heure de CycloPe et c'est à sa mémoire que CycloPe 2023 est dédié.

Ingénieur agronome, Philippe avait consacré toute sa vie au développement de la filière des oléagineux en France puis dans le monde. Il y avait commencé sa carrière en 1974 et avait connu les difficultés du CNTA. C'est alors que Jean-Claude Sabin lui confia la tâche de créer un établissement financier, contrôlé par les producteurs et financé par les célèbres «cotisations volontaires obligatoires» pour favoriser le développement des productions oléagineuses à commencer par le colza et le tournesol. Ce fut Sofiproteol qui connut un extraordinaire développement tant agricole qu'industriel et énergétique avec le diester. En 2002, c'est le rachat de Lesieur, en 2004 celui de Puget, en 2007 celui de Glon-Sanders sans parler de l'oléochimie et du développement international (Roumanie, Maroc, Malaisie).

Devenu peu à peu aveugle, ce que ne handicapait ni sa remarquable acuité d'esprit ni sa mémoire, Philippe assura la transition de Sofiproteol à Avril dont il assura la présidence de la fondation jusqu'en 2021.

Philippe était très engagé dans l'aide aux malvoyants, dans le développement agricole en Afrique et plus largement dans les problèmes de société (il avait fait partie de la Commission Attali).

Il tenait à ses racines basques (aux confins de la Soule et du Béarn) et c'est là qu'il repose, à Ascain.

Nous sommes fiers de l'avoir eu comme ami.

Philippe Chalmin

Sommaire

Avant-propos	VII
Les collaborateurs de CyclOpe 2023	IX
Les entreprises qui ont soutenu CyclOpe en 2023	XV
Première partie : « Les cavaliers de l'Apocalypse »	1
I « Les cavaliers de l'Apocalypse »	3
II Guerre en Ukraine.....	23
III Les fractures du monde.....	27
– Chine et Asie : « les mystères de la chambre jaune »	28
– Inde : l'année des dividendes de l'opportunisme ?	33
– Amérique du Sud : déchirements et stagnation	40
– Russie : sur le fil du rasoir	49
– Afrique du Nord et Moyen-Orient : la ronde des vents, entre multi-alignements et regards détournés	53
– L'Afrique subsaharienne courtisée et convoitée	59
IV Les tous petits pas de la gouvernance mondiale.....	69
– La gouvernance économique et commerciale mondiale en état de « mort clinique ».....	71
– Changements climatiques : de Charm el-Cheikh à Dubaï	79
Deuxième partie : Les marchés.....	89
Les marchés mondiaux en 2022	91
I Les marchés financiers.....	101
II Grains et agriculture tempérée.....	151
III Produits tropicaux	275
IV Produits aquatiques.....	355
V Produits forestiers.....	373
VI Minerais et métaux	391
VII Énergie.....	557
VIII Grands marchés industriels.....	641
IX Services.....	677

Les collaborateurs de CyclOpe 2023

Philippe CHALMIN	Président-fondateur de CyclOpe 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 « Les cavaliers de l'Apocalypse », Agriculture, Marchés dérivés, Poivre, Art
Yves JÉGOUREL	Codirecteur de CyclOpe Professeur du Conservatoire national des Arts et Métiers (Paris), titulaire de la chaire d'économie des matières premières et des transitions durables	Coordination minerais et métaux, Métaux, Engrais, vanille

Sébastien ABIS	Directeur du Club DEMETER et chercheur associé à Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Méditerranée- Moyen-Orient
Patrick AIGRAIN	Chef du service évaluation, prospective et analyses transversales de FranceAgriMer, Coordinateur du comité de pilotage statistique de l'Organisation internationale de la vigne et du vin (OIV)	Vin
Stéphanie AYRAULT	Journaliste agricole	Jute
Jean-Joseph BOILLOT	Chercheur associé à l'IRIS, Coprésident du Euro-India Economic & Business Group (EIEBG)	Inde
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	Analyste en intelligence minérale	
Gaëtan LEFEBVRE	Analyste en intelligence minérale	
Mathieu LEGUERINEL	Analyste en intelligence minérale	
Maxime PICAULT	Analyste en intelligence minérale	
Eric PUJOL	Analyste en intelligence minérale	
Aurélien REYS	Analyste en intelligence minérale	
Emma SAULNIER	Analyste en intelligence minérale	
Léane VERHULST	Analyste en intelligence minérale	
Benoît de CARBONNIÈRES	Consultant projets miniers Afrique Luxembourg	Cuivre, Diamants Platinoïdes

Jean-Yves CARFANTAN	Consultant associé société Celeres, Uberlândia Brésil et gérant du site IstoéBrésil (São Paulo)	Amérique du Sud
Éric CHAMPARNAUD	Associé C-Ways	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-François Di MEGLIO	Président d'Asia Centre, Centre d'expertise et d'études sur l'Asie	Chine
Damien DURAND	Directeur Économie, Alliance du lin et du chanvre européens	Lin
Gérald ESTUR	Consultant	Coton
Patrice GEOFFRON	Professeur à l'Université Paris-Dauphine-PSL, Directeur du Centre de Géopolitique de l'Énergie 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 HORNBY	Chroniqueur sur slate.fr	Marchés boursiers
Amandine HOURT	Chargée de mission, Centre d'études et de prospective ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire	Sisal et fibres dures
Ralph ICHTER	Président Euroconsultants, (Washington, États-Unis)	Politique agricole et commerciale américaine
Dominique JACOMET	Professeur à l'Institut français de la mode (IFM)	Textiles

Helga JOSUPEIT	Chercheur, marché des produits de la mer (Rome, Italie)	Produits aquatiques
Félix KANE	Consultant Agriculture et filières agricoles - AND International	Fruits et légumes tempérés, Pommes de terre, Fruits secs
Alain KARSENTY	Économiste au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)	Bois tropicaux
Élisabeth LACOSTE	Directeur de la Confédération internationale des betteraviers européens, CIBE (Bruxelles, Belgique)	Sucre, Éthanol
Jean-Paul LEHMANN	Membre de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN)	Uranium
Aurélien LEROY	Maître de conférences à l'université de Bordeaux	Caoutchouc
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
Marc NICOLLE	Journaliste pigiste	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	Lait et produits laitiers, 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
Dolio SFASCIA	Collaborateur Cercle CyclOpe	Poivre et autres épices
Manon SAILLEY	Chargée d'études économiques, Groupe Avril	Oléoprotéagineux
Bernard SAUBOT	Directeur des filières, des partenariats et du développement apicole Famille Michaud Apiculteurs	Miel
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 Tourisme
Tancrede VOITURIEZ	Chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)	Produits tropicaux, Huile de palme

Béatrice BEYER	Mise en page des versions française et anglaise	
Catherine HERSENT	Relecture	
Karine POUPON	Relecture et coordination	
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	

Métaux « électriques »

Qualifiés d'«électriques» dans une référence peut-être trop simple, les métaux présentés dans ce chapitre – et dans lequel le nickel aurait pu trouver sa place – jouent un rôle majeur dans le stockage d'énergie sous forme d'électricité au sein de batteries rechargeables des technologies appelées «Lithium-ion» (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 principalement 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 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, représentait en 2022 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 le consultant Roskill, les autres marchés du cobalt étaient en 2020, 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 plupart des experts pronostiquent une forte croissance de la consommation mondiale de cobalt dans les deux prochaines décennies (7-10 % par an) tirée par les besoins des secteurs du stockage de l'énergie et des mobilités électriques. Elle devrait ainsi atteindre 200 000 tonnes de cobalt contenu

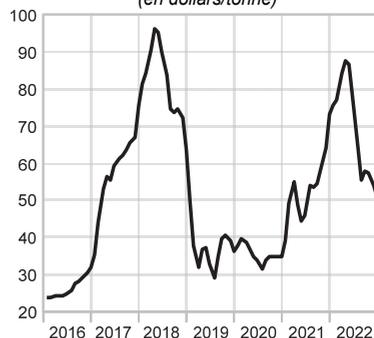
(t Co) à l'horizon 2025, contre 130 000 t Co en 2020. Toujours d'après Roskill, la part du secteur des batteries est attendue entre 70 % et 80 % du total de la demande à cet horizon. Ces estimations sont cependant basées sur des scénarii dans lesquels le marché du véhicule électrique (VE) continuerait de croître et d'utiliser en majorité des batteries lithium-ion intégrant du cobalt. Or, du fait du prix élevé du cobalt (le plus cher des métaux de cathodes) et des enjeux liés à son approvisionnement (forte dépendance à la République démocratique du Congo pâtissant d'une très mauvaise réputation), Tesla et d'autres constructeurs automobiles – comme le chinois BYD – se sont récemment tournés vers la production à grande échelle de VE intégrant des batteries LFP (Lithium-Fer-Phosphate) fonctionnant sans cobalt. Les besoins des VE utilisant des batteries de type LCO, NCA ou NMC sont néanmoins toujours importants, ainsi que ceux des technologies de réseaux d'internet 5G qui continueront à soutenir l'expansion du marché durant au moins encore plusieurs années. Le consultant britannique CRU estime ainsi que la demande en cobalt pour les batteries d'appareils électroniques portables (représentant environ 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.

Après avoir reculé à un seuil de \$ 35/kg pendant la pandémie mondiale, le prix du cobalt mé-

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

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production minière						
	120 100	148 000	144 000	142 000	165 000	190 000
Australie	5 030	4 880	5 740	5 630	5 295	5 900
Canada	3 870	3 520	3 340	3 690	4 361	3 900
Chine	3 100	2 000	2 500	2 200	2 200	2 200
Cuba	5 000	3 500	3 800	3 800	4 000	3 800
États-Unis	640	490	500	600	650	800
Indonésie				1 100	2 700	10 000
Madagascar	3 500	3 300	3 400	850	2 800	3 000
Maroc	2 200	2 100	2 300	2 300	2 300	2 300
Papouasie N.Guinée	3 310	3 280	2 910	2 940	2 953	3 000
Philippines	4 600	4 600	5 100	4 500	3 600	3 800
Rép. dém. du Congo	73 000	104 000	100 000	98 000	119 000	130 000
Russie	5 900	6 100	6 300	9 000	8 000	8 900
Autres pays	7 650	5 540	6 320	7 640	4 567	5 200

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

tal sur le marché européen (qualité *alloy grade cut cathode* 99 %) est reparti à la hausse début 2021 sous l'effet de la reprise économique post-covid puis des menaces de pénuries engendrées par le conflit russo-ukrainien (la Russie est un producteur non négligeable de cobalt en sous-produit des platinoïdes et du nickel). Son prix a atteint \$ 88/kg en avril 2022, avant de connaître une forte baisse, terminant l'année 2022 sous les \$ 50/kg, à la suite – notamment – de l'annonce de Tesla sur ses nouvelles orientations stratégiques concernant les batteries de type LFP. Les restrictions chinoises sur le Covid-19, qui ont été grandement ressenties dans les chaînes d'approvisionnement, ainsi que la diminution de la demande de l'électronique grand public et des industries à forte intensité énergétique (telles que la céramique) ont également joué un rôle non négligeable dans cette baisse des prix.

La production minière mondiale de cobalt en 2022 s'est élevée à 190 000 tonnes, selon les données préliminaires de l'*United States Geological Survey* (USGS) – le service géologique américain –, en hausse de 15 % par rapport à 2021. La quasi-totalité de cette offre (97 %) provient de la récupération de cobalt comme coproduit ou sous-produit de l'extraction du cuivre et du nickel.

En 2022, près de 70 % de la production minière était 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 inchangée, avec plus de 200 000 tonnes issues de RDC sur un total potentiel de près de 300 000 tonnes, même si une nouvelle donne sur le marché des batteries électriques pourrait aussi altérer ces prédictions.

La répartition de l'offre mondiale de cobalt est à analyser au regard des entreprises productrices plutôt qu'en termes de pays producteurs, 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 équivalaient à 17 % de l'offre primaire mondiale en 2021, selon S&P Capital IQ. En RDC, Glencore contrôle la mine de Kamoto/Katanga, représentant à elle seule près de 14 % de l'offre minière de cobalt, et la mine de Mutanda où elle a récemment relancé ses opérations après les avoir

suspendues en 2019. À cela s'ajoutent les mines canadiennes de Sudbury et australiennes de Murrin Murrin pour une capacité totale à l'échelle du groupe de près de 46 000 t Co contenu. Glencore a multiplié les contrats auprès de divers acteurs de la fabrication de batteries ces dernières années, 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 ses principaux clients figurent le groupe chinois GEM (fournisseur du fabricant de batteries CATL), le coréen SK Innovation (contrat de 30 000 t Co contenu à fournir jusqu'en 2025) ou encore Samsung SDI Co. Ltd pour 21 000 t Co à livrer de 2020 à 2024. Il faut y ajouter Tesla (contrat concernant un approvisionnement de 6 000 t Co), le norvégien FREYR (1 500 t Co) et le canadien Electra Battery Materials (1 000 t Co). Parallèlement, la société a initié 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 Zhejiang Huayou Cobalt (qui fabrique aussi des matériaux actifs de batteries), ainsi que les groupes Jinchuan Group Ltd. et China Molybdenum Co. Ltd. Ce dernier opère la mine de Tenke Fungurume, qui représente 15 % de l'offre primaire de cobalt mondial. Il est en outre propriétaire du gisement de Kisanfu, qui devrait entrer en activité en 2023. Plus généralement, il est estimé que 50 % de la production de cobalt en RDC est liée à des financements chinois. Le cobalt n'est pas transformé sur place. Après un premier traitement hydrométallurgique conjoint à celui du cuivre, il 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 sinocongolaises 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. En outre, des

allégations à l'encontre de l'entreprise suggèrent qu'elle aurait fait preuve de négligence quant à la sécurité de ses employés et qu'elle aurait dissimulé des accidents. Début 2022, cet important litige a mené au retrait temporaire de la gestion de la mine au profit d'un administrateur congolais et, depuis juillet 2022, à la suspension de ses exportations.

Plusieurs projets se développent dans le reste du monde. C'est notamment le cas en Australie avec la compagnie Cobalt Blue et son projet Broken Hill, intégrant la construction prochaine d'une usine pilote. En Amérique du Nord, plusieurs projets présentent des alternatives crédibles pour les filières de production de batteries hors Chine : la relance de la raffinerie de cobalt de l'entreprise First Cobalt, d'une capacité annuelle de 5 000 t Co contenu, ainsi que les projets d'exploration dans l'Idaho menés notamment par Formation Metals Inc. (qui prévoit une production de 1 525 tonnes par an de cobalt de haute pureté pendant dix ans), Jervois Mining (ressources mesurées et indiquées

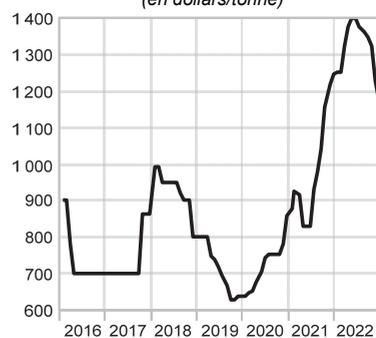
de 5,24 Mt de minerai titrant 0,44 % de cobalt) et Electra (ressources indiquées de 2,2 Mt de minerai à 0,26 % de cobalt). D'autres projets moins avancés de type « hautes teneurs et faibles volumes » sont également en développement, dont NICO de Fortune Minerals dans les Territoires du Nord-Ouest au Canada et Castle de Canada Silver Cobalt Works, en Ontario. En Finlande, la compagnie Terrafame envisage également de produire 5 000 t Co/an de la mine de Sotkamo (cette compagnie a aussi conclu un accord avec Stellan-tis en janvier 2023 pour l'approvisionnement en sulfates de nickel). Enfin, de nombreux projets de production de nickel de qualité batterie sont en développement en Indonésie, dont celui porté par l'entreprise chinoise Huayou Cobalt, et devraient pouvoir produire d'importantes quantités de cobalt en sous-produit.

Dans le domaine de l'amélioration de la traçabilité de l'approvisionnement du cobalt de RDC, *via* les filières artisanales, plusieurs initiatives

Graphite naturel (en tonnes de métal raffiné)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production mondiale	897 000	1 120 000	1 100 000	966 000	1 130 000	1 300 000
Allemagne		800	800	300	250	250
Autriche		1 000	1 000	500	500	500
Brésil	90 000	95 000	96 000	63 600	82 000	87 000
Canada	40 000	40 000	11 000	8 000	12 000	15 000
Chine	625 000	693 000	700 000	762 000	820 000	850 000
Corée du Nord	5 500	6 000	6 000	8 100	8 100	8 100
Corée du Sud					10 500	17 000
Inde	35 000	35 000	35 000	6 000	7 000	8 300
Madagascar	9 000	46 900	48 000	20 900	70 000	110 000
Mexique	9 000	9 000	9 000	3 300	2 100	1 900
Mozambique	300	104 000	107 000	28 000	72 000	170 000
Namibie	2 220	3 460				
Norvège	15 500	16 000	16 000	12 000	6 290	10 000
Ouzbékistan			100	100	110	0
Pakistan	14 000	14 000	14 000			
Russie	17 000	25 200	25 100	25 000	15 000	15 000
Sri Lanka	3 500	4 000	4 000	4 000	3 000	3 000
Tanzanie		150	150		0	8 000
Turquie	2 300	2 000	2 000	2 500	2 700	2 900
Ukraine	20 000	20 000	20 000	16 000	10 000	3 000
Vietnam	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Zimbabwe	1 580	2 000				
Autres pays	1 900	200				

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

sont en cours, notamment le projet *Fair Cobalt Alliance* de Glencore ou le partenariat entre la Gécamines et 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, ainsi que les échanges commerciaux, restent très approximatives et variables en fonction des sources, en particulier dans le secteur très confidentiel du graphite synthétique. La consommation mondiale de graphite est ainsi estimée entre 2,5 Mt et 3 Mt. Celle de graphite synthétique atteindrait quelque 1,7 Mt, tandis que celle de graphite naturel approcherait 1,3 Mt. L'Asie consomme environ les deux tiers du graphite produit dans le monde, suivie de l'Europe, de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud (autour de 10 % chacune). À l'échelle globale, le secteur de la sidérurgie utiliserait approximativement 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. Près de la moitié du graphite naturel mondial est destinée à la fabrication de réfractaires et moins de 15 % à celle de batteries. Cependant, cette part augmente progressivement.

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

Le graphite dit « sphérique » a été développé dans le but d'obtenir une plus grande surface de contact au sein de l'anode des batteries Li-ion. En effet, les particules sphériques favorisent ainsi une meilleure conductivité et un meilleur rendement, améliorant la performance de l'anode. La Chine produit quasiment 100 % du graphite sphérique non revêtu mondial qui est essentiellement fabriqué à partir de paillettes de graphite naturel provenant de la province du Heilongjiang, au nord-est de la Chine. Une partie de cette offre – qui est concentrée dans la province du Shandong – est consommée dans le pays par les producteurs d'anodes de batteries Li-ion. Le reste est vendu à des fabricants de batteries et des négociants japonais ou sud-coréens qui procèdent ensuite au revêtement des particules qui seront utilisées dans la fabrication des anodes. La production de graphite sphérique revêtu (autrement dit « matériau actif » de l'anode) est réalisée à hauteur d'environ 90 % en Chine, 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 d'anodes étaient de 1,5 Mt en 2022, 3,5 Mt de capacités supplémentaires sont en construction actuellement dans le monde, et ces dernières pourraient même atteindre 7 Mt en 2030. La demande en graphite pour ce secteur serait ainsi multipliée par dix ou par quinze sur les dix prochaines années.

La sidérurgie demeure toutefois l'usage majoritaire du graphite, en particulier synthétique, avec 60 % destinés à la production d'électrodes pour les fours électriques des installations sidérurgiques. 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 gra-

phite 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 2022, l'offre mondiale de graphite serait située entre 2,5 Mt et 3 Mt (60 % synthétique, 40 % naturel, bien que suivant les prix, ces parts puissent varier). Le graphite naturel résulte du métamorphisme (haute température et haute pression) de composés carbonés organiques (charbons, bitumes) contenus dans les roches. On en distingue trois types : paillettes, amorphe (ou microcristallin), et en veine. La Chine est non seulement le plus gros consommateur de graphite, mais également le premier producteur et exportateur mondial de graphite naturel. Le pays possède plus d'une centaine de mines de graphite, situées principalement au nord du territoire, dans les provinces de Heilongjiang, Shandong et en Mongolie intérieure. Si l'offre chinoise est très difficile à quantifier avec précision, l'USGS estime une production de 850 000 tonnes en 2022, soit 65 % du total mondial. Ces volumes seraient bien en deçà des capacités de production du pays qui se situeraient entre 1,2 Mt et 1,6 Mt, soit un taux d'utilisation de 40 % à 50 %. Le deuxième producteur minier, loin derrière la Chine, est le Mozambique (170 000 tonnes). Il est suivi de Madagascar (110 000 tonnes) et du Brésil (87 000 tonnes). Après une année 2020 placée sous le signe de la pandémie et des fermetures de mines ou d'usines, puis une année 2022 marquée par la guerre en Ukraine (impactant à la baisse les productions ukrainienne et russe), l'offre de graphite naturel a connu de fortes variations ces dernières années. Les premières estimations de l'USGS prévoient néanmoins une hausse de la production de 15 % entre 2021 et 2022, pour atteindre 1,3 Mt.

Le graphite synthétique est, quant à lui, issu du traitement à haute température d'un précurseur carboné amorphe. Ce dernier 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, serait utilisé 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.

Les réserves mondiales de graphite sont d'environ 330 Mt, selon l'USGS et sont localisées majoritairement en Turquie (90 Mt), au Brésil (74 Mt) et en Chine (52 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 cours de référence. Néanmoins, le prix pour une tonne de paillettes moyennes de graphite naturel, ayant une teneur comprise entre 94 % et 97 % de carbone, a été de \$ 1 318/t en 2022, contre \$ 982/t en 2021 et \$ 726/t en 2020 (soit une hausse de 82 % sur deux ans). Le prix du graphite synthétique oscille toujours dans une fourchette large entre \$ 7 000/t et \$ 20 000/t, selon les spécificités requises. La compétition entre le graphite naturel et synthétique permet aux utilisateurs de jouer sur les prix. Si les sociétés juniors détenant des permis d'exploration ou d'exploitation de graphite naturel mettent généralement en avant que celui-ci est bien moins onéreux pour le consommateur que le graphite synthétique, la réalité est plus complexe. En effet, bien que la production de graphite naturel en paillettes soit assez peu coûteuse, ces paillettes doivent ensuite subir une purification (elles contiennent de nombreuses impuretés) pouvant être très consommatrice d'énergie et, par conséquent, relativement chère. À l'inverse, la production de graphite synthétique est onéreuse du fait du prix des précurseurs (par exemple le *needle coke*) et des acides, mais le produit est déjà pur. Il s'agit donc toujours d'un compromis pour le client final.

Bien que la Chine continue 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. De nombreux projets voient, en effet, le jour, notamment en Afrique (Madagascar, Mozambique, Namibie, Tanzanie, mais également au Malawi) et en Australie (projets développés par Quantum Graphite, Renascor Resources, Minerals Commodities ou encore Hexagon Resources), bien soutenus par la demande croissante pour la fabrication de graphite sphérique à destination des batteries Li-ion. Aux

États-Unis, deux usines sont par ailleurs en cours de construction : le projet Vidalia, développé par Syrah en Louisiane, qui produira dans un premier temps 11 000 tonnes par an de matériaux actifs d'anodes à partir de la fin de l'année 2023 ; et le projet Kellyton, porté par Westwater Resources en Alabama, avec des capacités de production d'environ 7 500 tonnes par an et un lancement prévu courant 2023.

Lithium (Li)

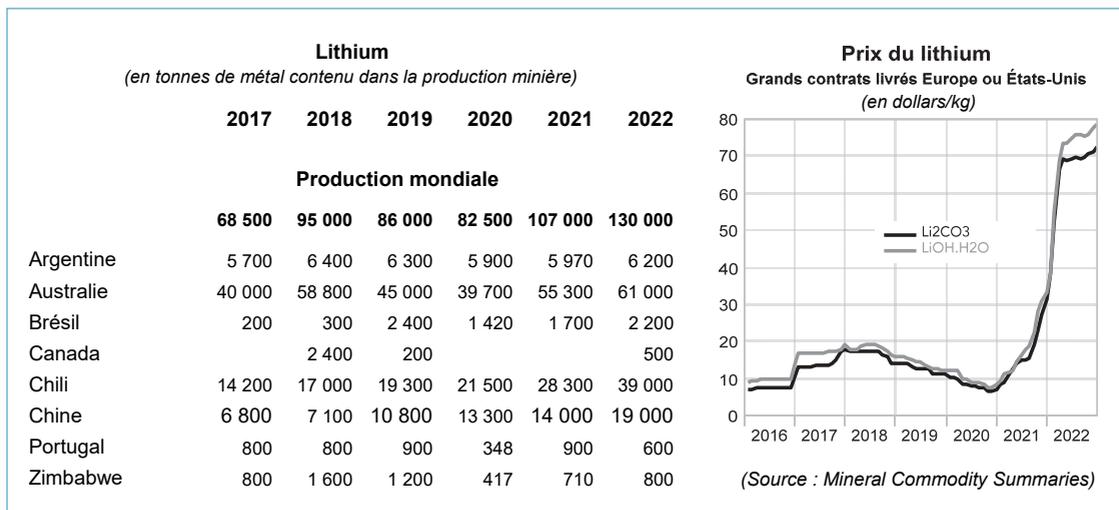
La croissance du marché du lithium s'est considérablement accélérée au cours de la dernière décennie. De par ses propriétés chimiques spécifiques, le lithium devrait rester (sauf innovation de rupture peu probable) un composant clé indispensable et non substituable des batteries rechargeables pour les vingt prochaines années. Cela s'explique principalement par les prévisions de développement massif de la mobilité électrique, soutenu par d'importants leviers réglementaires. Fin juin 2022, le Parlement européen a par exemple voté en faveur de l'interdiction, à partir de 2035, de la vente de véhicules neufs à moteur essence ou diesel, accélérant les perspectives de transformation du secteur du transport individuel, et d'augmentation de la demande en lithium correspondante.

Le secteur des batteries devrait ainsi atteindre 90 % des usages du lithium à l'horizon 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 fabrication de ciment, la pyrotechnie ou le traitement de l'eau.

L'avènement des batteries 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 de métal), les degrés de pureté des composés de lithium étaient de manière générale assez faibles. À l'inverse, pour les composés de lithium utilisés comme précurseurs pour la fabrication des batteries Li-ion, la notion de pureté est cruciale. Ceci s'explique par les enjeux de réactivité à l'échelle micrométrique des matériaux actifs intégrés dans ces batteries. Le degré de pureté des composés est fondamental pour assurer les performances, la longévité, mais aussi la sécurité des batteries.

Le composé de lithium 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) comme



précurseur. 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 2022 aurait été de 130 000 tonnes de lithium métal. Rappelons qu'en 2021 la production mondiale était de l'ordre de 100 000 tonnes. Elle pourrait dépasser 200 000 tonnes en 2025, selon la plupart des prévisions. Les réserves évaluées à ce jour sont de 26 Mt de lithium métal d'après l'USGS, tandis que les ressources mondiales identifiées seraient de l'ordre de 98 Mt.

L'année 2022 a globalement été propice aux investissements dans l'exploration et l'exploitation du lithium. Le budget mondial dédié à l'exploration de cette ressource minérale a presque doublé entre 2021 et 2022, passant d'environ \$ 250 millions à \$ 470 millions, selon S&P Global. En 2022, les cinq pays ayant connu les plus importants investissements ont été les États-Unis (\$ 93 millions), suivis de près par l'Australie (\$ 92 millions), le Canada (\$ 76 millions), l'Argentine (\$ 72 millions) et le Chili (\$ 25 millions).

L'Australie est devenue dès 2016 la première zone de production en volumes avec, entre autres, la plus grosse mine de lithium mondiale de Greenbushes. Aujourd'hui, une grande partie du lithium australien faiblement transformé (sous forme de concentrés de spodumène) continue d'être exportée et purifiée en Chine. Cependant, des étapes de transformation à haute valeur ajoutée commencent à être implantées sur le territoire australien. Entre 2022 et 2023, c'est, en particulier, par la mise en service de deux raffineries – Kwinana et Kemerton – destinées à la production d'hydroxyde de lithium de qualité batterie que ce phénomène est visible. La première est issue de la *joint-venture* Tianqi Lithium Energy Australia formée par les entreprises australienne et chinoise IGO Ltd et Tianqi Lithium. De mars à septembre 2022, 283 tonnes d'hydroxyde de lithium ont été produites à Kwinana, représentant le premier lithium de qualité batterie australien. L'année 2023 sera l'occasion d'augmenter progressivement les volumes de production ainsi que de pérenniser les phases de qualification et de certification des produits avec des clients potentiels. De la même manière, la société américaine Albemarle, acteur ma-

jeur du marché du lithium, a annoncé en novembre 2022 la finalisation de la raffinerie de Kemerton II en Australie-Occidentale. Sa mise en service est prévue en 2023 pour une capacité nominale de 25 000 tonnes/an d'hydroxydes de lithium.

L'Australie demeure très dynamique malgré des pénuries de main-d'œuvre persistantes. Dans l'ensemble, selon S&P Global, la production de lithium de l'Australie devrait augmenter à un taux de croissance annuel moyen de 14,2 % pour atteindre 116 000 tonnes en 2026, soutenue principalement par des expansions programmées parallèlement à une production constante des mines existantes. Les retours en production des mines de Wodgina (à l'arrêt depuis 2019) et de Bald Hill, ainsi que le démarrage du projet de Mt Holland développé par Wesfarmers et SQM devraient alimenter cette croissance. À l'horizon 2024, l'ouverture du projet Kathleen Valley, porté par la compagnie Liontown Resources, est également envisageable.

Le Chili et l'Argentine sont historiquement les deuxième et troisième plus grands producteurs mondiaux, à partir des salars andins. Les principaux exploitants sont Albemarle et SQM au Chili, et la compagnie Livent en Argentine. D'importants investissements ont été consentis par ces acteurs dans l'objectif d'étendre les capacités de production existantes ou d'augmenter leurs rendements, notamment au niveau du Salar d'Atacama. Parallèlement, la prise en compte de l'impact socio-environnemental de ces exploitations, et en particulier l'amélioration de la gestion des ressources en eau dans ces régions désertiques, est devenue un paramètre crucial pour la pérennité de ces projets.

Au-delà des extensions des productions existantes, un grand nombre de projets se développent, notamment en Argentine. Le plus prometteur semble être celui de Cauchari-Olaroz détenu par le chinois Ganfeng Lithium et les compagnies Lithium Americas et Jujuy Energia y Minería. En novembre 2022, Lithium Americas a annoncé avoir accéléré les opérations pour espérer un début de production au premier semestre 2023.

Au Brésil, Sigma Lithium Resources, propriétaire du gisement de spodumène de Grota do Cirilo dans le Minas Gerais, a annoncé en janvier 2023 que la production devrait commencer au mois d'avril suivant. En Bolivie, malgré d'importantes ressources grâce au Salar d'Uyuni (21 Mt

de Li contenu), il n'existe pas de production commerciale de lithium actuellement, mais des actions sont entreprises, notamment un rapprochement avec l'immense fabricant de batteries chinois CATL en fin d'année 2022.

Au Mexique, un important gisement d'argiles à lithium est en développement, Sonora, propriété de la société Bacanora Lithium en partenariat avec le chinois Ganfeng Lithium. L'ouverture est prévue pour 2024. Cependant, la situation politique dans l'État de Sonora, fortement marquée par l'insécurité du fait d'un rôle significatif des cartels impliqués dans le trafic de stupéfiants, pourrait compliquer les avancées du projet. De plus, dans une stratégie de nationalisation des ressources en lithium, le gouvernement mexicain a réformé sa législation minière en avril 2022. Il a ainsi décidé de créer une société publique d'extraction et de commercialisation de lithium tout en interdisant aux entreprises privées l'exploitation de nouveaux gisements de lithium.

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. Les États-Unis ont quasiment doublé le budget d'exploration entre 2021 et 2022, ce qui en fait la nation ayant le plus investi dans l'exploration pour le lithium au monde, motivé par la volonté d'indépendance vis-à-vis de la Chine concernant l'approvisionnement en métaux stratégiques. Un des projets les plus aboutis est celui de Thacker Pass dans le Nevada, propriété de la société Lithium Americas. Cette dernière a annoncé, en novembre 2022, que l'étude de faisabilité devrait être achevée au cours du premier trimestre 2023 et que la construction pourrait commencer en 2023. D'autres projets sont en cours de développement, tels que Rhyolite Ridge au Nevada (première production prévue pour 2026) ou les gisements de pegmatite de Piedmont (usine de transformation planifiée sur place). Dans sa démarche d'optimisation et de développement, la société Rio Tinto a par ailleurs construit une usine de récupération du lithium à partir des résidus miniers de sa mine de bore située à Boron, en Californie.

L'Afrique semble également bien positionnée pour jouer un rôle notable dans la production future de lithium, 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 pour l'exploitation d'un gisement de taille très significative. Cependant, en 2022, une finalisation incomplète des droits miniers et d'exploration a entraîné une suspension temporaire du développement du projet. Au Mali, la société Firefinch Minerals et son partenaire Ganfeng Lithium ont validé l'exploitation du site de Goulamina, dont la construction est déjà commencée et devrait se finir à la fin du premier trimestre 2024. Au Ghana, en janvier 2023, les compagnies Piedmont Lithium et Atlantic Lithium ont annoncé qu'elles prévoyaient de terminer l'étude de faisabilité définitive du projet Ewoyaa pour mi-2023. Au Zimbabwe, la société Bikita Minerals Ltd. opérant le projet homonyme a été rachetée par le groupe minier chinois Sinomine Resource Group. Les ressources du projet Bikita ont été estimées, en décembre 2022, à 282 402 tonnes de lithium métal et des augmentations de capacités de production comme de transformation sont prévues pour 2023. La fin d'année 2022 a aussi été marquée au Zimbabwe par l'interdiction des exportations de lithium non transformé, dans une tentative de valoriser le traitement du minerai sur place.

En Europe, il n'y a actuellement pas de production de lithium à destination du secteur des batteries. Cependant, 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, en février 2022, des ressources estimées à 143,5 Mt titrant 1,80 % Li_2O et 14,4 % B_2O_3 . Néanmoins, à la suite de nombreuses manifestations dans la capitale serbe en janvier 2022, le gouvernement a révoqué l'ensemble des permis et le développement de la mine est à l'arrêt. Ainsi, même sous l'hypothèse d'une meilleure acceptabilité future, la première production commercialisable de Jadar ne devrait pas être antérieure à 2027, d'après Rio Tinto. 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. La société australienne Vulcan Energy Resources a annoncé en décembre 2022 que l'étude de faisabilité définitive était en bonne voie d'être finalisée au cours du premier trimestre 2023. Elle a également reçu

l'approbation des autorités locales pour le plan de l'usine de démonstration du projet et 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 Solution, ont été conclus.

D'autres projets miniers 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 janvier 2023, Eramet et Électricité de Strasbourg (ES) ont signé un protocole d'accord exclusif en vue d'étudier conjointement le développement d'une production de lithium en Alsace à partir de saumures géothermales, sur la commune de Rittershoffen. Toujours dans le Grand Est, la société Lithium de France est titulaire du permis exclusif de recherches de Gîtes Géothermiques «Les Sources» depuis juin 2022. Dans l'Allier, la société Imerys poursuit ses travaux d'exploration sur son gisement de kaolin de Beauvoir pour définir d'éventuelles réserves de lithium. Imerys vise une production de 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium par an à partir de 2028. Plusieurs permis d'exploration pour le lithium dans les eaux géothermales dans le Massif central et le Bassin rhénan sont actuellement en instruction.

Les prix du lithium ont connu d'importantes fluctuations ces dernières années, ballottés entre des fondamentaux solides de la demande de long terme et des événements perturbateurs ponctuels, caractéristiques d'une industrie encore peu mature. La forte augmentation de ventes de véhicules électriques, notamment sur le marché européen, a relancé la demande mondiale en lithium en 2022 et soutenu de très hauts niveaux de prix, ces derniers atteignant même des records. Ainsi, cette même année, les prix du lithium ont quasiment triplé par rapport à 2021. Le prix annuel du carbonate de lithium pour des contrats *spot* livrables à partir des États-Unis est, en effet, passé d'une moyenne de \$ 16,72/kg en 2021, à \$ 65,53/kg en 2022, soit une hausse de plus de 290 %. Il en allait de même pour l'hydroxyde de lithium, dont les prix ont évolué de \$ 18,82/kg à \$ 70,24/kg, soit une croissance d'environ 270 %. Ces prix élevés

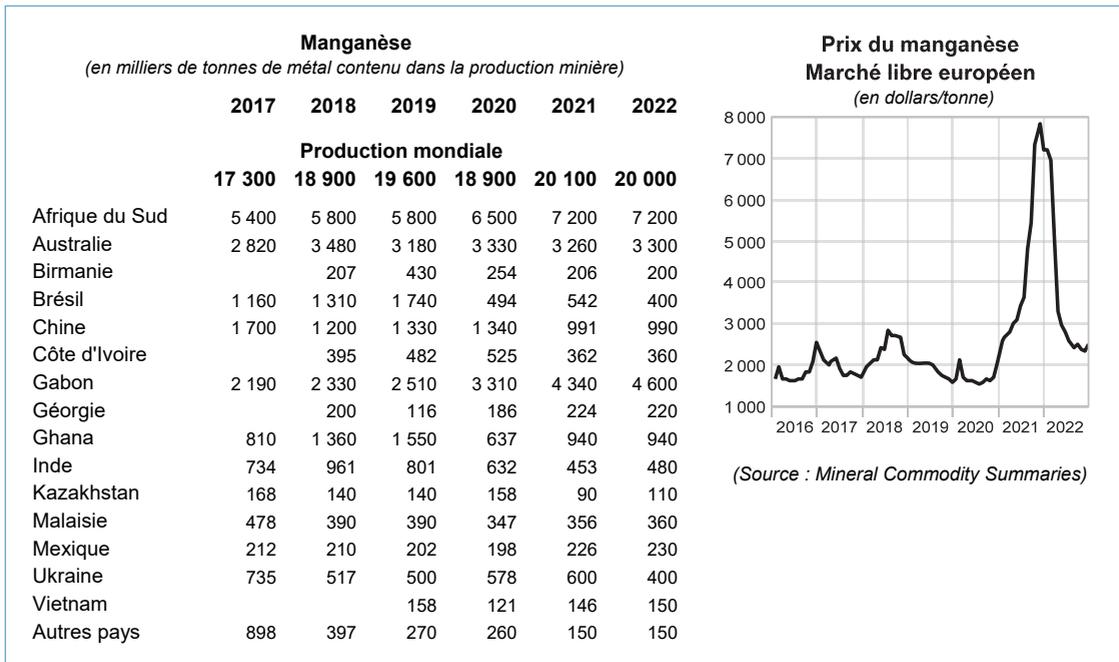
traduisent également les inquiétudes grandissantes sur les possibilités d'augmentation de l'offre en lithium de qualité batterie en un temps très court pour répondre à la demande. Ils peuvent représenter des facteurs incitatifs aux investissements industriels dans le domaine.

Ainsi, plusieurs projets de raffinage du lithium ont vu le jour en Europe. En France, par exemple, Viridian Lithium a lancé un projet dans la région Grand Est, tandis qu'en Allemagne Rock Tech Lithium prévoit de construire une première usine à Guben (Brandebourg) et AMG Lithium GmbH a, de son côté, débuté la construction d'une raffinerie dans le parc chimique de Bitterfeld/Wolfen. En ce qui concerne les gigafactories de batteries, leur nombre et les perspectives de production se structurent progressivement. En France, trois gigafactories devraient débiter entre 2023 et 2024.

Liées à ce développement, les problématiques sur la disponibilité et les méthodes d'extraction durables du lithium prennent une place de plus en plus grande dans les réflexions d'approvisionnements des acteurs. Enfin, l'approvisionnement en lithium de sources secondaires est amené à se renforcer sensiblement. La structuration de filières de recyclage du lithium à partir des batteries en fin de vie est un axe de recherche et de développement industriel important, notamment en Europe dans le cadre de politiques de sécurisation de l'offre en ce métal critique.

Manganèse (Mn)

Une fois le manganèse extrait de la mine, il est généralement réparti en trois 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 ferroalliages qui concentre 90 % des usages. Le manganèse joue un double rôle dans la production 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 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 « in-substituable » dans cet usage. Les deux tiers de la demande restante concernent la fabrication de ferroalliages rentrant dans la composition finale d'un grand nombre d'aciers. Si les teneurs en manganèse dans les aciers sont très variables et peuvent atteindre 14 %, un acier « classique » contient 6 % à 7 % Mn. Les aciers au manganèse sont utilisés essentiellement dans les secteurs du bâtiment et de l'automobile pour leurs propriétés de dureté, d'élasticité, de résistance à l'usure et à l'abrasion.

La qualité chimique doit contenir environ 35 % Mn tandis que la qualité batterie affiche des teneurs situées entre 44 % et 54 % Mn. Les débouchés du manganèse de qualité chimique et de qualité batterie (environ 10 % des usages), soit sous forme métallique, soit sous forme 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 spécifique 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 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 rentre dans la composition des cathodes LMO (Oxyde de Lithium-Manganèse) à hauteur de 65 % en masse, 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) et du 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 très 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 2022, la production minière de manganèse a été de 20 Mt, selon les données préliminaires de l'USGS, contre 20,1 Mt en 2021. Environ 75 % de la production mondiale de manganèse provient de trois pays : l'Afrique du Sud (7,2 Mt – 36 %), le Gabon (4,6 Mt – 23 %) et l'Australie (3,3 Mt – 16,5 %), suivis par la Chine, le Ghana, l'Inde et le Brésil.

Les ressources en Chine étant de moindre qualité et proches de l'épuisement, le marché est devenu très dépendant de la production sud-africaine qui a été multipliée par plus de six depuis l'année 2000. Cependant, le pays souffre de problèmes récurrents d'infrastructures, notamment ferroviaires et portuaires, mais également d'accès à l'électricité. Port Elizabeth est par exemple l'unique infrastructure portuaire pour assurer les exportations de manganèse du pays, mais n'a qu'une capacité limitée et insuffisante pour faire face aux hausses récentes de production. Or, plus de la moitié de la demande issue de Chine a, jusqu'ici, été assurée en majeure partie par les exportations sud-africaines. La production de manganèse de ce pays devrait fortement augmenter, Roskill prévoyant qu'il fournira environ la moitié de l'offre mondiale supplémentaire de minerai de manganèse au cours de la prochaine décennie. En 2021, l'Afrique du Sud a vendu à l'international pour plus de \$ 3 milliards de minerais de manganèse, soit son huitième produit le plus exporté et serait en hausse de 3 % sur 2022 (données non encore consolidées).

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. Pour 2022, l'USGS indique que les ré-

erves cumulées de l'Afrique du Sud (640 Mt), de la Chine (280 Mt), du Brésil (270 Mt) et de l'Australie (270 Mt) représentent 86 % des réserves mondiales, estimées à environ 1 700 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). Par ailleurs, un projet initié par le groupe Elcora nommé «Atlas Fox Deposit» se situant au Maroc est en cours d'avancement et la préparation du plan d'exploitation du manganèse est en cours.

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 2022 (*flakes* à 99,97 % Mn) a été de \$ 3 586/t, en baisse de 20 % par rapport à 2021 (\$ 4 492/t). Cette baisse des prix est le reflet de la diminution de la production mondiale d'acier en 2022 en raison des perturbations causées à la chaîne d'approvisionnement par le conflit entre la Russie et l'Ukraine, ainsi que par les fermetures intermittentes liées à la pandémie de Covid-19 en Chine.

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

Petits métaux

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

Certains grands regroupements peuvent être faits parmi ces petits métaux, où l’on retrouve :

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

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 2022, telles que publiées début 2023 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.

**Variations 2021-2022 de la production et des réserves des petits métaux
étudiés dans ce chapitre**

Elément	Unité de masse	Production exprimée en unité de masse contenue de	Production 2021	Production 2022	Variation de la production 2022-2021 (en %)	Réserves 2021	Réserves 2022	Variation des réserves 2022-2021 (en %)
Antimoine	kt	Sb	112	110	-1.79 %	>2 000	>1 800	-10.00%
Béryllium	t	Be	272	280	2.94 %	n.d.	n.d.	-
Bismuth	t	Bi	20 000	20 000	0.00 %	n.d.	n.d.	-
Cadmium	t	Cd	24 700	24 000	-2.83 %	n.d.	n.d.	-
Chrome	kt	Cr	42 200	41 000	-2.84 %	570 000 ^a	560 000	-1.75 %
Cobalt	t	Co	165	190	15.15 %	7 600 000	8 300 000	9.21 %
Gallium	t	Ga	434	550	26.73 %	n.d.	n.d.	-
Germanium	t	Ge	n.d.	n.d.	-	n.d.	n.d.	-
Graphite	kt	C	1130	1 300	15.04 %	320 000	330 000	3.13 %
Hafnium	t	Hf	n.d.	n.d.	-	n.d.	n.d.	-
Indium	t	In	932	900	-3.43 %	n.d.	n.d.	-
Lithium	kt	Li	107	130	21.50 %	22 000	26 000	18.18 %
Magnésium	kt	Mg	1070	1 000	-6.54 %	n.d.	n.d.	-
Manganèse	kt	Mn	20 100	20 000	-0.50 %	1 500 000	1 700 000	13.33 %
Molybdène	kt	Mo	255 000	250 000	-1.96 %	16 000	12 000	-25.00 %
Niobium	kt	Nb	87 600	79 000	-9.82 %	>17 000	>17 000	0.00 %
Rhénium	t	Re	59 500	58 000	-2.52 %	> 2400	LARGE	-
Scandium	t	Sc	n.d.	n.d.	-	n.d.	n.d.	-
Sélénium	t	Se	3 100	3 200	3.23 %	100 000	81 000	-19.00 %
Silicium	kt	Si	9 150	8 800	-3.83 %	n.d.	n.d.	-
Tantale	t	Ta	1 840	2 000	8.70 %	n.d.	n.d.	-
Tellure	t	Te	610	640	4.92 %	31 000	32 000	3.23 %
Terres rares	kt	TR	290	300	3.45 %	120 000	130 000	8.33 %
Titane	kt	Ti	240	260	8.33 %	n.d.	n.d.	-
Tungstène	kt	W	84	84	0.24 %	3 700	3 800	2.70 %
Vanadium	kt	V	105	100	-4.76 %	24 000	26 000	8.33 %
Zirconium	kt	Zr	1300	1 400	7.69 %	70 000 ^b	68000.00	-2.86 %

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

b réserves exprimées en ZrO₂

(Source : USGS 2023 - Mineral Commodity Summaries)

Le tableau p. 486 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 2023 réalisée par l'USGS.

Le tableau p. 488 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 2022, 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 un pic à 192 000 tonnes (t) en 2010. 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 subit 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 (pan-

neaux 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'Öko-Institut allemand s'est prononcé en défaveur d'une restriction de l'ATO dans les équipements électriques et électroniques dans le cadre de la directive européenne *Restriction of Hazardous Substances* (RoHS). 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

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 2022	Sous-produit
Antimoine	Chine	55 %	54 %	Partiellement : plomb, or, zinc
Béryllium	USA	66 %	65 %	Non
Bismuth	Chine	84 %	81 %	Essentiellement : plomb, tungstène
Cadmium	Chine	42 %	41 %	Essentiellement : zinc
Chromite (minerai de chrome)	Afrique du Sud	44 %	44 %	Rarement : platinoïdes
Cobalt (production minière)	République dém. du Congo	73 %	70 %	Essentiellement : cuivre, nickel
Gallium	Chine	98 %	98 %	Exclusivement : aluminium
Germanium	Chine	68 %	n.d.	Exclusivement : zinc, charbon
Hafnium	France	43 %	n.d.	Exclusivement : zirconium
Indium	Chine	57 %	59 %	Exclusivement : zinc, cuivre, plomb, étain
Lithium	Australie	53 %	47 %	Rarement : potasse
Magnésium	Chine	85 %	88 %	Non
Manganèse	Afrique du Sud	37 %	36 %	Non
Molybdène	Chine	44 %	40 %	Partiellement : cuivre
Niobium	Brésil	88 %	90 %	Non
Rhénium	Chili	49 %	50 %	Exclusivement : molybdène
Scandium	Chine	66 %	n.d.	Exclusivement : terres rares, fer, uranium
Sélénium	Chine	36 %	40 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc
Silicium	Chine	70 %	68 %	Non
Tantale	République dém. du Congo	34 %	43 %	Partiellement : niobium, lithium, étain, terres rares
Tellure	Chine	59 %	53 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc, bismuth
Terres rares	Chine	61 %	70 %	Non
Titane (éponge)	Chine	58 %	60 %	Non
Tungstène	Chine	83 %	84 %	Non
Vanadium	Chine	68 %	68 %	Essentiellement : acier, titane
Zirconium	Australie	33 %	36 %	Non

(Source : USGS 2023 - Mineral Commodity Summaries)

l'antimoine (concentré, métal, ATO). Les statistiques sont hétérogènes et à fort risque de «double comptage». Pour illustration, l'USGS a réévalué à la baisse la production 2020 d'antimoine, de 153 000 tonnes à 111 000 tonnes (soit une surestimation de 38 %). Toujours d'après le service géologique américain, elle serait stable en 2022, à 110 000 tonnes (contre 112 000 tonnes en 2021, après révision).

En 2022, le premier producteur a été la Chine avec 60 000 tonnes d'antimoine métal (chiffres préliminaires de l'USGS), un niveau quasiment similaire à celui de 2021, suivie de la Russie et du Tadjikistan, avec respectivement 20 000 tonnes et 17 000 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 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.

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 2022, à plus de 1,8 million de tonnes (Mt). Le Département américain de la défense aurait des stocks stratégiques d'antimoine à hauteur de 90 tonnes à la mi-2022, toujours selon l'USGS.

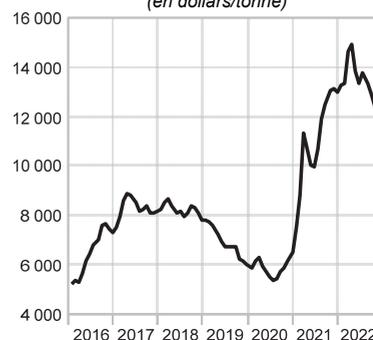
L'antimoine contenu dans les batteries au plomb et autres alliages est bien recyclé. Cela

Antimoine

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production mondiale						
	137 000	147 000	162 000	111 000	112 000	110 000
Australie	3 120	2 170	2 030	3 900	4 000	4 000
Birmanie	1 000	2 640	6 000	2 200	4 600	4 000
Bolivie	2 700	3 110	3 000	2 600	2 600	2 500
Canada			1	2	2	2
Chine	98 000	89 600	89 000	61 000	61 000	60 000
Équateur		50	1	1		
Guatemala	25	25	25	80	80	80
Honduras		12	10			
Iran	300	600	500	400	400	400
Kazakhstan	700	300	300	100	100	100
kirgizistan		370			0	0
Laos	340	300	140			
Mexique	243	260	300	700	750	800
Pakistan	60	28		17	66	70
Russie	14 400	30 000	30 000	25 000	20 000	20 000
Tadjikistan	14 000	15 200	28 000	13 000	16 800	17 000
Turquie	2 000	2 400	2 400	1 330	1 300	1 300
Vietnam	380	240	310	390	310	300

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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 \$ 13 199/t en 2022, en hausse de quasiment 20 % par rapport à 2021 (\$ 11 045/t). Ceci traduit la reprise économique post-covid, couplée à des coupes de production en Chine due aux mesures environnementales, mais aussi à la crise énergétique.

La demande future en antimoine devrait stagner, se situant au milieu de plusieurs tendances antagonistes 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 antimonié, 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 multi-jonctions, 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 qu'une bonne réflexion des neutrons.

Certaines formes sont privilégiées en fonction des secteurs d'usages. La principale est l'alliage

cuivre-béryllium (CuBe) contenant approximativement 2 % Be qui représente environ 80 % des quantités consommées. Cet alliage hérite du béryllium sa très grande résistance à l'usure et à l'oxydation. Sa principale application est en connectique pour des usages nécessitant un très haut niveau de fiabilité, dans des secteurs tels que l'aéronautique, le spatial et la défense (connecteurs et contacteurs électriques pour télescopes, gyroscopes, systèmes de guidage, etc.).

Une plus faible part de la consommation est sous forme de béryllium métal pur (15 % des usages), en particulier pour les applications dans les secteurs de la santé (équipements des rayons X, outillage pour l'entretien des installations d'IRM, etc.), 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. Conjuguées à la reprise qui a fait suite à la pandémie, les tensions apparues sur la scène internationale ont 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 en 2021 et a installé, en 2022, une nouvelle usine dans le Wisconsin afin de répondre à la demande croissante des marchés des semi-conducteurs et des batteries de véhicules électriques.

Les États-Unis demeurent le premier producteur mondial de béryllium en 2022 avec 180 tonnes, soit les deux tiers de la production minière totale. Ce pays 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

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

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production mondiale de minerai						
	214	240	250	250	272	280
États-Unis	150	165	160	165	175	180
Brésil	3	3	3	3	3	3
Chine	50	48	70	70	71	70
Madagascar	6	6	1	1	1	1
Mozambique		16	15	3	13	13
Nigeria	4	4	1	1	1	1
Rwanda	1	1	1	1	1	1
Ouganda				7	7	7

(Source : Mineral Commodity Summaries)

70 tonnes) et, pour une faible part, à partir du béryl extrait au Mozambique, en Ouganda et au Brésil (de l'ordre de quelques tonnes), ainsi qu'au Nigeria, au Rwanda et à Madagascar. Il faut noter que des gisements de béryl sont également exploités pour les gemmes (l'émeraude, l'aigue-marine ou encore la morganite sont des béryls).

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 installée dans l'agglomération nantaise. Au Kazakhstan, les stocks d'Ulba Metallurgical Plant JSC donnent également lieu à une production importante d'alliages au béryllium avec cuivre (CuBe), aluminium (AlBe) et nickel (NiBe).

Les seules réserves démontrées de béryllium mondiales sont celles de la mine de Spor Mountain, aux États-Unis, avec une actualisation pour 2022 établie à 19 000 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 la 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 recyclés, 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 : € 300 à € 1 500/kg ;
- alliage AlBe (39 % Be) pour composant aérospatial : € 200 à € 500/kg ;
- alliage CuBe (2 % Be) : € 20 à € 50/kg.

Le béryllium est inclus, depuis 2011, dans la liste des matières premières critiques pour l'économie européenne, et, depuis 2018, dans celle éta-

blie par les États-Unis. Dans ce cadre, la *Defense Logistics Agency* a pour mission de constituer un stock de défense nationale qui s'élevait au 30 septembre 2022 à 50 tonnes de Be métal, à 7 tonnes sous forme de poudre métallique et à 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 en priorité la production de terres rares, mais également de minéraux industriels à haute valeur ajoutée et de métaux dits technologiques, tels que le béryllium. Fin 2022, l'étude de préféabilité du projet était en voie de finalisation.

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.

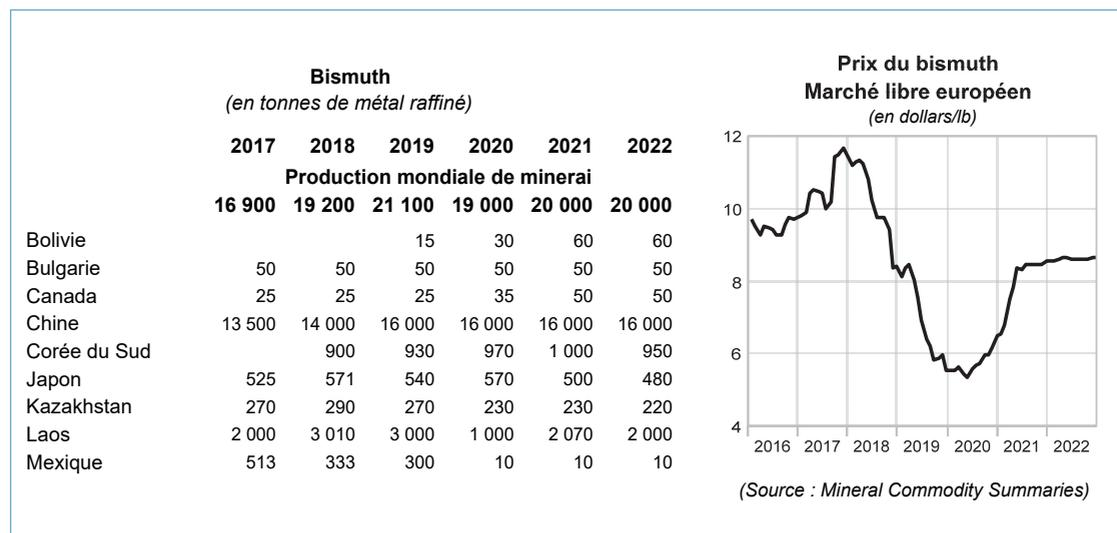
Le bismuth n'existe que très rarement sous forme de petites concentrations économiquement exploitables dans la croûte terrestre. Les chiffres de production mondiale sont ainsi généralement constatés au stade de la séparation métallurgique. Une complexité supplémentaire vient du degré de purification 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 2022, la production mondiale de Bi raffiné estimée par l'USGS a été de 20 000 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 80 % 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 ultrapur, d'alliages et de produits chimiques dérivés du bismuth est réalisée à partir de concentrés, d'oxydes, de pièces ou lingots de bismuth importés, notamment *via* sa filiale belge. La société raffine annuellement environ 3 000 à 3 500 tonnes de bismuth. Le bismuth vendu par 5N Plus est destiné à des applications pharmaceutiques, électroniques et industrielles. L'entreprise est intégrée verticalement et dispose de capacités de recyclage en boucle fermée.

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 2022, les prix du bismuth ont continué à augmenter avec un prix moyen (Bi 99,99 % Europe) à \$ 8,61/kg contre \$ 8,01/kg en 2021, soit une hausse de 7,5 %. 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 de publier son 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 recyclage est inférieur à 1 % étant donné le caractère dispersif des principaux usages du bismuth (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 plomb et chrome dans de nombreux sec-

teurs. 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 antivirus 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)

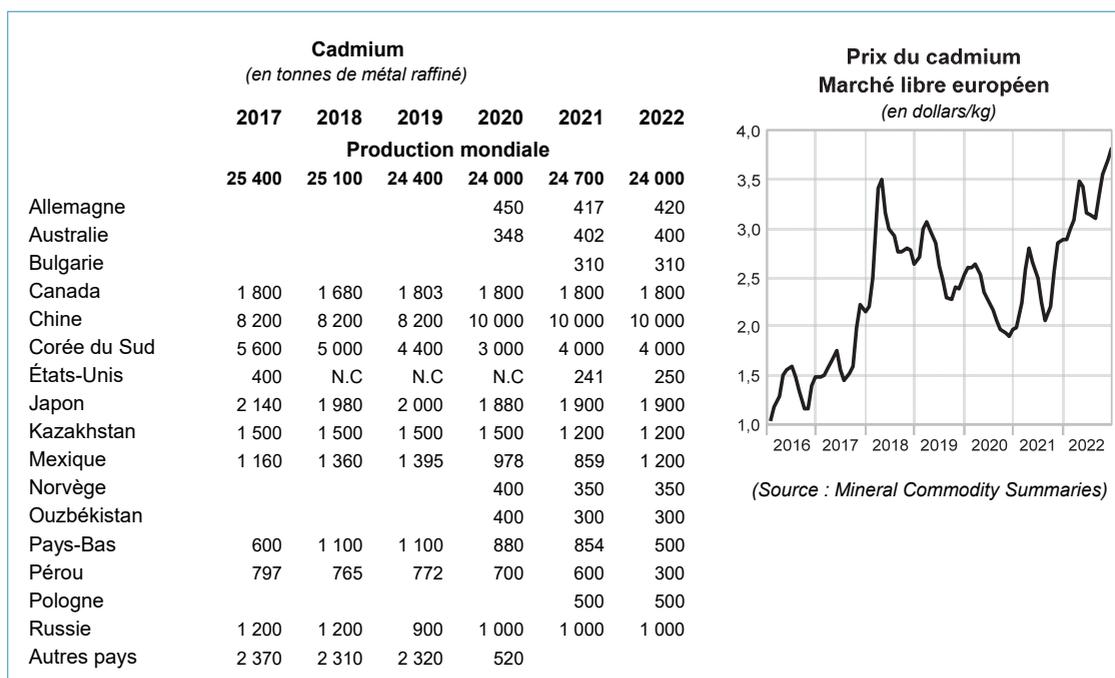
Le cadmium est un métal malléable à basses températures de fusion (321 °C) et d'ébullition

(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 en raison 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, orange ou rouges, très utilisés pour le revêtement des engins de chantier par exemple, car ils protègent l'acier de la corrosion. Datant de février 2017, un amendement du règlement REACH

limitant très fortement la teneur en cadmium des peintures entraîne cependant la substitution des pigments au cadmium par des pigments à base de vanadate de bismuth ou sulfure de cérium, présentant peu ou pas de toxicité. Hors de l'Europe, le cadmium est parfois encore utilisé pour la stabilisation des plastiques, même si des stabilisants baryum-zinc ou calcium-zinc peuvent remplacer ceux en baryum-cadmium dans les applications de chlorure de polyvinyle (PVC) souple. 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 cadmium par MW de capacité électrique installée. Cet usage a un fort potentiel de développement, bien que la technologie au silicium domine largement le marché des cellules photovoltaïques en 2022 (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 cadmium raffiné en 2022 était de 24 000 tonnes, lé-



gèrement inférieure à celle de 2021 qui s'élevait à 24 700 tonnes. Le cadmium est majoritairement récupéré en sous-produit de la métallurgie du zinc. La Chine, premier métallurgiste sur ce dernier segment, demeure aussi le premier 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 cadmium a suivi celle du zinc, à 2 %. À partir de fin 2019, la production de cadmium s'est infléchi et 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. Par exemple, les batteries avec d'autres chimies, en particulier Lithium-ion, peuvent remplacer les batteries Ni-Cd dans de nombreuses applications. Les revêtements d'aluminium, de zinc ou d'alliages de zinc tels que l'étain-zinc et le zinc-nickel peuvent remplacer le cadmium dans de nombreuses applications de plâchage, sauf lorsque les caractéristiques de surface d'un revêtement sont critiques (par exemple, les fixations pour avions).

Le cadmium des batteries Ni-Cd est couramment recyclé. La société Retrie 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 cadmium 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 européen du cadmium de pureté 99,95 % en 2022 a augmenté de 34 % par rapport à 2021 pour atteindre \$ 3,31/kg. En tant que grand consommateur de cadmium, mais sans production significative, l'Inde est un acteur déterminant de l'évolution des prix du cadmium sur le marché au comptant, marqué par des habitudes d'achat saisonnières.

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 – entrée en vigueur en 2022 – pourrait, à terme, pousser 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 nord-africains. 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 cadmium. 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). En vertu de 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 de 40 Mt. Après avoir connu une baisse de près de 18 % en 2020 à la suite de la pandémie de Covid-19, la production est repartie à la hausse dès l'année suivante, mais demeure toujours en deçà de son niveau pré-pandémique. Une forte croissance annuelle, comprise entre 5 % et 10 %, est attendue dans les prochaines années.

Plus de 95 % de la chromite est destinée à la production de ferrochrome, dont 77 % servent 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 la 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.

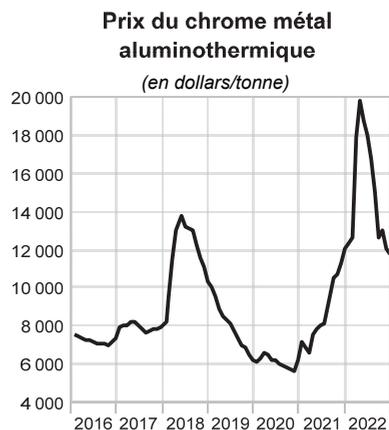
Selon les données de l'USGS, la production de chromite mondiale reste, en 2022, largement dominée par l'Afrique du Sud avec 18 Mt (soit 44 %) uniquement issues du complexe géologique du Bushveld. Les autres pays producteurs majeurs sont

la Turquie (6,9 Mt), le Kazakhstan (6,5 Mt) et l'Inde (4,2 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 14,4 Mt de ferrochrome ont été produites en 2021. Les principaux producteurs de ferrochrome sont de loin la Chine (6 Mt) et l'Afrique du Sud (3,8 Mt), contre seulement 0,7 Mt par an pour l'ensemble de l'Union européenne.

Toujours d'après l'USGS, les capacités de production mondiale de chrome métal (99,996 % Cr) étaient de 92 000 tonnes en 2020 et provenaient principalement de Chine (50 %), de Russie (22 %), 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, situé dans le département du Nord.

L'USGS évalue à approximativement 560 Mt les réserves mondiales de chromite (45 % Cr_2O_3) en 2022. Le Kazakhstan et l'Afrique du Sud possèdent respectivement 41 % et 36 % de ces réserves. Les ressources en chromite sont consi-

Chrome						
<i>(en milliers de tonnes de chromite)</i>						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	Production mondiale					
	35 700	43 100	44 800	37 000	42 200	41 000
Afrique du Sud	16 500	17 600	16 395	13 200	18 600	18 000
Finlande		2 210	2 415	2 290	2 270	2 200
Inde	3 500	4 300	4 139	2 500	4 250	4 200
Kazakhstan	4 580	6 690	6 700	7 000	6 500	6 500
Turquie	6 500	8 000	10 000	8 000	6 960	6 900
Autres pays	4 580	4 250	5 110	3 980	3 620	3 500



(Source : Mineral Commodity Summaries)

dérables puisqu'elles atteindraient 12 Gt, soit des volumes suffisants pour répondre à la demande actuelle pendant plusieurs siècles. Elles 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.

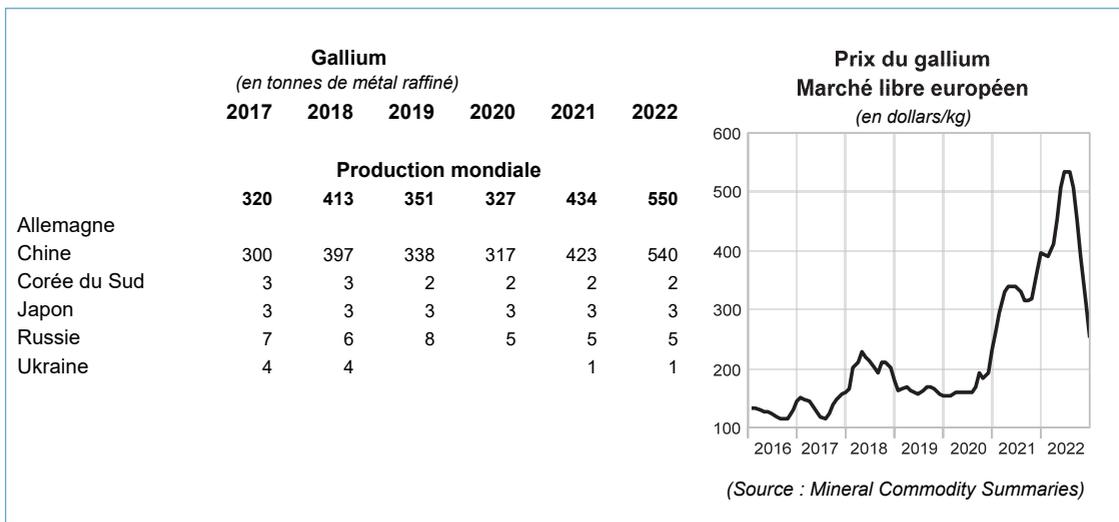
À l'instar de nombreux autres petits métaux, les cours du chrome ne sont pas établis sur les marchés boursiers, mais sont issus de négociations entre producteurs et utilisateurs. En raison de la diversité des produits se rapportant au chrome et de la variabilité de leur teneur en métal contenu, une grande diversité de prix peut être observée. Le prix moyen du chrome métal aluminothermique (99 % Cr) s'est envolé ces dernières années, passant de \$ 5 650/t en novembre 2020 à \$ 12 750/t en janvier 2022. Il a même temporairement atteint \$ 21 750/t au printemps 2022 en contrecoup du conflit russo-ukrainien et de la crainte de possibles pénuries à la suite des sanctions prises envers la

Russie. Fin 2022, les prix étaient redescendus à \$ 11 750/t, soit presque moitié moins que six mois auparavant. Les prix du ferrochrome (HC 60 % Cr et 6-8 % C) ont connu une dynamique similaire et sont retombés à \$ 2 508/t à la fin de l'année 2022.

Le marché du chrome, actuellement dominé par la production sud-africaine, pourrait connaître des évolutions à moyen terme, notamment liées au rôle croissant de l'Indonésie dans la production intégrée de nickel (*Nickel Pig Iron* ou NPI) et d'aciers inoxydables pour répondre à la demande chinoise, ainsi qu'aux manœuvres des trois producteurs miniers majeurs (Afrique du Sud, Kazakhstan et Inde). Par ailleurs, l'Afrique du Sud pourrait imposer une taxe à l'exportation de minerai de chrome pour encourager la production de ferrochrome domestique offrant une meilleure valeur ajoutée. Du côté de la demande, la fin de la politique chinoise dite du «zéro-covid» devrait se matérialiser par une reprise économique et une production croissante d'acier inoxydable qui pourraient bénéficier au marché du chrome dans son ensemble. Cette tendance haussière pourrait toutefois être contestée si les difficultés traversées par les économies européenne et étasunienne se poursuivaient.

Gallium (Ga)

Le gallium est un métal mineur qui revêt, ainsi que ses différents composés, une importance stratégique pour la production de circuits intégrés ana-



logiques. Sa consommation en 2022, de l'ordre de 300 à 400 tonnes, est essentiellement destinée aux marchés de l'électronique de puissance (estimé à \$ 37,4 milliards) et aux technologies de communication. En effet, le nitrure de gallium (GaN) est un matériau semi-conducteur conservant cette propriété à haut voltage et l'arséniure de gallium (GaAs) dispose d'une grande mobilité des électrons, ce qui permet aux puces utilisées par les technologies de la téléphonie de fonctionner avec des fréquences élevées jusqu'à 100 GHz. Le phosphure de gallium (GaP) et le GaN sont également utilisés en optoélectronique, un marché évalué à \$ 42,9 milliards en 2021, et en particulier dans la conception de diodes électroluminescentes dites «LED» pour leurs propriétés de conversion de l'électricité en lumière. L'un des autres usages importants du gallium est celui destiné aux couches minces CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium) utilisées par certaines cellules photovoltaïques. Enfin, plusieurs dizaines de tonnes de Ga sont utilisées ponctuellement pour la recherche sur les neutrinos en physique des particules et l'élaboration de transistors expérimentaux destinés aux applications logiques (processeurs de pointe).

Dans un contexte global de mise en place d'une transition énergétique, les marchés de l'électronique de puissance et des LED anticipent des taux de croissance minimums respectivement à 6 % et à 15 % par an jusqu'en 2029. Les composants utilisant des composés du gallium se retrouvent aussi bien dans les appareils destinés aux professionnels que dans les utilisations du quotidien (chargeurs de téléphone), et certaines entreprises d'électronique grand public comme Apple ont annoncé une volonté d'intégrer davantage de composants utilisant du GaN pour leurs chargeurs d'ordinateurs.

Aux États-Unis, la mise en place du *Defense Production Act III* (dit «DPA III») a stimulé la mise en place et la modernisation d'opérations minières. L'entreprise Nyrstar, acteur majeur de l'extraction du zinc aux États-Unis, prévoit d'étendre les activités de son usine de Clarksville dans le Tennessee en y ajoutant une nouvelle installation de traitement du gallium et du germanium. Une proposition de résolution a été déposée à la Chambre des représentants de cet État afin d'obtenir un soutien financier à hauteur de \$ 90 millions.

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 2022, la production estimée par l'USGS est de 550 tonnes de gallium faiblement purifié (hors États-Unis, ces chiffres étant confidentiels), contre 434 tonnes en 2021. La Chine produit 98 % de ce volume à partir de bauxites d'origines diverses. Les capacités totales estimées dans le pays sont de l'ordre de 870 tonnes. Toujours d'après l'USGS, les autres producteurs de gallium sont la Russie, la Corée du Sud et le Japon, leur production restant très limitée.

Les composants électroniques ont besoin de gallium purifié à 6N ou 8N. Seuls quelques pays ont accès à cette technologie à l'échelle industrielle, comme 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 d'une tendance de prix baissière prolongée sur ce marché.

Le gallium étant récupéré comme sous-produit du zinc et de l'aluminium, il n'existe pas d'évaluation normalisée des réserves. Néanmoins, l'USGS estime que les réserves mondiales de bauxite contiennent 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, et 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 fa-

brication du gallium raffiné et des plaquettes/galettes (*wafers*) de GaN ou GaAs. Il y aurait une capacité totale de traitement de 300 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.

En électronique de puissance, le carbure de silicium (SiC) est une alternative au GaN pour certaines applications. Les composants SiC sont généralement plus coûteux que ceux utilisant le GaN, mais leurs capacités en matière de haute tension et de courant élevé les rendent bien adaptés aux circuits d'alimentation pour les voitures et autres transports, ainsi qu'au sein des installations électriques à haute tension. Plusieurs applications liées à la défense utilisent des circuits intégrés à base de GaAs en raison de leurs capacités de fonctionnement à haute fréquence et d'amplification de signal, qui ne peuvent pas être substituées par un autre élément.

Comme plusieurs métaux mineurs, le gallium n'est pas coté sur les marchés boursiers : les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le prix *spot* moyen du gallium de pureté 99,99 % a été de \$ 428,30/kg en 2022, soit une hausse de 30 % par rapport à la moyenne des prix observée en 2021. Début 2022, le prix était fixé à \$ 395 kg, pour un maximum de \$ 535 kg atteint entre mai et août et un minimum de \$ 240 kg entre mi-novembre et début décembre, avant d'amorcer une remontée.

La baisse observée au cours du dernier trimestre de 2022 peut être attribuée à un ralentissement de la demande en Asie. En effet, la *Semiconductor Industry Association* (SIA) a annoncé que, sur le plan régional, les revenus des ventes de circuits intégrés, tous usages confondus, ont diminué de façon significative dans la zone Asie-Pacifique (- 10,1 %) et en Chine (- 16,2 %) en 2022. Cela est dû en partie aux mesures anti-Covid-19 mises en place par Pékin, qui a rendu l'importation d'électronique vers la Chine difficile et a conduit plusieurs acteurs du secteur à prioriser le marché américain. De cette manière, le marché du gallium est devenu surapprovisionné, et les fabricants ont été contraints de revoir leurs prix à la baisse en fin d'année. Aux Pays-Bas, un nouveau projet de R&D d'ampleur dirigé par l'entreprise *Gallium Semi* a ouvert ses portes à Nijmegen. Son activi-

té porte sur l'innovation sur les semi-conducteurs pour les communications mobiles, l'aérospatiale, l'industrie de défense et les applications médicales, où le GaN jouera un rôle central.

Toujours 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.

Sur le continent africain, Ivanhoe Mines a réalisé une étude de faisabilité sur le site de Kipushi, en République démocratique du Congo (RDC), dont les roches carbonatées contiendraient d'importantes quantités de sous-produits, dont du gallium. Au Botswana, l'entreprise Mount Burgess Mining a conduit une évaluation de la teneur en gallium des sites de Kihabe et de Nxuu, respectivement estimés à 10,8 g/t et 12,12 g/t.

Germanium (Ge)

Récemment inscrit comme métal stratégique par le gouvernement américain dans le *Defense Production Act III* (dit «DPA III»), il s'agit d'un matériau semi-conducteur utilisé pour de nombreuses applications militaires, les technologies de radiocommunication, ainsi que dans le secteur des panneaux photovoltaïques. Évalué à environ \$ 280 millions, le germanium en tant que matériau est un marché de niche. Le marché de son alliage silicium-germanium (SiGe) serait quant à lui évalué à \$ 4 milliards. Ce dernier est appelé à grandir, notamment tiré par la croissance du secteur de l'armement, du déploiement de la technologie 5G et du photovoltaïque. En effet, le germanium est aujourd'hui le générateur d'énergie le plus efficace dans les panneaux solaires qui peuvent convertir plus de 40 % de la lumière du soleil en électricité contre 20 % au maximum pour le silicium.

La répartition des usages du germanium reste stable, l'industrie des semi-conducteurs étant le premier consommateur de germanium. Ainsi, 30 % de la demande mondiale est destinée aux microfibres et transistors utilisés spécifiquement par la fibre optique. 20 % seraient consacrés aux panneaux photovoltaïques à haut rendement (majoritairement sur terre avec quelques applications aérospatiales). L'industrie de défense constituerait

20 % de la demande pour élaborer des systèmes de vision nocturne, d'optiques infrarouges et d'amplification de signaux. 20 % sont utilisés par la catalyse de polymères (polytéréphtalate d'éthylène «PET» utilisé pour l'embouteillage des boissons gazeuses, les fibres textiles et certains films plastiques) et les 10 % restants sont utilisés pour la recherche et quelques autres applications (poudres luminophores, métallurgie, chimiothérapie et autres applications médicales).

La plus forte croissance de la demande ces dernières années a été observée dans le secteur de la fabrication des fibres optiques, pour laquelle au moins 6 % de croissance par an à horizon 2029 est attendue. Le germanium est un composant indispensable dans ce secteur, intégré aux transistors ou bien sous forme de tétrachlorure de germanium, améliorant la vitesse de transmission de l'information. La technologie 5G, outre l'importante infrastructure en termes de fibres optiques qu'elle mobilise, utilise des semi-conducteurs analogiques fonctionnant à haute fréquence. L'alliage de silicium-germanium (SiGe) est devenu un matériau de choix dans ce secteur, qui devrait massivement se développer dans les années à venir.

Pour l'année 2020, la production mondiale de germanium était estimée par l'USGS à 130 tonnes, hors États-Unis, dont la valeur est tenue confidentielle. Depuis cette date, les données de production ne sont plus disponibles. Le Ge est majoritairement un sous-produit de la métallurgie

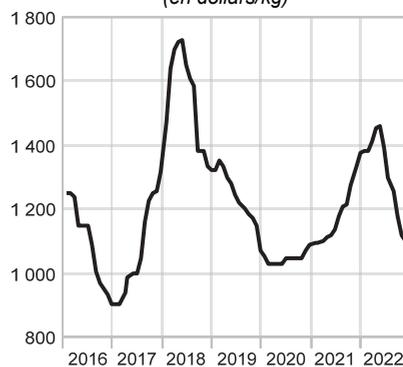
du zinc (75 %) et du charbon (25 %). La Chine est le premier producteur mondial de germanium depuis plus de dix ans avec une offre de 86 tonnes en 2020, toujours selon le service géologique américain (soit près de 66 % de la production totale en 2020). Elle tient cette place grâce à sa position dominante 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 petites et moyennes tailles ont fermé, en raison de fortes surcapacités de production et de la régulation des impacts environnementaux associés à leurs activités. Des investissements conséquents ont été effectués afin que le pays puisse devenir leader de la production de germanium raffiné à 99,999 999 % de pureté et au-delà, si bien que 30 % du germanium de qualité électronique proviendrait de Chine, devant la Russie et les États-Unis. Il faut également ajouter que, depuis 2015, le Bureau des réserves d'État chinois (*State Reserve Bureau – SRB –*) constituerait des stocks stratégiques de germanium chaque année.

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.

Germanium
(en kilogrammes de métal raffiné)

	2017	2018	2019	2020
Production mondiale	106 000	130 000	131 000	140 000
Chine	60 000	94 600	85 700	95 000
Russie	6 000	6 000	5 000	5 000
États-Unis	2 000			
Autres pays	40 000	30 000	40 000	40 000

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

La récupération du germanium contenu dans les lignites est souvent difficile et incomplète (de l'ordre de seulement quelques pour cent par tonne). 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 l'industrie des semi-conducteurs analogiques, 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.

Courant 2022, la société canadienne Ivanhoe Mines a conclu un accord avec la société congolaise Gécamines afin de commencer des travaux de réhabilitation du site de Kipushi en République démocratique du Congo. L'objectif annoncé par les partenaires est d'en faire un producteur de zinc à très haute teneur et responsable, avec la possibilité de trouver d'autres ressources coproduites et notamment du germanium. Les ressources minérales du gisement seraient évaluées à 11,78 Mt, et il serait possible d'extraire 64 grammes par tonne de germanium issu du zinc (pour une teneur minimale de 7 %). La réouverture du site est prévue pour 2024.

L'entreprise Nyrstar prévoit, pour sa part, d'exploiter le germanium et le gallium issus de l'exploitation de sa mine de zinc à Clarksville, dans le Tennessee (voir section consacrée au gallium). Au Botswana, Mount Burgess Mining compte également récupérer le germanium issu du zinc. 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.

Le prix moyen du germanium métallique avec une pureté de 99,99 % a été de \$ 1 295/kg en 2022, soit près de 9 % d'augmentation par rapport à 2021. Le maximum a été atteint mi-avril avec \$ 1 472/kg, et le minimum de \$ 1 100/kg en octobre 2022. Ce marché est caractérisé par des cycles de stockage et déstockage qui évoluent selon les prix et la demande perçue, créant ainsi une alternance entre tendances baissières et haussières. On peut aussi rapprocher

la diminution du prix lors des deux derniers trimestres 2022 avec l'annonce de la *Semiconductor Industry Association* (SIA) concernant les revenus des ventes de composants pour semi-conducteurs, qui ont diminué de façon significative dans la zone Asie-Pacifique créant ainsi des interrogations sur la demande chinoise. Le dioxyde de germanium, utilisé en catalyse des polymères, a suivi quasiment trait pour trait la tendance du marché métallique, avec un prix moyen de \$ 828,9/kg, un maximum à \$ 970/kg et un minimum de \$ 675/kg.

Début 2023, la plupart des métaux de base, dont le zinc, issu de la production chinoise, ont vu leurs cours augmenter. Cette tendance a aussi affecté le germanium, qui est remonté à \$ 1 200/kg début janvier 2023. La suppression progressive des mesures zéro-covid amorce une période plus optimiste quant à la demande asiatique. Cependant, dans un contexte où la pénurie de composants semi-conducteurs n'est pas complètement résorbée, dû au retour progressif aux affaires des principaux producteurs chinois, le marché du germanium continuera probablement d'être déséquilibré, et donc volatil.

Indium (In)

Au niveau mondial, la principale utilisation de l'indium est sous forme d'oxyde mixte d'étain-indium (ou « *indium-tin-oxide* », dit ITO) 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 possède de remarquables capacités de conduction électrique et est suffisamment résistant pour lui permettre d'être utilisé dans des composants électroniques flexibles. Il est 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 l'adoption des écrans tactiles dans notre quotidien. Il est aujourd'hui présent 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 corrélé au marché des écrans plats, qui devrait croître d'environ 5 % à 7 % d'ici à 2030. Par ailleurs, la tech-

nologie 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 continuer à tirer la demande d'indium vers le haut.

Les autres utilisations de l'indium se répartissent comme suit : les soudures sans plomb (10 %), les cellules photovoltaïques en couches minces (8 %), les matériaux d'interface thermique (6 %), les piles et batteries (5 %), les alliages et composés (4 %), les semi-conducteurs pour l'optique et LED (3 %) et enfin 8 % dans diverses autres applications, dont la recherche.

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 la majorité du marché photovoltaïque mondial – selon les chiffres de l'*institut Fraunhofer* –, leur part demeure stable, à environ 5 %.

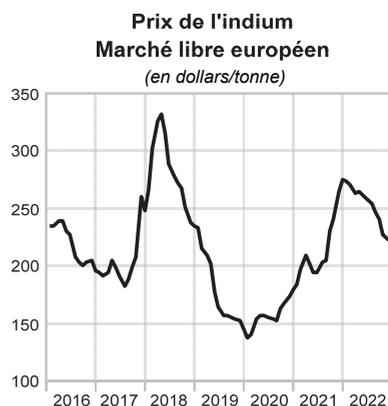
L'évolution des réseaux de télécommunications a créé une nouvelle demande d'indium, sous forme de phosphure d'indium (InP) pour des lasers et des capteurs optoélectroniques. Les lasers InP sont utilisés dans les télécommunications pour les réseaux à fibres optiques qui ont des connexions entre les antennes sans fil de troisième, quatrième et cinquième génération (3G, 4G et 5G). Ils per-

mettent 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 2022, la production mondiale d'indium raffiné s'élevait à 900 tonnes, selon les données préliminaires de l'USGS (contre 932 tonnes en 2021). Il n'existe pas de mine d'indium. Il est récupéré uniquement en tant que sous-produit à partir 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 7 N (99,9999 %) pour certaines applications comme les semi-conducteurs (optoélectronique). 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 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 (près de 60 % de la production mondiale) et la Corée du Sud avec 200 tonnes (22 %). Les autres

Indium (en tonnes de métal raffiné)						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production mondiale (en indium contenu)	714	741	968	960	932	900
Belgique	20	22	20	20	20	20
Canada	67	58	61	66	60	55
Chine	287	300	535	540	540	530
Corée du Sud	225	235	225	210	190	200
France	30	40	40	38	38	20
Japon	70	70	70	66	66	66
Pérou	10	11	12	12	12	0
Russie	5	5	5	5	5	5



(Source : Mineral Commodity Summaries)

pays produisant plus de 50 tonnes sont le Japon (66 tonnes) et le Canada (55 tonnes), ainsi que la France qui produit également de l'indium purifié à 99,998 % depuis 2012 sur le site d'Auby exploité par Nyrstar (capacité annuelle de production de 72 tonnes). La production française a chuté en 2022 (20 tonnes en 2022, selon les estimations de l'USGS, contre le double en 2020) en raison des coûts élevés de l'électricité qui ont conduit Traftura, l'actionnaire majoritaire de Nyrstar, à placer l'usine d'Auby sous surveillance et maintenance à plusieurs reprises en 2022.

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 d'Eloro Resources (Bolivie) et West Desert d'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 puisqu'actuellement, seulement un tiers d'entre elles sont équipées d'une filière de récupération d'indium. En outre, il est théoriquement possible de récupérer l'indium contenu dans les déchets de certaines raffineries de zinc.

En janvier 2020, le groupe chinois Vital Materials a racheté 3 609 tonnes de stocks d'indium, le dernier lot de petits métaux détenu par le *Fanya Metal Exchange*, stocks équivalents à environ quatre ans de production mondiale.

Le prix de l'indium n'est pas coté sur les principales places d'échanges de métaux : il s'agit d'un marché de gré à gré relativement opaque.

L'indium à 99,99 % stocké à Rotterdam a connu une tendance clairement baissière depuis janvier 2022, où le cours du kilo atteignait \$ 270 pour terminer l'année à \$ 230. Le marché chinois de l'indium à 99 % a, quant à lui, affiché un mouvement en dents de scie : le maximum a été atteint début avril à environ \$ 249/kg (converti à partir des taux de change USD/CNY correspondants), et les prix ont fluctué entre mai et août entre \$ 215 et 230/kg, avant de se replier au dernier trimestre légèrement en dessous des \$ 210/kg.

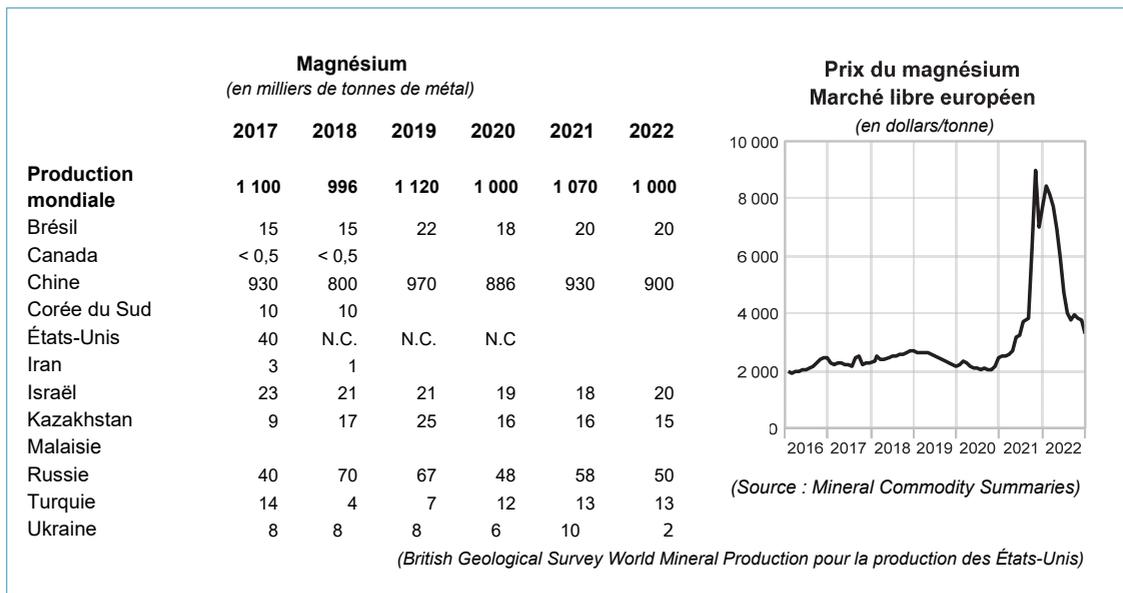
Peu de substitutions sont recherchées pour l'indium compte tenu de son faible prix et de sa disponibilité actuelle sur le marché. Dans les écrans plats, les oxydes étain-indium des conducteurs transparents peuvent être remplacés par des oxydes de zinc et d'étain dopés (AZO et FTO), moins chers, mais moins performants, des nanotubes de carbone ou d'argent (plus chers) ou des conducteurs transparents organiques (PEDOT). Des oxydes d'antimoine et d'étain (ATO) sont également utilisés pour remplacer l'indium dans ce même marché. 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. Les pays fournissant la majorité de l'indium recyclé sont la Corée du Sud et le Japon.

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 répartit 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, de l'hafnium, du béryllium et de l'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. L'utilisation de magnésium dans les pièces automobiles a continué d'aug-

menter alors que les constructeurs automobiles cherchent à réduire le poids des véhicules pour un meilleur rendement énergétique. Les pièces moulées en magnésium remplacent progressivement l'aluminium, le fer et l'acier dans certaines automobiles. La substitution de l'aluminium à l'acier dans les tôles automobiles a continué d'augmenter la consommation de magnésium pour cet usage. 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. Cependant, une diminution de la consommation de magnésium pour certains moules sous pression a été observée récemment. Cela s'explique par la baisse globale de production de certains constructeurs automobiles qui ont avancé une pénurie de puces informatiques pour expliquer la diminution de leur production malgré une forte demande. 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 du conflit avec la Russie se sont ainsi fait ressentir sur cette filière. En 2021, la reprise industrielle mondiale post-pandémie a entraîné une forte hausse de la demande mondiale en magnésium aboutissant à une pénurie qui fut logiquement suivie d'une forte augmentation des prix au dernier trimestre de cette année, où ils ont atteint des niveaux record. Les prix du magnésium

en Europe ont, par la suite, considérablement diminué au cours du premier semestre de 2022. Malgré une diminution progressive sur le reste de l'année, les cours actuels des prix du magnésium n'ont toujours pas retrouvé leurs niveaux antérieurs à la forte augmentation de 2021.

L'essentiel du marché du magnésium est en Chine, qui d'année en année renforce sa position dominante avec 90 % de la production mondiale. 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 mesures environnementales, 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 Magnesium et l'australien Magontec en Chine (bassin de Qaidam).

En 2022, la production mondiale de magnésium métal est estimée à 1 000 000 tonnes (hors États-Unis), selon l'USGS, en baisse de 7 % par rapport à 2021 (considérées s'élever à 1 070 000 tonnes après révision). 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 dans l'Ohio. L'australien Latrobe Magnesium (LMG) a, pour sa part, terminé une étude de faisabilité en 2019. Il a commencé la construction d'une usine de démonstration en 2020 produisant un magnésium bas carbone à partir du traitement de cendres volantes issues de centrales à charbon. L'entreprise en prévoit le démarrage au second trimestre de 2023. À la suite de la potentielle réus-

site de celle-ci, LMG planifie de développer une offre commerciale à grande échelle de plus de 10 000 tonnes par an dans la vallée de Latrobe. Selon Roskill, le procédé utilisé 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*. LMG a également débuté une étude de préfaisabilité pour une méga-usine internationale de 100 000 tonnes par an traitant des scories de ferronickel. Le canadien Alliance Magnesium a débuté, lui aussi, la construction d'une usine en 2020, mais elle n'est toujours pas achevée et la date de première production n'est à ce jour pas annoncée.

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 (83 000 tonnes en boucle courte – *new scrap* – et 37 000 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 \$ 5 377/t contre \$ 4 518/t en 2022, soit une hausse de 19 %. Cette tendance à la hausse des prix pourrait perdurer sur plusieurs années, en raison des nouvelles normes environnementales chinoises et de la hausse 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 de-

meurent 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)

De 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. Ses 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* (IMO), la demande mondiale était de 278 640 tonnes de molybdène contenu en 2021. La répartition se décompose comme suit : 82 % pour les aciers, distingués en aciers dits d'ingénierie (39 %), aciers inoxydables (24 %) et aciers pour l'outillage (8 %), 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 (5 %) pour les applications électriques.

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

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

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production mondiale						
	296 600	297 000	294 000	298 000	255 000	250 000
Argentine	450	600			0	0
Arménie	5 800	5 000	5 000	8 700	7 760	7 800
Canada	5 290	4 680	3 900	2 530	1 390	970
Chili	62 500	60 200	56 000	59 400	49 400	44 000
Chine	130 000	133 000	130 000	120 000	95 300	100 000
Corée du Sud				411	408	400
États-Unis	40 700	41 400	43 600	51 100	41 100	42 000
Iran	3 500	3 500	3 500	1 400	3 100	3 500
Mexique	14 000	15 100	16 600	16 600	16 300	16 000
Mongolie	1 800	1 800	1 800	2 890	2 970	2 300
Ouzbékistan	450	200	200	200	1 600	1 600
Pérou	28 100	28 000	30 400	32 200	34 100	32 000
Russie	3 100	2 800	2 800	2 700	1 700	1 700
Turquie	900	900	400			

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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, en lien avec la reprise de l'activité industrielle. 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. Cette diversité des usages est un sérieux atout pour la stabilité du marché, en particulier celui des aciers inoxydables dont la demande est tirée par l'amélioration de la qualité des aciers produits par la Chine et l'Inde qui y intègrent une teneur croissante 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. Elle demeure néanmoins encore loin des standards aux États-Unis (40 kg Mo par tonne d'acier).

La production minière de molybdène – en diminution depuis 2017 – s'élevait à 250 000 tonnes en 2022, selon les données préliminaires de l'USGS. La production minière mondiale provient à 94 % de cinq pays : la Chine (100 000 tonnes, soit 40 %), le Chili (44 000 tonnes, soit 18 %), les États-Unis (42 000 tonnes, soit 17 %), le Pérou (32 000 tonnes, soit 13 %) et le Mexique (16 000 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.

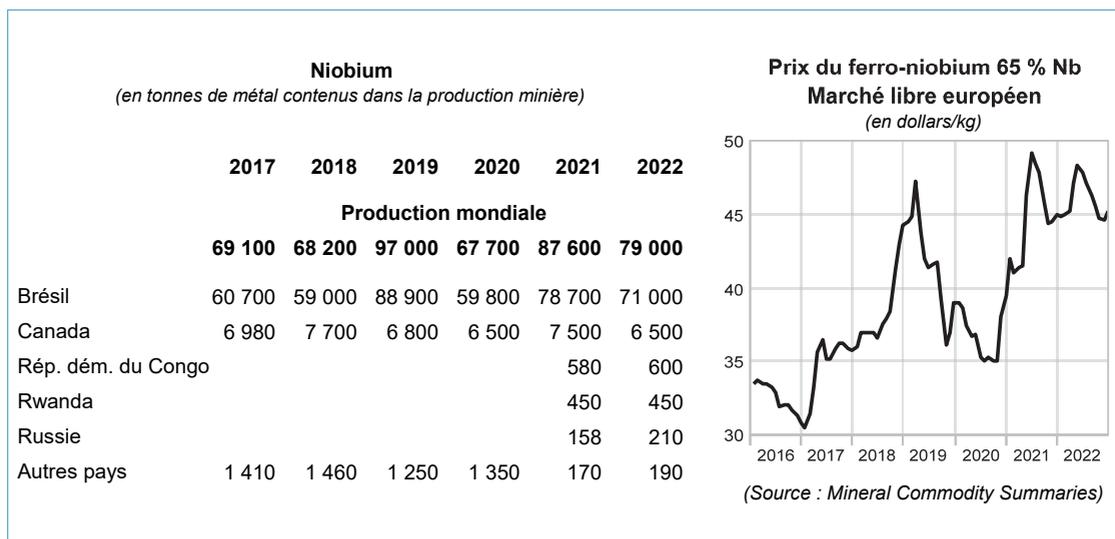
L'USGS évalue les réserves mondiales de molybdène en 2022 à 12 Mt, dont 3,7 Mt pour la Chine (52 % des réserves mondiales), suivie par les États-Unis (2,7 Mt), le Pérou (2,4 Mt) et le Chili (1,4 Mt). Les ressources en terre sont estimées à environ 25 Mt, auxquelles pourraient venir s'ajouter les ressources 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. Après s'être érodé au cours du premier semestre 2020, le prix moyen de l'oxyde technique de molybdène (concentré grillé, 57 % Mo) a rebondi en 2021 avec la reprise de l'activité industrielle post-covid, pour atteindre \$ 35,7/kg en moyenne après une hausse de 88 % en un an. Le cours du molybdène a connu une nouvelle envolée en 2022 en raison d'une légère contraction de la production et, parallèlement, d'une augmentation de la demande. Son prix s'élevait à \$ 55,99/kg sur le mois de décembre 2022, pour une moyenne annuelle 2022 de \$ 43,2/kg.

La consommation mondiale de molybdène devrait continuer à croître au cours de la prochaine décennie, en raison de la croissance de la demande d'aciers. En termes d'exploration, l'ouverture de



nouvelles mines de cuivre à moyen terme, 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. Toutefois, certains observateurs pointent, à l'inverse, des investissements encore insuffisants pour soutenir l'émergence de nouveaux projets. Parmi les plus avancés figurent les gisements de type porphyres de Malmbjerg au Groenland qui aurait le potentiel de fournir 30 % de la demande de l'Union européenne, et celui de Kitsault au Canada, où le molybdène est le produit principal.

Niobium (Nb)

Le ferroniobium (FeNb) – un alliage qui a une teneur en niobium de 60 % à 70 % – représente environ 85-90 % des usages du niobium. Il est utilisé principalement dans les aciers microalliés à haute limite d'élasticité (HLE), certains 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 dans les 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, l'optique, les céramiques et en joaillerie.

De nouveaux usages émergent rapidement, notamment dans le secteur des batteries Lithium-ion (Li-ion). En effet, le remplacement des anodes en graphite par des anodes à bases d'oxydes métalliques permettrait d'en prolonger la durée de vie ainsi que la capacité. 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 2022, la production mondiale du niobium est évaluée à 79 000 tonnes par l'USGS, soit une diminution de 10 % par rapport à 2021 (réévaluation par cette même institution à 87 600 tonnes en 2021, au lieu des 75 000 tonnes initialement annoncées). Le producteur dominant de ce marché est le Brésil qui compte pour 90 % de la production totale, suivi du Canada avec environ 8 %. 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 98 000 tonnes de Nb par an qui pourrait atteindre 118 000 tonnes de Nb par an dans un avenir proche, du fait d'augmentations de capacités envisagées. Deuxième source mondiale, la mine de Boa Vista Catalão est également située au Brésil, dans l'État de Goiás. Elle est exploitée depuis 2016 par la société China Molybdenum (CMOC), avec une capacité estimée d'environ 9 500 tonnes

de Nb par an. Au Canada, Magris Resources (ex-Niobec), exploite une mine située au Québec, avec une production évaluée à 6 500 tonnes de Nb en 2022, 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 actualisée en 2022 et une production envisagée de 7 450 tonnes par an de FeNb à 65 %, ce qui représenterait la première production de niobium du pays depuis 1959. La construction de l'usine pourrait commencer courant 2023 après la sécurisation des investissements et des permis, avec un démarrage de la production en 2026, selon la compagnie NioCorp. Ce projet est stratégique pour les États-Unis, car il permettrait de défendre leur indépendance sur une ressource minérale particulièrement stratégique pour le secteur de la défense et l'industrie aéronautique.

Le complément de l'offre minière mondiale est majoritairement 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 est associée à des risques socio-environnementaux, dont des conflits armés et du travail forcé, contre lesquels 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, dans l'État brésilien d'Amazonas, avec des ressources estimées à environ 75 Mt.

Des stocks stratégiques de 544 tonnes de ferriobium 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 ferriobium (65 % Europe) s'établissait à \$ 45,99/kg en 2022, en hausse de 2,7 % par rapport à 2021.

Le ferriobium est substituable par le ferovanadium dans la fabrication des aciers mi-

croalliés HSLE. Cette substitution présente des enjeux techniques et s'effectue ainsi usine par usine, en particulier dans des contextes de fortes différences de prix sur une longue période, comme celles observées, par exemple, en Chine sur la période 2017 à 2019. D'autres métaux pourraient également être envisagés en substitution dans certains aciers comme le tantale, le tungstène ou encore le molybdène. Néanmoins, la chimie des aciers est très complexe et tout particulièrement les substitutions et interactions couplées entre les différents métaux présents. Il est très difficile de juger avec exactitude de la faisabilité technique d'un tel remplacement du niobium sans faire de nombreux tests.

Rhénium (Re)

Le rhénium n'est obtenu qu'en sous-produit du molybdène, lui-même en grande partie sous-produit du cuivre dans certains gisements de cuivre (porphyres et gisements sédimentaires). 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 ainsi que 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.

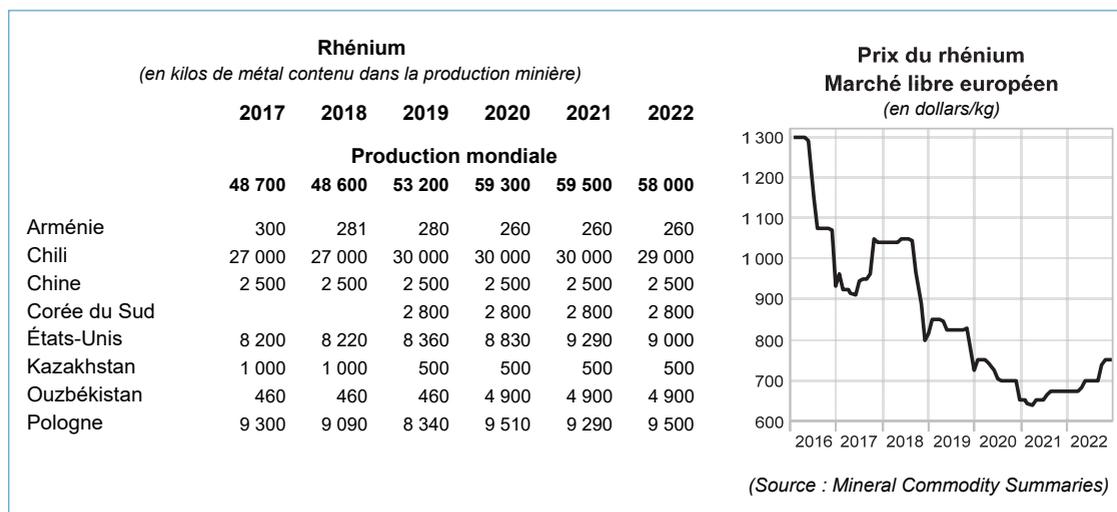
À la suite de la crise du Covid-19, les commandes ont chuté drastiquement en 2020 et 2021 face à l'incertitude de la reprise des trafics aériens. Cependant, l'annonce des prévisions de production pour 2022-2023 des avionneurs a relancé la demande en superalliages dès le deuxième trimestre 2021. En 2022, les trafics aériens ont repris progressivement. La guerre en Ukraine a conduit à une augmentation de la demande de l'aviation militaire et les commandes sont globalement reparties à la hausse. Cependant, malgré cette croissance notable, l'industrie aéronautique n'a pas retrouvé son niveau d'avant-crise. La plupart des acteurs de l'aéronautique observent, en effet, une contradiction très forte entre un marché désormais porteur et une incapacité de l'offre à servir ce marché. Cela s'explique notamment par un important manque de main-d'œuvre et des tensions au sein des chaînes d'approvisionnement. Airbus n'a, par exemple, pas atteint son objectif de livrer 700 avions en 2022, mais l'avionneur européen est tout de même leader sur le marché face à son principal concurrent Boeing. Le secteur de l'aéronautique devrait globalement mieux se porter en 2023 avec de bonnes perspectives à moyen terme.

En pétrochimie, le rhénium est l'un des catalyseurs clés dans les réactions de reformage catalytique du pétrole, opération chimique servant à va-

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

Il n'existe pas de production minière de rhénium à proprement parler. La production primaire est métallurgique puisque le rhénium est récupéré lors du traitement des fumées résultant du grillage de la molybdénite (sulfure de molybdène). La production de rhénium primaire récupéré en association avec du cuivre et du molybdène est estimée à 58 tonnes en 2022, selon les données préliminaires de l'USGS. Cela représente une diminution de 2,5 % comparée aux 59,5 tonnes produites en 2021. 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 2022, suivi par Freeport McMoran aux États-Unis, avec 9 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 2 295 tonnes, dont 1 300 tonnes pour le Chili (57 % 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. En Europe, plusieurs produits peuvent être distingués, selon leurs caractéristiques :

- rhénium métal (pellets à 99,9 % Re) : prix moyen en 2022 de \$ 1 176/kg, en augmentation de 12 % par rapport à 2021 (\$ 1 049/kg);

- perrhénate d'ammonium (APR), *basic grade* (69,2 % Re) : prix moyen en 2022 de \$ 710/kg, en augmentation de 8 % par rapport à 2021 (\$ 660/kg);

- perrhénate d'ammonium (APR), *catalyst grade* (> 69,2 % Re) : prix moyen en 2022 de \$ 983/kg, en baisse de 2 % par rapport à 2021 (\$ 1 004/kg).

Les filières de recyclage du rhénium représentent désormais près de la moitié de l'approvisionnement total. Les principaux producteurs de rhénium secondaire se situent au Japon, en Allemagne, aux États-Unis ainsi qu'au Kazakhstan, en Ouzbékistan et en Arménie. En France, un acteur est concerné avec l'entreprise Eurotungstène Poudres, désormais filiale d'Umicore. Les pièces contenant du rhénium dans des superalliages à base de nickel sont recyclées en boucle courte et en fin de vie. Le recyclage des superalliages concerne donc principalement les turbines d'avions ainsi que les pales et vanes de turbines à gaz, ce qui représente entre 15 et 20 tonnes de composés de rhénium par an. Seul le recyclage de superalliages fournit du rhénium métal ou du perrhénate d'ammonium (APR) directement disponibles sur le marché.

Cependant, les faibles prix observés ces dernières années ont fragilisé les 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. Cependant, la chute de l'activité de la construction aéronautique et spatiale en 2020 a contribué à resserrer l'offre

en métal recyclé. L'effet positif sur les prix observés en 2022 et les perspectives favorables du secteur aéronautique pourraient contribuer à redynamiser ces filières.

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.

Ces dernières années, des campagnes d'exploration ont eu lieu en Russie, notamment sur le site volcanique de Kudryavy dans les îles Kouriles. En août 2022, des niveaux significatifs de rhénium ont été identifiés lors de campagnes de forages pour le projet de cuivre et de molybdène de Lana Corina au Chili (85 mètres de forage à 0,77 ppm de rhénium). L'un des seuls projets d'exploration avancée est le projet Merlin dans le nord-ouest du Queensland (Australie), développé par Chinova Resources. Le potentiel serait une production de 7 300 kg par an de Re et 5 100 tonnes par an de Mo. Le projet semble néanmoins à l'arrêt depuis 2014.

Scandium (Sc)

Le scandium est généralement considéré comme faisant partie de la famille des terres rares en raison de ses propriétés similaires aux lanthanides. Il a pourtant des caractéristiques géologiques et industrielles distinctes parmi lesquelles son très faible rayon ionique, sa faible densité (2,99 g/cm³, proche de celle de l'aluminium) et son point de fusion élevé (1 541 °C).

Le scandium est utilisé sous deux formes principales : le scandium métal pour les alliages aluminium-scandium (Al-Sc) et l'oxyde de scandium pour 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, propriétés recherchées dans le secteur du trans-

port (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. En tant qu'oxyde, il intervient comme stabilisateur de l'électrolyte dans les piles à combustible avec de bonnes performances en conduction électrique. On peut aussi mentionner l'utilisation de nitrure de scandium-aluminium à des fins de recherche (ScAlN), afin de développer des semi-conducteurs de puissance fonctionnant à plus haute température et à plus haute fréquence que le nitrure de gallium.

Les concentrations naturelles de scandium dans la croûte terrestre sont trop faibles pour former à elles seules des gisements exploitables. Le scandium est récupéré uniquement en tant que sous-produit du traitement métallurgique d'autres substances, en particulier par récupération dans les résidus issus de la fabrication du dioxyde de titane, des terres rares, et de l'acier en Chine, ainsi que dans les filières de transformation de l'uranium, du charbon et des phosphates. Enfin, à partir du traitement hydrométallurgique du nickel et du cobalt issu de gisements latéritiques (Philippines, Australie).

Les chiffres de production sont très incertains. Une quantité de 15 tonnes à 25 tonnes serait produite mondialement, principalement sous forme de trioxyde de scandium (Sc_2O_3). L'essentiel de la production chinoise est assuré par le consortium Jiaozuo Rongjia Scandium Industry Science & Technology (anciennement Rongjia Scandium Industry) et s'élèverait à 10 tonnes par an d'oxyde de scandium (Sc_2O_3), en tenant compte de la production de scandium *via* la récupération dans les résidus issus de la fabrication des oxydes de titane, de terres rares, et de l'acier. L'objectif annoncé par la firme est d'augmenter la capacité de production à 20 tonnes dans un futur proche. Aux Philippines, l'opérateur japonais Sumitomo, exploitant le cobalt et le nickel latéritique de Taganito par un procédé de lixiviation acide à haute pression (*High Pressure Acid Leaching* – HPAL), récupère du scandium avec la production d'un concentré intermédiaire (oxalate de scandium), converti en

oxyde à la raffinerie Harima au Japon. Environ 9,7 tonnes d'oxalate de scandium auraient ainsi été produites en 2022, selon le gouvernement philippin. 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.

Plusieurs projets hors Chine visent à récupérer le scandium. On peut citer l'usine de Rio Tinto dans le complexe métallurgique de Sorel-Tracy au Québec, qui produirait 3 tonnes par an d'oxydes de scandium de haute pureté (99,99 %) à partir de ses résidus de production de dioxyde de titane. En Russie, les recherches pour la récupération du scandium sont concentrées sur le traitement des boues rouges issues du raffinage de l'alumine, notamment par la compagnie Rusal, l'un des premiers producteurs d'aluminium au monde. Dans les monts Oural, l'usine de Rusal produit de l'oxyde de scandium ainsi que des alliages Al-Sc (Al-Sc 2 %). Aux États-Unis, la société NioCorp cherche à finaliser le développement de la mine d'Elk Creek, dont les réserves probables de scandium seraient estimées à près de 2400 tonnes de Sc à extraire en coproduit du niobium. Toutefois, le capital nécessaire pour ce projet est évalué à \$ 1,4 milliard et la fusion récente de Niocorp avec la GX Acquisition Corp II ne suffirait pas à lever une telle somme dans un futur proche, décalant d'autant le début de la construction. Les études du gneiss alcalin à scandium et terres rares de La Paz en Arizona et de la rhyolite de Round Top au Texas sont toujours en cours par les compagnies Texas Mineral Resources et American Rare Earths. Les ressources actuelles du projet de La Paz seraient estimées entre 742,5 et 928 Mt de minerai avec une teneur moyenne en oxyde de scandium de 20 à 24,5 ppm.

En Australie, si aucune production minière de scandium n'a eu lieu en 2022, plusieurs projets sont à des stades très avancés et pourraient faire de ce pays le premier producteur mondial dans les prochaines années. Parmi ces derniers, trois se distinguent par leur avancement :

- Le projet Sunrise (anciennement Syerston), de la compagnie Clean Teq qui a effectué plusieurs forages en 2022 afin d'estimer plus précisément les concentrations de nickel, de cobalt et de scandium. La production de Sc_2O_3 projetée est de 20 tonnes par an et 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 Nyngan de la compagnie Scandium International Mining Corp qui pourrait produire 38,5 tonnes par an de Sc_2O_3 .

- Le projet Owendale remanié par la société Platina Resources et appelé PSP (Platina's Scandium Project) afin d'y associer l'extraction de nouvelles substances. Il est prévu une production de 20 à 40 t/an Sc_2O_3 en coproduit du cobalt et du nickel par lixiviation acide sous haute pression (HPAL). Les réserves seraient de 3 500 tonnes de Sc_2O_3 .

En Europe, certains projets européens de recherche, financés par l'EIT RawMaterials, pourraient déboucher sur la mise en place d'une filière européenne de production et raffinage du scandium.

Les ressources de scandium sont abondantes, mais peu concentrées, ce qui contraint sa récupération. Les alliages à haute résistance en titane et en aluminium ainsi que les matériaux en fibre de carbone peuvent se substituer aux applications en alliage de scandium à haute performance, notamment dans les équipements sportifs (vélos, équipements de golf). Une très faible quantité de scandium se retrouve dans l'aluminium recyclé, sans qu'il soit séparé. Le scandium peut être substitué par l'yttrium pour certaines applications, notamment les piles à combustible.

N'ayant pas de cotation sur les marchés organisés, 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 2022 à \$ 2 100/kg, contre \$ 2 200/kg en 2021. L'hypothèse moyenne prise par les entreprises pour l'évaluation économique de leurs projets miniers est généralement comprise entre \$ 1 500 et 2 000/kg d'oxyde de scandium. Selon certains acteurs chinois de la filière, le prix

du trioxyde de scandium serait maintenu relativement bas, en raison d'un marché excédentaire depuis 2011.

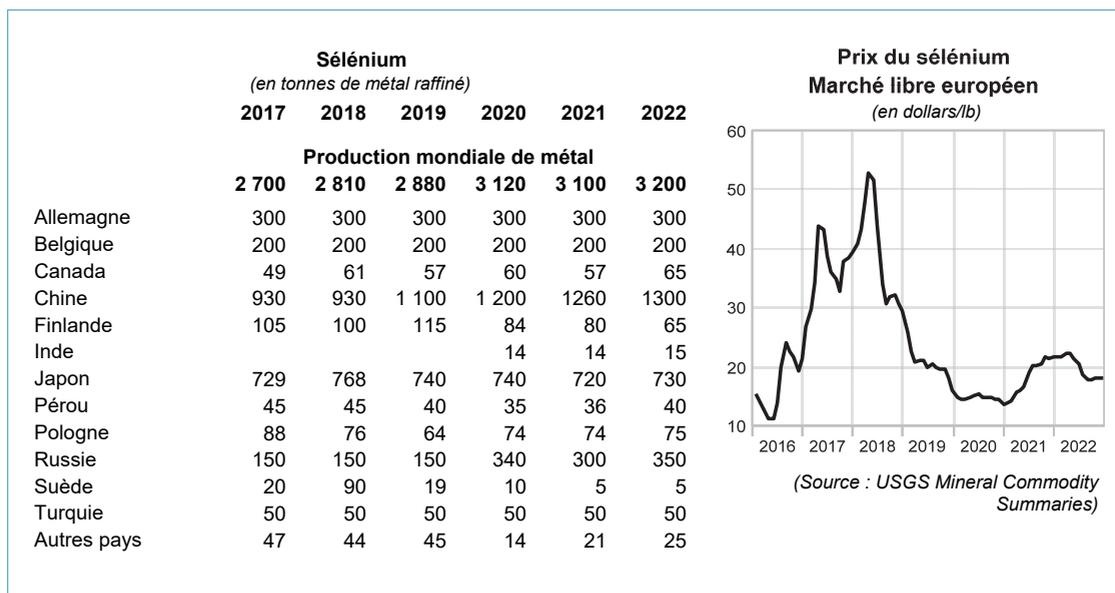
Il est intéressant de mentionner que l'ordre de grandeur du prix des alliages Al-Sc (2 %) est de \$ 3 000 à \$ 4 000/kg. Enfin, le prix moyen du scandium métal à 99,99 % *ex-Works* Chine sur certaines plateformes (Source : www.scrapmonster.com) est, quant à lui, de \$ 305 000/kg, illustrant l'extrême spécialité d'un tel matériau.

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 humaine et celle du bétail. Les applications métallurgiques constituent la plus grande part de sa consommation (40 %), sous forme de sélénium purifié à 99,5 %. Son utilisation dans les engrais est obligatoire dans certains pays tels que la Finlande, dont les sols sont très déficitaires en cet oligo-élément indispensable à la santé humaine et animale. Le marché du sélénium est très opaque et les chiffres publiés sont difficilement réconciliables. Les données ci-dessous sont donc indicatives.

La demande mondiale en sélénium serait restée stable avec les années et se répartit entre les usages suivants : 40 % pour les applications métallurgiques dont la production électrolytique du manganèse, 25 % pour l'industrie du verre, et 10 % pour le dopage de composants optoélectroniques et pour le secteur photovoltaïque. On estime par ailleurs que 10 % sont dédiés à l'agriculture et à l'alimentation animale, 10 % à la chimie et aux pigments, et 5 % en usages divers.

La métallurgie du manganèse est le principal secteur d'utilisation du sélénium de pureté à 99,5 %, dont la majeure partie a lieu en Chine. Son utilisation 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, 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 « CuInSe_2 » – et CIGS – disulfoséléniure de cuivre, d'indium et de gallium « Cu(In, Ga)Se_2 »). Malgré une production minoritaire des technologies photovoltaïques en couches minces vis-à-vis de cellules photovoltaïques au silicium, ces dernières continuent à être utilisées pour les applications requérant une plus grande flexibilité et un plus haut rendement.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production mondiale de sélénium raffiné a été estimée à 3 200 tonnes en 2022, soit une augmentation de 3,2 % par rapport à 2021 (3 100 tonnes). Les données concernant les États-Unis sont habituellement confidentielles. Néanmoins, le service géologique indique que l'unique producteur de

sélénium a stoppé temporairement ses activités 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 se concentre préférentiellement dans les sulfures des gisements de cuivre, nickel-cuivre sulfurés, et de façon plus anecdotique, de plomb ou de zinc. Il est récupéré en sous-produit majoritairement lors du traitement des boues anodiques issues du raffinage du cuivre, et minoritairement lors du traitement de minerais de plomb-zinc. Ce phénomène explique la corrélation entre les pays producteurs de sélénium et les fonderies/raffineries 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). Les États-Unis produisent également de petites quantités de sélénium raffiné *via* ASARCO Inc, acteur minier historique de l'exploitation du zinc. Cependant, la production a été mise en veille en 2021, selon l'USGS.

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

teneurs dans les minerais n'étant que rarement renseignées (0,5-12 ppm). Celles-ci s'établiraient à 81 000 tonnes de Se, dont 6 100 tonnes en Chine (soit 7,5 % des réserves mondiales) et 20 000 tonnes en Russie (soit près d'un quart des réserves mondiales). Les autres pays détenteurs de réserves significatives sont le Pérou et les États-Unis avec, respectivement, 13 % et 10 % des réserves mondiales. Les charbons contiendraient également des quantités importantes de sélénium, mais la récupération ne semble pas économiquement rentable pour l'instant. 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 %.

Le prix du sélénium est établi par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen pour le sélénium (teneur de 99,5 %) en 2022 était de \$ 8,93/kg contre \$ 8,34/kg en 2021. Pour le sélénium de teneur 99,99 %, le prix moyen en 2022 était évalué à 158,51 CNY/kg, soit l'équivalent de \$ 23,57/kg. Les prix sont restés relativement stables, voire baissiers, en raison de la pandémie de Covid-19 en Chine. Il n'y aurait pas de tensions sur l'offre d'après les informations recueillies par les consultants de Fastmarkets. Le marché du sélénium devrait ainsi afficher une tendance stable, évoluant selon le marché du manganèse.

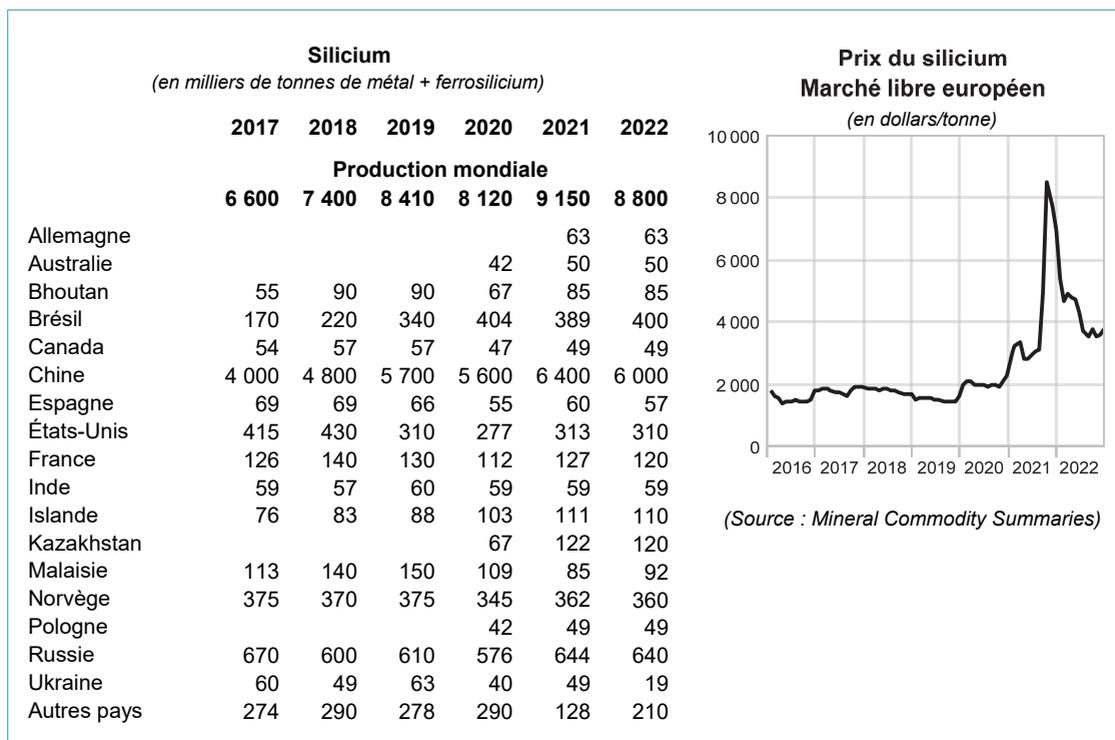
Silicium métal (Si)

Le silicium est le deuxième élément chimique le plus abondant dans l'écorce terrestre après l'oxygène. À ce titre, il est l'un des éléments les plus extraits du sol, que l'on cherche à le valoriser ou non. Il est utilisé dans de très nombreux domaines, notamment sous forme de silice (SiO₂) dans la construction, mais aussi sous sa forme pure (> 98 % Si) dite «silicium métal», qui fait l'objet de ce chapitre.

En 2022, le silicium métal serait davantage utilisé pour la fabrication des silicones et silanes (43 %) que dans la réalisation d'alliages d'alumi-

nium Al-Si (31 %). Cependant, certaines sources citent toujours le secteur de l'aluminium comme le plus gros consommateur. Le silicium métal est l'élément-phare des cellules photovoltaïques (22 %) et des semi-conducteurs (3 %), dont les croissances sont amenées à se renforcer au cours des années à venir. Les silicones sont utilisées dans de très nombreux secteurs pour leur inertie chimique, leur grande résistance à la chaleur, et leurs facultés à étanchéifier, coller ou lubrifier. Les alliages Al-Si sont utilisés dans tous les types de véhicules, qu'ils soient terrestres, marins ou aériens, mais également dans le bâtiment, les équipements ménagers, les câbles électriques et les emballages. Allié à l'aluminium, le silicium améliore la coulabilité et réduit le coefficient de dilatation thermique. Dans les cellules photovoltaïques, les propriétés semi-conductrices du silicium purifié combinées au rayonnement solaire permettent l'effet photoélectrique nécessaire à la production d'électricité. Dans la microélectronique, ces mêmes propriétés semi-conductrices sont fondamentales pour le fonctionnement des circuits intégrés, le stockage et la transmission d'informations. La consommation de silicium métal a été en forte hausse dans toutes les filières sur la période 2010-2022 et atteint près de 3,5 Mt en 2022.

Le silicium est produit par la réduction de la silice (SiO₂) dans un four à arc électrique en présence de charbon, de coke et de copeaux de bois. En fonction de la technicité de l'application, le silicium métal doit être affiné à différents niveaux de pureté : 98-99 % pour la qualité métallurgique (MG); et jusqu'à 99,999 999 99 % (9N à 10N) pour les qualités solaire et électronique. Pour la fabrication des silicones, le silicium métal est d'abord transformé en gaz diméthylchlorosilane puis hydrolysé pour former des chaînes Si-O. Différentes formulations aboutissent à des polymères ayant une consistance de gel, de résine, ou de gomme. Le silicium purifié pour le solaire et la microélectronique s'obtient à la suite d'une transformation en gaz trichlorosilane (SiHCl₃) que l'on distille puis décompose en présence d'hydrogène (procédé Siemens). Le silicium métal peut également être obtenu en lit fluidisé et de manière très minoritaire par affinage métallurgique (qualité métallurgique améliorée). Le silicium obtenu est sous une forme polycristalline, d'où son appella-



tion « polysilicium ». Il est ensuite refondu puis transformé en lingots mono ou multicristallins. En 2021, la part de cellules solaires au Si monocristallin est largement dominante sur le multicristallin, en atteignant près de 83 % du marché global.

L'USGS estime une production de matériaux à base de silicium de 8 Mt tous matériaux confondus. La production de silicium métal en 2022 atteint près de 3,5 Mt. Les premiers producteurs de silicium métal ont été la Chine, la Norvège, le Brésil, les États-Unis et la France.

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, seuls quelques gisements fournissent une roche de qualité suffisante pour la fabrication du silicium métal. Les réserves de silicium ne sont généralement pas communiquées par les *carriers* (exploitants des carrières).

Une partie du polysilicium est recyclée en boucle courte lors de la découpe des lingots et des plaquettes. Dans les produits en fin de vie, le recyclage du silicium n'est en général pas rentable, mais pourrait le devenir avec l'amélioration de

la collecte, des techniques de récupération, et les tensions croissantes sur le silicium primaire. La fumée de silice, coproduit de la métallurgie du silicium, sert de charge minérale améliorant les propriétés de certains bétons.

En métallurgie, le manganèse, l'aluminium ou le titane peuvent parfois se substituer au silicium avec une efficacité moindre ou un coût supérieur. 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. La grande abondance du silicium dans la nature et son faible coût relatif lui ont permis de devenir majoritaire par rapport à d'autres semi-conducteurs tel le germanium, ce dernier étant préféré dans certaines techniques de pointe (photovoltaïque aérospatial).

Les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Fin 2022, le *Guangzhou Futures Exchange* a toutefois annoncé qu'il proposait des contrats à terme et des options sur le silicium métal. Le prix annuel moyen du silicium métallurgique (MG) a été de \$ 3 782/t en 2022, soit une

baisse de 13,7 % par rapport à 2021. La pénurie de silicium métal avait généré de très fortes hausses des prix en 2021 qui ne se sont relâchées que partiellement en 2022.

Tantale (Ta)

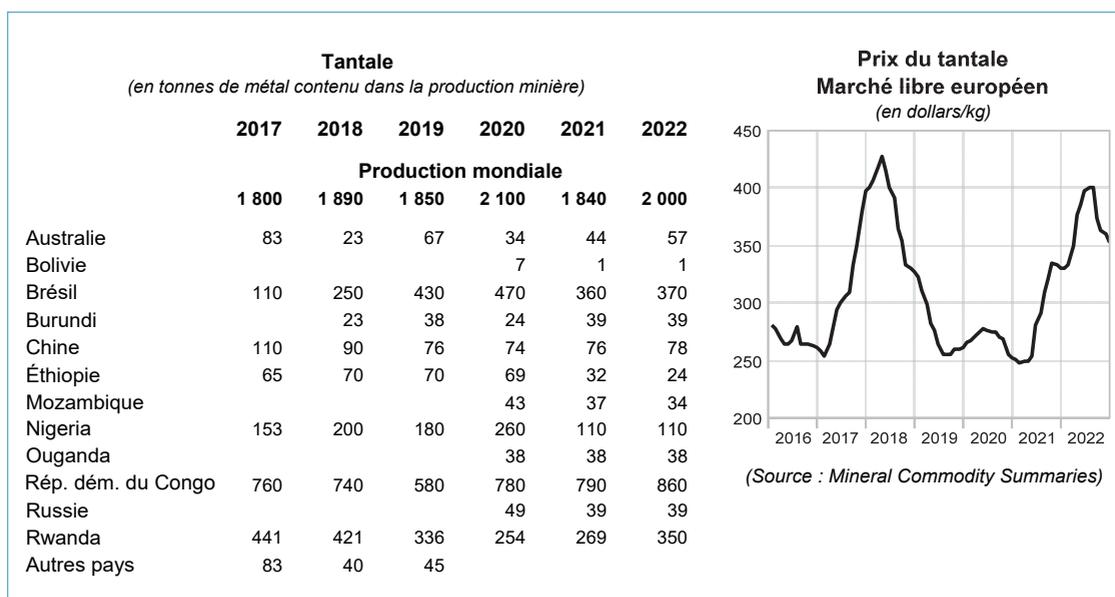
Le tantale est un métal réfractaire avec une température de fusion très élevée de 3 017 °C. C'est aussi un métal particulièrement dense (16,7), très résistant à la corrosion par les acides, et doté d'une permittivité élevée. Cette dernière propriété permet la fabrication de condensateurs électroniques de très faibles volumes et robustes, principale application mondiale du tantale. Sa dureté et sa résistance à la chaleur sont également prisées pour les superalliages et les outils de coupe (carbures).

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 des turbines utilisés dans l'aéronautique et les industries énergétiques (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 ou-

tils de découpe ou revêtement de moules en acier (5 %). Plus marginalement, le tantale sous sa forme d'oxyde (pentaoxyde de formule chimique Ta₂O₅) est utilisé dans le domaine optique dans la fabrication de lentilles de verre d'appareil photo pour améliorer leur légèreté et leur luminosité.

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 portatifs (téléphones, ordinateurs, tablettes, etc.). Selon le *Tantalum-Niobium International Study Center* (TIC), le déploiement massif des réseaux de communication 5G et l'électrification automobile vont continuer de tirer la demande en tantale vers le haut. D'ici 2024, les consultants Prismark Partners estiment même une croissance de 15 % par an, des ventes d'appareils électroniques portatifs utilisés dans de nombreux secteurs.

En 2022, la production mondiale était de 2 000 tonnes de Ta métal contenu, selon l'USGS. Cependant, les statistiques concernant l'extraction minière du tantale sont très peu précises. D'après



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 2022 avec 85 % de la production mondiale. Une part importante du tantale est issue d'exploitation artisanale et d'exportation de columbo-tantalite (aussi appelé coltan) à partir de la région des Grands Lacs africains. Les données estimées sont de 860 tonnes de Ta contenu pour la RDC (43 %) et 270 tonnes pour le Rwanda (18 %). Le Brésil (19 %) reste le deuxième producteur mondial, suivi du Nigeria (6 %) et de la Chine (4 %). En France, la production de tantale sous forme Ta_2O_5 est d'environ 10 tonnes par an en tant que sous-produit d'une exploitation de kaolin dans l'Allier.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. En 2022, le prix annuel moyen du tantale métal (Ta 99,8 % EU) s'est établi à \$ 368,4/kg, en hausse de 28 % par rapport à 2021 (\$ 287,7/kg).

Dans le cas des minerais de type pegmatite (majoritaire en Australie), le tantale est généralement un sous-produit de l'exploitation du lithium. Concernant l'actualité de ces gisements producteurs de lithium et tantale, en Australie, on notera un record de production pour le gisement géant de Greenbushes, le début de la construction de la mine de Kathleen Valley, ainsi que la réouverture des mines de Wodgina et de Bald Hill. Dans le monde, d'autres gisements à lithium-tantale de ce type sont également à l'étude ou en cours de développement tels que Blesberg en Afrique du Sud ou encore Manono en RDC.

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 est d'être incontestablement 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'acquérir des composés de tantale ou du métal en provenance de Chine, d'Iran, de Corée du Nord et de Russie.

Le tantale ne peut pas être substitué dans les microcondensateurs sans 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 de Ta contenu. Néanmoins, les seules données accessibles et vérifiables ne concernent que l'Australie (99 000 tonnes, d'après l'USGS) et le Brésil (40 000 tonnes). Les réserves chinoises seraient, quant à elles, de 180 000 tonnes. Les ressources en terre sont donc vraisemblablement bien supérieures, notamment au Canada et aux États-Unis (55 000 tonnes pour ce territoire 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 pulvé-

risation, 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.

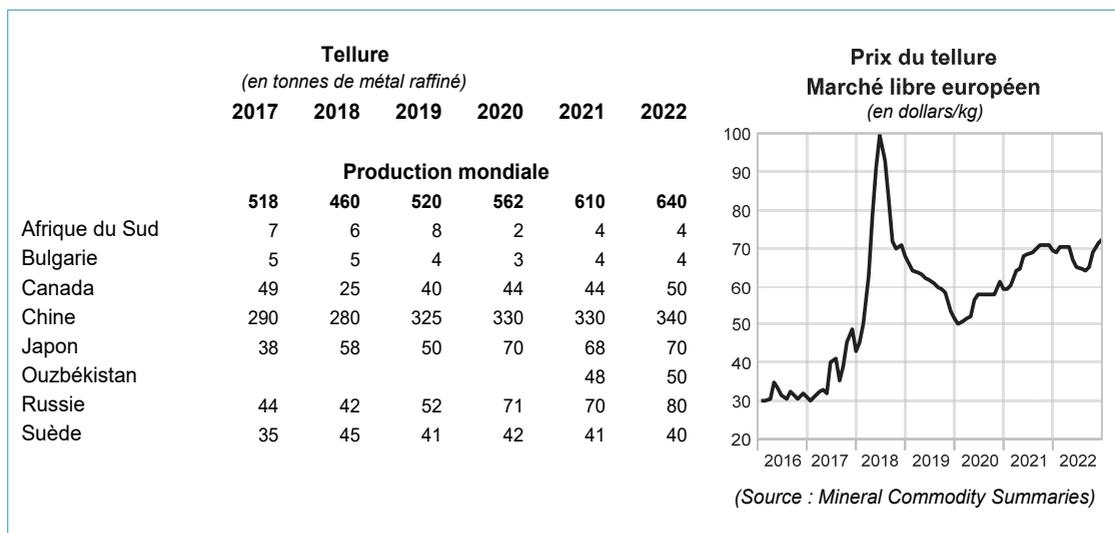
Tellure (Te)

Le tellure est l'un des éléments les plus rares dans l'écorce terrestre (1 ppb – 1 partie par milliard). Il est, pour l'essentiel, 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 particulièrement utilisé pour ses propriétés semi-conductrices, photosensibles et photoélectriques.

Le tellure est utilisé en premier lieu dans la fabrication de panneaux photovoltaïques à couches minces au tellure de cadmium (CdTe) qui représentait, selon l'USGS, 40 % de sa consommation en 2021. Il 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 l'Agence internationale de l'énergie (IEA), la part de marché des technologies couches minces représentait 3,4 % de la puissance photovoltaïque fabriquée dans le monde en 2021, soit environ 8,2 gigawatts (GW), dont 7,9 GW étaient des modules CdTe produits par First Solar (États-Unis). L'entreprise prévoit de poursuivre son expansion en visant une production de 16 GWc/an de modules à l'horizon 2024. Bien qu'il s'agisse d'un marché de niche, le secteur des modules au CdTe n'en demeure pas moins dynamique, comme le prouve le projet de construction d'une usine de production de panneaux CdTe par China National Building Materials (CNBM), qui pourrait avoir une capacité annuelle de plus de 1 GW. L'Europe semble en revanche éprouver des difficultés à trouver sa place puisque la seule entreprise européenne du secteur, l'allemand Calyxo, s'est déclarée en faillite au tout début de l'année 2020, probablement en raison de la concurrence des panneaux au silicium, bien moins onéreux que ceux utilisant 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 16 GWc de modules, comme prévoit de le faire l'américain First Solar dès 2024, de-



manderait donc environ 640 tonnes de tellure pour le seul secteur solaire (soit l'équivalent de la production mondiale de 2022). Une hausse de la demande pourrait être couverte partiellement ou en totalité grâce à l'expansion des capacités de récupération du tellure dans les résidus de raffinage du cuivre. Le taux de récupération actuel est estimé à 30-50 %, 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 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), où sont produites 40 tonnes de Te par an.

En 2022, la production de tellure mondiale (hors États-Unis) a été estimée par l'USGS à 640 tonnes, en augmentation par rapport à 2021 (610 tonnes). Les producteurs de tellure sont principalement les pays producteurs de cuivre raffiné : la Chine (53 %), la Russie (12,5 %), le Japon (11 %), les États-Unis (non communiqué), l'Ouzbékistan (8 %), le Canada (8 %), la Suède (6,25 %).

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, ou encore celui porté par le canadien GGX Gold, Gold Drop (Colombie-Britannique), qui a mesuré de fortes teneurs de tellure (entre 0,6 kg/t et 3,9 kg/t). En 2022, la société Rio Tinto a, de son côté, commencé à produire du tellure à partir de sous-produits provenant de sa mine de cuivre de Kennecott, dans l'Utah (États-Unis). Le tellure est raffiné par la société canadienne 5N Plus, un important producteur mondial de semi-conducteurs spécialisés et de matériaux de performance. Le tellure raffiné est principalement fourni à l'entreprise First Solar.

L'USGS évalue avec de très grandes incertitudes les réserves de tellure récupérable à 32 000 tonnes, dont 14 % en Russie, 11 % aux

États-Unis et 9 % en Chine. 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. En 2022, la quantité de panneaux solaires disponible pour le recyclage était limitée, mais en augmentation constante. Plusieurs matériaux peuvent remplacer le tellure dans la plupart de ses utilisations, mais généralement avec des pertes d'efficacité ou de qualité. Il est toutefois à noter que le tellure présente un degré de toxicité relativement élevé.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le prix *spot* du tellure (99,99 % Europe) s'est globalement maintenu autour de \$ 70/kg tout au long de l'année 2022, après deux années de hausse consécutive. L'engouement sur le marché des cellules à CdTe sera 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 singulière caractérisée par des électrons venant remplir l'orbitale 4f, située à proximité du noyau. Cette caractéristique atomique est à l'origine de propriétés remarquables de ces éléments, en particulier optiques (en absorption [coloration] comme en émission [luminescence]) et magnétiques.

En 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.).

Au sein de cette grande famille, quatre éléments chimiques aux propriétés magnétiques remarquables portent, à eux seuls, 90 % de la va-

lorisation du marché à savoir : néodyme (Nd), praséodyme (Pr), dysprosium (Dy) et terbium (Tb). Ces TR «magnétiques» sont utilisées sous forme d'alliages pour la production d'aimants permanents de haute performance, en particulier pour la technologie d'aimants néodyme-fer-bore (NdFeB). Les principaux moteurs de cette demande, progressant de près de 10 % par an, sont l'essor des véhicules électriques, de l'éolien *off-shore*, ainsi que celui de l'électronique et de la robotique, utilisant de grandes quantités d'aimants permanents.

À l'horizon 2030, la demande mondiale en aimants NdFeB, de l'ordre de 125 000 tonnes en 2019, est attendue, selon les estimations, entre 200 000 tonnes (Roskill, 2020) et 320 000 tonnes dans les scénarios les plus optimistes (9,8 % de croissance annuelle moyenne). En termes de volumes, la plus forte augmentation est attendue dans le secteur des véhicules électrifiés, passant de 9 % à 25 % du total en 2030, soit 50 000 tonnes d'aimants NdFeB. L'électronique occuperait la deuxième place, avec 20 % du total, suivi du secteur éolien, avec une part qui pourrait atteindre 10

à 15 % en 2030, contre 9 % en 2019, selon Roskill.

L'impact le plus fort sur l'offre concerne l'augmentation de la production de Nd et Pr en particulier. Lors du processus de raffinage des TR, ces deux éléments sont séparés de manière concomitante du fait de leurs propriétés très voisines. L'oxyde Nd-Pr est l'intrant fondamental de la production des aimants permanents NdFeB. Or, pour une production actuelle de l'ordre de 45 000 tonnes d'oxydes Nd-Pr à l'échelle mondiale, les capacités doivent doubler d'ici 2030, pour atteindre 90 000 tonnes. Les cas du dysprosium et du terbium sont légèrement différents, ces deux éléments étant ajoutés comme dopants dans les aimants NdFeB, afin d'abaisser le point de Curie et d'autoriser un fonctionnement optimal à plus de 200 °C. Ces conditions sont nécessaires en particulier dans l'éolien et l'automobile. Cependant, du fait de leur rareté et de leur prix, il existe de nombreuses tentatives pour limiter leurs usages ou les substituer de la part des utilisateurs. Leur production est de l'ordre de 2 000 tonnes par an, chiffre également amené à doubler d'ici 2030.

N'ayant pas de cotation sur les marchés bour-

Terres rares

(en tonnes d'oxydes contenus dans le minerai)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	Production mondiale					
	132 000	190 000	220 000	240 000	290 000	300 000
Australie	19 000	21 000	20 000	21 000	24 000	18 000
Birmanie		19 000	25 000	31 000	35 000	12 000
Burundi		630	200	300	500	80
Brésil	1 700	1 100	710	600	200	0
Chine	105 000	120 000	132 000	140 000	168 000	210 000
États-Unis		18 000	28 000	39 000	42 000	43 000
Inde	1 800	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900
Madagascar		2 000	4 000	2 800	6 800	960
Malaisie	180	200				
Russie	2 600	2 700	2 700	2 700	2 600	2 600
Thaïlande	1 300	1 000	1 900	3 600	8 200	7 100
Vietnam	200	920	1 300	700	400	4 300
Autres pays		60	66	100	60	80

(Source : Mineral Commodity Summaries)

siers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. En 2022, exprimés sous forme métal 99 % en référence «Franco à bord (Fob) Chine», les prix des TR ont quasiment tous augmenté en valeur absolue. Ces prix sont à considérer de manière individuelle par élément de TR, une grande disparité existant entre les TR légères, très abondantes, et les TR lourdes réservées à des applications de niche du fait de leur rareté et de leur prix. Ainsi, le lanthane a augmenté d'à peine 1 % en 2022, s'établissant à \$ 6,48/kg en moyenne (contre \$ 6,40/kg en 2021), tout comme le cérium (+ 2,5 %) à \$ 6,68/kg en 2022, tandis que les prix des TR utilisés dans les aimants permanents ont continué leur augmentation en 2022, à l'exception du dysprosium (- 5,3 % sur l'année), pour une moyenne de \$ 503/kg sur l'année. Le prix du terbium, la plus chère des terres rares, s'est établi en moyenne à \$ 2 598/kg contre \$ 1 714,5/kg en 2021 et 660,8/kg en 2020. Le praséodyme et le néodyme sont passés respectivement de \$ 123/kg à \$ 172/kg en 2022 (+ 28 %) et de \$ 121/kg à \$ 167/kg en 2022 (+ 27 %).

En 2022, la production minière mondiale de terres rares est estimée à 300 000 tonnes, selon l'USGS (exprimée en Oxydes de Terres Rares ou OTR), contre 290 000 tonnes en 2021 (après révision). La production chinoise officielle, régulée par des «quotas de production» par région et par producteur, a augmenté, passant à 210 000 tonnes d'OTR contre 168 000 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 2022, 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 2023, 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 eu une production totale de l'ordre de 18 000 tonnes d'OTR

en 2022, en diminution à la suite de litiges avec le gouvernement malais où est située l'usine de transformation. 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 2022, Lynas a avancé son projet d'extension en Australie (Kalgoorlie) avec une usine de purification en construction, 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 Nd-Pr.

Dans le reste du monde, des productions modestes peuvent être mentionnées, notamment en Russie où la société Solikamsk produit 2 600 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. Selon l'USGS, la production vietnamienne aurait bondi en 2022, passant de 400 tonnes en 2021 à 4 300 tonnes en 2022.

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. La progression des capacités chinoises de production d'aimants permanents (NdFeB et SmCo) est fulgurante avec une production estimée à 195 000 tonnes en 2021, contre 175 000 tonnes en 2019, 165 000 tonnes en 2018, et seulement 83 000 tonnes en 2010 (d'après les sources Argus Media et Adamas Intelligence). Cette industrie compte trois principaux centres de production dans les provinces de Zhejiang (ville de Ningbo), de Shanxi et Pékin. La ville de Ningbo concentrait 40 % de la production totale de matériaux magnétiques à base de terres rares

en 2019, avec 67 entreprises dédiées, dont l'entreprise Ningbo NingGang, premier fabricant de matériaux d'aimants permanents SmCo au monde, représentant 27 % de la production nationale et presque 20 % de la production mondiale.

Face à ce constat, un certain nombre de pays tente de valoriser la montée en puissance de filières de production de terres rares pour réduire les risques de dépendance aux importations chinoises. En conséquence, une dizaine d'usines sont en construction à travers le monde en 2022, 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.

Ainsi, en janvier 2023, la compagnie suédoise LKAB a publié des ressources en terres rares de 1 Mt d'OTR, associés au gisement de Kiruna. Ce dernier est un gisement ferrifère exploité depuis plus d'un siècle, où les terres rares sont portées par l'apatite, un minéral phosphaté. LKAB a étudié depuis 2018 le potentiel d'industrialisation de leur technologie brevetée *CLEANMAP* pour extraire les phosphates et les terres rares des résidus miniers de l'exploitation du fer. Les études préliminaires prévoient un circuit industriel en deux phases : la production de concentré d'apatite dans des installations directement adjacentes à la production de minerai de fer existante à Malmberget et Kiruna. Le concentré sera ensuite acheminé par chemin de fer vers un parc industriel situé sur la côte (Luleå ou Skellefteå – localisation définitive à l'étude) pour réaliser la dissolution de l'apatite et extraire le phosphore et les OTR. La production est espérée commencer en 2027. Il est, à ce stade, envisagé une production de l'ordre de 10 000 tonnes à 15 000 tonnes par an d'OTR sur une vingtaine voire une trentaine d'années. Plusieurs études économiques sont encore nécessaires pour préciser ces chiffres, ainsi que celui de l'enrichissement en Nd-Pr.

Toujours en Suède, le projet Norra Kärr, 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.

En Norvège, l'entreprise Yara 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 Ressources 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.

En France, quatre projets de pilotes industriels visent actuellement le recyclage d'aimants permanents à TR :

- celui porté par la société Carester. Un démonstrateur industriel appelé CAREMAG sera implanté à Lacq à l'horizon 2024. Fondé sur le modèle de la boucle longue, l'objectif est de traiter 1 000 tonnes d'aimants NdFeB en fin de vie par an, de tous types, pour produire des oxydes de TR purs. À terme, le principal marché ciblé est celui de l'automobile ;

- celui porté par la société MagREEsources, reposant sur la boucle courte. Une ligne de production pilote prévue pour septembre 2022 ataquera dans un premier temps le marché des plastoaimants. À plus long terme, l'objectif est la refabrication d'aimants frittés de haute performance reposant sur des sources d'aimants en fin de vie bien identifiées et de compositions connues et stables, comme, par exemple, les aimants des éoliennes en mer ;

- le projet MAGNOLIA, piloté par Orano à Châtillon (92), implique quatre autres partenaires (CEA, PAPREC, DAIMANTEL et VALEO). Il a pour ambition de structurer un outil industriel de fabrication d'aimants permanents haute-performance.

- celui de la *start-up* REEfine technologies, implantée à Lyon, travaillant avec l'entreprise ARELEC qui compte développer un atelier pilote de production de poudres coercitives anisotropes à Grenoble. En février 2022, elle s'est associée aux entreprises Celimer, Poral et ECM Technologies pour mener à bien son projet visant les contenants cosmétiques, la domotique et les petits moteurs électriques. Les premiers aimants recyclés sont attendus courant 2023.

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 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. La grande majorité du minerai de titane est utilisée sous la forme d'oxyde de titane (TiO_2) en tant que pigment. Il entre notamment dans la composition de certaines peintures, matières plastiques, papiers et caoutchoucs. Seule une petite partie du flux est utilisée pour la production du titane métal (de l'ordre de 6 à 7 % de la production mondiale), après avoir été transformée en éponge de titane au préalable par le biais de divers procédés incluant une réduction par réaction avec du sodium ou du magnésium (procédé *Kroll*, le plus courant). En 2019, l'aéronautique représentait environ 45 % du marché du titane métal, le secteur industriel 40 %, les applications militaires 8,5 % et les biens de consommation 6,5 %.

Les réserves de titane sont considérables. Elles sont estimées à 700 Mt (exprimées en contenu TiO_2) par l'USGS, soit environ 70 ans de production au rythme actuel. Les productions mondiales d'ilménite (FeTiO_3) et de rutil (TiO_2), les deux principaux minerais de titane, croissent chaque année et atteignaient respectivement 8,9 Mt et 0,6 Mt en 2022, selon l'USGS.

La production d'oxyde de titane découle principalement de ces deux exploitations, ainsi que dans une bien moindre proportion de celles de rutil synthétiques. Les capacités de production de pigments de dioxyde de titane sont évaluées en 2022 par l'USGS à 9,4 Mt. Concernant les éponges de titane, si les capacités sont estimées à 350 000 tonnes, la production mondiale n'est, quant à elle, estimée qu'à 260 000 tonnes.

Une part de l'explication de cet écart entre capacité et production est à rechercher dans la progressive maturité des circuits de recyclage du titane métal, offrant une disponibilité croissante de matériaux d'origine secondaire. Elle est aussi la conséquence du développement de l'offre par la Chine qui accroît progressivement sa domination sur le marché. Sa production d'éponges de titane est passée de 85 000 tonnes en 2019 à 150 000 tonnes en 2022, soit 58 % de la production mondiale, tout en améliorant leur qualité. Néanmoins, aucun producteur chinois n'est aujourd'hui certifié pour la fabrication des pièces aéronautiques les plus critiques. Derrière la Chine, le Japon (19 % de la production), la Russie (9 %) et le Kazakhstan (6 %) constituent les autres principaux producteurs du secteur. La nouvelle usine installée en 2019 en Arabie saoudite, qui a vocation à produire un titane de qualité aéronautique, poursuit son développement et a doublé, en 2022, les quantités produites (11 000 tonnes, soit 4 % du total mondial). Les volumes produits par l'Ukraine ont, en revanche, été divisés par six au cours de l'année passée (seulement 1 000 tonnes désormais, contre 6 100 tonnes en 2021).

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Depuis 2017, le prix moyen de l'éponge de titane de qualité TG-Tv, contenant au minimum 97,75 % de titane, fluctuait entre \$ 5,5/kg et \$ 8,5/kg sur le marché *spot*. Il s'est brusquement envolé

Titane
(en milliers de tonnes)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production mondiale d'ilménite						
	5 000	6 870	7 700	8 000	8 900	8 900
Afrique du Sud	550	765	1100	1 020	900	900
Australie	730	720	840	480	600	660
Brésil	50	66	25	34	33	32
Canada	840	630	680	595	430	470
Chine	300	2 100	2300	2800	3 400	3 400
États-Unis	100	100	100	100	100	200
Inde	300	319	162	174	204	200
Kenya	280	272	210	201	181	180
Madagascar	110	228	280	254	414	300
Mozambique	600	575	590	965	1 100	1 200
Norvège	220	236	400	444	468	430
Sénégal	300	297	310	300	482	520
Ukraine	230	373	490	464	316	200
Vietnam	200	105	160	138	122	160
Autres pays	150	83	74	67	137	77

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production mondiale de rutile						
	770	594	654	605	618	590
Afrique du Sud	95	103	110	86	95	95
Australie	290	141	200	190	190	190
Brésil						
Inde	10	15	11	11	12	11
Kenya	87	90	74	73	72	73
Madagascar				8	0	0
Mozambique	9	8	6	6	8	8
Sénégal	10	9	9	9	9	9
Sierra Leone	160	114	129	114	123	130
Ukraine	95	94	94	95	95	57
Autres pays	13	21	21	13	14	14

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production mondiale d'éponge de titane métal						
	193	205	200	230	240	260
Arabie saoudite			0	3	6	11
Chine	72	75	85	123	140	150
États-Unis	13	13	13	N.C		
Inde	1	1	0	0	0	0
Japon	51	49	49	49	49	50
Kazakhstan	9	16	16	15	15	16
Russie	40	44	44	31	27	25
Ukraine	8	8	8	5	6.1	1.0



(Source : Mineral Commodity Summaries)

à \$ 17,25 en mars 2022, en raison des soudaines tensions sur les marchés dans le sillage du conflit opposant la Russie à l'Ukraine, deux importants producteurs d'éponges de titane. Les prix sont progressivement redescendus à leur niveau d'origine au cours de l'année, qu'ils ont terminée à \$ 7/kg. Les prix du titane certifié aéronautique, probable-

ment beaucoup plus élevés, ne sont pas disponibles et dépendent des contrats passés entre les acteurs.

La croissance de l'aéronautique civile et de l'industrie militaire, ainsi que dans une moindre mesure le dessalement de l'eau de mer, devraient continuer de soutenir la demande en titane métal dans les prochaines années. En effet, l'im-

pact du Covid-19 sur l'industrie aéronautique, ayant temporairement freiné son développement, semble désormais appartenir au passé. 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 %, contribuant ainsi à tirer les besoins du métal vers le haut. Le regain des tensions internationales pousse également nombre de pays à œuvrer en faveur de vastes plans d'investissements dans les équipements militaires. Ces tensions pourraient, à terme, mettre à l'épreuve les filières d'approvisionnement de titane, et notamment celles à destination de l'Europe.

Néanmoins, du fait de son prix élevé et de sa complexité d'élaboration à partir de minéraux, l'usage du titane pourrait, au moins partiellement, également être remis en cause par la compétition avec des alliages d'aluminium dont les propriétés pour améliorer la légèreté et la résistance des appareils sont comparables. Il s'agit, en particulier, de l'alliage aluminium-scandium qui dépend toutefois d'une production future de scandium en quantité suffisante et d'un prix abordable (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.

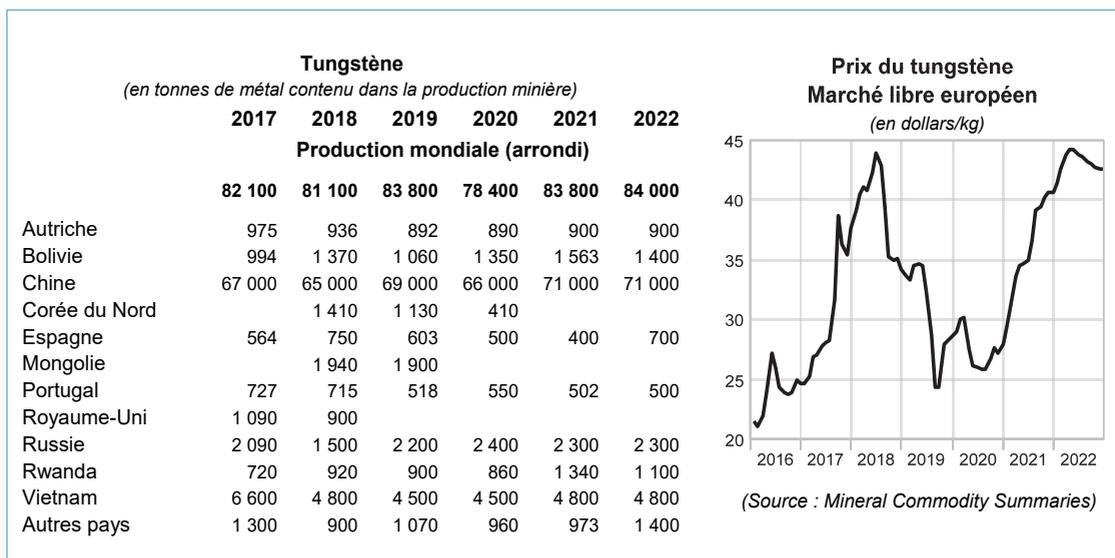
Concernant les pigments, principal débouché des minéraux titanifères, Eramet estime que le marché devrait rester en déficit en 2022, en raison d'une production chinoise affaiblie par des fermetures pour raison énergétique entre autres, et d'une consommation annuelle vigoureuse, malgré un ralentissement de la demande en Europe et en Chine sur le second semestre.

Le titane et les alliages de titane sont recyclables selon des conditions précises de recondi-

tionnement, en particulier pour la filière aéronautique. En France, le complexe industriel de production de titane de qualité aéronautique de Saint-Georges-de-Mons, en Auvergne, intégrant l'unité de recyclage d'Ecotitanium, a été inauguré en septembre 2017. Il dote l'industrie aéronautique d'une capacité autonome de production de titane de qualité aéronautique 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.

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 diodes électroluminescentes, dites «LED». 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 dans la composition 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 2022, la production mondiale de tungstène était de 84 000 tonnes (en W contenu). Elle a légèrement augmenté par rapport à 2021, selon les chiffres de l'USGS, tandis que la consommation a poursuivi son redressement, particulièrement aux États-Unis, avec la reprise de l'activité aérospatiale et les industries des hydrocarbures. En revanche, en Chine, la politique zéro-covid (impliquant des confinements successifs) semble avoir fortement impacté les industries manufacturières et, en conséquence, la consommation de tungstène. La Chine représente 85 % 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 2022, ils étaient de 81 170 tonnes (exprimées en concentrés contenant 65 % WO_3) pour l'extraction primaire, soit une maigre augmentation par rapport à 2021. Le Vietnam, à la deuxième place, ne concentre que 6 % de la production mondiale, soit environ 4 800 tonnes majoritairement *via* la mine de Nui Phao exploitée par la compagnie australienne Masan High-Tech Materials.

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 2022. Pour cette année, la moyenne annuelle s'est établie à \$ 43,15/kg, soit une hausse de 19 % par rapport à 2021. Cette augmentation est expliquée par l'arrêt temporaire de certaines industries chinoises pour lutter contre la pandémie de Covid-19, par l'escalade du conflit entre la Russie et l'Ukraine entraînant des risques de pénuries et finalement par une forte inflation. Dans le contexte de ses dons d'armement à l'Ukraine, il est à noter que les États-Unis sont dans l'obligation de remplacer les blindages de

ses tanks destinés à l'export constitué d'uranium appauvri par des alliages à base de tungstène. L'USGS indique également des stocks gouvernementaux aux États-Unis de 6 000 tonnes de minerais et concentrés, et de 5 tonnes d'alliages.

Les réserves connues de tungstène sont estimées par l'USGS à 3,8 Mt, dont 47 % en Chine. Un certain dynamisme est à noter quant à leur renouvellement. Le consultant Roskill identifie, en effet, quatorze projets au stade de développement à l'horizon 2028. Le projet le plus avancé semble être la mine de Sangdong en Corée du Sud, actuellement en cours de construction par Almonty. D'autres gisements de grandes tailles sont toujours à l'étude ou mis provisoirement « sous cocon » en 2022, essentiellement en Chine ainsi qu'en Australie et au Canada. L'un des dix plus importants gisements de tungstène, Bakuta au Kazakhstan, est toujours en construction. L'ouverture de la mine, initialement prévue pour fin 2022, semble avoir rencontré de nombreux problèmes. En Europe, la mine de La Parilla en Espagne a interrompu sa production en milieu d'année en réaction à la forte augmentation du prix du gaz naturel. La mine de Santa Comba (société Pivotal Metals, ex-Rafaella Resources) réouverte en 2021 au Portugal a permis le traitement d'un faible volume de minerai à forte teneur. En parallèle, celle-ci a continué ses études de faisabilité techniques préalables à une éventuelle mise en production. D'autres projets sont toujours à l'étude, dont la mine de Drake-lands (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, 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'alumine

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. Certains consultants envisagent même une diminution de la consommation de tungstène dans le secteur automobile, grâce à la simplification du groupe motopropulseur en lien avec la transition des véhicules thermiques vers les véhicules électriques. En revanche, les travaux de R&D de la société Nyobolt permettent d'envisager l'utilisation d'alliages de tungstène dans la composition des anodes des batteries au lithium, avec l'objectif d'en améliorer la vitesse de charge et la durabilité.

Vanadium (V)

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 90 % de la consommation mondiale, dont environ 45 % 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 %).

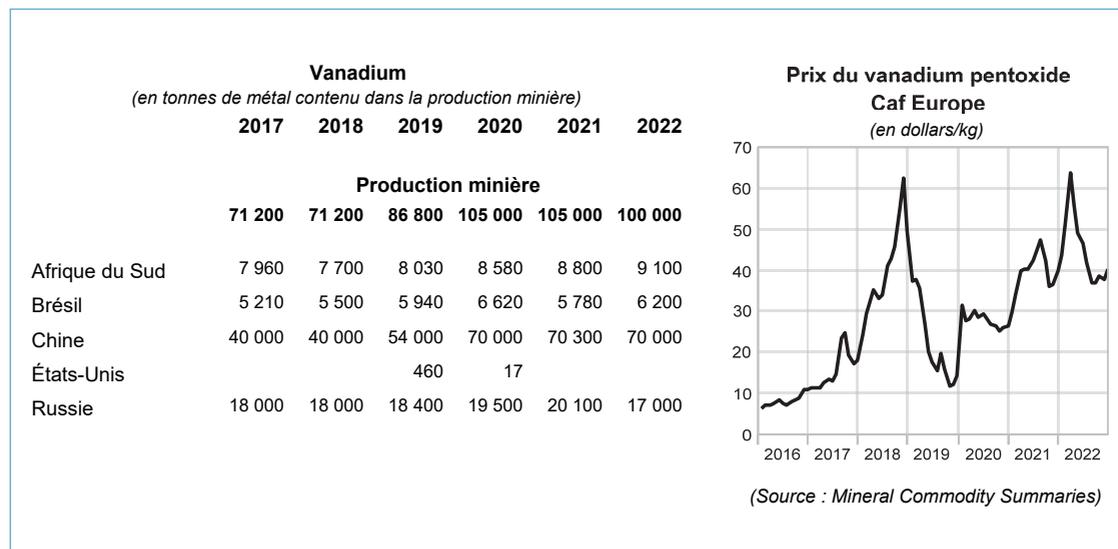
Le vanadium est commercialisé sous deux formes principales : d'une part, le ferrovanadium, un alliage utilisé pour la production d'aciers spéciaux tels que les aciers inoxydables durs et résistants pour les couteaux ou les instruments chirurgicaux, les essieux, les engrenages pour voitures, les pièces de moteurs à réaction, ou encore des tubes spéciaux pour l'industrie chimique ; d'autre part, sous forme de pentoxyde de vanadium (V_2O_5), utilisé comme précurseur pour le ferrovanadium, 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).

Les batteries VRB présentent des caractéristiques prometteuses pour le stockage stationnaire d'énergie (notamment issue de sources intermittentes, éoliennes ou solaires), bien que ne représentant que 2 % de la demande ces dernières années. Leur fonctionnement utiliserait environ 7 kg de pentoxyde de vanadium par kilowatt-heure d'énergie stockée. Elles fonctionnent par oxydo-réduction, 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.

Sous forme de ferrovanadium, le vanadium est l'un des additifs les plus rentables dans les alliages d'acier, en raison des très faibles quantités nécessaires pour augmenter considérablement la 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, 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 ferrovanadium et le ferri-niobium (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 100 000 tonnes de vanadium contenu en 2022 (5 % de moins qu'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 traitement de cendres volantes, de résidus pétroliers, de scories



de fonte et de catalyseurs usagés riches en vanadium. Le vanadium est caractérisé par sa forte affinité avec le carbone, ce qui explique sa concentration naturelle dans certains gisements pétroliers, 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 95 % de la production mondiale de vanadium : la Chine (70 %), la Russie (17 %) et l'Afrique du Sud (9 %). Le Brésil complète le tableau avec près de 6 200 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, le numéro deux mondial Evraz PLC – avec 14 % de la production mondiale en 2021 (d'après la compagnie) – a fait l'objet de sanctions britanniques, en mai 2022, en raison des représailles économiques contre la Russie à la suite de l'invasion de l'Ukraine. 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 VRB au vanadium avec la mine et l'usine de Vametco (4 570 t/an V_2O_5), rachetée à Evraz PLC 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 91 Mt de vanadium. En tête de file des pays attractifs se trouve l'Australie, qui compte 22 projets actifs portant sur le vanadium

et substances connexes, dont celui très avancé de Mount Peake développé par la compagnie TNG ou le gros projet Speewah Dome mené par la société King River Resources. Le deuxième pays est la Russie avec environ 15 % des réserves et ressources en vanadium mondiales, principalement grâce au projet de Kachkanarsky GOK, exploité par Evraz PLC et Vanadium Kachkanarsky Mine Dre.

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. En 2022, les prix moyens mondiaux du vanadium et du ferrovanadium ont globalement augmenté. Par exemple, le prix de fermeture moyen du ferrovanadium européen (pureté 78-82 %) a été de \$ 38,8/kg en 2022 contre \$ 34,3/kg en 2021, soit une hausse de 13 %. Le prix annuel du pentoxyde de vanadium européen (pureté 98 %) a, quant à lui, augmenté de \$ 39,45/kg en 2021 à \$ 45,13/kg en 2022, soit une hausse de 14 %. Les principaux fondamentaux ayant expliqué cette élévation des prix sont une demande dynamique en acier au premier trimestre 2022 (dans la continuité du dernier semestre 2021) et des incertitudes sur l'offre de mi-février à début mars avec la perspective de sanctions économiques contre la Russie après le déclenchement de la guerre en Ukraine (forte volatilité des prix avec une augmentation de \$ 42/kg le 23 février 2022 à \$ 62/kg le 8 mars 2022). Cependant, à partir de mars 2022, une baisse progressive des prix du vanadium et du ferrovanadium a été observée à la suite d'une demande en acier qui se ralentissait. Cette situation s'expliquait par une diminution de la demande dans le secteur automobile et de la production d'acier en Chine, en raison des restrictions domestiques chinoises face à l'augmentation des cas de Covid-19.

Les flux commerciaux de pentoxyde de vanadium entre la Russie et la République tchèque ont été relativement épargnés par le conflit, et les exportations tchèques de ferrovanadium vers des clients en Chine, en Inde, au Japon, aux Pays-Bas, en Turquie, en Ukraine et aux États-Unis ont également connu des perturbations limitées. Les conséquences à long terme des sanctions financières imposées à la Russie ne sont pas encore totalement tangibles, mais c'est un très bon signe pour le vanadium occidental qui est de fait plus

prisé des acheteurs et investisseurs. Par exemple, il est attendu que les États-Unis (grand importateur de ce métal critique) et certainement la Corée du Sud (un des principaux convertisseurs de pentoxyde de vanadium en ferrovandium) constituent des stocks stratégiques face à la diminution de l'offre en vanadium et qu'ils chercheront des approvisionnements supplémentaires en dehors de la Russie. Les fabricants européens d'acier et d'électrolytes pour batteries ont, par ailleurs, manifesté un vif intérêt pour le projet de récupération du vanadium de Neometals en Finlande. L'opération permettra de récupérer du pentoxyde de vanadium de haute pureté à partir de scories issues de la sidérurgie de SSAB AB en Scandinavie.

À court terme, le marché mondial du minerai de vanadium pourrait passer de \$ 2,78 milliards en 2022 à \$ 2,97 milliards en 2023, avec un taux de croissance annuel estimé à 6,9 %.

En Australie, TNG a reçu environ 800 millions AUD en lettres de soutien et d'intérêt de la part d'institutions financières soutenues par les gouvernements australien, sud-coréen et allemand pour le projet australien de Mount Peake. Australian Vanadium développe également l'un des plus grands projets de vanadium au monde. Le cours de l'action de la société a atteint son plus haut niveau depuis septembre 2008, le 4 avril 2022, juste avant qu'une étude de faisabilité financière estime un bénéfice net de 2,2 milliards AUD pour son projet homonyme. Le projet australien de vanadium a des ressources minérales estimées à 239 Mt, à 0,73 % de pentoxyde de vanadium, et des réserves de 30,9 Mt à 1,09 % de pentoxyde de vanadium. Le projet devrait produire 24,7 millions de livres de pentoxyde de vanadium par an, sur une durée de vie de 25 ans. En mars, le gouvernement australien a annoncé qu'il accorderait à Australian Vanadium 49 millions AUD afin de transformer le vanadium du projet en matériau de batterie. La subvention fait partie d'un programme de financement global de 243 millions AUD pour quatre projets, visant à augmenter la production nationale de cobalt, de nickel, d'aluminium, de vanadium et de terres rares.

Le marché du vanadium pourrait se tendre au cours de l'année 2023 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.

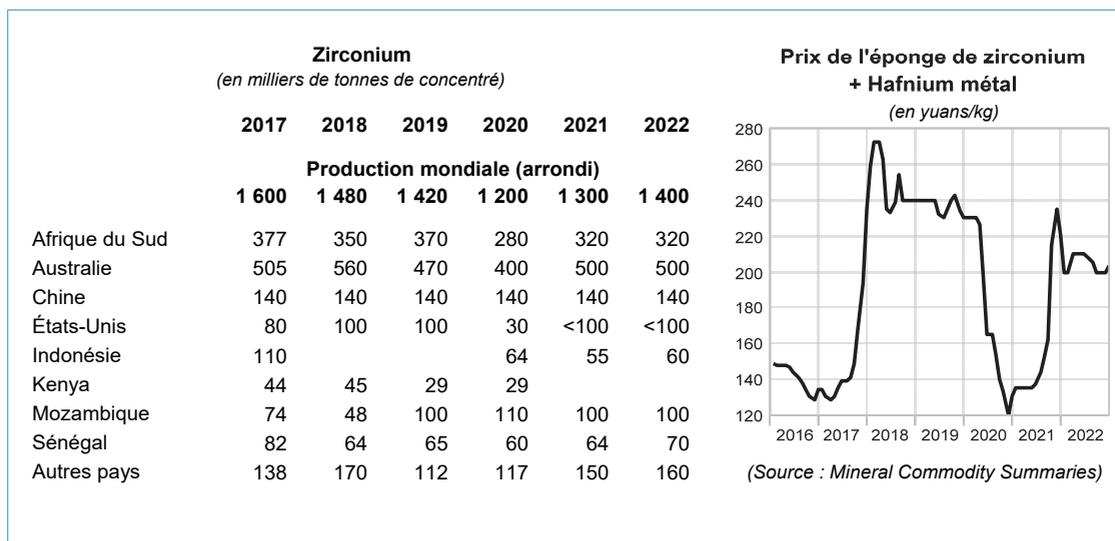
Les sources secondaires – en particulier par récupération du vanadium contenu dans les aciers rapides, les superalliages et les catalyseurs usés de l'industrie du pétrole – représentent des voies très intéressantes de diversification des approvisionnements pour les pays consommateurs. Ce recyclage représente aujourd'hui environ 10 % de la consommation, mais l'on peut s'attendre à une augmentation progressive de ces capacités de récupération, notamment aux États-Unis ou encore en Arabie saoudite.

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'élève à environ 1 Mt par an. 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, 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 mondiale de zircon ; elle est cependant un secteur à haute valeur ajoutée. Le zirconium métal est utilisé pour plus de deux tiers dans l'industrie nucléaire, vu son excellente transparence aux neutrons. Il peut être utilisé 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, il y avait à début 2023 438 réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde. 58 réacteurs étaient en construction, dont 21 en Chine, et 104 projets bien avancés, augurant ainsi d'une croissance soutenue de la demande.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production de concentrés de zircon était estimée à 1,4 Mt en 2022, un chiffre supérieur à ceux des deux années écoulées et retrouvant ainsi son niveau pré-pandémique. Quatre pays représentent plus des trois quarts de la production mondiale de

zircon, à savoir : l'Australie avec 36 % de la production mondiale (500 000 tonnes), l'Afrique du Sud avec 23 % (320 000 tonnes), la Chine avec 10 % (140 000 tonnes) et le Mozambique avec 7 % (100 000 tonnes). L'USGS évaluait à 68 Mt les réserves mondiales d'oxyde de zirconium en 2022, en légère baisse par rapport à l'année précédente (70 Mt), dont 71 % en Australie et 9 % 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 zircone ou en composés chimiques pour d'autres usages.

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

La production de zirconium métal était estimée à environ 7 000 tonnes en 2012 par la *Minor Metals Trade Association* (MMTA), dont 3 000 tonnes pour les États-Unis, 1 800 tonnes pour la France, 1 000 tonnes pour la Russie, 800 tonnes pour la Chine et 400 tonnes pour l'Inde (du fait de l'opacité du marché, il est très difficile de trouver des chiffres fiables plus récents). En France, les éponges de zirconium sont produites à partir de zircone sur le site de Jarrie, par la société Framatome, filiale d'Orano (ex-Areva). Ces éponges sont ensuite livrées à l'usine d'Ugine pour y être transformées en alliages sous différentes formes utilisées dans différents secteurs, dont l'industrie nucléaire.

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

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

Les prix du zirconium sont établis par négociation entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen de l'éponge de zirconium (teneur de 99,4 % et contenant de l'hafnium) a été, en 2022, de \$ 30,5/kg, un prix en hausse de 21 % par rapport à 2021 (\$ 25,2/kg).

Cette augmentation des prix a été causée en grande partie par la reprise économique post-pandémie et une demande soutenue par l'utilisation croissante du zirconium dans les applications technologiques, notamment celles du secteur des énergies renouvelables et du nucléaire. La pression de la demande devrait se poursuivre au cours des prochaines années, tirée notamment par la Chine, tandis que l'offre pourrait stagner en raison du faible nombre de projets miniers en cours de développement. Le seul en passe d'entrer en production à court terme est le projet Dubbo en Australie. Détenu par Australian Strategic Materials Ltd, le zircon extrait pourrait toutefois être uniquement exporté vers le marché sud-coréen. En parallèle, plusieurs mines voient actuellement la qualité des zircons récupérés baisser en quantité

et en qualité. Ceci pourrait amener à un déficit important sur le marché du zircon d'ici 2030.

Hafnium (Hf)

L'hafnium est un métal de transition ductile, résistant à la corrosion et chimiquement similaire au zirconium. Il se trouve naturellement dans les minerais de zirconium (zircon et baddeleyite) avec un ratio d'une part d'hafnium pour 30 à 50 parts de zirconium, selon la littérature. L'hafnium étant produit à partir des résidus de la purification du tétrachlorure de zirconium, il convient de se référer à la section précédente sur le zirconium pour une analyse plus complète.

L'hafnium est utilisé pour près de moitié dans les superalliages de nickel et cobalt (NiCo) comme stabilisateur haute température dans les moteurs d'avion et les moteurs de fusée. Il 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 quelques pour cent de la demande mondiale du métal.

Les perspectives de croissance des secteurs aéronautique – qui devrait doubler d'ici 2039, selon l'*International Air Transport Association* (IATA) –, 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 annuelle moyenne d'éponges d'hafnium est de l'ordre de 70 à 80 tonnes depuis

2010 et provient essentiellement de la France, des États-Unis et de la Chine. Comme pour le zirconium, c'est la société Framatome, filiale d'Orano (ex-Areva) qui produit de l'hafnium ultra pur sur le site de Jarrie (Isère) pour les applications aéronautiques principalement. Selon les données du commerce extérieur, la France a exporté 26 tonnes d'hafnium en 2021 (contre 21 tonnes en 2020) dont 19 tonnes vers l'Allemagne, 40,5 tonnes vers les États-Unis et 1,5 tonne vers la Grande-Bretagne.

Il n'existe pas de calcul normalisé des ressources et réserves d'hafnium. Néanmoins, l'USGS estime les réserves de zirconium à 68 Mt. Il est alors possible de déterminer de manière très simplifiée les réserves en hafnium en utilisant le ratio Zr/Hf soit 36 : 1 (chiffres USGS). Cela représenterait environ 1,9 Mt d'hafnium. Du fait des très faibles quantités utilisées, le recyclage de l'hafnium est seulement de l'ordre de 10 tonnes par an. Dans certains superalliages, l'hafnium peut être remplacé par le zirconium.

Les prix de l'hafnium sont établis par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Ils dépendent très fortement de ceux du zirconium. La croissance accélérée des industries aérospatiale et électronique à la suite de la levée des restrictions liées à la pandémie de Covid-19 a créé des pénuries sur les marchés qui ont nourri une forte hausse des prix. Le prix de l'hafnium (99 %) a ainsi été multiplié par quatre au cours de l'année 2022, passant de \$ 950/kg à \$ 3 750/kg. Les réserves et ressources en minéraux contenant de l'hafnium (et du zirconium) sont certes conséquentes, mais le marché est structurellement limité par l'offre. Les approvisionnements en hafnium en provenance de la Chine pourraient atténuer les pénuries, mais les besoins du pays – qui prévoit de construire plusieurs réacteurs nucléaires ces prochaines années – et la détérioration des relations internationales ne semblent pas suggérer un tel scénario à court terme.