2025

CYCLOPE

sous la direction de Philippe Chalmin et Yves Jégourel

Les Marchés Mondiaux

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

"Le piétinement sourd
des légions en marche"
José-Maria de Heredia

ECONOMICA

Les Marchés mondiaux

« Le piétinement sourd des légions en marche »

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
Le temps du monde fini commence
(Paul Valéry)

2008
Stupeur et tremblements
(Amélie Nothomb)

2009
Vertiges et déboires
(Paul Bairoch)

2010
La renaissance du Palais d'été
(Pierre-Jean Rémy)

2011
Le printemps des peuples et la malédiction des matières premières

2012
En la forêt de grande instabilité
(Charles d'Orléans)

2013
Crises et châtiments
(Fiodor Mikhaïlovitch Dostoïevski)

2014
Dans le rêve du pavillon rouge
(Ts'ao Hsueh-ch'in)

2015
Pour qui sonne le glas ?
(Ernest Hemingway)

2016
À la recherche des sommets perdus
(Marcel Proust)

2017
Vent d'Est, Vent d'Ouest
(Pearl Buck)

2018
Der Himmel lacht! Die Erde jubilieret
(Jean-Sébastien Bach)

2019
Les illusions perdues
(Honoré de Balzac)

2020
Allegoria ed effetti del Cattivo Governo
(Ambrogio Lorenzetti)

2021
« Cette obscure clarté qui tombe des étoiles »
(Corneille – *Le Cid*)

2022
Le monde d'hier
(Stefan Zweig)

2023
Les Cavaliers de l'Apocalypse
(Apocalypse de Jean)

2024
« Attendre et espérer »
(Alexandre Dumas – *Le comte de Monte Cristo*)

... et donc en 2025
« Le piétinement sourd des légions en marche »
(José-Maria de Heredia)

© Ed. ECONOMICA, 2025
Tous droits de reproduction, d'adaptation et d'exécution
réservés pour tous les pays.

Sommaire

Avant-propos V
Les collaborateurs de CyclOpe 2025 VII
Les entreprises qui ont soutenu CyclOpe en 2025 XV

Première partie : « Le piétinement sourd des légions en marche »..... 1

I Le piétinement sourd des légions en marche 3
II La révolution Trump 2 26
III Les tourments du monde 33
– Chine et Asie en 2024 : promesses compromises, certitudes ébranlées, rééquilibrage confirmé 35
– Inde et sous-continent indien : les dividendes de la *self-reliance* 47
– Amérique du Sud : le neuf et le vieux 57
– Russie : les dividendes de la paix ? 68
– Afrique du Nord et Moyen-Orient : un choc de temporalités. 72
– Afrique subsaharienne : un optimisme prudent 79
IV Les tous petits pas de la gouvernance mondiale..... 91
– La fin de la diplomatie commerciale internationale 92
– Changements climatiques : le thermomètre au-dessus de + 1,5 °C..... 95

Deuxième partie : Les marchés..... 105

Les marchés mondiaux en 2024..... 107
I Les marchés financiers..... 117
II Grains et agriculture tempérée..... 153
III Produits tropicaux 269
IV Produits aquatiques..... 352
V Produits forestiers..... 369
VI Minerais et métaux 411
VII Énergie..... 591
VIII Grands marchés industriels..... 689
IX Services..... 705

PAPREC
LES QUALITÉS DES MATIÈRES RECYCLÉES PAPREC
SONT RECONNUES DANS 65 PAYS
PAPREC
RECYCLAGE

Avant-propos

Le monde vit un temps de rupture géopolitique majeure avec des changements d'alliance qui promettent de redessiner une scène qui avait au fond peu changé depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. De l'Ukraine à Gaza, de la mer de Chine au Soudan, les conflits plus ou moins ouverts illustrent cette montée de tensions, de fractures nouvelles souvent fluctuantes au gré d'alliances improbables. Une certitude s'impose pourtant en ce début de 2025 : à la complexité d'un ensemble de situations géographiques tendues vient maintenant s'ajouter l'imprévisibilité émanant de Washington tant sur le plan géographique que commercial. En ce moment, le monde quelque peu angoissé écoute « le piétinement sourd des légions en marche ».

C'est là le dernier vers de l'un des sonnets les plus célèbres de José-Maria de Heredia, publié en 1893 dans son recueil *Les Trophées*. « La Trebbia » est un sonnet qui relate la célèbre bataille en 218 av. J.-C. durant laquelle les troupes carthaginoises d'Hannibal écrasèrent les légions romaines. Le premier vers « L'aube d'un jour sinistre a blanchi les hauteurs » est tout aussi prémonitoire. Deux ans plus tard, ce sera le désastre de Cannes qui fera trembler Rome.

Mais, aujourd'hui, c'est ce piétinement sourd que l'on entend sur des marchés mondiaux qui reflètent toutes nos incertitudes.

Il y a cinq ans déjà, l'épidémie du covid nous avait contraints à repousser de quelques semaines la publication de CyclOpe. Cette année, c'est l'incertitude trumpienne qui pèse sur nos écrits : des décisions spectaculaires peuvent se trouver inversées quelques jours seulement après la signature de l'un des nombreux *executive orders* dont Donald Trump semble faire son quotidien. Nous avons fait le choix d'arrêter la rédaction de CyclOpe 2025 à la mi-mars alors que tant d'interrogations demeurent, en nous efforçant autant que possible d'offrir des clefs de lecture pour les semaines et les mois qui suivront.

Les matières premières, qu'il s'agisse des terres rares ukrainiennes, du cobalt congolais, du pétrole et du gaz russe, et même, cette année, du cacao africain, restent le fondement de maintes dynamiques économiques, et, reprenant même le titre d'un ouvrage paru à Londres en 1938 : *Raw Materials, War Materials*, de convoitises stratégiques. Plus que jamais, c'est vers elles que marchent les « légions ».

Depuis maintenant près de quarante ans, l'équipe de CyclOpe scrute la dynamique de ces marchés des plus médiatiques aux plus confidentiels. Nous sommes plus de soixante-dix à partager cette passion et, cette année, Alain Bauer, titulaire de la chaire de criminologie au Conservatoire national des arts et métiers, nous a rejoints pour traiter des « matières illicites » qui forment une part de cette économie grise, si prospère en temps de guerre.

Mais CyclOpe n'existe aussi que par le soutien fidèle d'une quarantaine d'entreprises et d'institutions et, cette année, il nous est agréable de souligner le soutien pour la première fois de Kpler, de l'Alliance des Producteurs de Lin, d'Aéroports de Paris, d'InfraVia, de Brioche Pasquier ainsi que de notre ami Oliver Abela.

Yves Jégourel et l'auteur de ces lignes tiennent à remercier les uns et les autres pour avoir rendu possible une fois encore cette merveilleuse aventure cyclopéenne !

Philippe Chalmin
Avril 2025

Les collaborateurs de CyclOpe 2025

Philippe CHALMIN	Président-fondateur de CyclOpe Professeur émérite d'histoire économique à l'université Paris-Dauphine-PSL	Coordination générale « Le piétinement sourd », Agriculture, Marchés dérivés, 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 l'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
Alain BAUER	Professeur, titulaire de la chaire de criminologie du Conservatoire national des arts et métiers (Paris)	Matières illicites
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 »
Claire ANDRÉ LUQUET	Analyste en intelligence minérale	
Théo ARNAUD	Analyste en intelligence minérale	
Marie BOUVET	Analyste en intelligence minérale	
Victoire COLLIGNON	Analyste en intelligence minérale	
Gaétan LEFEBVRE	Analyste en intelligence minérale	
Mathieu LEGUÉRINEL	Analyste en intelligence minérale	
Balde Mamadou BOBO	Ingénieur données	
Paul NOTOM	Analyste en intelligence minérale	
Maxime PICAULT	Géologue métallogéniste	
Anthony POCHON	Géologue métallogéniste	
Éric PUJOL	Analyste en intelligence minérale	
Aurélien REYS	Analyste en intelligence minérale	

Filhet-Allard
MARITIME

Une gamme complète de solutions d'assurances dédiée aux traders, importateurs et exportateurs

EUROPE / AFRIQUE / ASIE

contact@fa-maritime.com - www.fa-maritime.com

Benoît de CARBONNIÈRES	Consultant projets miniers Afrique Expert financier Énergie et Mines auprès de la Commission européenne - 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
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-Benoit DELORON	Consulting Manager – S&P Global Agribusiness Consulting (Washington)	Biocarburants
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
Damien FAGGION	Directeur des achats, Famille Michaud Apiculteurs	Miel
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 de « Géopolitique des matières premières et gestion des risques » à l'INSEEC-PARIS et « visiting professor » au Politecnico de Turin	Changes et taux
Étienne GOETZ	Journaliste, *Les Échos*	Or
Carole GOMEZ	Assistante diplomée en sociologie du sport à l'Institut des sciences du sport de l'université de Lausanne	Sport
Emmanuel GROUTEL	Économiste de la filière forêt et bois, Président de Wood & Logistics Expert (WALE), Membre de la Société des Experts Bois	Bois tempérés
Anne GUILLAUME-GENTIL	Directrice associée de Commodafrica	Afrique
Gérard HORNY	Chroniqueur sur slate.fr	Marchés boursiers
Amandine HOURT	Cheffe de l'unité Elevage, Direction Marchés, études et prospective, FranceAgriMer	Sisal et fibres dures

VOS GRANDES IDÉES DEVRAIENT

ET VONT

SE RÉALISER

AVEC NOUS À VOS CÔTÉS

GTR 2024 Leaders in Trade

Récompensés par le **prix de la meilleure banque de financement du commerce des matières premières*,** nous nous appuyons sur notre expertise dans le secteur des matières premières et de notre présence mondiale pour vous offrir des solutions durables qui soutiennent votre croissance.

SOCIETE GENERALE

CONSEIL • BANQUE D'INVESTISSEMENT • FINANCEMENT • BANQUE TRANSACTIONNELLE
MÉTIER TITRES • MARCHÉ • MOBILITÉ ET GESTION DE FLOTTE AUTOMOBILE

*Attribué par GTR pour 2024.
Société Générale, S.A. au capital de 1 000 395 971,25 € - Siège social : 29, bd Haussmann, 75009 PARIS. Mars 2025.

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	Chargé de mission technique et réglementaire, Institut national de l'origine et de la qualité (INAO)	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, poivre, acier
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 *FruiTrop* (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	Ferrailles
Évariste NYOUKI	Responsable recherche économique de ENGIE Global Markets	Gaz naturel
Soriya PALETOU	Chargée d'études économiques, FranceAgriMer	Laine
Olivia PARODI	Chargée d'études économiques, FranceAgriMer	Lait et produits laitiers
Guillaume PERRET	Directeur, Perret Associates (Londres, Royaume-Uni)	Dérivés de charbon, Minerai de fer et Acier, Certificats CO_2, Fret

Francis PERRIN	*Senior Fellow* au *Policy Center for the New South* (Rabat) et directeur de recherche à l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)	Pétrole, Produits pétroliers
Christian de PERTHUIS	Professeur 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 (*London School of Economics*), au *Potsdam Institute for Climate Impact Research* 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 *La Tribune*, Auteur, éditeur	Russie
Juliette ROUESSARD	Journaliste	Jute, café, cacao, épices
Manon SAILLEY	Responsable des études économiques, Avril	Oléoprotéagineux
Jean-Paul SIMIER	Économiste, spécialiste des marchés agricoles et agroalimentaires, Crédit Agricole	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 *World Senior Tourism Congress*	Transport aérien, Tourisme
Tancrède VOITURIEZ	Chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)	Produits tropicaux, Huile de palme

---

Et toute l'équipe qui permet à CyclOpe de paraître en temps et en heure !

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	Adaptation
Claire MABILLE	Couverture
Isabelle TANGUY	Secrétariat et presse
Et toute l'équipe d'Economica	

CERCLE CYCLOPE

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

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

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

Les marchés traités

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

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

Les services

1. Le Cercle

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

2. Le Cercle des Experts

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

2. La Synthèse

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

CyclOpe est une société d'études spécialisée dans l'analyse des marchés mondiaux des matières premières : elle tire son nom du « Rapport CyclOpe » publié chaque année depuis 1985.
CyclOpe est dirigé par ***Philippe CHALMIN***, professeur à Paris-Dauphine, consultant auprès d'organismes internationaux (OCDE, CEE, CNUCED). L'équipe de CyclOpe est constituée d'une soixantaine de spécialistes dans le monde entier.

Conditions d'adhésion

Il existe deux formules d'adhésion au Cercle CyclOpe :

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

Cette adhésion peut être imputée en abonnements ou frais d'études. Elle est fixée à **4 100 euros HT**.

2. ***L'abonnement à la synthèse mensuelle, est fixé à* 1 630 euros HT.**

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

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

Les entreprises et institutions qui ont soutenu CyclOpe 2025

Aéroports de Paris (ADP)
AGL
Alliance for European Flax-Linen and Hemp
Audacia
BIC-BRED
BIR
BRGM
Brioche Pasquier
BRS
CGB
CIS
Crédit Agricole-CIB
Crédit Agricole-SA
Cristalco
EDF
ENGIE Global Markets
Eramet
Filhet-Allard Maritime
Fives
Groupe Avril
Haropa Port
InfraVia
Kpler
Lambert Commodities
Les Échos
Mambo
OCP
Paprec
Rexecode
Société Générale
S&P Global
Sucres et Denrées
Tereos
TotalEnergies
Touton
Trade Data Monitor
Trafigura
Transamine
Unigrains
Union InVivo
Veolia
Vivescia
et Oliver Abela

Les Echos,

Le leader de l'actualité économique en France

Illimité
site web et application

Journal numérique
en avant-première

Newsletters premium
pour les abonnés

Abonnez-vous

abonnement.lesechos.fr

Les Echos
Prenez un temps d'avance

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

OFREMI
OBSERVATOIRE FRANÇAIS DES RESSOURCES MINÉRALES POUR LES FILIÈRES INDUSTRIELLES

Comme en témoigne le récent Critical Raw Materials Act de la commission Européenne, la sécurisation des approvisionnements en ressources minérales constitue un enjeu stratégique majeur pour l'industrie française et européenne. C'est pourquoi le BRGM mobilise ses compétences pour contribuer à une gestion responsable des matières minérales. Il mène, notamment en lien avec l'Ofremi (l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles), des travaux d'intelligence économique et d'analyse de risques et de vulnérabilités en appui aux politiques publiques, à la diplomatie des ressources et aux industriels.

Analyses de criticité

Au sein de l'Ofremi, le BRGM réalise des études pour évaluer les risques d'approvisionnements de la France en substances minérales, au regard de leur importance économique ou stratégique pour l'industrie. Le BRGM partage également sa vision sur ces sujets en contribuant aux réflexions européennes et aux travaux du World Materials Forum.

Suivi et analyse des marchés mondiaux des métaux

Le BRGM assure un suivi des marchés des métaux et publie régulièrement des analyses couvrant les acteurs, l'environnement socio-politique des marchés, et l'évolution du prix des métaux. Il étudie par ailleurs les perspectives d'évolution de ces thèmes à court et moyen termes.

Analyses des filières industrielles

En collaboration avec ses partenaires de l'Ofremi, le BRGM met à disposition une veille stratégique, économique et technique des chaines mondiales d'approvisionnement et des besoins actuels et futurs des secteurs industriels. Il analyse également les risques économiques, sociaux, géopolitiques et environnementaux liés aux chaines de valeur industrielles consommatrices de métaux et matériaux.

Approvisionnements et mines responsables

En intégrant notamment des approches d'analyse du cycle de vie et de prise en compte des impacts environnementaux, le BRGM contribue aux travaux en cours autour des préoccupations ESG (Environnement social et de bonne gouvernance) associées aux activités extractives et aux filières avals.

Publications

Retrouvez les travaux d'intelligence minérale du BRGM sur www.mineralinfo.fr.

Siège - Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : (33) 2 38 64 34 34

www.brgm.fr

Métaux « électriques » :
retour sur terre

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.

L'essentiel des batteries Li-ion sur le marché aujourd'hui 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. La technologie dite NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt), dont la cathode contient lithium, cobalt, nickel et manganèse, a dominé les développements technologiques et industriels dans le monde et en Europe ces dernières années.

D'autres technologies de batteries sont en train de prendre des parts de marché, notamment en Europe, telles que les batteries LFP (Lithium-Fer-Phosphate). D'autres sont encore en phase de développement, mais devraient apparaître dans le paysage industriel du stockage d'énergie à horizon d'une quinzaine d'années, comme les batteries sodium-ion. Leur développement aura, à terme, un impact sur la demande en métaux utilisés jusque-là par le secteur, ainsi que sur les technologies de recyclage à mettre en place.

Cobalt (Co)

Le cobalt joue un rôle essentiel dans le stockage de l'énergie et entre dans la composition de trois types de cathodes de batteries Li-ion : Lithium Cobalt Oxyde (LCO), Lithium Nickel Cobalt Aluminium (NCA) et Nickel Manganèse Cobalt (NMC). Son incorporation permet d'accroître la densité énergétique, d'améliorer les performances et d'augmenter la stabilité ainsi que la longévité des batteries.

Selon le Cobalt Institute, en 2023, 45 % de la consommation mondiale de cobalt étaient destinés aux batteries rechargeables des véhicules électriques, tandis que 26 % étaient utilisés dans les appareils électroniques du quotidien (téléphones, tablettes, ordinateurs portables), représentant un total de 71 %. Les autres marchés du cobalt sont, par ordre d'importance : les superalliages (9 %), les carbures cémentés (4 %), les pigments (3 %), les catalyseurs au cobalt (3 %). Le cobalt est également utilisé dans diverses autres applications (10 %), notamment les aimants permanents samarium-cobalt, les pneumatiques, ainsi que les agents séchants employés dans l'industrie chimique et les revêtements.

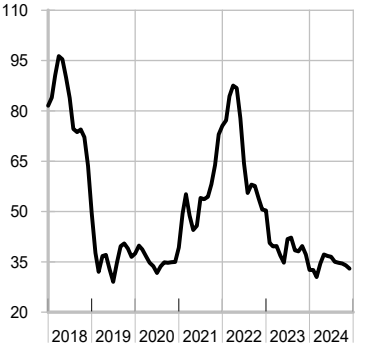
La plupart des experts pronostiquent une forte croissance de la consommation mondiale de cobalt au cours deux prochaines décennies, estimée entre 7 % et 10 % par an, principalement portée par les besoins des secteurs du stockage de l'énergie et des mobilités électriques. La part du secteur des batteries dans la demande totale de cobalt devrait atteindre 80 % à un proche horizon. Cependant, ces estimations reposent sur l'hypothèse de croissance continue du marché du véhicule électrique (VE) et des batteries Li-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), de nombreux constructeurs automobiles – comme Tesla ou le chinois BYD – se sont récemment tournés vers la production à grande échelle de VE intégrant des batteries LFP fonctionnant sans cobalt. De même, le marché des appareils portables est resté sous pression en 2023, enregistrant, selon le *Cobalt Institute*, une deuxième année consécutive de recul. Les prix ont également chuté. À plus long terme et même par à-coups, la croissance du marché des VE et le développement des technologies de réseau 5G devraient se poursuivre, soutenant ainsi l'expansion de la demande en cobalt.

Après être tombé sous les $ 35/kg à la toute fin des années 2010, le prix du cobalt métal sur le marché européen (qualité *alloy grade cut ca-*

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

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production minière			
	144 000	142 000	165 000	197 000	238 000	290 000
Australie	5 740	5 630	5 295	5 790	5 220	3 600
Canada	3 340	3 690	4 361	3 060	4 220	4 500
Chine	2 500	2 200	2 200			
Cuba	3 800	3 800	4 000	3 700	3 300	3 500
États-Unis	500	600	650	500	500	300
Indonésie		1 100	2 700	9 600	19 000	28 000
Madagascar	3 400	850	2 800	3 500	4 000	2 600
Maroc	2 300	2 300	2 300			
Nouvelle-Calédonie				2 000	2 570	1 500
Papousie-Nouv. Guinée	2 910	2 940	2 953	2 990	3 070	2 800
Philippines	5 100	4 500	3 600	3 900	3 800	3 800
Rép. dém. du Congo	100 000	98 000	119 000	144 000	175 000	220 000
Russie	6 300	9 000	8 000	9 200	8 700	8 700
Turquie			2 400	2 100	2 500	2 700
Autres pays	6 320	7 640	4 567	6 600	6 080	6 200

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

thode 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 à la suite, notamment, de l'annonce de Tesla sur ses nouvelles orientations stratégiques concernant les batteries LFP, et d'un recul de la demande des industries à forte intensité énergétique. Cette tendance baissière s'est confirmée avec des prix qui sont restés sous les $ 40/kg durant la majeure partie des deux années écoulées. L'offre minière ayant augmenté sensiblement ces dernières années, le prix devrait se maintenir relativement bas à court terme, avant un prochain sursaut.

La production minière mondiale de cobalt en 2024 s'est élevée à 290 000 tonnes, selon les données préliminaires de l'*United States Geological Survey* (USGS), soit une hausse de 21,8 % par rapport à l'année précédente. La très grande majorité de cette offre provient de la récupération de cobalt comme coproduit ou sous-produit de l'extraction du cuivre et du nickel. Les trois-quarts de la production minière mondiale sont issus de la République démocratique du Congo (RDC) et près de 10 % d'Indonésie, dont les volumes extraits sont en forte augmentation depuis deux ans.

La production mondiale de cobalt est, pour l'essentiel, assurée par quelques grands groupes industriels. Plusieurs compagnies chinoises sont ainsi devenues des acteurs incontournables du marché grâce aux importants investissements réalisés ces dernières années, en RDC et en Indonésie. Il s'agit en particulier de Zhejiang Huayou Cobalt (qui fabrique aussi des matériaux actifs de batteries), ainsi que Jinchuan Group Ltd. et, surtout, China Molybdenum Co. Ltd. (CMCO) qui est devenu, en 2023, le premier producteur de cobalt dans le monde (55 500 tonnes). L'entreprise chinoise a renforcé sa position en 2024 en doublant sa production (114 000 tonnes). Cette augmentation significative est principalement attribuée aux performances de ses deux principales mines en RDC. Elle y opère la mine de Tenke Fungurume, qui représente environ un dixième de l'offre primaire de cobalt mondial, et pour laquelle les différends avec le gouvernement congolais qui accusait l'entreprise de sous-estimer les réserves semblent désormais résolus. Elle est également propriétaire du gisement de Kisanfu, qui est entré en production 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 80 % du cobalt mondial, et en est le plus grand consommateur, avec près de 87 % de sa consommation intérieure destinée à l'industrie des batteries Li-ion.

Longtemps principal acteur de ce marché, la multinationale suisse Glencore, spécialisée dans le négoce de matières premières, est toujours très active dans le domaine minier. Selon *S&P Capital IQ*, ses actifs sur le cobalt équivalaient à environ un sixième de l'offre primaire mondiale en 2023, mais les résultats du groupe indiquent un recul de 8 % de la production en 2024, avec 38 200 tonnes produites. En RDC, Glencore contrôle la mine de Kamoto/Katanga et celle de Mutanda, où elle a récemment relancé ses opérations après les avoir suspendues en 2019. À cela s'ajoutent la mine canadienne de Sudbury, qui a été affectée par des arrêts de maintenance en 2024, et la celle australienne de Murrin Murrin.

Ces dernières années, plusieurs projets ont été initiés dans le reste du monde pour trouver des alternatives et soutenir le développement de filières de production de batteries hors Chine. C'est le cas notamment en Indonésie. Le pays, qui ne produisait pas de cobalt en 2019, participe aujourd'hui à près d'un dixième de la production mondiale. Cinq unités de transformation HPAL (*High Pressure Acid Leaching*) – un procédé permettant de produire à la fois du nickel et du cobalt sous forme d'hydroxydes, directement utilisables pour la fabrication de batteries – ont été mises en service par des entreprises chinoises. La société chinoise Ningbo Lygend a également débuté, en 2023, la production de sulfates de cobalt sur l'île d'Obi. Selon le *Cobalt Institute*, la production indonésienne devrait poursuivre son développement pour représenter 16 % de la production mondiale à horizon 2030.

D'autres projets sont aussi lancés ailleurs, comme en Australie avec la compagnie Cobalt Blue et son projet Broken Hill, où seule la construction d'une raffinerie a été conservée dans le projet initial. La mine, qui avait été désignée par le gouvernement comme « projet majeur » et avait reçu une subvention fédérale de 15 millions de dollars australiens, a été mise en veilleuse. En Amérique du Nord, des discussions ont dernièrement eu lieu pour une possible relance d'une raffinerie de cobalt par l'entreprise First Cobalt, et des projets d'exploration sont en cours dans l'Idaho. Plusieurs sources ont également rapporté que les États-Unis envisageaient d'ajouter du cobalt à leurs stocks stratégiques de défense. Par ailleurs, l'armée américaine a récemment annoncé une subvention de $ 20 millions pour soutenir la construction d'une raffinerie de cobalt au Canada. De son côté, la Chilean Cobalt Corp. a indiqué avoir reçu une lettre d'intérêt de Eximbank (la banque d'import-export des États-Unis), soulignant ainsi l'intérêt croissant de Washington pour sécuriser son approvisionnement en cobalt. La Zambie cherche également à attirer des investissements étrangers afin de revitaliser le secteur du cobalt qu'elle produit en tant que sous-produit du cuivre. En Finlande, la compagnie Terrafame envisagerait également de produire annuellement 5 000 tonnes de cobalt de la mine de Sotkamo (elle a aussi conclu un accord avec Stellantis en janvier 2023 pour l'approvisionnement en sulfates de nickel). Néanmoins, la baisse des prix observée depuis mi 2022 semble avoir freiné les investisseurs, surtout que de nombreux projets de production de nickel de qualité « batterie » sont actuellement en développement en Indonésie et devraient produire d'importantes quantités de cobalt en sous-produit, faisant concurrence aux différents projets cités ci-dessus.

Dans le domaine de l'amélioration de la traçabilité de l'approvisionnement du cobalt de RDC, via les filières artisanales, plusieurs initiatives sont en cours, dont le projet Fair Cobalt Alliance de Glencore, auquel sont associés Tesla, LG Energy Solution et Northvolt, ou encore le partenariat entre la Gécamines et Trafigura malgré les difficultés rencontrées par les différentes parties pour pérenniser cette initiative, notamment en raison de divergences stratégiques et de préoccupations concernant la gouvernance et la souveraineté minière en RDC.

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 confidentiel du graphite synthétique. La consommation mondiale de graphite est ainsi estimée entre 3,5 Mt et 4 Mt. Celle de graphite synthétique atteindrait environ 2,9 Mt, tandis que celle de graphite naturel approcherait 1,4 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 (environ 10 % chacune).

Il est toutefois difficile de connaître les parts respectives du graphite naturel et synthétique pour chaque application. En 2030, d'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la demande mondiale de graphite serait de 10,4 millions de tonnes (Mt) et atteindrait 16 Mt en 2040. La demande mondiale de graphite en 2030 doublerait donc par rapport à 2023.

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 2040. En 2024, la part de la consommation du graphite synthétique et naturel par le secteur des batteries est estimée à 33 %. Ce secteur contribuerait à 65 % de la demande mondiale en 2040, toujours selon l'AIE.

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 une meilleure conductivité et un meilleur rendement, améliorant la performance de l'anode. La Chine produit 98 % du graphite sphérique non revêtu mondial. Une partie de cette production – qui est concentrée dans la province du Shandong – est consommée dans le pays par les producteurs d'anodes de batteries Li-ion. Le reste est vendu à des fabricants de batteries et des négociants japonais ou sud-coréens qui procèdent ensuite au revêtement des particules 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 de 90 % en Chine, en raison d'une maîtrise technique, 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 par une couche de carbone ou non), comme Novonix ou Syrah aux États-Unis ou encore NMG au Canada, 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 3,8 Mt en 2023, 4,6 Mt de capacités supplémentaires sont en construction actuellement dans le monde, et ces dernières pourraient même atteindre 12,5 Mt en 2030. La demande en graphite pour ce secteur serait ainsi multipliée par dix ou par quinze sur les dix prochaines années.

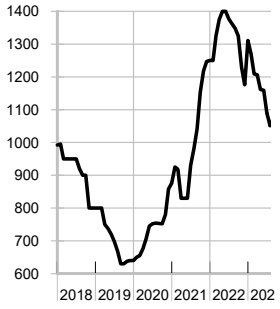
La sidérurgie demeure toutefois l'usage majoritaire du graphite, en particulier synthétique, avec 60 % destinés à la production d'électrodes pour les fours électriques des installations sidérurgiques. Les électrodes sont utilisées dans de nombreuses industries, dont 60 % pour la fabrication d'acier, 25 % 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. D'ici 2040, la demande en graphite pour le secteur métallurgique est estimée entre 3,4 Mt et 3,8 Mt. La consommation du secteur métallurgique serait ainsi équivalente à la production actuelle de graphite tous secteurs confondus, selon l'AIE. L'industrie des réfractaires absorbe environ 40 % de la production mondiale de graphite naturel. La fabrication de briques de fours et creusets utilise principalement des paillettes de graphite de haute pureté (>85 % C) et de moyenne à grande taille (150 à 300 µm), dont la morphologie contribue à améliorer la cohésion des briques.

En 2024, la production mondiale de graphite se situerait entre 3,5 Mt et 4 Mt (70 % synthé-

Graphite naturel
(en tonnes de métal raffiné)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production mondiale	**1 100 000**	**966 000**	**1 130 000**	**1 680 000**	**1 530 000**	**1 600 000**
Allemagne	800	300	250	250	180	170
Autriche	1 000	500	500	500	500	500
Brésil	96 000	63 600	82 000	72 000	66 300	68 000
Canada	11 000	8 000	12 000	13 000	5 470	20 000
Chine	700 000	762 000	820 000	1 210 000	1 210 000	1 270 000
Corée du Nord	6 000	8 100	8 100	8 100	8 100	8 100
Corée du Sud			10 500	23 800	9 620	9 600
Inde	35 000	6 000	7 000	11 000	25 600	27 800
Madagascar	48 000	20 900	70 000	130 000	63 000	89 000
Mexique	9 000	3 300	2 100	2 000	1 300	900
Mozambique	107 000	28 000	72 000	166 000	98 000	75 000
Norvège	16 000	12 000	6 290	10 380	6 480	7 000
Ouzbékistan	100	100	110			
Russie	25 100	25 000	15 000	16 000	15 000	20 000
Sri Lanka	4 000	4 000	3 000	2 600	3 000	3 300
Tanzanie	150		0	6 120	13 200	25 000
Turquie	2 000	2 500	2 700	2 800	2 800	3 100
Ukraine	20 000	16 000	10 000	1 000	1 670	1 200
Vietnam	5 000	5 000	5 000	500	2 500	2 000

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



(Source : Mineral Commodity Sum

tique, 30 % 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 de nombreuses mines de graphite, situées principalement au nord du territoire, dans les provinces de Heilongjiang, de Shandong et en Mongolie intérieure. Si la production chinoise est très difficile à quantifier avec précision, l'USGS estime une production de 1,27 Mt en 2024, soit 79 % de la production mondiale. Ces volumes seraient bien en deçà des capacités de production du pays qui se situeraient autour de 1,7 Mt. Le deuxième producteur minier, loin derrière la Chine, est Madagascar (89 000 tonnes) ; il est suivi du Mozambique (75 000 tonnes) et du Brésil (68 000 tonnes). Après une année 2020 caractérisée par la pandémie et les fermetures de mines et d'usines, et une année 2022 marquée par la guerre en Ukraine (impactant à la baisse les productions ukrainienne et russe), la production de graphite naturel a connu de fortes variations ces dernières années. Les premières estimations de l'USGS prévoient une hausse de la production de 4,6 % pour l'année 2024, par rapport à 2023, pour atteindre 1,6 Mt, en raison notamment de l'ouverture de deux nouvelles mines, l'une en Tanzanie (Lindi Jumbo), l'autre au Brésil (Santa Cruz). Le secteur des batteries pour véhicules électriques est considéré comme le principal consommateur de graphite à partir de 2030. Pour ses besoins en graphite naturel, si les paillettes de petite taille sont privilégiées, la tension sur la demande pourrait être susceptible d'étendre les besoins en graphite naturel aux paillettes de grande taille, quitte à les broyer, au détriment d'autres applications requérant de grandes paillettes.

Le graphite synthétique est, quant à lui, issu du traitement à haute température d'un précurseur carboné amorphe. Ce précurseur dérive du pétrole, du charbon ou de matières organiques diverses et il s'agit typiquement de coke de pétrole. 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. La production mondiale est de plus de 2,8 Mt en 2024, et largement dominée par la Chine avec quasiment les trois quarts du total produit, loin devant le Japon et les États-Unis. La production de needle coke et de regular coke, raffinés à partir de pet coke et nécessaires à la production de graphite synthétique de grade « batterie », est centrée en Chine, aux États-Unis et au Royaume-Uni.

Les réserves mondiales de graphite sont d'environ 290 Mt, selon l'USGS, et sont localisées majoritairement en Chine (81 Mt), au Brésil (74 Mt) et à Madagascar (27 Mt). Les trois autres pays ayant des réserves importantes sont le Mozambique (25 Mt), la Tanzanie (18 Mt) et la Russie (14 Mt).

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Compte tenu de la grande variété des produits graphiteux échangés, il est difficile de donner un prix de référence. Néanmoins, le prix pour une tonne de paillettes moyennes de graphite naturel, ayant une teneur comprise entre 94 % et 97 % de carbone, a été de $ 1 040/t en 2024, contre $ 1 149/t en 2023 et $ 1 318/t en 2022. Le prix du graphite synthétique oscille toujours dans une fourchette large entre $ 5 000/t et $ 15 000/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 jouent généralement sur le fait que celui-ci soit 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 donc 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 Recources, 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, plusieurs usines sont aussi en cours de construction : le projet Vidalia, développé par Syrah en Louisiane, qui produira dans un premier temps 11 250 tonnes par an de matériaux actifs d'anodes à partir de la fin de l'année 2023, puis 45 kt à terme ; mais aussi Pyrotek, Urbix Resources, Westwater Resources, Epsilon Advanced Materials, etc. L'Europe manque cruellement de graphite et d'anodes pour batteries, ce qui la rend totalement dépendante de la Chine, à tel point qu'elle ne devrait produire que 1 % de l'offre mondiale d'ici à 2030, même si plusieurs annonces de projets ont été faites récemment (Talga Resources en Suède, Putailai en Suède, Vianode en Norvège, etc.).

Lithium (Li)

Toutes les valeurs de production et réserves données dans cette section le seront sous forme de lithium métal.

Le marché du lithium a connu une croissance fulgurante au cours de la dernière décennie, alimentée par l'essor des technologies vertes et la demande croissante en batteries rechargeables. En raison de ses propriétés chimiques uniques, le lithium s'avère un composant majeur des batteries pour les deux prochaines décennies, en l'absence d'innovation disruptive d'importance. Cette situation est accentuée par les prévisions de développement massif de la mobilité électrique, encouragées par des réglementations internationales incitatives, comme contraignantes.

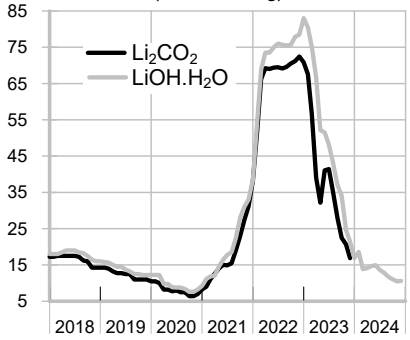
Ainsi, l'Union européenne (UE) s'est engagée dans une transition énergétique ambitieuse, avec l'interdiction des véhicules essence et diesel à partir de 2035. Cette décision, couplée à d'autres mesures incitatives, devrait générer une demande en lithium métal d'environ 100 000 tonnes en Europe à l'horizon 2030. Or, la production européenne actuelle est quasi inexistante, ce qui soulève des questions d'approvisionnement et de dépendance vis-à-vis des pays étrangers.

Le secteur des batteries devrait ainsi atteindre plus de 95 % des usages du lithium d'ici 2030, sachant qu'en 2024, déjà, 89 % du lithium produit a servi à produire des batteries. Jusqu'ici, les usages « hors batteries » du lithium étaient relativement diversifiés, principalement pour la fabrication de verres et céramiques, de graisses lubrifiantes

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

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production mondiale			
	86 000	**82 500**	**107 000**	**146 000**	**204 000**	**240 000**
Argentine	6 300	5 900	5 970	6 590	8 630	18 000
Australie	45 000	39 700	55 300	74 700	91 700	88 000
Brésil	2 400	1 420	1 700	2 630	5 260	10 000
Canada	200		0	520	3 240	4 300
Chili	19 300	21 500	28 300	38 000	41 400	49 000
Chine	10 800	13 300	14 000	22 600	35 700	41 000
Namibie					2 700	2 700
Portugal	900	348	900	380	380	380
Zimbabwe	1200	417	710	1030	14900	22000

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

et pour la métallurgie. La croissance de ces demandes est toutefois négligeable en comparaison des besoins attendus pour les batteries.

Le développement des batteries Li-ion a révolutionné le marché du lithium en requérant des produits de très haute pureté, de qualité « batterie », contrairement aux autres usages moins exigeants sur la pureté du lithium. Le lithium est utilisé sous deux formes principales dans les cathodes des batteries : le carbonate de lithium Li_2CO_3, et l'hydroxyde de lithium LiOH. Le premier est majoritairement utilisé dans les batteries de type LFP (Lithium, Fer, Phosphate) et les batteries NMC (Nickel, Manganèse, Cobalt), moins riches en nickel. Les batteries NMC, plus riches en nickel, recourent plutôt au lithium sous forme d'hydroxyde. Les chimies pouvant changer assez rapidement, notamment avec le développement des batteries LFP aux dépens des NMC, plusieurs installations de transformation permettent de passer d'une forme du lithium à une autre, afin de répondre à la demande du marché à un instant t.

Selon l'USGS, la production minière en 2024 aurait été de 240 000 tonnes de lithium métal. Rappelons qu'en 2023, la production mondiale était de l'ordre de 204 000 tonnes, ce qui correspond à une augmentation d'une année sur l'autre de 18 % environ. Les réserves évaluées à ce jour sont de 30 Mt de lithium métal, toujours d'après l'USGS, principalement localisées au Chili (9,3 Mt) et en Australie (7 Mt). Les ressources mondiales identifiées seraient de l'ordre de 115 Mt. Ces ressources sont principalement situées dans le « triangle du lithium », une région où se trouvent de nombreux salars (23 Mt en Argentine, 23 Mt en Bolivie, 11 Mt au Chili). La transformation et le raffinage du lithium sont, quant à eux, majoritairement réalisés en Chine, notamment alimentée par la production australienne ou sud-américaine. Si le processus de production du lithium à partir des salars permet d'obtenir du carbonate, l'hydroxyde est, quant à lui, produit à partir de concentré de spodumène ou d'une transformation supplémentaire du carbonate.

Ces dernières années, les prix du lithium ont été soumis à d'importantes fluctuations, oscillant entre des fondamentaux solides de la demande à long terme et des événements perturbateurs ponctuels, reflétant ainsi la nature encore peu mature de l'industrie. En 2023, une baisse significative des prix des produits dérivés du lithium a ainsi été observée, principalement due aux craintes d'une offre excédentaire à court terme, à l'expiration du programme de subventions du gouvernement chinois pour l'achat de véhicules électriques après une décennie et à des ventes mondiales de véhicules électriques inférieures aux attentes. Par conséquent, le prix du carbonate de lithium livré aux États-Unis a chuté de 30 % entre 2022 et 2023, tandis que celui de l'hydroxyde de lithium monohydraté a diminué de 37 % sur la même période. Les prix se sont maintenus à un niveau bas en 2024, rendant les projets aux coûts d'exploitations les plus élevés non rentables.

L'année 2023 a, malgré le maintien à un niveau bas du prix du lithium, globalement été propice aux investissements dans l'exploration et l'exploitation du lithium. Le budget mondial dédié à l'exploration de lithium a considérablement augmenté entre 2023 et 2024 en passant d'environ $ 830 millions à $ 1,1 milliard, selon S&P Global.

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 construction de deux raffineries destinées à la production d'hydroxyde de lithium de qualité batterie que ce phénomène a pu être visible. Ce sont les raffineries de Kwinana et de Kemerton. En 2024, l'Australie a produit 88 000 tonnes de lithium métal, d'après l'USGS.

Le Chili (49 000 tonnes) et l'Argentine (18 000 tonnes) sont historiquement de grands producteurs mondiaux de lithium, provenant des salars andins. Les principaux exploitants sont Albemarle et SQM au Chili, ainsi que la compagnie Arcadium Lithium en Argentine. Il est à noter l'annonce du rachat d'Arcadium Lithium par le géant minier Rio Tinto, validé en ce début d'année 2025 par le conseil d'administration. Cet accord permettra à Rio Tinto de devenir le troisième acteur mondial du lithium, derrière Albemarle et SQM. 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 des paramètres cruciaux pour la pérennité de ces projets. Au-delà des extensions des productions existantes, de nombreux projets se développent, notamment en Argentine. Il est à noter que celui de Cauchari-Olaroz, détenu par le géant chinois Ganfeng Lithium, ainsi que par les compagnies Lithium Americas et Jujuy Energia y Mineria, est entré en production en 2023. De plus, le projet Centenario Ratones, développé par le groupe français Eramet, utilise une technologie plus efficace (DLE : *Direct Lithium Extraction*) que l'évaporation traditionnellement pratiquée. Ce dernier projet a produit ses premières quantités de lithium qualité batterie fin 2024.

Un autre acteur majeur du marché du lithium est la Chine. Il s'agit du troisième extracteur mondial, ayant produit l'équivalent de 41 000 tonnes de lithium métal en 2024, toujours selon l'USGS. Cette production est réalisée à la fois à partir de roches dures, notamment du spodumène, mais également à partir de salars localisés principalement dans les hauts plateaux du Qinghai, au centre du pays. Mais la Chine est surtout dominante dans le processus de purification et transformation du lithium, notamment pour obtenir la qualité batterie. Environ 70 % du lithium qualité batterie dans le monde en 2024 l'est en Chine, tant sous forme de carbonate que d'hydroxyde.

Les autres acteurs mondiaux sont mineurs aujourd'hui, mais ont vocation à développer leurs capacités de production. C'est le cas de l'Amérique du Nord avec de nombreux projets d'extraction de roche dure au Canada ou de saumures aux États-Unis. Ces derniers comptent également sur le gisement de Thacker Pass, qui prévoit la production de lithium à partir d'argiles lithinifères. Le Brésil possède aussi des réserves de lithium (1,2 Mt), ainsi que des mines, notamment le projet de Grota de Cirilo en production depuis 2023. Le potentiel africain est également avéré, en particulier au Zimbabwe qui a fortement augmenté son offre depuis 2023 grâce à l'ouverture de plusieurs mines à l'aide de capitaux chinois. L'autre grand acteur africain est le Mali, qui a mis en production deux mines de spodumène (Goulamina et Bougouni) fin 2024-début 2025, là encore grâce à l'apport de capitaux chinois. L'Europe est aujourd'hui quasiment complètement dépendante de l'importation de lithium, mais plusieurs projets sont en développement pour réduire sa dépendance et répondre en partie aux besoins des gigafactories qui poussent sur le continent. Les projets européens les plus avancés sont ceux de Keliber en Finlande (extraction de spodumène et transformation en hydroxyde de lithium) et Vulcan Energy en Allemagne (extraction du lithium à partir des saumures géothermales à l'aide de la DLE, puis transformation en hydroxyde). Il existe d'autres projets d'extraction plus ou moins avancés et souvent intégrés (c'est-à-dire que la transformation du lithium est réalisée sur place ou directement à partir de la production de la mine) pour obtenir du lithium de qualité batterie, la plupart du temps sous forme d'hydroxyde (Emili en France, San Jose en Espagne, Cinovec en République tchèque, Zinnwald en Allemagne, Wolfsberg en Autriche). À cela s'ajoute le projet d'extraction au Portugal de Barroso, ainsi que les projets français d'extraction de lithium à partir de saumures géothermales portés par Lithium de France et Eramet/Électricité de Strasbourg. L'Europe compte également plusieurs projets de transformation seule, afin de passer de la forme carbonate à la forme hydroxyde, ou alors permettant d'augmenter la pureté pour d'atteindre la qualité batterie. Enfin, il est à noter la présence du gisement de Jadar en Serbie (143,5 Mt), qui subit une forte opposition locale et dont le gouvernement serbe avait annulé les permis, avant de les réautoriser en 2024.

En parallèle de ces évolutions, les enjeux liés à la disponibilité et aux méthodes durables d'extraction du lithium gagnent en importance dans les stratégies d'approvisionnement des acteurs de l'industrie. De plus, le recours aux sources secondaires pour l'approvisionnement en lithium est appelé à se développer significativement. La mise en place de filières de recyclage du lithium à partir des batteries en fin de vie constitue un axe majeur de recherche et de développement industriel, particulièrement en Europe, dans le cadre des politiques visant à sécuriser les approvision-

nements de ce métal crucial. Toutefois, la chute des prix du lithium a mis à mal cette stratégie, incitant certaines compagnies à mettre leur projet de recyclage en pause, comme Eramet en France, par exemple.

Manganèse (Mn)

Lors de son extraction des mines, le manganèse est usuellement scindé en trois catégories, selon sa teneur : les minerais riches (Mn>44 %), les minerais intermédiaires (30 %<Mn<44 %) et les minerais pauvres (Mn<30 %). La qualité dite métallurgique, qui représente la plus grande partie des concentrés miniers, contient généralement un minimum de 35 % de Mn et des teneurs variables en éléments traces (Fe, Al, As, P, etc.) qui vont impacter ses caractéristiques finales. Le manganèse métallurgique est destiné à la fabrication d'alliages (aciers, fonte, etc.) qui représente 90 % des usages de ce métal. Dans la fabrication des alliages, le manganèse joue un double rôle, puisqu'un tiers de la demande dans ce secteur concerne la désulfuration et la désoxydation lors de la fabrication de la fonte et de son affinage. Le manganèse ayant une importante affinité avec le 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. 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 pour les secteurs du bâtiment et de l'automobile pour leurs propriétés de dureté, d'élasticité, de résistance à l'usure, à la corrosion et à l'abrasion. Les minerais basse teneur (<30 % Mn) sont ajoutés lors de la production de fonte. En 2024, environ 16,3 Mt de silicomanganèse ont été produits, soit une baisse de 12 % par rapport à 2023. Le principal producteur de silicomanganèse est, de loin, la Chine avec 11 Mt, soit 68 % de la production totale, suivi de l'Inde (14 %) et de la Russie (3 %). En 2024, la production de ferromanganèse (ferromanganèse raffiné et ferromanganèse à haute teneur en carbone) était de 5,4 Mt, dominée principalement par la Chine, suivie de l'Inde, du Japon, de la Russie et de la Norvège. Le conflit russo-ukrainien a entraîné la suspension temporaire de la production de ferroalliages en Ukraine, notamment à l'usine de Nikopol Ferroalloy Plant (NZF) et à Zaporizhzhia depuis novembre 2023, entraînant une baisse d'approvisionnement en alliages pour l'Europe. En conséquence, au début de 2024, les exportations de ferroalliages ont atteint un niveau historiquement bas, frôlant l'arrêt total. En mai 2024, la production a repris de manière très partielle. La production de ferroalliages de manganèse s'est établie à 105 kt en 2024, soit une baisse de 50 % par rapport à 2023.

La qualité batterie affiche des teneurs situées entre 44 % et 54 % de Mn. Les débouchés du manganèse de qualité chimique et de qualité batterie (environ 10 % des usages), soit sous forme métallique ou de composés chimiques manganésifères, sont les alliages spéciaux, le secteur des piles et batteries, et la chimie. Cependant, chaque usage demande une forme et une qualité spécifiques du manganèse. Les composés chimiques de manganèse comprennent plusieurs formes, dont la principale est le dioxyde de manganèse, qui est soit naturel (pyrolusite) soit synthétique (dioxyde de manganèse chimique – CMD ou électrolytique – EMD). De nombreux autres composés existent, comme le permanganate de potassium, les sulfates, les chlorures de manganèse, etc., qui rentrent dans la composition d'engrais et d'aliments pour animaux, dans l'électronique ou pour le traitement de surface des pigments et métaux, représentant une part minime des usages.

Le dioxyde de manganèse (MnO_2) rentre donc dans la composition des piles sèches (salines ou alcalines), ainsi que de manière croissante pour les technologies de batteries Li-ion. En 2024, la production totale de la Chine était d'environ 195 kt d'EMD, restant relativement stable par rapport à l'année précédente. Le MnO_2 est utilisé comme matériau actif des cathodes de ces batteries pour en augmenter la conductibilité électrique. Il rentre dans la composition des cathodes LMO (Lithium-Oxyde de Manganèse) à hauteur de 65 % en masse, dans certains cas (en fonction du précurseur) dans celle des cathodes NMC (Oxyde de Nickel-Manganèse-Cobalt) de formule chimique Li $(NiMnCo)O_2$), contenant entre 6 %

et 19 % de manganèse en masse en fonction de la configuration retenue. Les prévisions de croissance de la demande en Mn pour cet usage sont donc fortes (d'un facteur 10 d'ici 2030), pouvant conduire prochainement à des modifications des filières industrielles, notamment pour produire des sulfates de manganèse purifiés préférés par les fabricants de batteries. Par ailleurs, en septembre 2024, Orano et le groupe chinois XTC New Energy ont créé deux joint-ventures dédiées à la production de composants de batteries de véhicules électriques en France. La première usine, détenue majoritairement par XTC New Energy, a vocation à fabriquer des Matériaux actifs de Cathode (CAM). La seconde, détenue majoritairement par Orano, a vocation à produire des Précurseurs de Matériaux actifs de Cathode (PCAM). Ces fabrications, qui utilisent des métaux comme le cobalt, le nickel, le manganèse (sulfate de manganèse) et le lithium, sont essentielles à la production et à la performance des batteries de véhicules électriques.

En 2024, la production minière de manganèse a été de 20 Mt selon les données préliminaires de l'USGS contre 19,6 Mt en 2023. Environ 75 % de la production mondiale de manganèse provient de trois pays : l'Afrique du Sud (7,4 Mt-37 %), le Gabon (4,6 Mt-23 %) et l'Australie (2,8 Mt-14 %), suivis par la Chine, le Ghana, l'Inde et le Brésil. Les ressources en Chine étant de médiocre qualité et proches de l'épuisement, le marché est devenu très dépendant de la production sud-africaine, multipliée par plus de 6 depuis l'année 2000. Cependant, en mars 2024, South 32, premier producteur mondial de minerai de manganèse, a annoncé une suspension de ses opérations jusqu'au premier semestre 2025 face aux dégâts causés par un cyclone tropical Megan qui a endommagé les installations de la mine de Groote Eyland en Australie. Cet arrêt a entraîné des perturbations mondiales sur l'approvisionnement en minerai.

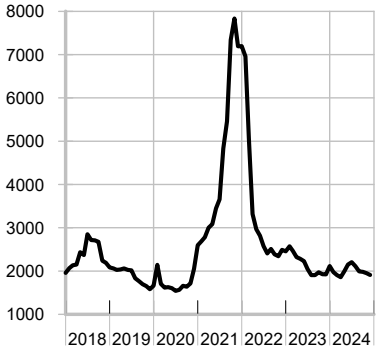
Les gisements de manganèse sont, de manière générale, associés aux gisements de fer sédimentaires anciens de type « formations ferrifères rubanées », car leurs modes de formation sont assez similaires. Les minéraux manganésifères (pyrolusite, rhodochrosite, etc.) ont précipité à partir de l'eau de mer pour former des roches sédimentaires stratifiées. L'évaluation des ressources et réserves mondiales est difficile et très imprécise. En 2024, l'USGS indique que les réserves cumulées de l'Afrique du Sud (560 Mt), de la Chine (280

Manganèse

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

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Production mondiale					
	19 600	**18 900**	**20 100**	**19 800**	**19 600**	**20 000**
Afrique du Sud	5 800	6 500	7 200	7 300	7 300	7 400
Australie	3 180	3 330	3 260	3 040	2 860	2 800
Birmanie	430	254	206	207		
Brésil	1 740	494	542	624	580	590
Chine	1 330	1 340	991	743	767	770
Côte d'Ivoire	482	525	362	394	357	360
Gabon	2 510	3 310	4 340	4 670	4 490	4 600
Georgie	116	186	224	166		
Ghana	1 550	637	940	844	818	820
Inde	801	632	453	721	744	800
Kazakhstan	140	158	90	129		
Malaisie	390	347	356	247	410	410
Mexique	202	198	226	221		
Ukraine	500	578	600	323		
Vietnam	158	121	146	155		
Autres pays	270	260	150	325	1 230	1 300

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Mt), du Brésil (270 Mt) de l'Australie (500 Mt) représentent 86,8 % des réserves mondiales, estimées à environ 1 700 Mt. De nouvelles occurrences de manganèse de haute pureté ont été découvertes au Timor-Leste en 2024 (pays d'Asie du Sud-Est) lors d'un programme d'exploration réalisé par Estrella Resources. 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 valorisation très peu probable à court et moyen termes.

Par ailleurs, Euro Manganese a pour objectif de retraiter un important gisement de manganèse contenu dans les résidus d'une mine de pyrite (FeS_2) qui a fonctionné entre 1951 et 1975. Le projet Chvaletice Manganese est situé à environ 90 km à l'est de Prague, en République tchèque. Ainsi, le but serait de réduire la dépendance de l'Europe à l'égard des importations de matières premières pour les batteries en fournissant jusqu'à 20 % de la demande européenne de manganèse de haute pureté d'ici 2030. L'entreprise a depuis conclu plusieurs accords d'offtake pour la vente de manganèse métallique de haute pureté.

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. Le dioxyde de manganèse des piles est en partie recyclé. Actuellement, le manganèse reste très peu récupéré dans les batteries Li-ion. Mais de nombreux projets sont en développement et seront basés sur de nouveaux procédés hydrométallurgiques permettant d'accroître la récupération des métaux des cathodes en général (Mn, Co, Ni, etc.).

Les prix du manganèse sont établis par contrats directs entre producteurs et utilisateurs. Le prix moyen du Mn métal en 2024 a été de $ 2 010/t, en baisse de 6,7 % par rapport à 2023 ($ 2 154/t) et retrouve un ordre de grandeur connu il y a cinq ans.

Le manganèse figure dans la dernière liste des matières premières critiques pour l'UE publiée en mars 2023. Il n'était pas considéré comme étant critique dans les quatre listes précédentes.

La demande future en manganèse sera tirée en grande partie par la croissance de l'urbanisation mondiale, ainsi qu'en moindre mesure par l'électromobilité et le développement des technologies de batteries Li-ion. Cet usage devrait rester minoritaire en volume (au maximum quelques dizaines de milliers de tonnes de manganèse, soit moins de 10 % du marché).

Petits métaux :
quelques tensions

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 réalisation 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 2024, telles que publiées début 2025 par l'*United States Geological Survey* (USGS) – le Service géologique des États-Unis – dans son analyse annuelle de l'industrie minérale mondiale *Mineral Commodity Summaries*. Ces données sont à considérer comme des estimations provisoires, susceptibles de révisions importantes au cours des mois, voire des années à venir. Elles doivent, en conséquence, être appréhendées avec beaucoup de prudence, car les marchés de nombreux petits métaux sont opaques.

Variations 2023-2024 de la production et des réserves des petits métaux étudiés dans ce chapitre

Élement		Unité de masse	Production exprimée en unité de masse contenue de	Production 2023	Production 2024	Variation de la production 2024-2023 (en %)	Réserves 2023	Réserves 2024	Variation des réserves 2024-2023 (en %)
Antimoine	Sb	t	Sb	106 000	100 000	-5.7%	>2 000 000	>2 000 000	0.0%
Béryllium	Be	t	Be	325	360	10.8%	n.d.	n.d.	-
Bismuth	Bi	t	Bi	16 200	16 000	-1.2%	n.d.	n.d.	-
Cadmium	Cd	t	Cd	24 100	24 000	-0.4%	n.d.	n.d.	-
Chrome	Cr	kt	Chromite	45 200	47 000	4.0%	560 000	1 200 000	114.3%
Cobalt	Co	t	Co	238 000	290 000	21.8%	11 000 000	11 000 000	0.0%
Gallium	Ga	t	Ga	633	760	20.1%	1 100	1 100	-
Germanium	Ge	t	Ge			-	n.d.	n.d.	-
Graphite	C	kt	Graphite	1 530	1 600	4.6%	280 000	290 000	3.6%
Hafnium	Hf	t	Hf			-	n.d.	n.d.	-
Indium	In	t	In	1 020	1 080	5.9%	n.d.	n.d.	-
Lithium	Li	t	Li	204 000	240 000	17.6%	28 000 000	30 000 000	7.1%
Magnésium	Mg	kt	Mg	900	1 000	11.1%	n.d.	n.d.	-
Manganèse	Mn	kt	Mn	19 600	20 000	2.0%	1 900 000	1 700 000	-10.5%
Molybdène	Mo	t	Mo	248 000	260 000	4.8%	15 000 000	15 000 000	0.0%
Niobium	Nb	t	Nb	110 000	110 000	0.0%	>17 000 000	>17 000 000	0.0%
Rhénium	Re	t	Re	63	62	-1.0%	LARGE	LARGE	-
Scandium	Sc	t	Sc			-	n.d.	n.d.	-
Sélénium	Se	t	Se	3 530	3 700	4.8%	95 000	92 000	-3.2%
Silicium	Si	kt	Si	9 470	9 700	2.4%	n.d.	n.d.	-
Tantale	Ta	t	Ta	2 040	2 100	2.9%	n.d.	n.d.	-
Tellure	Te	t	Te	944	980	3.8%	36 000	35 000	-2.8%
Terres Rares	TR	t	Oxydes de terres rares	376 000	390 000	3.7%	110 000 000	90 000 000	-18.2%
Titane	Ti	kt	Ti	9 430	9 400	-0.3%	750	560	-25.3%
Tungstène	W	t	W	80 000	81 000	1.3%	4 400 000	4 600 000	4.5%
Vanadium	V	t	V	104 000	100 000	-3.8%	19 000 000	18 000 000	-5.3%
Zirconium	Zr	kt	Concentrés de zircon	1 440	1 500	4.2%	74 000	70 000	-5.4%

a réserves exprimées en équivalent concentrés de chromite de qualité "shipping grade"
b réserves exprimées en ZrO_2

(Source : USGS - Mineral Commodity Summaries)

Données non disponibles

Le tableau p. 514 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 2025 réalisée par l'USGS.
Le tableau 516 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 2024, ainsi que le caractère de « sous-produit », ou non, de l'élément. En effet, nombre de 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)

L'antimoine est utilisé dans les ignifugeants (43 %), les stabilisateurs à la chaleur, les plastiques (6 %), le caoutchouc, les textiles et les peintures. Il est en général sous forme de trioxyde d'antimoine Sb_2O_3 dit « ATO » (à ne pas confondre avec « Antimony-Tin-Oxide » : l'oxyde d'étain-antimoine) combiné à des halogénures (chlorures ou bromures). La consommation d'antimoine a atteint un pic à 192 000 tonnes (t) en 2010. Elle baisse depuis, en raison de la substitution de l'antimoine par des substances à plus faible toxicité.

En alliage avec le plomb, l'antimoine sous sa forme « métal » permet d'augmenter la dureté, la résistance à la fatigue et à la corrosion du plomb (14 %). Son utilisation majeure en tant que métal reste dans les batteries automobiles (32 %). Cet usage subit deux tendances antagonistes : reconnues pour leur fiabilité et leur faible coût, les batteries au plomb-antimoine 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. Le reste de la demande se répartit dans diverses applications, notamment dans les verres ultra-transparents (panneaux photovoltaïques), les émaux et céramiques, mais également les munitions au plomb, le caoutchouc (vulcanisation des caoutchoucs rouges), ainsi que dans la catalyse pour la production de fibres de polyester et du polytéréphtalate d'éthylène (PET), largement utilisé pour la production des bouteilles en plastique. Les applications émergentes sont celles de l'oxyde d'antimoine-étain comme matériau conducteur transparent pour les écrans tactiles et les semi-conducteurs, notamment dans la microélectronique (AsSb, GaSb, et InSb).

En 2020, l'Oeko-Institut allemand s'est prononcé en défaveur d'une restriction de l'ATO dans les équipements électriques et électroniques dans le cadre de la directive européenne Restriction of Hazardous Substances (RoHS). Pour ces usages, il existe en effet peu de substituts, ou alors ceux-ci posent des problèmes équivalents ou supérieurs. À l'inverse, certains produits antimoniés, comme les retardateurs de flamme, ont été interdits dans d'autres régions du monde, comme en Alaska.

Parmi plus de cent minéraux antimonifères, la stibine (Sb_2S_3) est le minerai principal à partir duquel est extrait l'antimoine. Cependant, la majeure partie de l'antimoine est récupérée en tant que coproduit ou sous-produit du traitement de minerais de plomb-zinc ou d'or, comme en Russie et au Tadjikistan.

Il existe une grande incertitude sur les données de production en raison du dynamisme des échanges à chaque stade de transformation de l'antimoine (concentré, métal, ATO). Les statistiques sont hétérogènes et à fort risque de « double

Données complémentaires

Matière première	Premier producteur mondial	Part de la production mondiale du premier producteur en 2024	Sous-produit
Antimoine	Chine	58 %	Partiellement : plomb, or, zinc
Bérylium	USA	50 %	Non
Bismuth	Chine	82 %	Essentiellement : plomb, tungstène
Cadmium	Chine	39 %	Essentiellement : zinc
Chromite (minerai de chrome)	Afrique du Sud	45 %	Rarement : platinoïdes
Cobalt (production minière)	République dém. du Congo	76 %	Essentiellement : cuivre, nickel
Gallium	Chine	98 %	Exclusivement : aluminium
Germanium	Chine	n.d.	Exclusivement : zinc, charbon
Graphite naturel	Chine	78 %	Non
Hafnium	France	n.d.	Exclusivement : zirconium
Indium	Chine	71 %	Exclusivement : zinc, cuivre, plomb, étain
Lithium	Australie	37%	Rarement : potasse
Magnésium	Chine	91 %	Non
Manganèse	Afrique du Sud	37 %	Non
Molybdène	Chine	42 %	Partiellement : cuivre
Niobium	Brésil	92 %	Non
Rhenium	Chili	47 %	Exlusivement : molybdène
Scandium	Chine	n.d.	Exlusivement : Terres Rares, fer, uranium
Sélénium	Chine	49 %	Exlusivement : cuivre, plomb-zinc
Silicium	Chine	76 %	Non
Tantale	République dém. du Congo	42 %	Partiellement : niobium, lithium, étain, Terres Rares
Tellure	Chine	77 %	Exclusivement : cuivre, plomb-zinc, bismuth
Terres rares	Chine	69 %	Non
Titane (éponge)	Chine	68 %	Non
Tungstène	Chine	82 %	Non
Vanadium	Chine	67 %	Essentiellement : acier, titane
Zirconium	Australie	33 %	Non

(Source: USGS - Mineral Commodity Summaries)

comptage ». Pour illustration, l'USGS a réévalué à la hausse la production 2023 d'antimoine, de 83 000 tonnes à 106 000 tonnes (soit une sous-estimation de 27,6 %). Toujours d'après le service géologique américain, elle serait stable en 2024, avec une légère tendance à la baisse, avec une production d'environ 100 000 tonnes.

En 2024, le premier producteur minier a été la Chine avec 60 000 tonnes d'antimoine contenu (estimation USGS), suivie du Tadjikistan et de la Russie, avec, respectivement, 17 000 tonnes et 13 000 tonnes. Depuis 2010, la Chine fait face à des difficultés sur le plan minier, avec des réserves et des teneurs en baisse, et des impacts environnementaux importants. Le gouvernement a adopté des normes plus strictes dans ce domaine et a arrêté de nombreux sites d'extraction. Ainsi, plusieurs fonderies chinoises ont eu du mal à se fournir en concentrés cette année. Plusieurs fondeurs du plus grand centre (*hub*) de production d'antimoine en Chine ont dû arrêter leur production faute d'approvisionnement. Le pays importe donc 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.

Le Tadjikistan prévoyait, pour 2021, l'ouverture d'un nouveau site de production nommé TALCO Gold project d'une capacité de 16 000 tonnes par an d'antimoine métal par l'entreprise chinoise Huayu Mining, mais elle a été décalée à la fin 2022 en raison du covid. Fin 2023, l'entreprise chinoise a annoncé le passage de la phase de construction à la phase de production. Le projet a atteint son objectif de production de 5 000 tonnes dans l'année et devrait prendre entre douze et dix-huit mois pour atteindre sa pleine capacité.

En décembre 2023, l'entreprise australienne Larvotto Resources a, quant à elle, racheté à Trafigura le projet d'or et d'antimoine Hillgrove, en Nouvelle-Galles du Sud. Ce gisement se classe parmi les dix premiers au monde pour l'antimoine.

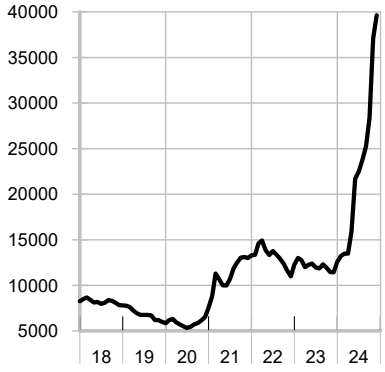
En dépit du rééquilibrage géographique qui est à l'œuvre depuis plus de quinze ans, la Chine

Antimoine

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Production mondiale					
	162 000	**111 000**	**112 000**	**83 100**	**106 000**	**100 000**
Australie	2 030	3 900	4 000	2 290	1 860	2 000
Birmanie	6 000	2 200	4 600	4 600	4 500	4 500
Bolivie	3 000	2 600	2 600	3 000	3 700	3 700
Canada	1	2	2	2		
Chine	89 000	61 000	61 000	40 000	62 300	60 000
Équateur	1	1				
Guatemala	25	80	80	24	49	50
Iran	500	400	400	500	500	500
Kazakhstan	300	100	100	300	40	40
kyrgyzstan			0	40	20	20
Laos	140			220	200	200
Mexique	300	700	750	700	800	800
Pakistan		17	66	79	250	250
Russie	30 000	25 000	20 000	4 300	13 000	13 000
Tadjikistan	28 000	13 000	16 800	21 000	17 000	17 000
Turquie	2 400	1 330	1 300	5 800	1 600	1 600
Vietnam	310	390	310	250	300	300

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

dispose toujours des plus grosses réserves mondiales d'antimoine prouvées à ce jour. L'USGS a réévalué les réserves d'antimoine en 2024 à plus de 2 Mt, stable par rapport à 2023.

En raison de la forte dépendance des États-Unis vis-à-vis de la Chine et du fait que la plupart des pays possédant des gisements d'antimoine sont en opposition aux intérêts politiques, industriels et militaires des États-Unis, le projet de la mine Stibnite Gold Project (Idaho, États-Unis), détenu par Perpetua Resources, a reçu un soutien majeur du gouvernement américain, avec $ 75 millions de subventions du ministère de la Défense et une lettre d'intérêt de $ 1,8 milliard de la banque d'import-export des États-Unis (EXIM). Sur les recommandations du Service des forêts des États-Unis, l'administration Biden a délivré le permis d'exploitation minière, début janvier 2025. Cette mine d'or et d'antimoine pourrait répondre à 35 % des besoins annuels en antimoine des États-Unis et produire environ 450 000 onces d'or par an.

L'antimoine contenu dans les batteries au plomb et autres alliages est recyclé avec le plomb. 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. Cela n'est pas le cas pour les autres usages (ignifugeants, verre), qui ont tendance à être dispersifs.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Son prix ne cesse d'augmenter depuis 2020, en particulier depuis mars 2024, et a même fini par dépasser son pic historique de 2011 ($ 17 500/t) en mai 2024, pour atteindre $ 39 637/t en décembre 2024. Cette augmentation spectaculaire est le fruit de multiples facteurs, comme les difficultés de la Chine citées précédemment ainsi que la restriction, par cette dernière, des exportations des produits d'antimoine, couvrant les minerais, les formes métalliques et divers oxydes susceptibles de « double usage » (militaire et civil) invoquant des raisons de sécurité nationale et de non-prolifération (mise en vigueur le 15/09/2024). En décembre 2024, en réponse aux nouvelles restrictions américaines sur les technologies avancées, la Chine a annoncé une interdiction immédiate des exportations de gallium, de germanium et d'antimoine vers les États-Unis, intensifiant les tensions entre ces deux puissances et exacerbant les craintes d'un resserrement de l'offre mondiale. Ces facteurs impactent à la hausse les coûts de production et cela crée de la tension sur l'offre. Le prix moyen annuel de l'antimoine métal a été de $ 22 243/t en 2024, une forte hausse de plus de 83 % par rapport à 2023 ($ 12 138/t).

À court terme, la demande en antimoine devrait stagner, se situant à la croisée 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. Cependant, à plus long terme, les propriétés semi-conductrices de l'antimoine pourraient lui offrir de nouveaux débouchés dans le domaine de l'électronique et des batteries, du raffinage électrolytique de métaux rares, ainsi que dans le secteur photovoltaïque. En effet, l'utilisation de l'antimoine, en tant que stabilisant, dans la fabrication de panneaux photovoltaïques continue de croître, en particulier sur le marché chinois. L'antimoine améliore considérablement les performances des panneaux photovoltaïques, ce qui en fait un élément clé de la transition énergétique. D'après l'agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), la capacité mondiale d'installation de nouveaux panneaux photovoltaïques a atteint environ 345 gigawatts (GW) en 2023, soit une augmentation de 74 % par rapport à l'année précédente. Le marché chinois représente, à lui seul, plus de 62 % de cette capacité mondiale, avec une hausse impressionnante de 152 % par rapport à 2022. Ce développement rapide va considérablement accroître la demande d'antimoine dans les années à venir.

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. Ses propriétés uniques comprennent la légèreté, la rigidité, la très forte résistance à

Béryllium
(en milliers de tonnes)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production mondiale minerai	**250**	**250**	**272**	**313**	**325**	**360**
États-Unis	160	165	175	175	185	180
Brésil	3	3	3	40	40	80
Chine	70	70	71	70	74	77
Madagascar	1	1	1	1	1	1
Mozambique	15	3	13	25	23	24
Nigeria	1	1	1			
Rwanda	1	1	1	1	1	1
Ouganda		7	7	1	1	1

(Source : Mineral Commodity Summaries)

la corrosion, une très bonne transparence aux rayons X, ainsi qu'une bonne réflexion des neutrons. Deux minéraux de béryllium sont exploités industriellement : la bertrandite ($Be_4Si_2O7[OH]_2$) aux États-Unis – avec une teneur en minerai de 0,25 % Be – et le béryl ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$), dans des pegmatites granitiques pour les autres pays.

Certaines formes sont privilégiées en fonction des secteurs d'usages. La principale est l'alliage cuivre-béryllium (CuBe) contenant près de 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.). Le béryllium est aussi utilisé sous forme métallique pure (15 % des usages), en particulier pour des 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 béryllium est sous forme d'oxyde et de céramiques, utilisés par exemple dans le secteur de la construction (substrats isolants, blindages, etc.).

L'essor de la demande en alliages CuBe est principalement lié aux besoins en connectique. Les tensions géopolitiques récentes ont largement favorisé les débouchés traditionnels à forte valeur ajoutée du béryllium, notamment dans les secteurs de l'aérospatiale, de la défense et de l'énergie. Grâce à ses propriétés uniques et à l'expansion des industries des télécommunications, de l'aérospatiale et de la défense, la demande mondiale en béryllium devrait ainsi continuer à croître dans les années à venir.

La production mondiale minière de béryllium contenu s'élève à 360 tonnes pour 2024. Les États-Unis demeurent en tête du classement mondial en 2024 avec 180 tonnes, soit la moitié de l'offre 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 77 tonnes) et au Brésil avec une production estimée à 80 tonnes, soit le double par rapport à 2023. Cette hausse pourrait être la combinaison de plusieurs facteurs, à savoir l'optimisation des opérations minières et l'amélioration des infrastructures. Pour une faible part, le béryl est extrait au Mozambique et en Ouganda (de

l'ordre de quelques tonnes), ainsi qu'au Rwanda et à Madagascar. Il faut noter que des gisements de béryl sont également exploités pour les gemmes (l'émeraude, l'aigue-marine et la morganite sont des béryls).

Plusieurs entreprises à l'échelle mondiale contribuent à la production et au raffinage de béryllium, parmi lesquelles Materion aux États-Unis, Ulba Metallurgical Plant (filiale de KazAtomProm) au Kazakhstan, Hunan Shuikoushan Nonferrous Metals Group en Chine, et Xinjiang Xinxin Mining Industry Co. en Chine. Au Kazakhstan, les stocks d'Ulba Metallurgical Plant JSC donnent également lieu à une production importante d'alliages au béryllium avec du cuivre (CuBe), de l'aluminium (AlBe) et du nickel (NiBe). Le 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. L'acteur japonais NGK Insulators Ltd. est le deuxième producteur mondial d'alliages CuBe et possède, entre autres, une filiale en France installée dans l'agglomération nantaise. En revanche, IBC Advanced Alloys aux États-Unis a annoncé, en avril 2024, arrêter la production d'alliages de béryllium et d'aluminium dans son usine du Massachusetts en raison de l'insuffisance de la demande à long terme pour les produits d'alliages de béryllium et d'aluminium coulé et se concentrer sur sa production d'alliage de cuivre.

En 2024, les ressources mondiales (non normées) sont estimées par l'USGS à plus de 100 000 tonnes de Be contenu, dont 60 % sont situées aux États-Unis dans les régions de Spor Mountain (19 000 tonnes) et Gold Hill dans l'Utah, de McCullough Butte dans le Nevada et de Black Hills dans le Dakota du Sud.

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 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 donne des fourchettes de prix en fonction des qualités recherchées. En 2024, le prix moyen du Be métal pur de qualité aérospatiale était de $ 985/kg, soit en légère augmentation de 6 % par rapport à 2023 où le prix était de $ 931/kg.

Le béryllium est inclus depuis 2011 dans la liste des matières premières critiques pour l'économie européenne, et, depuis 2018, dans celle établie par les États-Unis. Dans ce cadre, la Defense Logistics Agency a pour mission de constituer un stock de défense nationale qui s'élevait en septembre 2022 à 50 tonnes de Be métal, à sept tonnes sous forme de poudre métallique et à une tonne sous forme de minerai (béryl). Depuis peu, l'Inde a identifié 30 minéraux essentiels à sa transition énergétique, dont le béryllium, et cette liste devrait contribuer à l'élaboration d'une stratégie nationale.

En termes d'exploration, peu de projets sont identifiés pour renouveler les ressources déjà connues, hormis aux États-Unis avec le gisement de terres rares de Round Top (Texas), et le projet Beryllium Butte situé dans l'Utah. En octobre dernier, l'entreprise Rockland Resources Ltd. a d'ailleurs reçu des permis de forage pour ce dernier, situé à seulement 30 km de Spor Mountain.

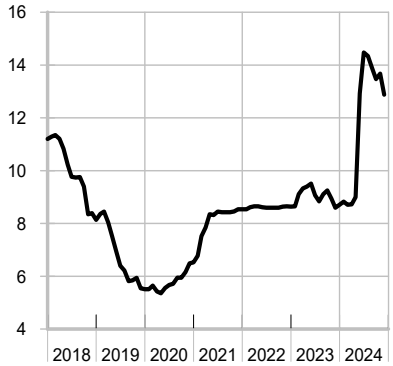
Bismuth (Bi)

Le bismuth est principalement un sous-produit de l'extraction et de la métallurgie du plomb. C'est un métal malléable, semi-conducteur avec une basse température de fusion (271 °C). Ses principaux débouchés concernent deux secteurs bien distincts : d'une part, sous forme d'alliages

Bismuth
(en tonnes de métal raffiné)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Production mondiale de minerai					
	21 100	**19 000**	**20 000**	**19 000**	**20 000**	**16 000**
Bolivie	15	30	60	0	68	70
Bulgarie	50	50	50	50	46	50
Canada	25	35	50			
Chine	16 000	16 000	16 000	15 500	13 300	13 000
Corée du Sud	930	970	1 000	810	1 000	1 000
Japon	540	570	500	490	500	500
Kazakhstan	270	230	230	190	180	180
Laos	3 000	1 000	2 070	1 940	1 150	1 100
Mexique	300	10	10			

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

à bas point de fusion (9 % : 11 °C à 300 °C), il est également utilisé en métallurgie et en électronique (7 %) (soudures en remplacement du plomb) ; d'autre part, sous forme chimique (84 %), il a d'importantes applications dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique ainsi que pour la dépollution des eaux et la production de pigments.

L'un des principaux avantages du bismuth est sa faible toxicité parmi les métaux lourds, ce qui explique son utilisation dans de nombreux produits, notamment pour ses propriétés antibactériennes.

Dans la croûte terrestre, les concentrations économiques de bismuth sont particulièrement rares, avec peu de gisements connus où ce métal a été exploité en tant que substance principale (le plus connu étant Tazna en Bolivie). De ce fait, la majorité de la production est en lien avec les phases de séparation et purification métallurgique d'autres métaux. Le bismuth est donc majoritairement un sous-produit, voire un coproduit dans quelques cas. 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, spécifiquement destiné à l'usage médical.

En 2024, la production mondiale de Bi raffiné estimée par l'USGS a été de 16 000 tonnes, ce qui est comparable à la production de 2023 établie à 16 200 tonnes. Selon les chiffres de cette institution américaine, la Chine demeure le premier producteur mondial de bismuth avec plus de 80 % de l'offre. Dans ce pays, la structuration de cette industrie 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 High-Tech Materials exploite la mine de tungstène de Núi Pháo, produisant également du bismuth en coproduit. Les chiffres de production pour l'année 2024 n'ont pas encore été publiés, mais ils seront probablement bien inférieurs à la capacité de production annuelle de 2 000 tonnes de bismuth, entre autres, dû au passage du typhon Yagi et au récent changement de prestataire chargé des opérations de minage. Le bismuth est récupéré en sous-produit du tungstène, initialement sous forme d'un concentré. Il est ensuite extrait par un procédé de mise

en solution (lixiviation) et précipitation par cémentation conduisant à la production d'un cément contenant 90 % Bi. Ce dernier est vendu tel quel aux consommateurs, où il sera éventuellement transformé en briquettes métalliques à plus forte valeur ajoutée par 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 de la production et de 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, d'activités sur les sels de bismuth du groupe Orrion Chemicals en Espagne.

En 2024, les prix du bismuth ont considérablement augmenté avec un prix moyen (Bi 99,99 % Europe) à $ 11,64/kg contre $ 9,04/kg en 2023, soit une hausse de 28,8 %. D'après l'USGS, cette hausse conséquente des prix du bismuth est à mettre en lien avec les coûts élevés des matières premières en Chine, conséquence directe de la forte compétition entre les fonderies nationales. N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, ces prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs.

L'USGS a cessé de publier son estimation des réserves mondiales de Bi depuis 2018. Elles étaient auparavant fondées sur les réserves des gisements de plomb contenant du bismuth. Cette absence de référence mondiale sur l'état des réserves s'explique surtout par le manque de données nécessaires à une telle estimation, notamment lié au manque d'information concernant les capacités de production.

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 secteurs. Les acteurs majeurs du secteur (par exemple, BASF, DuPont, DCC Lansco, etc.) utilisent déjà largement ces formulations. D'autre part, de futures applications potentielles dans les domaines des semi-conducteurs, de la thermoélectricité ou pharmaceutiques pourraient porter le marché.

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'exploration minière, un unique projet peut être mentionné : celui de Fortune Minerals, avec le projet NICO situé dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. La compagnie envisage une mine de cobalt-or-bismuth-cuivre, toujours au stade de la faisabilité, qu'elle souhaiterait d'ailleurs mettre à jour cette année. En 2023, la société a signé un partenariat avec le géant minier Rio Tinto pour des essais d'optimisation concernant la récupération des métaux critiques contenus dans le minerai (c'est-à-dire cobalt et bismuth). Elle a également annoncé son souhait de construire une unité hydrométallurgique en Alberta pour extraire les métaux contenus dans les concentrés de sa future mine. D'après l'étude de faisabilité de 2014, les réserves probables et prouvées du gisement sont de l'ordre de 46 000 tonnes de bismuth, soit 12 % des réserves mondiales lors de sa publication. La société a récemment été la cible de plusieurs investissements étatiques, aussi bien canadiens qu'étatsuniens (*via* le ministère de la Défense) en raison de sa future production de métaux particulièrement stratégiques.

En février 2025, la Chine a annoncé la mise en place immédiate de contrôles aux exportations concernant le bismuth, en plus de ceux relatifs aux biens à doubles usages déjà réglementés par la *Commerce Control List*. Les biens visés par ces nouveaux contrôles sont : le bismuth métal, certains produits à base de bismuth (notamment les matériaux semi-conducteurs, tels que le germanate de bismuth), les précurseurs de ceux-ci (triphénylbismuth) et également les technologies et informations nécessaires à leurs productions.

Cadmium (Cd)

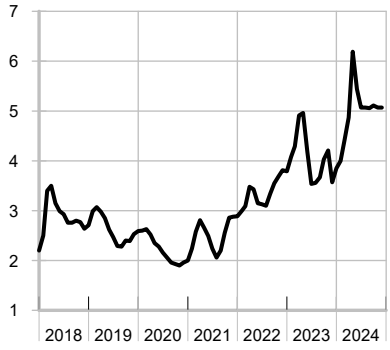
Le cadmium est un métal malléable à basses températures de fusion (321 °C) et d'ébullition (767 °C). C'est un métal toxique pour l'environnement et la santé humaine, ce qui en restreint fortement l'utilisation.

Le principal usage du cadmium est la production d'accumulateurs rechargeables au nickel-cadmium (batteries Ni-Cd). Les batteries Ni-Cd se classent généralement en deux catégories : les batteries grand public et de spécialité. Les premières, longtemps utilisées dans les équipements électriques portables, sont de moins en moins usitées du fait des réglementations sur la toxicité du cadmium (interdiction européenne depuis 2006) et de leur délaissement face au développement des batteries nickel-hydrure métallique (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion), aux performances nettement supérieures, et dont les prix sont en baisse constante. En 2018, les batteries Ni-Cd représentaient moins de 2 % de la capacité du marché mondial des batteries rechargeables (environ 550 gigawatts-heures – 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 sous forme 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. Un autre usage similaire est le cadmiage, un procédé de galvanoplastique, consistant à déposer un revêtement de cadmium sur certaines pièces métalliques. Il est utilisé dans l'industrie aéronautique, pour certaines pièces nécessitant une forte résistance à la corrosion et un faible coefficient de friction. Datant de février 2017, un amendement du règlement REACH, limitant très fortement la teneur

Cadmium
(en tonnes de métal)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production mondiale			
	24 400	**24 000**	**24 700**	**22 600**	**24 100**	**24 000**
Allemagne		450	417	320		170
Australie		348	402	328	900	900
Bulgarie			310	340	310	300
Canada	1 803	1 800	1 800	1 800	1 800	1 700
Chine	8 200	10 000	10 000	8 700	9 300	9 300
Corée du Sud	4 400	3 000	4 000	4 000	4 500	4 500
États-Unis			241	212	375	300
Japon	2 000	1 880	1 900	1 800	1 800	1 700
Kazakhstan	1 500	1 500	1 200	1 000	1 000	1 000
Mexique	1 395	978	859	1 170	1 020	1 200
Norvège		400	350	420	420	350
Ouzbékistan		400	300	220	220	200
Pays-Bas	1 100	880	854	574	726	400
Pérou	772	700	600	460	494	620
Pologne			500	250	250	250
Russie	900	1 000	1 000	1 000	1 000	800
Autres pays	2 320	520				

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

en cadmium des peintures, favorise la substitution des pigments au cadmium par des pigments à base de vanadate de bismuth ou de sulfure de cérium, présentant peu ou pas de toxicité. Hors 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 étant le tellurure de cadmium (CdTe) pour les cellules photovoltaïques à couches minces, qui nécessitent approximativement 80 kg de cadmium par mégawatt (MW) de capacité électrique installée. Cet usage connaît un développement croissant (5 % de la capacité installée en 2024), bien que la technologie au silicium domine largement le marché des cellules photovoltaïques (voir la section consacrée au tellure).

Selon l'USGS, la production mondiale de cadmium raffiné en 2024 était de 24 000 tonnes, soit une production stable par rapport à 2023 avec 22 100 tonnes. Le cadmium est majoritairement récupéré en sous-produit de la métallurgie du zinc et par le recyclage des batteries Ni-Cd. La Chine, premier métallurgiste sur ce dernier segment, demeure aussi le premier producteur mondial de cadmium avec 39 % de l'offre mondiale, 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 la fin 2019, la production de cadmium s'est infléchie et semble désormais se stabiliser. Les autres producteurs majeurs sont la Corée du Sud, le Japon et le Canada. Début février 2025, le gouvernement chinois a annoncé la mise en place de contrôles à l'exportation concernant, entre autres, les semi-conducteurs à base de tellurure de cadmium et de tellurure de cadmium-zinc.

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. Cette teneur augmente autour de 0,2 à 0,3 % dans les concentrés de minerai, soit une production de 3 kg/t de zinc élaboré. Les teneurs observées dans les gisements de phosphates sédimentaires peuvent 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 les applications de placage, sauf lorsque les caractéristiques de surface d'un revêtement sont critiques (par exemple, dans l'industrie aéronautique).

Le cadmium des batteries Ni-Cd est couramment recyclé. La société Cirba Solutions (ex-Retriev Technologies), basée dans l'Ohio (États-Unis), produit des lingots de cadmium secondaire à partir du recyclage des batteries par pyrométallurgie. En revanche, d'après l'USGS, une autre entreprise dans l'Ohio a cessé de recycler les batteries Ni-Cd pour se recentrer sur le marché des batteries lithium. Dans l'Union européenne (UE), 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 issus du recyclage de ces batteries.

En 2024, le prix annuel moyen européen du cadmium de pureté 99,95 % a augmenté de 21,3 % par rapport à 2023, pour atteindre $ 4,93/kg. En tant que grand consommateur de cadmium, l'Inde est un acteur déterminant de l'évolution de ses prix sur les marchés, marqués par des habitudes d'achat saisonnières. Par ailleurs, l'Inde a ajouté le cadmium sur sa liste des métaux critiques en 2023. En 2024, l'Inde, bien que grand consommateur de cadmium, a été supplantée par la Chine qui est devenue le premier importateur mondial de ce métal.

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 « décadmier » l'acide phosphorique servant à la production des engrais, ce qui pourrait faire 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, ainsi que 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 en est le principal minéral porteur, contenant entre 30 % et 55 % de chrome sous forme d'oxyde de chrome (Cr_2O_3). En vertu de ses caractéristiques de résistance au ternissement et à la corrosion, son usage principal 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.

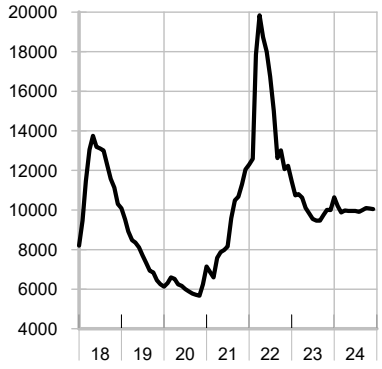
La production minière mondiale de chrome en 2024 est de 47 Mt, d'après l'USGS. Après avoir connu une baisse de près de 18 % en 2020 à la suite de la pandémie de covid, la production est repartie à la hausse dès l'année suivante, pour atteindre son niveau prépandémique en 2023.

Plus de 95 % de la chromite extraite est destinée à la production de ferrochrome, dont les trois quarts servent à la production d'aciers inoxydables pour lesquels le chrome est irremplaçable, et le quart restant pour d'autres aciers et alliages au chrome. Les 5 % de la production de chromite restants sont utilisés sous forme de composés chimiques, de produits réfractaires et pour la confection de moules pour les fonderies. Sous sa forme métal, le chrome ne compte que pour moins de 1 % de la demande en chromite et cette dernière forme est utilisée pour plus de moitié dans les superalliages pour l'aéronautique (parties chaudes des réacteurs d'avion) et pour la production d'énergie (turbines à gaz), selon la société DCX Chrome, filiale de Delachaux.

Chrome
(en milliers de tonnes de chromite)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Production mondiale					
	44 800	**37 000**	**42 200**	**41 900**	**45 200**	**47 000**
Afrique du Sud	16 395	13 200	18 600	19 100	19 700	21 000
Brésil					1 420	1 400
Finlande	2 415	2 290	2 270	2 000	1 910	1 900
Inde	4 139	2 500	4 250	4 000	4 100	4 100
Kazakhstan	6 700	7 000	6 500	6 000	6 000	6 500
Turquie	10 000	8 000	6 960	5 410	8 160	8 000
Zimbabwe					1 070	1 100
Autres pays	5 110	3 980	3 620	5 380	2 880	2 900

Prix du chrome métal aluminothermique
(en dollars/tonne)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Selon les données de l'USGS, la production de chrome mondiale reste, en 2024, largement dominée par l'Afrique du Sud avec 21 Mt (soit 45 %) uniquement issue du complexe géologique du Bushveld. Cette production a augmenté de 6 % par rapport à 2023 après une baisse par rapport à 2022, en raison de l'inflation et de la forte hausse des prix locaux de l'électricité en 2023. Les autres pays producteurs majeurs sont la Turquie (8 Mt), le Kazakhstan (6,5 Mt) et l'Inde (4,1 Mt). Bien que la plupart de la chromite soit extraite en tant que substance principale, environ 15 % de la production mondiale de chromite est un sous-produit de l'exploitation de platinoïdes. C'est notamment le cas à l'ouest du complexe du Bushveld, en Afrique du Sud (soit le quart de la production sud-africaine). En 2023, l'Organisation des Nations unies (ONU) a identifié au Timor-Leste plusieurs « minéraux stratégiques », dont la chromite. Le pays a lancé un appel d'offres pour l'exploration, plus tôt dans l'année, pour des minéraux métalliques, des pierres ornementales, des pierres précieuses et des terres rares. Ainsi, en novembre 2023, trois compagnies australiennes et une compagnie locale ont obtenu treize zones de concession pour l'exploration minière de ces minéraux, dont la chromite.

Selon les données compilées par l'Élémentarium, environ 15,7 Mt de ferrochrome ont été produites en 2023. Les principaux producteurs de ferrochrome sont, de loin, la Chine (7,7 Mt) et l'Afrique du Sud (3,2 Mt), contre environ 0,5 Mt en 2023 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 117 000 tonnes en 2023 et réparties principalement entre la Chine (52 %), la Russie (23 %), la France (10 %), ainsi que le 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 de ferrochrome ou de l'acide chromique. En France, la production de chrome aluminothermique est assurée par la société DCX Chrome, du groupe Delachaux, sur son site de Marly, situé dans le département du Nord.

L'USGS évalue à plus de 1 200 Mt les réserves mondiales de chromite (45 % Cr_2O_3) en 2024. Si, historiquement, le Kazakhstan et l'Afrique du Sud possèdent des réserves importantes (respectivement, 320 Mt et 200 Mt), l'USGS déclare, depuis 2024, l'existence de réserves de chromites très importante au Zimbabwe à hauteur de 540 Mt, représentant désormais 47 % des réserves mondiales bien que sa production reste encore modeste (1,1 Mt en 2024). Les ressources en chromite sont considérables, 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. À noter tout de même que les aciers galvanisés ont aussi une bonne résistance à la corrosion et peuvent, dans certaines applications, remplacer les inox. Les aciers inoxydables sont largement recyclés avec un taux de recyclage en fin de vie (*old scrap*) de 80 % à 90 %. Selon l'Élémentarium, le taux de recyclage du chrome est de 38 %. Les autres alliages et superalliages sont également recyclés pour le même usage si l'alliage est préservé, ou pour alimenter la production de ferrochrome dans le cas contraire. Le chrome métal contenu dans les superalliages n'est pas récupéré en tant que tel, mais ceux-ci sont fortement recyclés pour des usages proches, du fait de leur valeur très élevée.

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 (*in warehouse* EU 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 $ 19 838/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. En 2023, les prix sont redescendus à un prix moyen de $ 10 149/t, soit une baisse de 28 % par rapport à 2022. Les prix se sont stabilisés à ce niveau en 2024, avec une moyenne à $ 10 057/t. Les prix du ferrochrome (HC 60 % Cr et 6-8 % C) ont connu une dynamique similaire et sont retombés à un prix moyen,

pour 2023, de $ 2 850/t. Il est à noter que l'augmentation de la production de ferrochrome par la Chine (environ 5-10 %) a entraîné une baisse des prix en fin d'année 2023. Les prix ont remonté légèrement début 2024 au niveau d'avant la surproduction chinoise, pour se maintenir plus ou moins à ce niveau tout au long de l'année.

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). De plus, l'UE et les Philippines ont relancé les négociations visant à établir un accord de libre-échange et à renforcer la coopération pour les matières premières critiques de la transition énergétique. 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. Cependant, l'inflation pourrait impacter les marchés de la construction et entraîner une baisse de la demande d'acier.

Gallium (Ga)

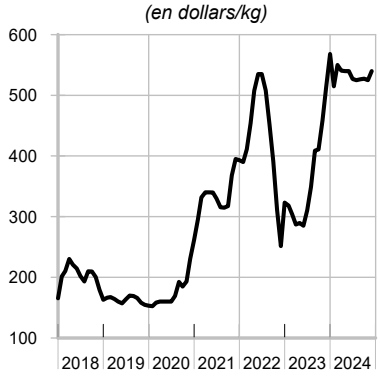
Le gallium est un métal mineur qui revêt, ainsi que ses différents composés, une importance stratégique pour la production de circuits intégrés. Le gallium est principalement employé comme matériau semi-conducteur sous forme d'arséniure de gallium (GaAs) et de nitrure de gallium (GaN). Il est en premier lieu utilisé à l'échelle mondiale dans l'optoélectronique (44 %), pour fabriquer des diodes électroluminescentes (LED), ou encore des radars ; et pour ses fonctions semi-conductrices dans les circuits électroniques intégrés analogiques (36 %) au sein des ordinateurs, smartphones, etc. Les composants analogiques utilisant du gallium pouvant supporter une tension plus élevée et plus performants (à température et fréquence égale) que ceux utilisant uniquement du silicium, ils sont employés à divers usages dans certaines applications, tout particulièrement dans les domaines militaire, aérospatial et des télécommunications. On le retrouve également dans les cellules photovoltaïques (7 %), en couche mince de type CIGS (Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium). Plusieurs dizaines de tonnes de gallium sont aussi utilisées ponctuellement pour la recherche en physique des particules et l'élaboration de transistors expérimentaux, ou encore de façon plus continue dans la production d'aimants supraconducteurs, d'écrans plats, etc. 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.

Si le gallium primaire (pureté de 99,99 % ou 4N) peut être récupéré en sous-produit du zinc

Gallium
(en tonnes de métal raffiné)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production mondiale						
351	**327**	**434**	**610**	**633**	**760**	**610**
Chine	338	317	423	600	621	750
Corée du Sud	2	2	2	2	3	3
Japon	3	3	3	3	3	3
Russie	8	5	5	5	6	6
Ukraine			1			

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

(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, en fonction des applications, le gallium doit être purifié à une pureté de 99,999 99 %, 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 2024, la production estimée par l'USGS est de 760 tonnes de gallium primaire, contre 633 tonnes en 2023, soit une augmentation de près de 20 %. La Chine produit près de 99 % de ce volume à partir de bauxites d'origines diverses. Les capacités totales estimées dans le pays sont de l'ordre de 1 000 tonnes. Toujours d'après l'USGS, les autres producteurs de gallium sont la Russie, le Japon, et la Corée du Sud, mais leurs productions restent limitées à quelques tonnes par an seulement.

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 la Chine, le Japon, les États-Unis et la Slovaquie. Ces dernières années, plusieurs pays, tels que l'Allemagne, le Kazakhstan, la Hongrie, le Royaume-Uni, ont arrêté soit la production, soit le raffinage du gallium en raison des surcapacités chroniques et une tendance de prix baissière prolongée sur ce marché.

Le gallium étant récupéré comme sous-produit de l'aluminium et du zinc, 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.

Le recyclage du gallium a surtout lieu en boucle courte par récupération des déchets (*scraps*) de fabrication du gallium raffiné et des plaquettes/galettes (*wafers*) de GaN ou GaAs. Il y aurait une capacité totale de traitement de 300 tonnes par an, selon l'USGS, la production secondaire ayant lieu essentiellement au Canada, en Chine, en Allemagne, en Belgique, 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 de fonctionnement à haute tension les rendent bien adaptés aux circuits d'alimentation pour les voitures et autres transports, ainsi qu'au sein des installations électriques, telles que des centrales. Plusieurs applications liées à la défense utilisent des circuits intégrés à base de GaAs en raison de leur couverture haute fréquence et ne peuvent pas à ce jour être substituées par d'autres éléments.

À l'instar de 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. En Europe, le marché reste peu actif en raison d'une consommation limitée, bien que les prix soient en hausse : en 2024, le prix spot moyen du gallium de pureté 99,99 % livré à Rotterdam s'élevait à $ 535/kg, soit une hausse de 49 % par rapport à l'année précédente ($ 354/kg). Les variations de prix en 2024 sont restées limitées comparées à 2023, année des premières mesures de contrôle à l'exportation. Toutefois, la récente mesure chinoise d'interdiction d'exportation aux États-Unis de la substance (annoncée le 03/12/2024, remplaçant celle de 2023) pourrait affecter plus durement ce marché.

Le marché américain pourrait ainsi observer une hausse de prix des produits de gallium en raison des restrictions du ministère chinois du Commerce (MOFCOM), dont les dernières mesures ont été annoncées le 3 décembre 2024. À cette date, ce dernier a déclaré l'arrêt immédiat l'exportation vers les États-Unis de plusieurs matériaux présentant un double usage civil et militaire potentiel, incluant – entre autres – le gallium. Cette mesure constitue un renforcement ciblé de la mesure de contrôle des exportations prise en juillet 2023, qui limitait les flux hors de Chine sans pour autant les interrompre. Face à l'éventualité d'une instrumentalisation stratégique de cette ressource par la Chine, les pays dépendants des importations chinoises de gallium cherchent à diversifier leurs sources d'approvisionnement. En Europe, le

groupe grec MELTEN (comprenant Mytilineos Energy & Metals) poursuit sa volonté d'investir dans l'établissement d'un site produisant du gallium à partir du traitement de la bauxite présente à Agios Nikolaos, en Crète. Le 16 janvier dernier, la firme annonçait allouer € 295 millions à ce projet, qui débuterait courant 2026 avec une capacité de production annuelle de 50 tonnes. Au Canada, Rio Tinto a exprimé, fin 2024, son intérêt à produire du gallium à Saguenay-Lac-Saint-Jean, au Québec, et pourrait recevoir jusqu'à $ 7 millions de la part du gouvernement du Québec pour construire une usine de démonstration. Cette dernière pourrait produire jusqu'à 3,5 tonnes de gallium primaire, pour un coût estimé à $ 20 millions.

Germanium (Ge)

Le germanium possède des propriétés semi-conductrices qui sont utilisées pour de nombreuses applications militaires, des technologies de communication, ainsi que dans le secteur des panneaux photovoltaïques. Évalué à quelques centaines de millions de dollars, le marché du germanium est, en tant que tel, un marché de niche. Celui de son composé silicium-germanium (SiGe) est bien plus important et devrait atteindre les $ 4,5 milliards en 2024, tiré par la croissance de la demande de circuits intégrés dédiés aux communications, notamment le déploiement de la 5G.

La répartition des usages du germanium reste stable, l'optoélectronique étant le premier consommateur de germanium. Ainsi, 33 % de la demande mondiale est destiné aux fibres, verres de chalcogénure et circuits intégrés utilisés spécifiquement par la fibre optique. Environ 20 % seraient consacrés aux panneaux photovoltaïques à haut rendement (majoritairement terrestre 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).

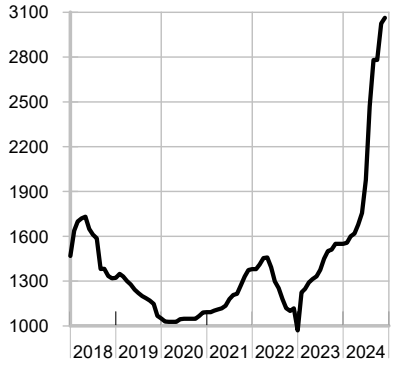
Le germanium est majoritairement un sous-produit de la métallurgie du zinc (75 %) et du charbon (25 %). Pour l'année 2020, la production mondiale de germanium était estimée par l'USGS à 130 tonnes, hors États-Unis. Le *World Mining Data* l'évaluait à 139 tonnes en 2022. Depuis ces dates, les données de production ne sont plus disponibles.

Avec 66 % de la production totale en 2020 (93 % pour le *World Mining Data* en 2022), la Chine est le premier producteur mondial de germanium depuis plus de dix ans. Elle tient cette

Germanium
(en kilogrammes de métal raffiné)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production mondiale						
	131 000	**140 000**				
Chine	85 700	95 000				
Russie	5 000	5 000				
États-Unis	N.C.	N.C				
Autres pays	40 000	40 000				

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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).

Toutefois, depuis 2014, année durant 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. En ce sens, le gouvernement chinois a entrepris de solidifier cette branche industrielle, en accompagnant la fusion-acquisition de firmes spécialisées par de grands acteurs industriels nationaux, tels que Yunnan Lincang Xinyuan Germanium et le géant Chinalco via sa filiale Yunnan Chihong Zinc & Germanium.

Le pays a pu ainsi devenir leader de la production de germanium raffiné à 99,999 % 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. En effet, la récupération nécessite des investissements spécifiques importants et difficiles à rentabiliser au vu des fluctuations importantes de la demande. Ce dernier est contenu dans les lignites, mais le procédé est souvent difficile et incomplet (de l'ordre de seulement quelques pour cent par tonne).

Dans l'industrie des semi-conducteurs analogiques, l'alliage silicium-germanium (SiGe) peut être substitué par le phosphure d'indium ou par les composés au gallium (nitrure ou arséniure) dans la fabrication de transistors bipolaires à hétérojonction (HBT) destinés aux communications à moyennes et hautes fréquences. Les chutes de fabrication (*new scraps*) sont largement recyclées en boucle courte et représentent environ la moitié de l'apport pour la production de fibre optique, l'électronique et le photovoltaïque. Le recyclage du germanium dans les produits en fin de vie est également pratiqué, notamment aux États-Unis, mais reste marginal. Des substitutions sont possibles dans le domaine de l'optique infrarouge, mais souvent au détriment de la performance. Certaines LED utilisées par les phares automobiles utilisent également du germanium couplé à d'autres composés, comme l'arséniure de gallium, et restent difficilement substituables à court terme. Depuis le 1er août 2023, le ministère chinois du Commerce contrôle les exportations de germanium *via* l'attribution de licences spécifiques. Le 3 décembre 2024, ce même ministère a interdit tout mouvement de germanium, entre autres, ciblant le marché nord-américain.

Ce climat délétère affecte également le prix moyen du contrat européen. Le contrat standard (pureté de 99,999 %, livraison en Europe) s'est établi en moyenne à $ 2 154,46/kg, soit 1,6 fois plus que son niveau de 2023 ($ 1 359,71/kg). Cette année a été la plus instable pour le germanium, avec des variations de prix bien plus marquées qu'en 2011. Les écarts moyens des prix par rapport à la moyenne annuelle ont été 3,5 fois plus importants qu'à cette époque, et le prix maximal atteint a plus que doublé, atteignant $ 3 150/kg, contre $ 1 425/kg en 2011.

Enfin, la fin d'année 2024 a connu une flambée des prix : la moyenne du dernier trimestre dépassait de près de $ 1 000/kg la moyenne annuelle.

En mai 2024, Umicore et STL, une filiale de Gécamines, ont signé un accord exclusif et de long terme pour valoriser le germanium extrait des résidus miniers du site Big Hill à Lubumbashi, en RDC. Umicore s'est engagé à apporter son expertise en raffinage et recyclage pour optimiser les nouvelles installations de traitement de STL, et bénéficiera en échange d'un accès exclusif au germanium raffiné pour des applications technologiques avancées (fibre optique, cellules solaires, électronique). Le premier site issu de cette collaboration a été inauguré le 4 octobre 2024 et les premières exportations de germanium du site congolais vers les installations belges d'Umicore ont commencé lors du dernier trimestre 2024.

Hafnium (Hf)

Le hafnium est un métal de transition ductile, résistant à la corrosion et chimiquement proche du zirconium. Il se trouve naturellement dans les mi-

nerais de zirconium (zircon et baddeleyite) avec un ratio d'une part d'hafnium pour 30 à 50 parts de zirconium selon la littérature de référence. Le hafnium étant produit à partir des résidus de la purification du tétrachlorure de zirconium, il convient de se référer à la section précédente sur le zirconium pour une analyse plus complète.

Le hafnium est utilisé pour près de moitié dans les superalliages de nickel ou de cobalt 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 le domaine médical (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, constituent un potentiel 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, selon l'*IndustryARC*, de la France (49 %), des États-Unis (44 %), de la Chine (3 %) et de la Russie (3 %). Ces chiffres relativement anciens sous-estiment probablement la part actuelle de la Chine dans la production mondiale. Comme pour le zirconium, c'est la société Framatome, filiale d'EDF, qui produit en France du hafnium de haute pureté à Jarrie (Isère), pour des applications nucléaires, aéronautiques et spatiales essentiellement.

Il n'existe pas de calcul normalisé des ressources et réserves d'hafnium. Néanmoins, l'USGS estime les réserves de zirconium à 70 Mt. Il est alors possible de déterminer de manière très simplifiée les réserves en hafnium en utilisant le ratio Zr/Hf, soit 36 : 1 (chiffres USGS). Cela représenterait environ 2 Mt d'hafnium. Du fait des très faibles quantités utilisées, le recyclage du hafnium est seulement de l'ordre de dix tonnes par an. Dans certains superalliages, le hafnium peut être substitué par le zirconium.

Les prix du hafnium sont établis par négociation directe entre producteurs et utilisateurs. Ils dépendent très fortement de ceux du zirconium. La croissance accélérée des industries aérospatiale et électronique à la suite de la levée des restrictions liées à la pandémie de covid a créé des pénuries sur les marchés qui ont nourri une forte hausse de la demande, face à une offre rigide qui ne peut pas augmenter rapidement. Le prix du hafnium (99 %) a ainsi été multiplié par sept entre janvier 2022 et juillet 2023, passant de $ 950/kg à $ 6 950/kg sur la période, avant d'amorcer une décrue continue depuis, terminant l'année 2024 sous les $ 4 000/kg, soit un prix qui reste élevé. Les réserves et ressources en minéraux contenant du hafnium sont certes conséquentes, mais le marché est structurellement limité par l'offre et la production de zirconium. Pour répondre aux besoins croissants, notamment des industries de pointe, Framatome a annoncé, fin 2023, des investissements sur son site de Jarrie qui permettront d'augmenter de façon substantielle sa production d'alliages de haute qualité en hafnium (et zirconium). L'augmentation des investissements dans les technologies nucléaires et aérospatiales, ainsi que les avancées dans la fabrication de semi-conducteurs et d'autres composants électroniques, devraient continuer à stimuler la demande dans les prochaines années.

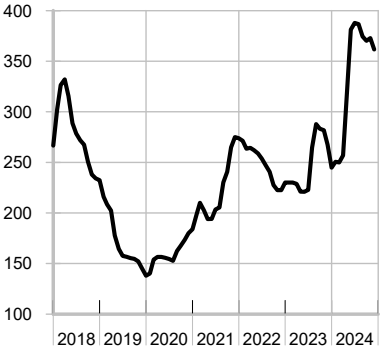
Indium (In)

Au niveau mondial, la principale utilisation de l'indium est sous forme d'oxyde mixte d'étain-indium (ou « indium-tin-oxide », dit « ITO »), destiné à l'industrie des écrans plats, couvrant 60-70 % de la demande mondiale. Cette dernière serait de

Indium
(en tonnes de métal)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production mondiale *(en indium contenu)*						
	968	**960**	**932**	**999**	**1 020**	**1 080**
Belgique	20	20	20	19	19	10
Canada	61	66	60	39	40	35
Chine	535	540	540	670	690	760
Corée du Sud	225	210	190	180	180	180
France	40	38	38	19	21	21
Japon	70	66	66	66	65	60
Ouzbékistan			1	1	1	1
Russie	5	5	5	5	5	10

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

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 annuellement d'environ 5 % à 7 % d'ici à 2030. Par ailleurs, la technologie des transistors IGZO (oxyde mixte, de zinc, gallium et indium) qui permettent une haute définition et un moindre coût énergétique, pourrait accélérer les ventes et continuer à tirer la demande d'indium vers le haut, à des coûts financiers élevés cependant.

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 du *Fraunhofer Institute*, leur part demeure stable, à environ 5 % de la capacité installée.

L'évolution des réseaux de télécommunications a créé une nouvelle demande d'indium, sous forme de phosphure d'indium (InP), notamment dans les lasers et les capteurs optoélectroniques. Les lasers ainsi que les récepteurs InP sont utilisés dans les télécommunications pour les réseaux de fibres optiques reliant les antennes sans fil, notamment de cinquième génération (5G). Cet usage devrait continuer à tirer la demande en indium vers le haut. De même, le développement de l'intelligence artificielle devrait engendrer des besoins croissants en InP via la demande en semi-conducteurs des data centers et le déploiement de fibre optique à très haut débit.

En 2024, la production mondiale d'indium raffiné s'élevait à 1 080 tonnes, selon les données de l'USGS (contre 1 020 tonnes en 2023). Il n'existe pas de mine d'indium à proprement parler. Il est récupéré uniquement en tant que sous-produit d'autres métaux, comme le zinc (95 %) et, dans une moindre mesure, le cuivre et l'étain (5 %). Il

est produit à partir des poussières et résidus des fonderies (principalement de zinc) avec une qualité de 3N (99,9 %) ou 4N (99,99 %) et peut être purifié jusqu'à 6 ou 7 N (99,999 99 %) 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 760 tonnes (près de 70 % de la production mondiale) et la Corée du Sud avec 180 tonnes (17 %). Les autres pays produisant plus de 30 tonnes sont le Japon (60 tonnes) et le Canada (35 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 est stable avec 21 tonnes en 2023 et 2024, selon les estimations de l'USGS. D'après ce dernier, la capacité de production cumulée des raffineries mondiales serait de l'ordre de 1 800 tonnes.

L'indium étant récupéré comme sous-produit minoritaire, il n'existe pas d'évaluation standardisée des réserves et ressources mondiales. Néanmoins, les chercheurs Werner, Mudd & Jowitt ont pu, en 2017, estimer les ressources en indium des gisements de zinc, cuivre et étain dont les teneurs en indium étaient documentées ou supposées. Ils ont abouti à des ressources d'environ 380 000 tonnes d'indium, soit plus de 500 ans de production au rythme de 2017. Selon cette étude, les principaux pays détenteurs d'indium seraient l'Australie (13 %), le Canada (12 %), la Russie (11 %), la Chine (7 %) et le Pérou (7 %). L'indium, en tant que sous-produit du zinc, est rarement analysé par les compagnies d'exploration minières. Les quelques projets ayant a priori un potentiel sont : Mount Pleasant d'Adex Mining (Nouveau-Brunswick, Canada), Ayawilka de Tinka Resources (Pérou), Iska Iska de Eloro Resources (Bolivie) et West Desert de American West Metals (Utah, États-Unis). Concernant ce dernier projet, la compagnie australienne American West Metals annonce des ressources géologiques récupérables à ciel ouvert et également par travaux souterrains de l'ordre de 670 tonnes d'indium. L'ensemble des permis nécessaires à la réalisation de la mine à ciel ouvert ainsi qu'au creusement d'un puits d'exploration ont été accordés en juillet 2024. D'après l'USGS, le Kazakhstan prévoit d'ouvrir l'accès à certains de ses gisements contenant, entre autres, de l'indium pour attirer les investissements étrangers.

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 historiques de certaines raffineries de zinc.

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 % à Rotterdam a connu une tendance clairement à la hausse depuis janvier 2024, où le cours du kilo atteignait $ 245 avant de terminer l'année à $ 362, conduisant à une augmentation de 33,3 % du prix moyen de l'indium entre 2023 et 2024.

Des substitutions à l'indium existent, mais à ce jour, son prix relativement faible ainsi que sa disponibilité actuelle sur le marché réduisent leurs utilisations. De plus, le coût de ces substitutions est souvent prohibitif et des pertes de performances sont notables. 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.

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. Lors de ce processus, seulement 30 % de l'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.

En février 2025, la Chine a annoncé la mise en place immédiate de contrôles aux exportations concernant l'indium. Les biens visés par ces nouveaux contrôles sont : le phosphure d'indium, les précurseurs de celui-ci (triméthylindium et triéthylindium) ainsi que les technologies et informations nécessaires à leurs productions. Cette décision fait partie des mesures de rétorsion à l'encontre des États-Unis, notamment en réponse à la restriction sur les semi-conducteurs.

Magnésium (Mg)

Le magnésium est le huitième élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Sous forme d'ion, c'est un élément chimique nécessaire à la vie de la quasi-totalité des êtres vivants. Il est utilisé sous différentes formes pour de nombreuses applications : on le retrouve sous forme de carbonates de magnésium, comme la magnésite ou la dolomite, qui peuvent être utilisées directement comme amendement agricole, charge pour peintures et matières plastiques ou en pharmaceutique et en cosmétique ; sous forme de chlorure de magnésium qui peut être utilisé comme sel de déneigement ou comme retardateur de flamme et sous différentes formes raffinées métalliques ou chimiques. C'est sous forme d'alliage métallique qu'il est le plus utilisé. Il apporte légèreté, résistance et usinabilité dans certains alliages, et en particulier l'aluminium. Plus précisément, les usages du magnésium raffiné se répartissent de la manière suivante :

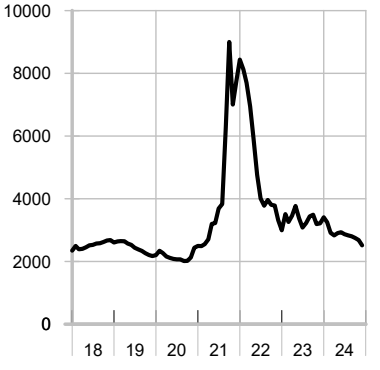
Un peu plus d'un tiers du magnésium produit entre dans la composition des alliages d'aluminium qui contiennent en moyenne 0,8 % Mg. Ces alliages sont utilisés dans les infrastructures, dans l'automobile ou l'aéronautique, principalement pour alléger les équipements. Cet alliage est aussi utilisé dans la fabrication des canettes de boissons ;

Un autre tiers est utilisé 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 les applications de défense, ainsi que pour la production de châssis d'appareils électro-

Magnésium
(en milliers de tonnes de métal)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production mondiale	**1120**	**1000**	**1070**	**1050**	**900**	**1000**
Brésil	22	18	20	22	20	20
Chine	970	886	930	933	805	950
Iran				5	5	5
Israël	21	19	18	22	17	20
Kazakhstan	25	16	16	27	22	20
Malaysia						
Russie	67	48	58	21	18	15
Turquie	7	12	13	14	13	15
Ukraine	8	6	10	2	0	

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

niques haut de gamme (appareils photo, ordinateurs portables, tablettes, etc.) ;

– environ 10 % pour la désulfuration de l'acier (principal débouché de la poudre de magnésium chinoise) ;

– environ 10 % 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 ;

– une petite partie du magnésium est aussi utilisée pour la production de fonte à graphite sphéroïdal (fonte ductile) ; ou d'autres usages pharmaceutiques ou comme complément nutritionnels.

Le principal potentiel de croissance de la demande en magnésium raffiné est pour l'allègement des équipements automobiles et aéronautiques. 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 les véhicules entraînant une augmentation de 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 récemment observée. Le magnésium reste également très utilisé par les principaux producteurs d'éponges de titane pour l'aéronautique, à savoir la Chine, la Russie, le Kazakhstan, le Japon et plus récemment l'Arabie Saoudite. Les effets de la pandémie de covid puis de la guerre russo-ukrainienne se sont ainsi fait ressentir sur cette filière. En 2021, la reprise industrielle mondiale post-pandémie a entraîné une nette hausse de la demande mondiale en magnésium, aboutissant à une pénurie qui fut logiquement suivie d'une forte augmentation des prix qui se sont maintenus à un niveau élevé jusqu'au début de l'invasion russe. La reprise du secteur aéronautique n'a pas été si haute que prévue, et les récents déboires de Boeing ont limité la demande. À plus long terme, les batteries magnésium-ion, qui possèdent une capacité et densité d'énergie théoriquement double des lithium-ion (Li-ion), pourraient dynamiser le marché à un horizon supérieur à dix ans, bien qu'aujourd'hui, le niveau de développement technologique soit bas.

L'essentiel du marché du magnésium métal se trouve en Chine, qui d'année en année renforce sa position dominante avec 95 % de la production mondiale en 2024. 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 CO_2. D'autres procédés permettent d'obtenir du magnésium, comme le procédé Dow qui permet d'obtenir du magnésium à partir de l'électrolyse du chlorure de magnésium provenant de saumures ou d'eau de mer. Ce procédé est utilisé par l'israélien Dead Sea Magnésium et l'australien Magontec en Chine (bassin de Qaidam).

En 2024, la production mondiale de magnésium métal est estimée à 1 000 000 tonnes (hors États-Unis), selon l'USGS, en augmentation de 11 % par rapport à 2023 (considérées s'élever à 900 000 tonnes après révision). Des capacités de production se sont toutefois développées hors Chine. Aux États-Unis, le magnésium primaire était produit en 2023 par une entreprise de l'Utah dans une fonderie électrolytique qui récupérerait le magnésium en saumures du Grand Lac Salé. L'australien Latrobe Magnesium (LMG) 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 prévoit le démarrage de son unité en 2025, ayant récemment reçu l'accord pour sa demande en électricité. Si le succès est au rendez-vous, 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 douze tonnes de CO_2 par tonne de magnésium, contre vingt-cinq tonnes de CO_2 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. Début 2023, l'entreprise a annoncé avoir choisi la Malaisie pour son usine, et plus précisément le parc industriel de Samalaju. À l'inverse, le canadien Alliance Magnesium, qui avait un projet de construction d'une usine de production de magnésium « vert » à partir d'un nouveau

procédé breveté, est, depuis 2024, placé en situation de faillite, ayant récemment reconnu ne pas être en mesure de réunir les conditions nécessaires à la poursuite de son projet. En Europe, plusieurs projets – dont deux en Roumanie et un en Bosnie – pourraient produire du magnésium métal après 2025, selon Reuters.

Il n'existe pas d'estimation précise des réserves de magnésium dans sa globalité. 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. Néanmoins, l'USGS évalue les réserves de magnésite, un des minéraux exploités, à hauteur de 7,7 Mt dans le monde (en MgO contenu) avec environ 29 % en Russie, 15 % en Slovaquie et 9 % en Chine.

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 (75 000 tonnes en boucle courte – new scrap – et 25 000 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. De même, une partie du magnésium utilisé dans les procédés métallurgiques de production du zirconium ou du titane peut être récupérée et réutilisée. En termes de substitution, l'aluminium et le zinc peuvent remplacer le magnésium, mais au prix d'un gain de poids (moins avantageux). Le carbure de calcium peut être utilisé à la place du magnésium dans la désulfuration du fer et de l'acier.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le prix spot moyen annuel du magnésium métal sur le marché européen a été de $ 2 893/t en 2024 contre $ 3 334/t en 2023, soit une diminution de 13,2 %.

Malgré une offre de plus en plus diversifiée et une demande solide pour les besoins d'allègement des structures, plusieurs freins industriels demeurent pour étendre encore l'utilisation du magnésium, tels que son inflammabilité et sa corrosion rapide à l'air. À plus long terme, les batteries rechargeables au magnésium-ion – qui ont une capacité et une densité d'énergie théoriquement double de celle des batteries Li-ion – pourraient gagner 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, à terme, remplacer les combustibles fossiles. 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* (IMOA), la demande mondiale était de 286 440 tonnes de molybdène contenu en 2022. La répartition se décompose comme suit : 82 % pour les alliages, distingués en aciers de construction dits « d'ingénierie » (38 %), aciers inoxydables (25 %) et aciers pour l'outillage (8 %), la production de fonte (8 %) et les superalliages (3 %). Les autres usages du molybdène sont les composés chimiques (13 %) principalement utilisés dans la fabrication de catalyseurs employés par l'industrie pétrolière, les pigments et les peintures et, enfin, le molybdène sous forme métallique (5 %) pour les applications électriques. En se basant sur une progression de la demande mondiale de 2 % par an, sur les dix prochaines années, comparable à celle observée pendant la dernière décennie, le besoin atteindrait 350 000 tonnes, soit une croissance de la demande totale de plus de 63 000 tonnes.

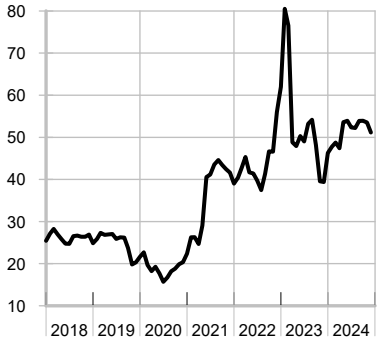
Molybdène

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
				Production mondiale		
	294 000	**298 000**	**255 000**	**253 000**	**248 000**	**260 000**
Arménie	5 000	8 700	7 760	7 800	7 600	8 000
Australie				277	660	1 000
Canada	3 900	2 530	1 390	952	1 150	1 200
Chili	56 000	59 400	49 400	45 600	44 100	38 000
Chine	130 000	120 000	95 300	106 000	96 000	110 000
Corée du Nord				700	400	700
Corée du Sud		411	408	367	339	300
États-Unis	43 600	51 100	41 100	34 600	34 000	33 000
Iran	3 500	1 400	3 100	3 700	2 500	3 000
Kazakhstan					3 730	3 900
Mexique	16 600	16 600	16 300	15 500	17 500	17 000
Mongolie	1 800	2 890	2 970	3 000	3 160	3 100
Ouzbékistan	200	200	1 600	1 700	1 700	1 700
Pérou	30 400	32 200	34 100	31 600	33 500	41 000
Russie	2 800	2 700	1 700	1 700	1 700	1 700
Turquie	400					

Prix du molybdène
Marché libre européen

(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

Le rebond des investissements consacrés aux hydrocarbures en 2023 anticipé par l'Agence internationale de l'énergie (AEI) laisse prévoir une hausse de la demande du métal à court terme. À long terme, les perspectives restent toutefois mitigées, selon certains analystes. Les investissements dans le pétrole et le gaz sont en effet appelés à diminuer progressivement, ce qui constitue un risque de détérioration de la demande. L'usage du molybdène dans les technologies bas carbone et, en particulier, dans le secteur énergétique devrait néanmoins la stimuler. Selon un des scénarios de l'AIE, la demande en molybdène dans le secteur des énergies « propres » pourrait ainsi doubler d'ici à 2040 (environ 50 000 tonnes). Il faut compter également sur l'usage croissant d'aciers inoxydables de meilleure qualité, dans les pays émergents en particulier.

L'oxyde de molybdène (MoO_3) de qualité technique contient au minimum 57 % Mo et est obtenu par le grillage des concentrés miniers de sulfure de molybdène (molybdénite). Il peut être utilisé tel quel lors de la production de fonte ou subir divers traitements pour obtenir, entre autres, le ferromolybdène, le molybdène métal et divers composés chimiques. Les domaines d'utilisation des aciers et alliages au Mo sont extrêmement variés, comprenant l'industrie agroalimentaire (cuves, tuyaux résistants à la corrosion), la génération électrique (centrales nucléaires, turbines à vapeur, à gaz), les transports (pièces de trains, de réacteurs d'avion), la construction (tunneliers, fers à béton, ponts, système de ventilation) et la défense. Cette grande 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 par l'Inde qui y intègrent une teneur croissante en molybdène. La Chine est ainsi passée de 6 kg de molybdène 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 est en augmentation par rapport à 2023, alors qu'elle était en diminution depuis 2017. Elle s'élève à 260 000 tonnes en 2024, selon les données préliminaires de l'USGS. La production minière mondiale provient à 92 % de cinq pays : la Chine (110 000 tonnes, soit 42 % du total), le Chili (38 000 tonnes, soit 15 %), le Pérou (41 000 tonnes, soit 16 %), les États-Unis (33 000 tonnes, soit 13 %) et le Mexique (17 000 tonnes, soit 7 %).

Le molybdène provient de gisements porphyriques de cuivre (70 %), où il est exploité en tant que coproduit, et de gisements porphyriques à molybdène dominant, le gisement de Climax aux États-Unis en étant le modèle le plus connu. En Chine, le molybdène est également récupéré comme coproduit du tungstène dans des gisements de type skarn à W-Mo, ainsi que dans des gisements sédimentaires exhalatifs à molybdène et nickel dans des shales noirs.

L'USGS évalue les réserves mondiales de molybdène en 2024 à 15 Mt, dont 5,9 Mt pour la Chine (39 % des réserves mondiales), suivie par les États-Unis (3,5 Mt), le Pérou (1,9 Mt) et le Chili (1,4 Mt).

Le molybdène est recyclé à partir des déchets de la catalyse, des aciers et des superalliages, ce qui peut représenter jusqu'à 30 % 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 dans l'objectif d'éviter les pertes de performance.

Le molybdène est peu substitué dans ses usages du fait de ses caractéristiques remarquables et, surtout, d'une offre variée et d'un prix relativement faible. Néanmoins, il pourrait éventuellement 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.

L'oxyde technique, le ferromolybdène et le métal sont échangés sur la base de contrats directs à plus ou moins long terme, mais également sur le marché spot (au comptant). Les prix du molybdène sont enregistrés en $/lb ou en $/kg de Mo contenu. Des fourchettes des prix contractuels constatés sont publiées quotidiennement par des fournisseurs de données comme Argus Media. Le métal a brièvement été coté au *London Metal Exchange* (LME) de 2010 à 2019. Les contrats à terme suffisent généralement à couvrir les besoins des industriels, si bien que les quantités échangées sur le marché au comptant restent faibles.

Le cours moyen du molybdène en 2024 était de $ 51,2/kg, en recul de 5,4 % par rapport à 2023, année où son prix moyen était de $ 54,1/kg.

La consommation mondiale de molybdène devrait continuer à croître au cours de la prochaine décennie en raison de la progression 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 porphyre de Malmbjerg au Groenland qui aurait le potentiel de fournir 25 % de la demande de l'Union européenne, et celui de Kitsault au Canada, où le molybdène en est le produit principal.

De manière générale, l'approvisionnement en molybdène reste instable en raison de sa dépendance au marché du cuivre, car il est en grande partie exploité en tant que coproduit de ce métal. L'offre minière est, de ce fait, corrélée à celle du cuivre qui ne représente pas nécessairement les besoins réels du marché du molybdène. Ce sont donc les rares producteurs de molybdène primaire qui peuvent, dans une certaine limite, ajuster leur production, ce qui entraîne depuis quelques années un regain d'intérêt pour les porphyres à Mo. On peut notamment citer l'exemple de la Chine qui investit massivement, depuis le début des années 2000, dans l'exploration de sources de molybdène primaire sur son territoire. Plusieurs gisements de taille mondiale ont été mis en exploitation, comme le porphyre à Mo géant de Donggou (Jinduicheng Molybdenum) dans le Henan, en 2015. À plus long terme, l'exploitation du gisement de Shapingou dans l'Anhui offre les meilleures perspectives et pourrait suffire à répondre à la croissance de la demande chinoise. La compagnie Zijin, qui a repris le gisement en 2022, a annoncé que la mine produira 27 000 tonnes par an de Mo à pleine capacité sur une période initiale de 57 ans (Zijin, octobre 2022). En comparaison, la mine Jinduicheng (porphyre Mo) a produit 20 000 tonnes en 2022 et celle de Cerro verde au Pérou, 10 000 tonnes. Avec une capacité annuelle de production de 40 000 tonnes, Zijin deviendrait alors le premier producteur de molybdène du pays.

En ce qui concerne les événements de l'année 2024, la société canadienne Centerra Gold a finalisé ses études de faisabilité en vue de rouvrir sa mine de molybdène de Thompson Creek, dans l'Idaho, d'ici à 2027. Elle était en sommeil depuis 2014, en réaction à l'effondrement du cours du molybdène. En Corée du Sud, le producteur de tungstène Almonty, propriétaire de la mine de tungstène-molybdène de Sangdong, a finalisé des accords d'enlèvement (*off-take*) avec la société SeAH (fournisseur de SpaceX). Cette mine de tungstène doit ouvrir courant 2025, mais la production de molybdène ne commencera qu'en 2026. Au Groenland, Greenland Resources a, elle, aussi signé des accords d'enlèvement, en l'occurrence pour son gisement de Malmbjerg, avec l'aciériste finlandais Outokumpu Oyj.

En février 2025, le MOFCOM (ministère chinois du Commerce) a mis en place un contrôle des exportations de molybdène, au motif de régulation des biens à doubles usages (militaire et civil). Il concerne les alliages et le molybdène de haute pureté (≥ 97 %), essentiellement destiné à la fabrication de composant de missile. Ce nouveau contrôle s'applique également aux technologies et informations nécessaires à la production de ces biens.

Niobium (Nb)

Le ferroniobium (FeNb), un alliage qui a une teneur en niobium de 60 % à 70 %, représente entre 85 et 90 % des usages du niobium. Il est utilisé principalement dans les aciers microalliés à haute limite d'élasticité (HLE) et dans certains aciers inoxydables et réfractaires. Le ferroniobium de haute pureté (99 % FeNb) est utilisé dans la production des supraconducteurs, en particulier des accélérateurs de particules et des appareils IRM (Nb_3Sn et NbTi) et les superalliages composant les aubes de turbine des réacteurs d'avion et des turbines à gaz, ainsi que dans les réacteurs nucléaires (par exemple dans la gaine en zircaloy des crayons de combustible). 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.

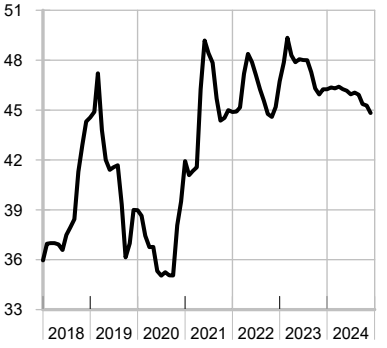
De nouveaux usages émergent rapidement, notamment dans le secteur des batteries Lithium-ion (Li-ion). En effet, le remplacement des anodes en graphite par des anodes à bases d'oxydes métalliques permettrait d'en prolonger la durée de vie ainsi que la capacité. Dans ce sens, la société suisse Leclanché, spécialisée dans le stockage électrique, a présenté en 2024 un nouveau type de batterie Li-ion à anode à base de niobium pour applications lourdes. Elle est décrite comme possédant une très forte densité électrique, une durée de vie de 10 000 cycles et la capacité de pouvoir endurer le rechargement rapide. Selon CBMM, le leader mondial du marché du niobium, interrogé par Fastmarkets, la consommation du niobium dans les batteries pourrait atteindre 25 % de ses revenus annuels, soit une production de 35 000 tonnes d'oxyde de niobium d'ici 2030. Ces prévisions expliquent l'important investissement réalisé, en 2023, par l'entreprise dans une nouvelle usine de production d'oxyde de niobium pour batteries. Un autre marché potentiel de croissance est celui du niobium nanocristallin, actuellement estimé à 1 200 tonnes de niobium contenu.

Pour l'année 2024, la production mondiale du niobium est évaluée à 110 000 tonnes par l'USGS, similaire à 2023 (réévaluation par cette même institution à 110 000 tonnes en 2023, au lieu des 83 000 tonnes initialement annoncées début 2024). Le producteur dominant de ce marché est le Brésil, avec plus de 90 % des tonnages mondiaux, suivi du Canada avec environ 6 %. L'industrie brésilienne du niobium est fortement intégrée, avec pour principal acteur la société CBMM. Sa mine principale est celle 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. Des investissements récents ont permis d'augmenter la capacité de production de produits de première transformation pour passer de 100 000 tonnes à 150 000 tonnes de FeNb équivalent par an, anticipant ainsi la demande future et dépassant sa capacité de production primaire. 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 le groupe China Molybdenum (CMOC), avec une capacité estimée d'environ 9 500 tonnes de Nb par an. Au Canada, Magris Performance Materials Inc. (ex-Magris Resources), exploite la mine Niobec, située au Québec, avec une produc-

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

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production mondiale			
	97 000	**67 700**	**87 600**	**83 700**	**110 000**	**110 000**
Brésil	88 900	59 800	78 700	75 600	102 000	100 000
Canada	6 800	6 500	7 500	6 700	6 700	7 100
Rép. dém. du Congo			580	710	740	700
Rwanda			450	199	200	200
Russie			158	381	353	350
Autres pays	1 250	1 350	170	127	121	120

Prix du ferro-niobium 65 % Nb
Marché libre européen
(en dollars/kg)



(Source : Mineral Commodity Summaries)

tion évaluée à 7 100 tonnes de Nb en 2023, soit 6 % de la production mondiale. Aux États-Unis, la société NioCorp, propriétaire du gisement d'Elk Creek (Nebraska), poursuit l'objectif d'engager la construction des premières infrastructures minières. La production envisagée lors de l'étude de faisabilité de 2022 était de 7 450 tonnes par an de FeNb à 65 %, ce qui représenterait la première production de niobium du pays depuis 1959. La société a d'ores et déjà signé des « accords de livraison » (ou contrats d'*offtake*) pour sa future production, notamment 75 % du ferroniobium ainsi que les terres rares avec le constructeur automobile Stellantis ; elle cherche à faire de même sur le titane. Ce projet est stratégique pour les États-Unis, car il permettrait de renforcer la sécurisation des approvisionnements relatifs à une ressource minérale particulièrement critique pour le secteur de la défense et de l'industrie aéronautique. D'autres projets sont également en cours d'exploration, en particulier au Brésil, avec l'acquisition par l'australien St George Mining du projet Araxá adjacent à la mine du même nom et au Canada par les travaux de Nio Métaux Stratégiques (ex-Niocan) sur l'ancienne mine d'Oka. Il convient de noter, tout de même, une petite production minière de niobium en France qui concerne la carrière de kaolin de Beauvoir-Échassières (03) exploitée par Imerys Ceramics France et qui commercialise un concentré à Sn-Ta-Nb. Cette production serait de l'ordre de 80-90 tonnes de concentré par an, ce qui représenterait cinq à six tonnes de niobium.

Le complément de l'offre minière mondiale est majoritairement issu de l'exploitation du « coltan », où le niobium et le tantale sont portés par une association minérale de colombite-tantalite. Le coltan est en particulier exploité artisanalement en République démocratique du Congo (RDC), au Rwanda, ainsi qu'au Mozambique.

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. À travers le monde, de nombreux gisements de niobium font l'objet d'études avancées. Parmi les plus notables, on trouve le projet Kanyika, porté au Malawi par Globe Metals & Mining, dont la construction devrait débuter en 2025. En Tanzanie, le projet Panda Hill est mené par Panda Hill Mining, tandis qu'en Australie, le gisement de Dubbo-Toongi est développé par Australian Strategic Materials en Nouvelle-Galles du Sud. Enfin, une découverte récente à haute teneur, Luni-West Arunta, située en Australie-Occidentale, appartient à WA1 Resources.

D'après les données du service géologique américain, les stocks stratégiques de ferroniobium détenus par les États-Unis seraient de 136 tonnes.

N'ayant pas de cotation sur les marchés bour-

siers, les prix sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Le prix annuel moyen du ferroniobium (65 % Europe) s'établissait à $ 45,92/kg en 2024, en baisse de 3,3 % par rapport à 2023.

Le niobium est substituable par le vanadium et le molybdène dans la fabrication des aciers microalliés HSLE. D'autres métaux pourraient également se substituer au niobium dans certains aciers, comme le tantale, le titane, le tungstène ou encore le molybdène. Les composites à matrice céramique sont aussi envisageables dans les applications de haute température, telles que les superalliages. Néanmoins, la substitution du niobium par d'autres métaux pourrait entraîner une diminution des performances ou une augmentation importante des prix.

Rhénium (Re)

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

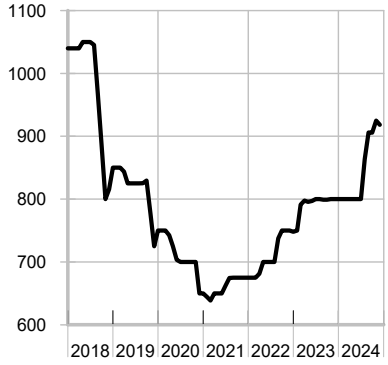
Le perrhénate d'ammonium (APR) est le principal produit intermédiaire. Il est utilisé pour obtenir l'acide perrhénique et le rhénium métal sous forme de poudres, pellets ou briquettes. Le rhénium entre dans la composition des superalliages à base de nickel, notamment pour la fabrication des aubes de turbines pour la partie chaude des réacteurs d'avions civils et militaires. Les superalliages à base de nickel représentent 80 % de la demande mondiale, contenant de l'ordre de 3 % Re en poids. 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, les commandes ont chuté drastiquement en 2020 et 2021 face à l'incertitude de la reprise du trafic aérien. Cependant, l'annonce des prévisions de production pour 2022-2023 des avionneurs a relancé la demande en superalliages dès le second trimestre 2021. En 2022, le trafic aérien a repris progressivement. La guerre en Ukraine a conduit à une augmentation de la demande de l'aviation militaire, et les commandes sont donc globalement reparties à la hausse. Cependant, malgré cette croissance no-

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

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Production mondiale					
	53 200	**59 300**	**59 500**	**55 100**	**62 600**	**62 000**
Arménie	280	260	260	260	210	200
Chili	30 000	30 000	30 000	29 000	30 000	29 000
Chine	2 500	2 500	2 500	2 500	5 300	5 300
Corée du Sud	2 800	2 800	2 800	2 800	2 800	3 000
États Unis	8 360	8 830	9 290	8 870	9 410	9 500
Kazakhstan	500	500	500	500	500	500
Ouzbékistan	460	4 900	4 900	4 900	5 000	5 000
Pologne	8 340	9 510	9 290	6 310	9 380	9 400

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

table, 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. Néanmoins, conformément aux prévisions, le secteur de l'aéronautique a une nouvelle fois enregistré une croissance de sa production en 2024, notamment illustrée par une augmentation de 4 % du nombre d'avions commerciaux livré par Airbus (766 avions contre 735 en 2023).

Les catalyseurs en pétrochimie arrivent en seconde position avec environ 15 % des usages. En effet, l'alliage rhénium-platine est l'un des catalyseurs clés dans les réactions de reformage catalytique du pétrole, opération chimique servant à valoriser une fraction du pétrole (le naphta lourd) en essence. La demande de rhénium dans cet usage reste stable, la part des substituts, comme les catalyseurs polymétalliques à base d'iridium ou d'étain, n'ayant pas augmenté significativement.

Les autres applications, comme les alliages Mo-Re et W-Re, représentent 5 % des usages du rhénium.

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 le cuivre et le molybdène est estimée à 62 tonnes en 2024, selon les données préliminaires de l'USGS. Cela représente une baisse de 1 % comparée aux 62,6 tonnes produites en 2023. L'industrie est fortement concentrée. Les principaux producteurs de rhénium au Chili sont Molymet et Codelco. Le Chili totalise approximativement 29 tonnes de rhénium qui sont récupérées dans les fumées lors du grillage des minerais réalisés dans différentes opérations métallurgiques à travers le monde (incluant également celles de Belgique, du Mexique et du Pérou). En 2024, les États-Unis en auraient produit environ 9,5 tonnes (majoritairement *via* la société Freeport McMoran), suivis par la Pologne avec 9,4 tonnes de rhénium (essentiellement par la société KGHM). Les autres producteurs sont situés en Ouzbékistan, en Corée du Sud et en Chine.

L'USGS évalue avec de grandes incertitudes les réserves mondiales de rhénium comme supérieures à 2 314 tonnes, dont 1 300 tonnes pour le Chili (56 % 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, en 2024, le prix moyen du perrhénate d'ammonium (APR) (basic grade-69,2 % Re) était de $ 843/kg, en augmentation de 7 % par rapport à 2023 ($ 790/kg).

On estime que les filières de recyclage auraient produit 25 tonnes de rhénium en 2024, ce qui représente désormais près du tiers de l'approvisionnement total. Les principaux producteurs de rhénium secondaire se situent aux États-Unis, en Allemagne, ainsi qu'au Canada, en Estonie, en France, au Japon, en Pologne et en Russie. En France, un acteur est concerné avec l'entreprise Umicore Specialty Powders (ex-Eurotungstène Poudres). Les pièces contenant du rhénium dans des superalliages à base de nickel sont recyclées en boucle courte et en fin de vie. Le recyclage des superalliages concerne donc principalement les turbines d'avions ainsi que les pales et vannes de turbines à gaz, ce qui représente entre 15 tonnes 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, en juin 2020, l'entreprise Umicore a fermé ses activités de recyclage du rhénium dans son usine de Wickliffe dans l'Ohio pour des raisons de rentabilité (capacité de sept tonnes par an). Cette décision s'inscrit dans la lignée des précédents de l'entreprise Hootech en Chine, ainsi que de Nordmet et KLS en Estonie, qui ont également cessé leur production de rhénium secondaire en 2018 (environ trois 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 spa-

tiale en 2020 a contribué à resserrer l'offre en métal recyclé. L'effet positif sur les prix observés en 2022-2023 et les perspectives favorables du secteur aéronautique pourraient contribuer à redynamiser ces filières de recyclage.

En outre, depuis 2008, de nombreuses expérimentations ont été réalisées pour substituer le rhénium dans ses applications majeures, notamment en produisant des superalliages appauvris en 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. Néanmoins, une éventuelle substitution du rhénium dans les superalliages utilisés dans les parties les plus chaudes des turbines à gaz demeure très limitée.

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 (propriété de Culpeo Minerals) au Chili. L'un des rares projets avancés est le celui de Merlin dans le nord-ouest du Queensland (Australie), développé par Chinova Resources. Les premières infrastructures de la mine, telles que les travaux souterrains d'accès au gisement, ont été partiellement réalisées en 2014, mais la mine a rapidement été mise sous cocon à la suite de l'effondrement du cours du molybdène. Le potentiel serait une production de 7 300 kg par an de Re et 5 100 tonnes par an de Mo. Toujours dans le Queensland, à moins de 100 km du projet Merlin, la société Hammer Metals a annoncé des ressources minérales en Re pour son projet de mine de cuivre Kalman, soit 39,1 Mt de minerai à 2,1 g/t Re (accompagnés d'autres métaux, comme l'or, l'argent et le molybdène).

Du côté des énergies renouvelables et de la production d'hydrogène, des études ont démontré la possibilité de remplacer le platine par du rhénium dans les opérations d'électrolyse de l'eau. Ce métal serait employé dans une technologique innovante de membrane échangeuse d'anions ne nécessitant pas l'utilisation d'élément du groupe du platine, dont les prix sont très élevés.

Scandium (Sc)

Le scandium est un élément généralement considéré comme faisant partie de la famille des terres rares en raison de ses propriétés similaires aux lanthanides. Il possède pourtant des caractéristiques géologiques et des propriétés industrielles distinctes, parmi lesquelles son très faible rayon ionique, sa faible densité (2,99 g/cm^3, proche de celle de l'aluminium) et son point de fusion élevé (1 541 °C).

Le scandium est utilisé sous deux formes principales : l'oxyde de scandium pour le stockage stationnaire d'énergie au sein des piles à combustible à oxydes solides de haute température (SOFC), et le scandium métal dans les alliages aluminium-scandium (Al-Sc).

En tant qu'oxyde, parfois dénommé « scandia » (Sc_2O_3), il intervient comme dopant stabilisateur de l'électrolyte solide en zircone (oxyde de zirconium : ZrO_2) dans les piles à combustible avec de bonnes performances en conduction ionique.

Sous forme métallique, il donne aux alliages Al-Sc une légèreté et une forte résistance mécanique : des propriétés recherchées dans le secteur du transport (aéronautique civile et militaire, automobile, etc.), ainsi que dans les équipements sportifs de haute qualité (cycles, clubs de golf, battes de baseball, etc.), 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. Son rôle dans les alliages d'aluminium est celui d'agent d'affinage de grain en favorisant la germination de l'aluminium et, par conséquent, en limitant la croissance cristalline. Ainsi, les alliages auront des propriétés mécaniques supérieures permettant, par exemple, d'alléger des structures en substituant des alliages plus lourds (comme les aciers). Les doses utilisées lors de l'adjonction de scandium dans l'aluminium sont faibles, de l'ordre de 0,1-0,2 % de la masse de l'alliage (exceptionnellement 2 % dans certaines applications particulières).

Un usage plus marginal est celui des lampes halogènes où il peut être intégré sous forme d'halogénure de scandium (ScI_3) pour en améliorer le spectre d'émission. On peut aussi mentionner l'utilisation de nitrure de scandium-aluminium à

des fins de recherche (ScAlN), comme le développement des semi-conducteurs de puissance fonctionnant à plus haute température et à plus haute fréquence que le nitrure de gallium.

Les faibles concentrations naturelles de scandium dans la croûte terrestre et ses propriétés atomiques sont des freins à la formation de gisements économiquement exploitables. Les ressources de scandium sont donc abondantes, mais peu concentrées, ce qui contraint sa récupération. Ainsi, le scandium peut être récupéré uniquement en tant que coproduit ou sous-produit lors du traitement métallurgique d'autres substances, en particulier par récupération directe ou dans les résidus issus de la fabrication/purification du dioxyde de titane, des terres rares, et de l'acier (en Chine), ainsi que dans les filières de transformation de l'uranium, du zirconium, de la bauxite et des phosphates (en Russie). Enfin, il peut être récupéré à partir du traitement hydrométallurgique du nickel et du cobalt issus de gisements latéritiques (Philippines, Australie).

Les chiffres de production sont très incertains. Une quantité de 30 à 40 tonnes aurait été produite mondialement en 2024, principalement sous forme de trioxyde de scandium (Sc_2O_3). La capacité de production mondiale annuelle est estimée à 80 tonnes, la Chine étant de loin le principal producteur mondial.

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 10-12 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. Toujours en Chine, dans la province du Hebei, la société Minmetals filiale de la firme CMC (China Metallurgical Group Corporation) a finalisé, en 2023, la construction de son usine de Tangshan avec une capacité de production de 20 tonnes à partir de minerai importé de Papouasie–Nouvelle-Guinée.

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 onze tonnes d'oxalate de scandium auraient ainsi été produites en 2024.

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.

Parmi les projets en cours de développement figure l'usine de Rio Tinto dans le complexe métallurgique de Sorel-Tracy au Québec, avec une capacité de trois tonnes par an d'oxydes de scandium de haute pureté (99,99 %) à partir de ses résidus de production de dioxyde de titane. Sur ce site, Rio Tinto prévoit une importante augmentation de sa capacité de production à douze tonnes par an à brève échéance. 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.

En Australie, bien qu'aucune production minière de scandium n'ait encore débuté, plusieurs projets sont à des stades avancés. Parmi ces derniers, plusieurs se distinguent par leur avancement :

Le projet Sunrise (anciennement Syerston), de la compagnie Clean Teq avec une production projetée de 20 tonnes Sc_2O_3 par an et qui pourrait monter à 150 tonnes par an, en sous-produit du nickel et du cobalt. Les réserves prouvées et probables sont de 6 700 tonnes de Sc contenu, soit la plus grande ressource mondiale en scandium publiquement documentée à ce jour ;

Le projet Nyngan de la compagnie Scandium International Mining Corp qui pourrait produire 38 tonnes par an de Sc_2O_3 pendant vingt ans ;

Le projet Owendale acheté par Rio Tinto mi-2023 à la société Platina Resources et appelé PSP (*Platina's Scandium Project*). Il est prévu de produire jusqu'à 40 t/an Sc_2O_3 sur une période de trente ans en coproduit du cobalt et du nickel par lixiviation acide sous haute pression (HPAL).

Le projet Sconi (société Australian Mines) dans le Queensland devrait produire du scandium en plus du cobalt et du nickel, également par un procédé de type HPAL. Le démarrage théorique de la production est prévu d'ici 2028, avec une capacité de 74 t/an Sc_2O_3.

D'autres découvertes sont en cours, West Cobar Metals ayant révélé, en 2024, d'importantes ressources en scandium dans le gisement Newmont, en Australie-Occidentale, avec des réserves probables dépassant 1 200 tonnes. Australian Mines a réévalué et presque doublé ses ressources en scandium sur le projet de Flemington, en Nouvelle-Galles du Sud. En Europe, certains projets européens de recherche, financés par l'EIT RawMaterials, pourraient également déboucher sur la mise en place d'une filière européenne de production et raffinage du scandium, même si, actuellement, l'approvisionnement européen repose essentiellement sur le secondaire. Il est généralement contenu dans les boues rouges issues du raffinage de la bauxite par le procédé Bayer, avec notamment un projet pilote en Grèce. Le projet ScaVanger vise à produire, à un horizon proche, environ 21 tonnes par an d'oxyde de scandium en coproduit du raffinage de l'oxyde de titane, avec une première usine possiblement implantée en France.

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. À titre indicatif, sur le marché des métaux de Shanghai, l'oxyde de scandium à 99,99 % de pureté s'échangeait fin 2024 autour de $ 620/kg et le scandium métal à 99,999 % aux alentours de $ 3 629/kg.

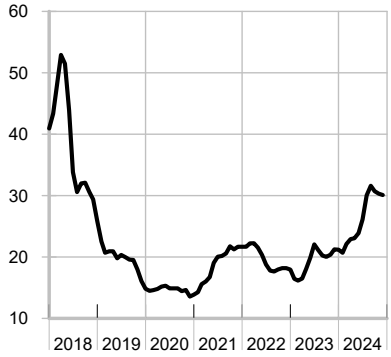
Sélénium (Se)

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 animale. Les applications métallurgiques constituent la plus grande part de sa consommation (40 %), sous forme de sélénium purifié à 99,5 %. Son uti-

Sélénium
(en tonnes de métal)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production mondiale de métal						
	2 880	**3 120**	**3 100**	**3 310**	**3 530**	**3 700**
Afrique du Sud	300	300	300		9	9
Allemagne	300	300	300	300	50	50
Belgique	200	200	200	200	200	200
Canada	57	60	57	110	130	130
Chine	1 100	1 200	1 260	1290	1780	1800
Finlande	115	84	80	130	122	170
Inde		14	14	14	14	14
Japon	740	740	720	710	680	710
Pérou	40	35	36	57	50	50
Pologne	64	74	74	82	74	74
Russie	150	340	300	340	350	340
Serbie					24	60
Suède	19	10	5	10	4	
Turquie	50	50	50	50	50	50
Ouzbékistan					2	2
Autres pays	45	14	21	14		

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



(Source : USGS Mineral Commodity Summaries)

lisation 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. 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 dans le temps et se répartit entre les usages suivants : 40 % pour les applications métallurgiques, dont la production électrolytique du manganèse, 20 % pour l'industrie du verre et 20 % 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, 5 % pour la chimie et les pigments, et 5 % en usages divers.

La métallurgie du manganèse est le principal secteur d'utilisation du sélénium de pureté 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, marchés 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 également 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 3 700 tonnes en 2024, soit une augmentation de 4,8 % par rapport à 2023 (3 530 tonnes). Les données concernant les États-Unis sont habituellement confidentielles. Les principaux producteurs mondiaux sont la Chine (1 800 tonnes), le Japon (710 tonnes), la Russie (340 tonnes) et la Belgique (200 tonnes). Ces quatre pays représentent plus de 80 % de l'offre mondiale. Du côté des actualités, l'USGS indique que la production suédoise 2024 est nulle à la suite d'un incendie dans la raffinerie de Rönnskär et que la production serbe a récemment augmenté grâce à des travaux d'expansions des installations de Bor. En Indonésie, Amman Mineral et Freeport Indonesia ont inauguré un nouveau complexe de fonderie-raffinerie d'une capacité annuelle de 77 tonnes de sélénium à 99,9 %. Au Kazakhstan, en janvier 2025, la société Kazakhmys annonce avoir finalisé les essais de sa raffinerie du complexe de Balkhach permettant de produire environ 100 tonnes de sélénium à 99,5 %.

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-Retorte), la Belgique (Umicore), la Finlande (Boliden), la Pologne (KGHM) et la Suède (Boliden). Les États-Unis produisent également de petites quantités de sélénium non raffiné via ASARCO (Texas) et RioTinto-Kennecott (Utah). La production de sélénium pur a été mise en veille en 2021 et, selon l'USGS, la totalité du sélénium produit est désormais raffiné à l'étranger.

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 92 000 tonnes de Se, dont 26 000 tonnes en Rus-

sie (soit plus du quart des réserves mondiales) et 16 000 tonnes au Pérou (soit 17 % des réserves mondiales). Les autres pays détenteurs de réserves significatives sont les États-Unis, le Canada et la Chine avec, respectivement, 11 %, 7 % et 5 % des réserves mondiales. Les charbons contiendraient également des quantités importantes de sélénium, mais à ce jour, la récupération ne semble pas économiquement viable. La combustion industrielle du charbon est d'ailleurs une des principales sources d'émission de sélénium dans l'environnement. La plupart du sélénium recyclé provient des déchets électroniques, des panneaux photovoltaïques en couches minces et jadis 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 insignifiant et 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 2024 était de $ 26,07/kg contre $ 19,17/kg en 2023, soit une hausse significative de 36 %. Cette importante augmentation des prix est probablement imputable à la surcapacité de production des fonderies de cuivre chinoises ayant entraîné une forte concurrence à l'achat des concentrés de cuivre. Cette concurrence interne a mécaniquement mené à l'accroissement des prix du sélénium, ce métalloïde étant valorisé en tant que sous-produit de l'affinage du cuivre. 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 principalement selon le marché du manganèse.

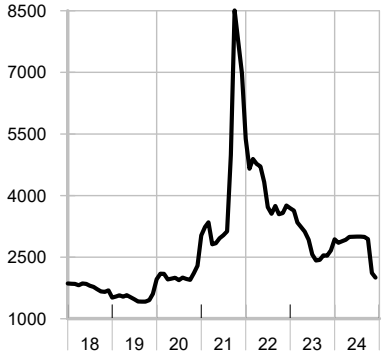
Silicium métal (Si)

Le silicium est le second 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 (SiO_2) dans la construction, mais aussi sous sa forme pure (c'est-

Silicium
(en milliers de tonnes de métal + ferrosilicium)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production mondiale			
	8 410	8 120	9 150	9 110	9 470	9 700
Afrique du Sud	96				50	45
Allemagne			63	62	59	60
Australie		42	50	48	39	40
Bhoutan	90	67	85	75	82	80
Brésil	340	404	389	391	386	390
Canada	57	47	49	49	52	50
Chine	5 700	5 600	6 400	6 670	7 270	7 400
Espagne	66	55	60	52	49	45
États-Unis	310	277	313			
France	130	112	127	121	113	110
Inde	60	59	59	59	59	60
Islande	88	103	111	128	97	90
Kazhakhstan		67	122	101	134	137
Malaisie	150	109	85	91	91	130
Norvège	375	345	362	339	299	300
Pologne		42	49	47	33	30
Russie	610	576	644	626	527	520
Ukraine	63	40	49	28		
Autres pays	278	290	128	223	130	208

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

à-dire > 98 % Si) dite « silicium métal », qui fait l'objet de ce chapitre.

En 2024, le silicium métal est utilisé dans trois principaux usages, chacun représentant environ un tiers de la consommation. Il s'agit de la fabrication des silicones et silanes, la réalisation d'alliages d'aluminium Al-Si et enfin les cellules photovoltaïques. Il est à noter l'utilisation de silicium métal pour la fabrication des semi-conducteurs, bien que cela ne représente qu'une très faible part du marché (3 à 5 %). Les croissances des deux derniers usages 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 2010-2024 et a dépassé les 4,5 Mt en 2024.

Le silicium est produit par la réduction de la silice (SiO_2) 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 diméthyldichlorosilane, 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 ($SiHCl_3$) 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 appellation « polysilicium ». Il est ensuite refondu puis transformé en lingots mono - ou multicristallins. En 2024, la part de cellules solaires au Si monocristallin est largement dominante sur le multicristallin, en atteignant près de 98 % du marché global, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

L'USGS estime une production de silicium métal de 4,6 Mt en 2024. Les premiers producteurs ont été la Chine, le Brésil, la Norvège, les États-Unis et la France. La Chine est responsable de 84 % de la production mondiale et vise l'hégémonie sur le marché du silicium. Elle continue d'installer de nouveaux fours pour produire du silicium métallurgique et du polysilicium en grande quantité, appliquant ainsi une pression baissière sur les prix. Celle-ci est difficile à supporter dans les autres régions du monde où les coûts de production sont plus élevés, notamment en Europe. Début 2024, REC Silicon a arrêté la production de polysilicium solaire sur son site de Butte aux États-Unis en raison du coût de l'électricité. De même, REC Group a arrêté la production de polysilicium en Norvège, dont les sites ont été en partie rachetés par le groupe chinois Bluestar Elkem, début 2024. Le producteur de silicium métal français Ferropem et le producteur de polysilicium Wacker ont également rencontré des difficultés. Ce fut aussi le cas pour les fabricants de plaquettes de silicium norvégiens, dont certains ont annoncé des arrêts de production.

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 re-

cyclage 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 tellurure de cadmium peuvent se substituer au silicium en tant que semi-conducteurs sur des critères de prix et de performance. 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, tels que le germanium, ce dernier étant préféré dans certaines techniques de pointe (le photovoltaïque ou l'aérospatiale, par exemple).

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 termes et des options sur le silicium métal. Après avoir atteint un sommet, fin 2021, à plus de $ 8 500/t, le prix du silicium métal a baissé en 2022, puis 2023. Sur 2024, les prix se sont maintenus aux alentours de $ 2 800/t, sans variation majeure depuis fin 2023.

Tantale (Ta)

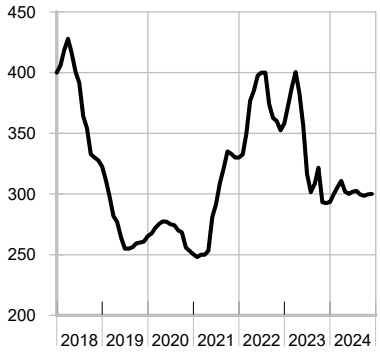
Le tantale est un métal réfractaire avec une température de fusion très élevée de 3 017 °C. C'est également un métal particulièrement dense (16,7), très résistant à la corrosion par les acides, et doté d'une permittivité électrique élevée. Cette dernière propriété est recherchée pour la fabrication de condensateurs électroniques robustes de très faibles volumes, 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 outils de découpe ou revêtement de moules en acier (5 %). Plus marginalement, le tantale sous sa forme d'oxyde (pentoxyde de formule chimique Ta_2O_5) est utilisé dans le domaine optique lors de la fabrication de lentilles de verre d'appareil photo pour

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

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production mondiale			
	1 850	2 100	1 840	1 990	2 040	2 100
Australie	67	34	44	46	44	52
Bolivie		7	1		1	2
Brésil	430	470	360	370	138	210
Burundi	38	24	39	59	1	2
Chine	76	74	76	78	78	76
Éthiopie	70	69	32		40	40
Mozambique		43	37		51	55
Nigéria	180	260	110	110	390	390
Ouganda		38	38			
Rép. dém. du Congo	580	780	790	890	920	880
Russie		49	39	31	23	29
Rwanda	336	254	269	347	350	350
Autres pays	45			120		

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

en améliorer leur légèreté et leur luminosité.

La consommation mondiale de tantale est repartie à la hausse en 2024, après une année 2023 morose. Ce rebond s'explique par un rétablissement de la demande concernant les technologies de l'information et de la communication (TIC) comprenant, entre autres, l'électronique portable ou encore les data centers. Si les condensateurs multicouches en céramiques (MLCC) continuent de dominer le marché grâce à des coûts moindres et à leur disponibilité, la demande en condensateurs au tantale a augmenté avec l'utilisation des appareils portatifs (téléphones, ordinateurs, tablettes, etc.). Selon le T*antalum-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 2030, différents consultants estiment des croissances du marché du tantale comprises entre 5 et 15 % par an, relativement proche des prévisions de vente d'appareils électroniques portatifs avec une progression de la demande de 9-12 % par an.

En 2024, la production mondiale était de 2 100 tonnes de Ta métal contenu, selon l'USGS. Cependant, les statistiques concernant l'extraction minière du tantale sont très peu précises. Toujours selon les données de l'USGS, la République démocratique du Congo (RDC), le Nigéria, le Rwanda et le Brésil sont les principaux producteurs de tantale en 2024 avec 87 % de la production mondiale. Une part importante du tantale est issue d'exploitation artisanale et d'exportation de concentrés de colombo-tantalite (aussi appelé coltan) provenant de la région des Grands Lacs africains. Les données estimées sont de 880 tonnes de Ta contenu pour la RDC (42 %) et 390 tonnes pour le Nigéria (19 %). Le Rwanda (17 %) passe troisième producteur mondial, suivi du Brésil (10 %) et de la Chine (4 %). En France, plus précisément dans l'Allier, la production de tantale est estimée à dix tonnes par an en tant que sous-produit de l'exploitation de kaolin de la mine de Beauvoir-Échassière, propriété d'Imerys.

N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix sont établis par négociation directe entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. En 2024, le prix annuel moyen du tantale métal (Ta 99,8 % EU) s'est établi à $ 301/kg, enregistrant une baisse de 11,7 % par rapport à la moyenne 2023 ($ 341/kg).

Dans le cas des minerais de type pegmatite (majoritaires 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 que la construction de la mine de Kathleen Valley (Liontown) est finalisée et que celle-ci a produit ses premiers concentrés en milieu d'année. Une autre actualité remarquable est le rachat, en 2023, de la mine de Bald Hill par la société Mineral Resources (également propriétaire de Wodgina et Mt Marion). Cette même mine a d'ailleurs été mise sous cocon en fin d'année 2024 à la suite de la baisse du prix du lithium. 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, Swanson en Namibie ou encore Manono en RDC. Ce dernier projet est d'ailleurs au cœur d'un conflit politico-financier entre le chinois Zijin Mining et la société australienne AVZ Minerals.

L'offre australienne est devenue particulièrement attractive par rapport à la production de tantale en provenance du Rwanda et de la RDC, car elle échappe au cadre des minerais de conflit. D'un point de vue économique, cependant, ce type de minerai présente un aspect doublement avantageux et risqué, étant étroitement lié à la production de lithium. En effet, d'une part, l'extraction de lithium permet de maintenir des coûts de production relativement faibles, mais, d'autre part, cette dépendance au lithium entraîne des fluctuations des volumes extraits en fonction de l'évolution des prix. Cet effet de levier montre désormais ses limites, particulièrement depuis l'effondrement des cours du lithium en 2023. La mise en sommeil, pour des raisons économiques, de la mine de lithium de Bald Hill, qui produit également du tantale, illustre parfaitement cette dynamique.

Strategic Minerals Europe, le seul producteur de tantale du continent européen, a produit en 2023 un peu plus d'une trentaine de tonnes de concentré de tantalite/colombite, en tant que coproduit de sa production primaire d'étain à Penouta, en Espagne. Toutefois, la société a temporairement suspendu ses activités minières fin 2023 en raison d'un contentieux d'ordre environnemental. De-

puis, Strategic Minerals Europe a été rachetée par IberAmerican Lithium, qui reprendra les travaux d'exploitation une fois la transaction finalisée.

Un autre facteur de tension potentielle est le développement accéléré de restrictions sur l'approvisionnement pour les entreprises de produits électroniques, notamment. Ainsi, le gouvernement américain a mis en place une loi sur les « minerais de conflit » obligeant les entreprises américaines à examiner leurs chaînes d'approvisionnement pour connaître et déclarer l'origine de leurs minerais et composés de tantale (ainsi que de tungstène et d'étain) particulièrement en provenance de Chine, d'Iran, de Corée du Nord et de Russie. La reprise des conflits armés à la frontière entre la RDC et le Rwanda pourrait intensifier ces procédures de contrôle.

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 également une production secondaire de tantale à partir des déchets en boucle courte (*new scrap*), produits durant la fabrication de produits électroniques et de matériaux utilisant le tantale. À la fin de leur cycle de vie, le recyclage de ces composants devient particulièrement complexe en raison de leur forte dilution et de la taille des composants électroniques. Cependant, cela demeure un axe de développement crucial. De manière générale, le recyclage du tantale compte pour environ 20 % de la consommation mondiale. L'USGS estime même que la part du recyclage pourrait représenter jusqu'à 30 % de la production domestique des États-Unis.

Les réserves mondiales de tantale sont proches des 400 000 tonnes de Ta contenu. Néanmoins, les seules données accessibles et vérifiables concernent l'Australie (110 000 tonnes selon l'USGS) et le Brésil (40 000 tonnes). Les réserves chinoises seraient, quant à elles, de 240 000 tonnes, mais ce chiffre est à prendre avec prudence en raison du manque d'informations précises corroborant cette estimation. Les ressources en terre sont vraisemblablement bien supérieures, notamment au Canada et aux États-Unis.

À l'échelle mondiale, les perspectives pour la demande en tantale sont positives. 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 dispositifs de communication 5G ou ceux fonctionnant à des températures élevées dans les véhicules électriques. Les condensateurs sont, et devraient donc rester, le principal marché du tantale. Le développement futur de ces derniers sera axé sur le remplacement de plusieurs MLCC par un seul condensateur au tantale pour un gain de performance et de poids. Les cibles de pulvérisation, les produits chimiques à base de tantale, les superalliages et les produits métallurgiques ont une large gamme d'applications finales et cette diversité offre une mesure de protection contre les fluctuations des différents marchés.

Tellure (Te)

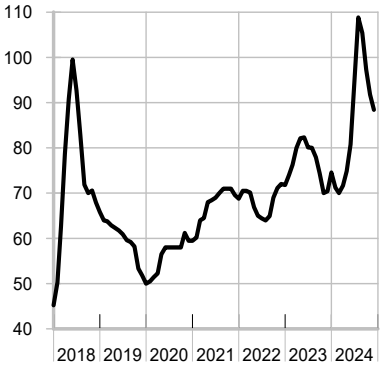
Le tellure est l'un des éléments les plus rares dans l'écorce terrestre (1 à 10 ppb). Il est, pour l'essentiel, extrait en sous-produit de la métallurgie du cuivre. Il est souvent associé au sélénium avec lequel il partage des propriétés chimiques. Le tellure est particulièrement utilisé pour ses propriétés semi-conductrices, photosensibles et photoélectriques.

Le tellure est utilisé en premier lieu dans la fabrication de panneaux photovoltaïques à couches minces au tellurure de cadmium (CdTe) qui représentait, selon l'USGS, 60 % de sa consommation en 2024. Il est aussi utilisé dans les générateurs thermoélectriques (20 %), en métallurgie (15 %) en tant qu'additif pour accroître l'usinabilité de métaux, comme l'acier ou le cuivre, ainsi que dans la fabrication de produits chimiques (5 %). Le tellurure 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 (2 %), l'imagerie thermique, les capteurs pour l'imagerie spatiale, les détecteurs de rayons X, les

Tellure
(en tonnes de métal raffiné)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production mondiale			
	520	**562**	**610**	**584**	**944**	**980**
Afrique du Sud	8	2	4	4	4	4
Bulgarie	4	3	4	3	1	1
Canada	40	44	44	24	27	27
Chine	325	330	330	380	725	750
Japon	50	70	68	68	65	70
Ouzbékistan			48	3	13	13
Russie	52	71	70	70	73	70
Suède	41	42	41	33	36	46

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

colorants pour l'industrie céramique, les capteurs biologiques, et les biocides.

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la part de marché des technologies de couches minces représentait 2 % de la puissance photovoltaïque fabriquée dans le monde en 2023, soit environ 12,5 gigawatts (GW), dont la majorité était des modules CdTe produits par First Solar (États-Unis). En 2024, First Solar livrait 14,1 GW de modules à couches minces CdTe. 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. Avec seulement 5 % de part de marché du tellure (contre 42 % dans le monde), les panneaux CdTe semblent, en revanche, éprouver des difficultés à trouver leur place en Europe, puisque la seule entreprise européenne du secteur, l'allemand Calyxo, s'est déclarée en faillite en 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 dix ans). Une fabrication annuelle de 16 GWc – gigawatts « crête » – de modules, comme le prévoyait de le faire l'américain First Solar dès 2024, demanderait donc 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 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 tellurure de bismuth et certains minerais d'or, comme à Kankberg (Suède), où ont été produites 46 tonnes de Te en 2024.

En 2024, la production mondiale de tellure (hors États-Unis) a été estimée par l'USGS à 980 tonnes, en augmentation de 3,8 % par rapport à 2023 (944 tonnes). Les producteurs de tellure sont principalement les pays producteurs de cuivre raffiné : la Chine (76,5 %), la Russie (7,14 %), le Japon (7,14 %), les États-Unis (non communiqué), la Suède (4,7 %) et le Canada (2,75 %).

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 environ 20 tonnes de tellure par an 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 35 000 tonnes, dont 16,6 % en Russie, 10,9 % aux États-Unis, et 8,9 % 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 $ 85,80/kg tout au long de l'année 2024, après trois années de hausse consécutive et un pic à $ 110/kg en août 2024. L'engouement sur le marché des cellules à CdTe sera le principal moteur de la croissance de consommation du tellure à court terme.

Le 4 février 2025, Le MOFCOM (ministère chinois du Commerce) a annoncé de nouvelles mesures de contrôle des exportations sur cinq métaux et leurs composés, dont le tellure, renforçant ainsi son leadership sur la production mondiale de celui-ci. Ce contrôle vise principalement les États-Unis, premier importateur de tellurure de cadmium chinois pour la fabrication des panneaux photovoltaïques. Néanmoins, le contrôle n'étant pas une interdiction, les effets pourraient n'être que limités sur le marché.

Terres rares (TR)

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), aux propriétés optiques et magnétiques remarquables. Le marché actuel est toutefois tiré par quatre éléments en particulier, qui portent, à eux seuls, 90 % de la valeur économique de la filière, à savoir : le néodyme (Nd), le praséodyme (Pr), le dysprosium (Dy) et le terbium (Tb). Ces TR dites « magnétiques » sont principalement 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, suivent l'essor des véhicules électriques, de l'éolien offshore, ainsi que celui de l'électronique et de la robotique, utilisant de grandes quantités d'aimants permanents.

En 2024, la production minière mondiale de terres rares est estimée à 390 000 tonnes selon l'USGS (exprimée en Oxydes de Terres Rares ou OTR), contre 376 000 tonnes en 2023. Ce chiffre est en croissance permanente depuis dix ans. Le principal facteur de hausse est l'augmentation des « quotas de production » par région et par producteur en Chine, étant passé à 270 000 tonnes d'OTR en 2024, contre 240 000, tonnes en 2023 et 210 000 tonnes l'année précédente. La Chine représente 69 % de cette production primaire mondiale.

En termes d'opérations minières, les États-Unis sont aujourd'hui le deuxième producteur avec 11,5 % du total mondial. L'année 2024 a été une année record pour l'unique producteur américain à ce jour, l'entreprise MP Materials. La production d'OTR à partir de la mine de Mountain Pass en Californie a atteint 45 000 tonnes. À cela

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

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production mondiale			
	220 000	**240 000**	**290 000**	**300 000**	**376 000**	**390 000**
Australie	20 000	21 000	24 000	18 000	16 000	13 000
Birmanie	25 000	31 000	35 000	12 000	43 000	31 000
Burundi	200	300	500			
Brésil	710	600	200	80	140	20
Chine	132 000	140 000	168 000	210 000	255 000	270 000
États-Unis	28 000	39 000	42 000	42 000	41 600	45 000
Inde	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900
Madagascar	4 000	2 800	6 800	960	2 100	2 000
Malaisie				80	310	130
Nigeria					7 200	13 000
Russie	2 700	2 700	2 600	2 600	2 500	2 500
Thaïlande	1 900	3 600	8 200	7 100	3 600	13 000
Vietnam	1 300	700	400	1 200	300	300
Autres pays	66	100	60		1 440	1 100

(Source : Mineral Commodity Summaries)

s'ajoute la montée en puissance des deux projets phares de cet acteur :

Se positionner sur l'étape de raffinage, avec la production d'oxyde Nd-Pr, intermédiaire indispensable pour la fabrication d'aimants NdFeB : 1 300 tonnes ont été produites à l'usine Independence, à Fort Worth, au Texas ;

Produire des terres rares métalliques et les précurseurs d'aimants sur le sol américain. Cette étape a également été franchie en 2024, avec les premiers essais d'aimants frittés en NdFeB de qualité automobile et les premiers kilogrammes de métal Nd-Pr. MP Materials compte produire environ 1 000 tonnes d'aimants NdFeB par an, avec une montée en production progressive annoncée pour fin 2025, à destination de clients comme General Motors.

La Birmanie complète le podium, avec près de 8 % de la production minière selon l'USGS (31 000 tonnes). Le pays a émergé comme une source notable de TR lourdes (c'est-à-dire les éléments de TR à plus haut numéro atomique, plus rares naturellement et de plus haute valeur, comme le Dy et le Tb) à partir de 2018. L'essentiel de cette production est identifié comme étant importé par la Chine. Toutefois, le conflit dans l'État Shan, frontalier avec la Chine, a des conséquences directes sur les flux de terres rares entre les deux pays. D'après Argus Media, toutes les exportations ont été stoppées depuis la mi-octobre 2024. Paradoxalement, il n'y a pas eu d'impact sur les prix du Dy et du Tb, illustrant un marché déprimé.

L'Australie demeure très active dans le secteur, même si la production sur le territoire national est en baisse avec 13 000 tonnes OTR. L'activité est principalement portée par la société australienne Lynas, implantée à la fois en Malaisie, en Australie et aux États-Unis. Elle a tiré son épingle du jeu après la crise de 2010 et est rapidement devenue une référence de l'exploitation des terres rares « hors Chine ». L'année 2024 a vu l'amélioration du traitement du concentré de lanthanides dans son usine de Malaisie, ainsi qu'à l'usine de Kalgoorlie en Australie occidentale, avec de meilleurs taux de récupération pour le mélange de carbonates de terres rares. Environ un quart de la production

de Lynas est sous forme d'oxydes Nd-Pr à haute valeur ajoutée, en grande partie destinée à assurer la production japonaise d'aimants permanents NdFeB. De plus, Lynas a reçu une contribution de $ 258 millions du gouvernement américain pour la construction d'une usine de séparation des terres rares légères au Texas : capacités de 5 000 tonnes par an, dont 1 250 tonnes d'oxydes Nd-Pr. L'installation devrait être opérationnelle au cours de l'année 2026 et les sources de matières premières proviendront de la mine Mt Weld en Australie et de l'installation de traitement de Kalgoorlie.

On évoquera ici quelques exemples de projets australiens avancés dans le domaine de la production minière et raffinée de TR :

La raffinerie de terres rares d'Eneabba, de la compagnie Iluka Resources, a finalisé son financement en décembre 2024 (prêt du gouvernement australien de $ 1,65 milliard et contribution de $ 414 millions d'Iluka).

La société Australian Strategic Materials développe le projet minier Dubbo et a ouvert une usine en Corée du Sud en mai 2022 avec ses partenaires, maîtrisant l'étape stratégique dite de « métallisation ». Ce procédé désigne la technologie de passage des oxydes Nd-Pr aux alliages magnétiques, indispensables pour la fabrication d'aimants permanents. Cette technologie intéresse le département de la Défense américain, souhaitant répliquer de telles usines sur le territoire des États-Unis.

Dans le reste du monde, des productions minières de Thaïlande (environ 13 000 tonnes OTR en 2024, selon l'USGS), et de Russie alimentent également le marché. Comme annoncé début février 2025, Vladimir Poutine considère les terres rares comme une priorité pour « renforcer le potentiel de l'industrie nationale ». Le seul site en Russie qui extrait actuellement du minerai est celui de Lovozerskoye. La société Solikamsk Magnesium Works y produit 2 600 tonnes d'OTR sous forme de concentrés de terres rares. Le 25 février, la société atomique d'État russe Rosatom a révélé des détails sur les volumes de production attendus à l'avenir, et le ministère des Ressources naturelles a publié les chiffres des réserves supérieurs à ceux de l'USGS. Une nouvelle installation d'enrichissement de concentrés est annoncée : elle devrait permettre de doubler la production de Solikamsk à partir de 2027. D'autres productions mineures ont lieu au Brésil, en Inde, ou encore au Vietnam.

Durant l'année 2024, le marché a été marqué par une stagnation importante. Si la production chinoise d'aimants permanents a augmenté, cette hausse a été relativement limitée (300 000 tonnes en 2024 d'aimants NdFeB produits, contre 280 000 tonnes en 2023). Une situation de surproduction est ainsi observée, toutes terres rares confondues, que les subventions de soutien aux véhicules électriques n'ont pas suffi à résorber.

Les prix ont reflété cette situation. N'ayant pas de cotation sur les marchés boursiers, les prix des TR sont établis par négociation directe de contrats entre producteurs et transformateurs ou utilisateurs. Ces prix sont à considérer de manière individuelle par élément de TR, une grande disparité existant entre les TR légères très abondantes et à faible valeur (lanthane et cérium en particulier, utilisées comme catalyseurs dans un certain nombre d'industries, dont la chimie de spécialité), et les TR lourdes, réservées à des applications de niche.

En 2024, exprimés sous forme métal 99 % en référence « Franco à bord (Fob) Chine », les prix des TR légères (abondantes) ont été identiques à l'année précédente. Le lanthane s'est ainsi établi à $ 4,95/kg, en moyenne, en 2024, et le cérium à $ 5,3/kg.

Les prix des terres rares magnétiques, après une chute de plus de 50 % en 2023 par rapport à 2022, ont continué sur cette tendance en 2024. Celui du Pr s'est établi, en moyenne, en 2024 à $ 76,3/kg, contre $ 78,4/kg en 2023 et $ 172/kg en 2022. Le constat était similaire pour le prix du Nd, avec une moyenne en 2024 à $ 69,5/kg, contre $ 71,8/kg en 2023 et $ 167/kg en 2022.

Le dysprosium a vu son prix s'établir à $ 325/kg sur l'année 2024, contre $ 384/kg en 2023 et $ 503/kg en 2022. Enfin, le terbium, la plus chère des terres rares, a affiché un prix moyen pour 2024 de $ 1 002,5/kg, contre 1 649/kg pour 2023 (après un record au-delà de la barre des $ 3 000/kg atteint en mars 2022).

Ces prix s'avèrent inférieurs à un prix de maintien des mines et usines, même pour les producteurs chinois. Ainsi, début 2025, la Chine a réagi en publiant un projet de régulation plus stricte du secteur. Bloomberg News a rapporté, le 19 février, ce projet de règles publié par le ministère

de l'Industrie et des Technologies de l'information (MIIT) proposant, d'une part, d'interdire aux entreprises privées d'exploiter des terres rares dans le pays et, d'autre part, de nouvelles règles de quotas (avec un possible retour des quotas d'exportation). Pour la première fois, ces règles prendraient également en compte toute matière première importée en Chine. Les prochaines déclarations sur les quotas permettront d'évaluer l'effet final de la nouvelle réglementation, qui devrait avoir un impact haussier sur les prix dans les mois à venir.

Ce règlement illustre une volonté de consolidation et de centralisation accrues de l'industrie de transformation des terres rares en Chine. De ce fait, et prolongeant un mouvement précédent, les petits acteurs indépendants seront absorbés à terme par les deux grandes sociétés chinoises de terres rares ayant vocation à s'imposer comme les seuls leaders tolérés : China Northern Rare Earth Group Ltd. et China Rare Earth Group Co. Ltd., implanté au sud du pays.

Dans le reste du monde, de nombreux projets, même de tailles modestes, voient le jour tout le long de la chaîne de valeur pour se réapproprier une partie de la production, notamment à partir de sources secondaires. En France, plusieurs projets 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. 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, notamment des TR lourdes. À terme, le principal marché ciblé est celui de l'automobile ;

Celui porté par la société MagREEsources, ayant un objectif spécifique de 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 ;

Celui du groupe Solvay, ayant annoncé, en septembre 2022, étendre ses activités sur la chaîne de valeur des aimants permanents Nd-Fe-B, notamment leur recyclage, à La Rochelle ;

Celui piloté par Orano – le projet MAGNOLIA –, ayant pour ambition de structurer un outil industriel de fabrication d'aimants permanents haute-performance.

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 à faire émerger une ou des filières européennes de production d'aimants permanents NdFeB. Malgré cette note positive, l'une des conditions d'émergence et de survie de ces nouvelles filières est de s'affranchir tant que possible de la fixation chinoise des prix de marchés internationaux des terres rares.

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. Près de 90 % du minerai de titane sont utilisés sous la forme de dioxyde 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 minerai est utilisé 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 2023, l'aéronautique commerciale représentait environ 28 % du marché du titane métal, le secteur industriel 47 %, les applications militaires 16 % et les biens de consommation 9 %. La part du secteur aéronautique est plus élevée en Europe et aux États-Unis.

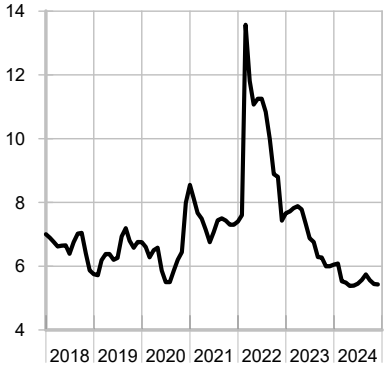
Les réserves de titane sont considérables. Elles sont déclarées supérieures à 560 Mt (exprimées en contenu TiO_2) par l'USGS, soit environ soixante ans de production au rythme actuel. Les productions mondiales d'ilménite ($FeTiO_3$) et de rutile (TiO_2), les deux principaux minerais de titane, atteignaient, respectivement, 8,9 Mt et 45 Mt en 2024, toujours selon le service géologique américain.

La production de dioxyde de titane découle principalement de ces deux minéraux, ainsi que – dans une bien moindre proportion – de celles de rutiles synthétiques. Les capacités de production

Titane
(en milliers de tonnes)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production mondiale d'ilménite						
	7 700	**8 000**	**8 900**	**8 800**	**8 840**	**8 900**
Afrique du Sud	1 100	1 020	900	1 100	1 260	1 300
Australie	840	480	600	400	400	400
Brésil	25	34	33	28		
Canada	680	595	430	520	350	350
Chine	2 300	2 800	3400	3140	3 250	3 300
États-Unis	100	100	100	200	100	100
Inde	162	174	204	210	210	210
Kenya	210	201	181	190		
Madagascar	280	254	414	320	300	240
Mozambique	590	965	1100	1 400	1 860	1 900
Norvège	400	444	468	410	360	360
Sénégal	310	300	482	410	260	300
Ukraine	490	464	316	190	130	120
Vietnam	160	138	122	170		
Autres pays	74	67	137	110	360	330
Production mondiale de rutile						
	654	**605**	**618**	**640**	**590**	**450**
Afrique du Sud	110	86	95	100	100	100
Australie	200	190	190	200	200	200
Inde	11	11	12	13	12	12
Kenya	74	73	72	73	47	40
Madagascar		8	0	0		
Mozambique	6	6	8	8	8	8
Sénégal	9	9	9	9		
Sierra Leone	129	114	123	130	110	60
Ukraine	94	95	95	95	95	10
Autres pays	21	13	14	10	20	20
Production mondiale d'éponge de titane métal						
	200	**230**	**240**	**270**	**320**	**320**
Arabie saoudite	0	3	6	10	11	15
Chine	85	123	140	180	220	220
Inde	0	0	0	0	0	0
Japon	49	49	49	47	57	55
Kazakhstan	16	15	15	15	14	14
Russie	44	31	27	20	20	20
Ukraine	8	5	6	1	0	0

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

de pigments de dioxyde de titane sont évaluées en 2024 par l'USGS à 9,8 Mt. Concernant les éponges de titane, si les capacités sont estimées à 410 000 tonnes, la production mondiale n'est, quant à elle, estimée qu'à 320 000 tonnes.

La Chine accroît progressivement sa domination sur le marché. Sa production d'éponges de titane est en effet passée de 85 000 tonnes en 2019 à 220 000 tonnes en 2024, soit 69 % de la production mondiale, toujours d'après les estimations de l'USGS. Néanmoins, aucun producteur chinois n'est pour l'instant certifié pour la fabrication des pièces aéronautiques les plus critiques, qui représentent pourtant une importante part de la demande mondiale de titane métal. La situation pourrait cependant évoluer prochainement. Der-

rière la Chine, le Japon (17 % de la production), la Russie (6 %) et le Kazakhstan (4 %) constituent les autres principaux producteurs d'éponges qui sont, elles, toutes certifiées de qualité aéronautique, tout comme celles produites par l'Arabie saoudite, dont la nouvelle usine installée en 2019 a produit 15 000 tonnes d'éponges en 2024, soit 4,5 % du total mondial. La production ukrainienne d'éponges, qui atteignait 6 100 tonnes en 2021, est désormais nulle et ne pourra pas être relancée à court terme compte tenu de l'état des installations qui se trouvent à proximité de la ligne de front. Les capacités de production d'éponges dans le monde sont supérieures à la consommation actuelle. Cependant, leur répartition entre un nombre restreint de pays et le faible nombre d'usines qualifiées pour les usages les plus stratégiques entraîne régulièrement des tensions sur ce marché.

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 à $ 17,25/kg 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 2022, terminant à $ 7/kg. Cette tendance à la baisse se maintient depuis pour atteindre $ 5,4/kg en décembre 2024. Les prix du titane certifié aéronautique, probablement beaucoup plus élevés, ne sont pas disponibles et dépendent des contrats passés entre les acteurs. Le marché des scraps (déchets et copeaux), qui représentent des sources importantes de matières premières dans la transformation d'éponges de titane en lingots, était toujours sous tension fin 2023, tout particulièrement en Europe.

La croissance de l'aéronautique civile et de l'industrie militaire, ainsi que, dans une moindre mesure, celle du secteur énergétique (nucléaire, hydrogène, géothermie), devrait continuer de soutenir la demande en titane métal dans les prochaines années. Le secteur de l'aéronautique a connu plusieurs crises récentes : d'abord entre 2019 et 2022 avec la crise de covid, puis avec les déboires de Boeing sur son modèle 777 et les grèves qui ont impacté l'entreprise en 2024. Ces événements ont provoqué une chute brutale de la demande en titane en 2020, suivie d'une reprise plus lente que prévu. Néanmoins, le développement du secteur devrait continuer à tirer la demande vers le haut compte tenu de l'usage du titane dans les différents programmes aéronautiques. En 1960, le Boeing 727 contenait à peine 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 %. Les tensions entre l'offre de titane de qualité aéronautique et la croissance soutenue de la demande pourraient, à terme, mettre à l'épreuve les filières d'approvisionnement de titane, notamment celles à destination de l'Europe dans un contexte marqué par une diminution des approvisionnements russes.

Les alliages aluminium-scandium et les matériaux composites semblent constituer de bonnes solutions de substitution. Toutefois, leur adoption dépendra de la qualification des nouveaux matériaux, d'une production à un prix abordable et de l'accès à du scandium en quantité suffisante (voir la section consacrée au scandium). Le cas échéant, ils pourraient contribuer à limiter la demande en titane. Les techniques d'usinage classiques génèrent des chutes de production pouvant atteindre jusque 70 % de la masse de titane à mettre en œuvre pour obtenir une pièce déterminée. La fabrication additive, en plein développement aujourd'hui, est une technique qui permettra de consommer beaucoup moins de matière que les méthodes classiques et limitera donc aussi les besoins. Le recyclage des scraps d'usinage fait par ailleurs l'objet d'un intérêt croissant de la part des industriels. En avril 2023, Airbus, Safran et Tikehau Capital ont acquis la société Aubert & Duval qui comprend l'usine de recyclage du titane Ecotitanium, située à Saint-Georges de Mons dans le Puy-de-Dôme. Ce rachat dote l'industrie aéronautique d'une capacité autonome de production en développant des alliages de titane TA_6V à partir de chutes et de copeaux issus du façonnage des pièces par les constructeurs et sous-traitants du secteur.

Concernant les pigments, principal débouché des minéraux titanifères, le marché fait face à une surcapacité de production, principalement en Chine, couplée à une demande en recul. Pas moins

de sept acteurs chinois ont mis en route de nouvelles lignes de production en 2024, renforçant ainsi la domination du pays avec plus de 50 % des capacités mondiales. Le dioxyde de titane est principalement utilisé dans l'industrie de la peinture, en particulier pour les revêtements architecturaux, des applications étroitement liées au secteur de l'immobilier. Or, ce dernier est en crise en Chine depuis 2022, entraînant indirectement une baisse de la demande en dioxyde de titane. Par ailleurs, l'UE a décidé d'imposer des droits de douane sur les importations de dioxyde de titane chinois en fin d'année 2024, pour une durée de cinq ans. Des mesures antidumping sont aussi envisagées par d'autres pays. Ces décisions pourraient favoriser les producteurs européens et américains et peser fortement sur les industriels chinois.

L'entreprise métallurgiste et minière française Eramet exploite toujours le gisement Grande Côte Opérations (GCO) au Sénégal. En revanche, l'entreprise a vendu, en septembre 2023, sa filiale norvégienne ETI et l'usine de transformation d'ilménite en laitier de dioxyde de titane au groupe britannique Ineos Enterprises.

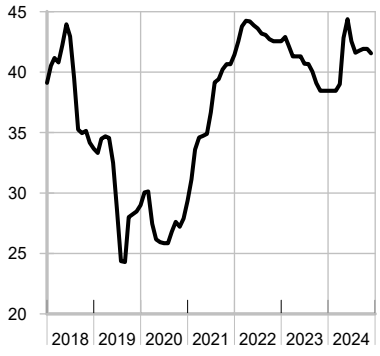
Tungstène (W)

Le tungstène se caractérise par le plus haut point de fusion connu (3 422 °C), par sa dureté exceptionnelle et sa forte densité (19,25) équivalente à celle de l'or. Les carbures cémentés sont l'usage le plus courant représentant (entre 59 et 66 % de la demande, selon les sources). Les carbures cémentés (le carbure de tungstène-cobalt, par exemple) sont des matériaux très durs, résistants et réfractaires. Ils sont indispensables à la production d'outils de découpe ou de forage, notamment lorsque les matériaux à usiner sont résistants (aéronautique, automobile, industrie minière et pétrolière) ou lorsque les outils sont de très petite taille (électronique). Les aciers et alliages au tungstène représentent entre 13 % et 20 % de la demande mondiale, également du fait de ses propriétés de résistance à la chaleur, à la corrosion et à la fatigue. Les applications représentent, par exemple, les installations offshore, celles de traitement des eaux usées, les systèmes de désalinisation de l'eau de mer, etc. Le tungstène est également employé dans les superalliages pour les parties chaudes des turboréacteurs en aéronautique et applications aérospatiales ou pour les turbines à gaz dans la production d'électricité, par exemple. Environ 12 % 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 désormais plus qu'une part minime de la consommation mondiale au profit des diodes électroluminescentes, dites « LED ». Les autres usages de tungstène métal comprennent les électrodes des lampes à décharge luminescente haute et basse pression, certains contacts électriques et électroniques, les anodes des tubes à rayons X

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

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Production mondiale (arrondi)					
	83 800	**78 400**	**83 800**	**79 800**	**79 500**	**81 000**
Australie				200	430	1 000
Autriche	892	890	900	910	850	800
Bolivie	1 060	1 350	1 563	1 360	1 500	1 600
Chine	69 000	66 000	71 000	66 000	66 000	67 000
Corée du Nord	1 130	410		1 520	1 600	1 700
Espagne	603	500	400	800	650	700
Portugal	518	550	502	500	450	500
Russie	2 200	2 400	2 300	2 000	2 000	2 000
Rwanda	900	860	1 340	1 400	1 200	1 200
Vietnam	4 500	4 500	4 800	4 000	3 500	3 400
Autres pays	1 070	960	973	1 080	1 320	1 500

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

employés dans l'imagerie médicale et de sécurité, telle que déployée au sein des aéroports, les résistances chauffantes de fours industriels de haute température, ainsi que la recherche dans la fusion thermonucléaire civile. Le projet ITER prévoit ainsi d'utiliser du tungstène dans la composition du *divertor* qui constitue le « plancher » du réacteur. Les 9 % restants de la consommation de tungstène à l'échelle mondiale sont présents sous forme de composés chimiques, que l'on retrouve essentiellement dans les catalyseurs et pigments.

En 2024, la production mondiale de tungstène était de 81 000 tonnes (en W contenu). Elle a faiblement augmenté par rapport à 2023, selon les chiffres de l'USGS. La Chine détient plus de 80 % de la production mondiale, principalement 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 2024, ils étaient de 114 000 tonnes (exprimées en concentrés contenant 65 % WO_3) pour l'extraction primaire, en faible augmentation par rapport à 2023. Toujours d'après l'USGS, le Vietnam, second producteur mondial, concentre plus que 4 % de la production, soit environ 3 400 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), précurseur 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 sont restés assez stables en 2024, augmentant de moins de 1 % sur l'année, passant d'une moyenne de \$ 40,74 kg WO_3 en 2023 à \$ 41,08 kg WO_3.

Les réserves minières de tungstène sont estimées par l'USGS à 4,4 Mt, dont 52 % en Chine. Un certain dynamisme est à noter quant à leur renouvellement. Le consultant Roskill identifie ainsi quatorze projets au stade de développement à l'horizon 2028. Concernant la construction de la mine de Sangdong en Corée du Sud, Almonty estime un lancement de la production pour le premier trimestre 2025. La société australienne EQ Resources a annoncé, courant 2024, un projet d'expansion en souterrain de la mine de Mount Carbine (Queensland-Australie). De plus, elle annonce le redéveloppement de la mine de Wolfram Camp localisée à une centaine de kilomètres de Mount Carbine. D'autres gisements de grande taille sont toujours à l'étude ou mis provisoirement « sous cocon » en 2024, essentiellement en Chine ainsi qu'en Australie – tel que, par exemple, Molyhil de Thor Energy et Mount Mulgine de Tungsten Mining – et au Canada avec Mactung de Fireweed Metals. Concernant le gisement de tungstène Bakuta au Kazakhstan, l'un des plus importants au monde, la production semble avoir commencé fin 2024. En Europe, l'arrêt de la mine de La Parilla en Espagne semble maintenu, la cause probable étant les difficultés économiques de la société W Resources – Iberian Resources. Toujours en Espagne, à la suite du rachat de Saloro-Barruecopardo par l'entreprise australienne EQ Resources en 2023, la production augmente rapidement et a atteint en 2024 un niveau record d'un peu plus de 1 000 t/WO_3. Le développement de la mine de Santa Comba (société Pivotal Metals, ex-Rafaella Resources) semble, lui, à l'arrêt complet à la suite de l'annulation de sa concession minière courant 2023. D'autres projets sont toujours à l'étude, dont la mine d'Hemerdon (ex- Drakelands) au Royaume-Uni, pour laquelle la société Tungsten West poursuit ses investissements et dont la réouverture a été repoussée à 2 026. Malgré des difficultés financières, elle aurait obtenu le permis nécessaire au fonctionnement de son usine de séparation minérale.

Les États-Unis ont appliqué, en 2024, des tarifs douaniers de 25 % sur les importations depuis la Chine des principaux composés de tungstène. Le gouvernement chinois a répliqué en février 2025 par la mise en place de mesures de contrôle sur les exportations de tungstène, certains composés et biens associés et des technologies de production.

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 aérospatial, 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 % d'ici à 2030. Toutefois, la substitution des superalliages par l'aluminure de titane en aéronautique et, à terme, par les céramiques à matrice composite pourrait conduire à une réduction progressive de la demande provenant de ce secteur. Certains consultants envisagent même une diminution de la consommation de tungstène dans l'industrie 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'entrevoir 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 la production de l'acide sulfurique, et dans la fabrication d'aimants supraconducteurs, ainsi que pour l'électrolyte 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 intermit-

Vanadium

(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Production minière						
	86 800	**105 000**	**105 000**	**102 000**	**104 000**	**100 000**
Afrique du Sud	8 030	8 580	8 800	8 870	8 670	8 000
Brésil	5 940	6 620	5 780	5 840	5 420	5 000
Chine	54 000	70 000	70 300	66 900	70 000	70 000
États-Unis	460	17				
Russie	18 400	19 500	20 100	20 000	20 000	21 000

Prix du vanadium pentoxide Caf Europe

(en dollars/kg)

(Source : Mineral Commodity Summaries)

tentes, 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 oxydoréduction, mettant à profit les quatre différents degrés d'oxydation du vanadium au sein de l'électrolyte. Or, la technologie VRB a connu des revers ces dernières années, notamment du fait du trop fort impact de la volatilité des prix du vanadium sur la rentabilité des projets. L'un des principaux projets à grande échelle en Chine, *Rongke Power*, a ainsi connu des difficultés liées au coût élevé de l'électrolyte au vanadium. Malgré ces obstacles, la mise en service de cette batterie « géante » a finalement été achevée en 2022, avec son raccordement au réseau électrique de la ville de Dalian. 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 vanadium dans un acier pour doubler sa résistance. Le principal débouché est donc les aciers HLE (haute limite d'élasticité), particulièrement utilisés pour des aciers résistants aux chocs et aux vibrations. Le développement de ces aciers a permis, entre autres, la mise en œuvre de normes de construction plus strictes en Chine (changement des standards pour les constructions antisismiques, les fers à béton devant dorénavant être en acier HLE au vanadium).

La production mondiale de vanadium s'est élevée à 100 000 tonnes de vanadium en 2024 (environ 4 % de moins qu'en 2023), 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 18 % 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 70 % 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 plus de 95 % de la production mondiale de vanadium en 2024 : la Chine (70 %), la Russie (21 %) et l'Afrique du Sud (8 %). Le Brésil complète le tableau avec près de 5 000 tonnes provenant de la mine de magnétite de haute qualité de Maracas, dans l'État de Bahia, exploitée par la compagnie canadienne Largo Resources.

L'industrie du vanadium chinoise est concentrée entre quelques grands groupes sidérurgiques, dont Pangang Group Vanadium Titanium & Resources Co. (17 % de la production mondiale). La production primaire issue de la magnétite se développe également avec des groupes tels que Xining Special Steel Co., et China Vanadium Titano-Magnetite Mining Company. En Russie, le numéro deux mondial est Evraz PLC avec 14 % de la production mondiale en 2021 (d'après la compagnie). 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 a acquis, en 2016, Vametco, la filiale de Evraz.

Selon S&P Global, le cumul des ressources et des réserves conformes aux standards internationaux atteindrait 107 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 encore le gros projet Speewah Dome mené par la société King River Resources. De plus, Australian Vanadium Ltd. et Technology Metals Australia Ltd. ont annoncé leur fusion dans une déclaration conjointe en septembre 2023. Cette opération consolidera le gisement de Gabanintha

et son satellite Yarrabubba en un unique projet *Australian Vanadium Project*, devenant ainsi l'un des dix premiers gisements mondiaux, selon les données de S&P.

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 2024, les prix moyens mondiaux du vanadium et du ferrovanadium ont globalement diminué. Par exemple, le prix de fermeture moyen du ferrovanadium européen (pureté 78-82 %) a été de $ 32,7/kg en 2023 contre $ 26,9/kg en 2024, soit une baisse de 18 %. Le prix annuel du pentoxyde de vanadium européen (pureté 98 %) a, lui aussi, largement diminué, passant de $ 17,69/kg en 2023 à $ 12,91/kg en 2024, soit une baisse de 27 %. De plus, l'inflation a impacté les marchés de la construction et de la production d'acier, entraînant une baisse des prix du vanadium. Seul le secteur des batteries VRB a été relativement épargné.

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 des 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 ferrovanadium) 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 en Scandinavie. Toujours en Europe, Norge Mining a obtenu, en juin 2024, les droits d'extraction de vanadium, de titane et de minerai de fer sur une partie de ses licences d'exploration dans le Sud-Ouest de la Norvège.

Le marché devrait continuer à se diversifier avec l'hypothétique mise en production des projets australiens. Environ 90 % du vanadium est actuellement utilisé comme agent de renforcement dans l'acier, mais la demande de batteries à flux redox au vanadium (VRFB) devrait être multipliée par huit d'ici 2030, par rapport à 2022, selon le cabinet de conseil américain en vanadium. Par exemple, en juillet 2024, Pure Lithium a remporté le prix Coup de cœur de la start-up au Forum mondial des matériaux pour son électrode au lithium métal prête à être utilisée pour les batteries. Cette technologie associe une anode en lithium métal à une cathode en oxyde de vanadium.

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 0,03 %, 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.

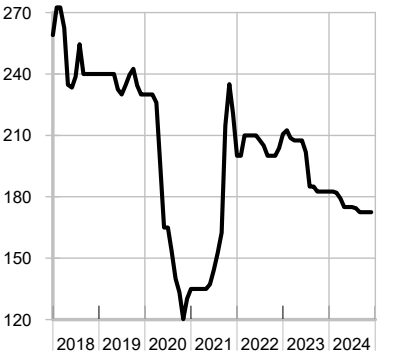
La demande mondiale en zircon s'élève à plus de 1 Mt par an. Selon les données de la Zircon Industry Association et l'entreprise spécialisée en intelligence économique Global Growth Insights, les principaux usages du zircon sont pour la production de céramiques (environ 55 %), de matériaux réfractaires (20 %), de sables de fonderies (15 %) de produits chimiques et notamment de zircone (9 %), et pour celle d'éponges de zirconium métal (1 %). 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 donc qu'en-

Zirconium
(en milliers de tonnes de concentré)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
			Production mondiale (arrondi)			
	1 420	1 200	1 300	1 440	1 440	1 500
Afrique du Sud	370	280	320	300	289	300
Australie	470	400	500	500	500	500
Chine	140	140	140	140	100	100
États-Unis	100	30	<100	100	100	100
Indonésie		64	55	97	95	95
Kenya	29	29		27	20	20
Madagascar				27	34	30
Mozambique	100	110	100	104	144	160
Sénégal	65	60	64	57	48	60
Sierra Leone				34	28	20
Autres pays	112	117	150	57	86	110

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



(Source : Mineral Commodity Summaries)

viron 1 % de la consommation mondiale de zircon ; c'est cependant un secteur à haute valeur ajoutée. Le zirconium métal est utilisé en majorité 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 le 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. La croissance économique des pays émergents devrait également stimuler la consommation de zircon. Concernant la demande pour le zirconium métal, elle est corrélée à l'industrie du nucléaire. Selon l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), le parc nucléaire mondial comptait, en 2023, plus de quatre cents réacteurs répartis dans une trentaine de pays. Plusieurs centrales sont actuellement en construction (environ une soixantaine), notamment en Chine, et de nombreux pays européens ont récemment annoncé la relance de leurs investissements dans la filière, dont la France, la Suède, la Pologne ou encore la Slovénie, augurant ainsi d'une croissance soutenue de la demande à un proche horizon.

Selon les données préliminaires de l'USGS, la production de concentrés de zircon est estimée à 1,5 Mt en 2024, un chiffre légèrement supérieur aux dernières années écoulées. Cinq pays représentent plus des trois quarts de la production de zircon, à savoir : l'Australie avec 33 % de la production mondiale (500 000 tonnes), l'Afrique du Sud, 20 % (300 000 tonnes, en baisse), le Mozambique, 11 % (160 000 tonnes, en hausse), ainsi que la Chine et les États-Unis avec 7 % (100 000 tonnes chacun). L'USGS évaluait à plus de 70 Mt les réserves mondiales d'oxyde de zirconium en 2023, dont 78 % en Australie et 8 % en Afrique du Sud.

En raison de sa forte densité (entre 3,9 et 4,8 g/cm^3), 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, similaire à celui utilisé pour la production d'éponges de titane. Les éponges de zirconium métal obtenues contiennent jusqu'à 5 % de hafnium. Dans le cas où le métal est utilisé pour l'industrie nucléaire, d'autres traitements complexes et très coûteux doivent avoir lieu pour séparer le zirconium du hafnium.

Du fait de l'opacité du marché, il est très difficile de trouver des chiffres fiables et récents. Selon la *Minor Metals Trade Association* (MMTA), la production de zirconium métal était estimée en 2012 à environ 7 000 tonnes, dont 3 000 tonnes pour les États-Unis, 1 800 tonnes pour la France, 1 000 tonnes pour la Russie, 800 tonnes pour la Chine et 400 tonnes pour l'Inde. En France, les éponges de zirconium sont produites à partir de zircone sur le site de Jarrie situé à proximité de Grenoble (Isère), par la société Framatome, filiale d'EDF. 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 du hafnium) a poursuivi sa baisse au cours de l'année 2024, passant de $ 25,5/kg à $ 23,8/kg entre janvier et décembre.

Après l'augmentation des prix engendrée par la reprise économique post-pandémie et une utilisation croissante du zirconium dans les applications technologiques, le marché semble avoir retrouvé un certain équilibre. La pression de la demande devrait néanmoins se poursuivre au cours des prochaines années, tirée notamment par la Chine et la relance nucléaire en cours dans plusieurs pays. Les capacités de production du zirconium métal dans le monde étant mal connues, il est difficile d'estimer précisément si l'offre pourra répondre à cette augmentation des besoins. Il est, en revanche, peu probable que l'approvisionnement en minerai soit le point bloquant : la production de zirconium métal ne représentant qu'une part minime des usages du minerai, une faible réorientation des flux de minerai vers la production métal impacterait relativement peu les autres usages (on pourrait multiplier par deux la production de zirconium métal, en ne consommant qu'un faible pourcentage de minerai supplémentaire). Cela étant, pour le marché global, l'offre en minerai pourrait stagner en raison du faible nombre de projets miniers en cours de développement et ainsi impacter les autres usages. Les projets australiens les plus avancés de Coburn mineral sands (Australie-Occidentale) et de Dubbo Ziconia (Nouvelle-Galles du Sud), lesquels sont toutefois en suspens en raison des enjeux liés à la valorisation industrielle des terres rares associées dans le gisement, pourraient permettre de produire plus de 20 000 tonnes de zircon par an. Ces volumes non négligeables seront toutefois loin d'être suffisants pour couvrir l'ensemble des besoins mondiaux, surtout qu'en parallèle, plusieurs mines voient actuellement la qualité des zircons récupérés baisser en quantité et en qualité. Ce plafonnement de l'offre pourrait ainsi amener à un déficit important sur le marché du zircon dès 2030.