

VANADIUM 2024

Matières premières

La teneur en vanadium (V) de l'écorce terrestre est de 0,016 %.

Le vanadium, est le plus souvent récupéré à partir de titanomagnétites vanadifères qui peuvent renfermer jusqu'à 3 % de V_2O_5 . Dans les titanomagnétites, le [titane](#) se substitue au [fer](#) de la magnétite pour donner un oxyde mixte de formule $Fe_{3-x}Ti_xO_4$.

Par exemple :

- le gisement Windamurra, en Australie, renferme 55 % de Fe, 14 % de TiO_2 et 0,47 % de V_2O_5 ,
- celui de Mapochs, à Roossenekul dans la province de Limpopo, en Afrique du Sud, 1,4 % de V_2O_5 ,
- le gisement de Waikato North Head, en Nouvelle Zélande, est constitué de sables noirs riches en oxyde de fer (80 % de Fe_3O_4 , 8 % de TiO_2 , 0,6 % de V_2O_5). La capacité de production est de 1,2 million de t/an de sable avec des réserves de 150 millions de t. Le minerai est concentré sur place par séparation magnétique puis transporté en suspension dans de l'eau par un pipeline sur une distance de 18 km jusqu'à l'usine sidérurgique située à Glenbrook qui possède une capacité de production de 650 000 t/an d'acier.

Lorsque la teneur en oxyde de vanadium est supérieure à 1-1,5 %, le minerai peut être traité directement pour le récupérer, cela est le cas en Afrique du Sud et en Chine et donne, en 2021, 18 % de la production mondiale de vanadium. Pour des teneurs inférieures, l'oxyde de vanadium est extrait du laitier obtenu lors de l'utilisation des minerais de titanomagnétite vanadifère pour élaborer de l'[acier](#), cela est le cas, en Chine, en Nouvelle Zélande et en Russie dans 14 aciéries et donnent, en 2021, 70 % de la production mondiale de vanadium. Les 12 % restant sont fournis par le recyclage de matériaux usés.

La concentration des minerais renfermant des titanomagnétites vanadifères est facilitée par leurs propriétés magnétiques mises à profit après broyage.

Du vanadium est également présent dans du [charbon](#), du [pétrole](#), des sables bitumineux et est récupéré dans les cendres après combustion du charbon ou dans les résidus pétroliers, lors de son raffinage. Il est également récupéré lors du recyclage de catalyseurs.

Du vanadium est aussi présent dans des minerais d'[alumine](#) (roscoelite) extraits en Inde et dans des minerais d'[uranium](#) (carnotite) extraits aux États-Unis qui contiennent de 1 à 5 % de V_2O_5 . Par exemple, la société [Energy Fuels](#) a extrait, depuis 1980, 24 494 t de V_2O_5 lors du traitement de minerais d'uranium dans l'usine de White Mesa, dans l'Utah, aux États-Unis. Cette production est intermittente, elle dépend du cours du vanadium, et actuellement est effectuée sur des solutions de traitement des résidus des exploitations antérieures. Entre 2014 et 2018, cette coproduction a été suspendue pour reprendre en 2019 avec une production de 862 t de V_2O_5 et être à nouveau arrêtée début 2020 après avoir produit 30 t.

Élaboration industrielle

Les titanomagnétites riches en vanadium, par exemple en Afrique du Sud, sont calcinées, en présence de [carbonate](#) (65 kg/t de concentré), [chlorure](#) ou [sulfate de sodium](#), dans un four tournant, à 1100°C. La magnétite (F_3O_4) est oxydée en hématine (Fe_2O_3) et le vanadium est libéré en donnant du vanadate de sodium ($NaVO_3$) qui est extrait par lixiviation à l'[eau](#), puis l'ajout d'[ammoniac](#) permet la précipitation du vanadate d'ammonium. La calcination de ce dernier dans des conditions déterminées donne l'oxyde désiré.

Les titanomagnétites plus pauvres en vanadium sont principalement traitées dans un haut fourneau puis un convertisseur, en Chine ou en Russie.

Le traitement dans un haut fourneau donne d'une part un laitier riche en [dioxyde de titane](#) d'où ce dernier sera extrait (voir le chapitre [dioxyde de titane](#)) et d'autre part de la fonte contenant le vanadium. Ce dernier sera récupéré sous forme de V_2O_5 dans un convertisseur, lors de l'élaboration de l'[acier](#) à partir de la fonte et du soufflage du [dioxygène](#) destiné à diminuer la teneur en [carbone](#).

En Afrique du Sud, le minerai qui était extrait par Evraz de la mine de Mapochs subissait un traitement en 3 étapes de pré-réduction puis de réduction dans un four électrique et enfin d'oxydation. Il était pré-réduit, en présence de [charbon](#) en poudre, dans un four tournant vers 1 140°C puis, réduit, vers 1 350°C dans un four électrique à électrode immergée dans lequel avait lieu la séparation entre un laitier riche en dioxyde de titane et une fonte contenant le vanadium, avec une teneur de 1,28 % de V. Celle-ci subissait ensuite, dans une poche de coulée, un soufflage de dioxygène qui permettait de recueillir dans un nouveau laitier, le vanadium sous forme d'oxyde, avec une teneur comprise entre 12 et 16 % de V. Les sables riches en magnétite de Nouvelle Zélande, exploités par [New Zealand Steel](#), subissent un traitement proche.

Les laitiers obtenus comme coproduits des [opérations sidérurgiques](#) sont ensuite traités comme les minerais riches en vanadium.

Le vanadium contenu dans les [pétroles](#) lourds se retrouve, dans le coke produit lors du procédé flexicoke de transformation des pétroles lourds en produits plus légers. Le vanadium renfermé dans le coke est extrait par de l'[acide sulfurique](#) puis précipité par de l'[ammoniac](#), en vanadate d'ammonium. Le principe d'extraction est le même pour le vanadium contenu dans les cendres des centrales thermiques fonctionnant au [charbon](#).

Les oxydes de vanadium sont principalement utilisés pour produire, par aluminothermie ou par réduction au four électrique du ferrovanadium destiné à la fabrication d'[acier](#) ou des alliages vanadium-[aluminium](#) destinés à la métallurgie du [titane](#).

Le vanadate d'ammonium ou les oxydes purifiés sont à la base de l'élaboration des divers composés chimiques du vanadium.

Productions

Production minière de vanadium

En 2024, en milliers de t de vanadium contenu, sur un total mondial de 100 000 t. Sources : USGS

en tonnes de vanadium contenu

Chine	70 000 t	Afrique du Sud	8 000 t
Russie	21 000 t	Brésil	5 000 t

Source : USGS

Au **Brésil**, a débuté, en août 2014, la production de la mine de Maracás Menchen, dans l'État de Bahia, exploitée par la société canadienne [Largo Resources](#). En 2024, la production a été de 9 264 t de V_2O_5 . 2,250 million de t de minerai ont été extraites avec une teneur de 0,63 % de V_2O_5 et un taux de récupération de 76,4 %. Les réserves prévues et probables sont, fin 2024, de 98,92 millions de t de minerai renfermant 0,57 % de V_2O_5 et 7,51 % de TiO_2 . La teneur du minerai est de 19,94 % en matériau magnétique renfermant 2,11 % de V_2O_5 et 3,29 % de TiO_2 . A compter de 2024 le dioxyde de titane contenu est récupéré sous forme d'ilménite avec une production, en 2024, de 44 863 t.

La mine de Windimurra, en **Australie**, propriété d'[Atlantic](#), qui avait commencé à produire a dû cesser toute production après un incendie qui a détruit l'usine d'enrichissement le 4 février 2014. Les réserves prouvées et probables sont, en novembre 2019, de 87,5 millions de t contenant 0,49 % de V_2O_5 . La mine, à ciel ouvert, est située en Australie Occidentale, à 660 km au nord de Perth. Le minerai contient outre le vanadium, 55 % de [fer](#) et 14 % de [TiO₂](#). La capacité de production prévue est de 7 600 t de V_2O_5 . En Australie, divers autres projets sont à l'étude.

Réserves minières

En 2024, les réserves mondiales sont estimées à 18 millions de t, réparties dans les pays suivants :

en milliers de t

Australie	8 500	Chine	4 100
Russie	5 000	Afrique du Sud	430

Source : USGS

En Chine, 83,2 % des réserves chinoises de titanomagnétites vanadifères sont situées dans la province du Sichuan.

Principaux producteurs

Les principaux producteurs de vanadium sont :

- Des groupes chinois :
 - [Pangang Group Vanadium Titanium & Resources](#), n°1 mondial, avec 17 % de la production mondiale, dans la province du Sichuan, avec une capacité de production de 260 000 t/an de laitiers, 22 000 t/an de V_2O_5 , 16 000 t/an de ferrovanadium.
 - Chengde XinXin Vanadium & Titanium, dans la province de Hebei.
- [Evraz](#), groupe russe, est n°2 mondial, avec 13 % de la production mondiale, en produisant de l'oxyde de vanadium et du ferrovanadium, en Russie et en République tchèque. En 2021, la production de vanadium contenu dans des laitiers, réalisée exclusivement en Russie, a été de 20 058 t. Les ventes ont été de 7 053 t de vanadium contenu dans des laitiers et 13 288 t de vanadium renfermé dans des alliages et des produits chimiques.
 - **En Russie**, Evraz exploite, à Kachkanarsky, avec 3 mines à ciel ouvert, le dépôt de titanomagnétite vanadifère de Gusevogorskoye, qui possède des réserves de 3,108 milliards de t de minerai contenant 15,9 % de fer, 5 % de TiO_2 et 0,13 % de V_2O_5 , les laitiers sont produits par les installations sidérurgiques de Nizhny Tagil, dans la

région de Sverdlovsk, et transformés, en ferrovanadium et oxyde de vanadium, à Tula, avec une capacité de production de 7 500 t/an d'oxyde de vanadium et 5 000 t/an de ferrovanadium.

Par ailleurs, le gisement de Kachkanar Proper possède 6,743 milliards de t de réserves prouvées et probables renfermant 16,5 % de fer et 0,14 % de V_2O_5 .

- **En République tchèque**, à Mnisek pod Brdy, Evraz a une capacité de production de 4 600 t/an de ferrovanadium à partir d'oxyde produit à Tula.
- [Glencore](#), exploite à 74 %, en Afrique du Sud, dans le complexe du Bushveld, la mine de Rhovan et a produit, à Brits, en 2024, 8 300 t de V_2O_5 sous forme d'oxyde et de ferrovanadium. Les réserves prouvées et probables étaient, fin 2024, de 17,8 millions de t renfermant 0,46 % de V_2O_5 .
- [Bushveld Minerals](#), a acquis, en 2016, Vametco, filiale de Evraz, en Afrique du Sud, qui produit des oxydes de vanadium et du vanadium nitré, à Brits dans la province du Nord-Ouest, avec, en 2023, une production de 2 306 t de vanadium. Les réserves prouvées et probables sont de 51 millions de t de minerai renfermant 0,63 % de V_2O_5 et 28,9 % de magnétite et 2,00 % de V_2O_5 dans la magnétite. Par ailleurs, a acquis, en novembre 2019, la société Vanchem qui produit du ferrovanadium et des composés chimiques du vanadium à Highveld, en Afrique du Sud, avec, en 2023, une production de 1 408 t de vanadium contenu. Au total, en 2023, la production du groupe est de 3 714 t de V contenu. En 2024 la société Vanchem a été vendue à Southern Point Resources Fund (SPR).
- La société canadienne [Largo Resources](#) exploite, au Brésil, la mine de Maracás Menchen, dans l'État de Bahia, voir ci-dessus.
- La société [US Vanadium Holding](#) a acquis en octobre 2019, la société Stratco, filiale d'Evraz, qui aux États-Unis, à Hot Springs, dans l'Arkansas, produit de l'oxyde de haute pureté et divers composés chimiques du vanadium, avec une capacité de production de 5 400 t/an d'oxyde de vanadium.

Commerce international

Pour le ferrovanadium, en 2024.

Principaux pays exportateurs, sur un total de 25 967 t.

en tonnes			
Afrique du Sud	8 629	République tchèque	916
Chine	6 599	Pays Bas	846
Corée du Sud	2 719	Malaisie	718
Canada	1 510	Russie	674

Source ITC

Les exportations d'Afrique du Sud sont destinées à 89 % aux Pays Bas, 3 % au Japon, 2 % au Brésil.

Principaux pays importateurs, sur un total de 30 041 t.

en tonnes			
Allemagne	3 662	Pays Bas	2 302
Italie	2 607	Corée du Sud	2 211
États-Unis	2 401	Taipei chinois	2 194
Japon	2 344	Inde	1 417

Source : ITC

Les importations allemandes proviennent à 52 % d'Autriche, 12 % de Corée du Sud, 8 % de

République tchèque.

En 2022, en vanadium contenu, les importations des États-Unis ont été de 1 500 t de V_2O_5 , 2 700 t de ferrovanadium, 100 t d'autres oxydes et hydroxyde, 30 t d'alliage Al-V, 790 t d'autres composés chimiques, 1 800 t de cendres et déchets.

Recyclage

Le vanadium contenu, sous faible teneur, dans les [aciers](#) n'est pas récupéré.

Par contre celui contenu dans les aciers rapides et les [superalliages](#) est récupéré et recyclé. Il en est de même pour l'oxyde de vanadium des catalyseurs usés. La récupération des catalyseurs usés permet le recyclage de 3 000 t/an de vanadium.

Le recyclage représente, en 2020, 10 % de la consommation.

Situation française

Il n'y a pas de production française.

Commerce extérieur

Exportations

Les exportations en 2024 étaient de :

- 2 117 kg pour les oxydes et hydroxydes vers principalement :
 - à 94 % le royaume Uni,
 - à 5 % l'Espagne.
- 39 t pour le ferrovanadium vers principalement :
 - à 51 % l'Allemagne,
 - à 21 % la Suède,
 - à 7 % la Chine
- 45 t pour le métal brut vers :
 - à 97 % l'Afrique du Sud,
 - à 2 % la Pologne.

Importations

Les importations en 2024 étaient de :

- 288 t pour l'oxyde et hydroxyde, en provenance principalement :
 - à 56 % d'Afrique du Sud,
 - à 21 % de Chine,
 - à 13 % de Taïwan,
 - à 7 % de Suède,
 - à 3 % d'Allemagne.
- 409 t de ferrovanadium en provenance principalement :
 - à 35 % d'Afrique du Sud,
 - à 32 % d'Autriche,
 - à 15 % d'Allemagne,
 - à 8 % de Slovénie.
- 109 t de métal brut en provenance :
 - à 28 % d'Afrique du Sud,

- à 8 % d'Allemagne,
- à 7 % des États-Unis.

Utilisations

Consommations

La consommation mondiale, en 2023, s'élevait à 118 100 t dont 66 700 t en Chine, 12 900 t en Amérique du Nord et 11 300 t dans l'Union européenne.

Secteurs d'utilisation du vanadium

En 2024, dans le monde. Source : Largo Resources

Aciers	85 %	Chimie	4,5 %
Batteries	6 %	Aérospatial	4,5 %

Source : Largo Resources

Le vanadium est introduit dans les [aciers](#) principalement, à 85 %, sous forme de ferrovanadium. Celui-ci renferme 40, 60 ou 80 % de vanadium. Ceux contenant 60 et 80 % de vanadium sont élaborés par aluminothermie ou réduction dans un four électrique. Ceux à 40 % de vanadium sont préparés par réduction à l'aide de [silicium](#).

En moyenne, en 2018, dans le monde, la teneur des aciers en vanadium est de 0,054 kg de V/t d'acier, avec :

- 0,099 kg/t en Amérique du Nord,
- 0,077 kg/t en Europe,
- 0,053 kg/t au Japon,
- 0,048 kg/t en Chine,
- 0,012 kg/t en Inde.

Le vanadium, en formant des carbures et des nitrures, sous faible teneur, d'environ 0,25 %, comme le [niobium](#) ou le [titane](#), permet d'obtenir des aciers micro-alliés, à haute résistance (aciers HSLA) qui représentent 12 % de la production mondiale d'aciers. Le rôle du vanadium est d'augmenter la limite élastique et la résistance à la traction, propriétés importantes pour les aciers destinés à la construction et en particulier les ronds à béton. Cette application dans les aciers HSLA représente, en 2014, 46 % des utilisations du vanadium.

Les aciers rapides ont des teneurs en vanadium comprises entre 1 et 5 %.

Le vanadium entre dans la composition du principal alliage de [titane](#), TA6V, contenant 90 % de Ti, 6 % de [Al](#) et 4 % de V, utilisé dans l'aéronautique ainsi que pour des implants dentaires.

L'oxyde de vanadium, V_2O_5 , est utilisé comme catalyseur dans le procédé de contact de fabrication de l'[acide sulfurique](#). Il catalyse la réaction d'oxydation du [dioxyde de soufre](#), en trioxyde. Il catalyse également la formation d'anhydride maléique, par oxydation à l'air du butane.

Le vanadium est utilisé dans des batteries stationnaires. Ces batteries redox au vanadium qui possèdent une capacité importante peuvent répondre à des pics de consommation ou au lissage de la production de sources intermittentes telles que le photovoltaïque ou l'éolien. La possibilité pour le vanadium de présenter, en solution, 4 différents degrés d'oxydation (+V, +IV, +III, +II) est mise à profit. La demi-cellule positive contient, en solution dans l'[acide sulfurique](#), des ions VO^{2+} qui lors de la charge donnent des ions VO_2^+ , la demi-cellule négative renfermant des ions V^{3+} donnant des ions V^{2+} , le séparateur des cellules est une membrane perméable aux protons. La tension entre les 2 demi-cellules est de 1,41 V à 25°C.

Il est également utilisé dans des batteries au [lithium](#). La technologie lithium-ions utilise des cathodes en oxyde de lithium-[cobalt](#), LiCoO_2 qui peuvent être remplacées par des cathodes en phosphate de lithium-vanadium, $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$, associé ou non à du phosphate de lithium-fer, LiFePO_4 . Ces batteries sont destinées à alimenter les véhicules électriques. Une technologie concurrente lithium-métal-polymère, utilise des cathodes en oxyde de vanadium, carbone et polymère. Cette technologie était utilisée par le groupe Bolloré pour alimenter les véhicules Blue Car d'Autolib, à Paris. Elle présente l'avantage de ne comporter que des composants solides évitant les risques d'explosion mais doit fonctionner à 85°C pour atteindre un fonctionnement optimal.

Utilisations diverses :

Colore en jaune les céramiques et les [verres](#).