

## VANADIUM 2014

### 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 de vanadium 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 de Pipestone Lake, dans la Province du Manitoba, au Canada, contient, 57,5 % de Fe, 0,66 % de V et 16,6 % de  $TiO_2$ . Le gisement Windamurra, en Australie, renferme 0,47 % de  $V_2O_5$ , celui de Mapochs, en Afrique du Sud, 1,4 % de  $V_2O_5$ .

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 21 % 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 de vanadium pour élaborer de l'acier, cela est le cas, en Chine, en Afrique du Sud et en Russie et donne 68 % de la production mondiale de vanadium.

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. On estime que cette source représente, avec les catalyseurs usés, 15 % de la production de vanadium.

Du vanadium est aussi présent dans des minerais d'uranium (carnotite) extraits aux États-Unis qui contiennent de 1 à 5 % de  $V_2O_5$ , des minerais d'alumine (roscoelite) extraits en Inde, des sables riches en oxyde de fer (80 % de  $Fe_3O_4$ , 8 % de  $TiO_2$ , 0,6 % de  $V_2O_5$ ), en Nouvelle Zélande. Par exemple, la société Energy Fuels a extrait, en 2013, 594 t de  $V_2O_5$  et 459 t de  $U_3O_8$  lors du traitement de minerais d'uranium dans l'usine de White Mesa, dans l'Utah, aux États-Unis. La production de 0,45 kg de  $U_3O_8$  génère, pour ce minerai, 1,8 kg de V dans  $V_2O_5$ . En 2014, cette coproduction a été suspendue.

### PRODUCTIONS : en 2014, en t.

Les titanomagnétites riches en vanadium, par exemple en Afrique du Sud, sont calcinées, en présence de carbonate, chlorure ou sulfate de sodium, dans un four, à 850°C. Il se forme 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 soit traitées dans un haut fourneau puis un convertisseur, en Chine ou en Russie soit en 3 étapes de pré-réduction puis de réduction dans un four électrique et enfin d'oxydation, en Afrique du Sud.

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 extrait par Evraz de la mine de Mopachs est pré-réduit, en présence de charbon en poudre, dans un four tournant vers 1140°C puis, réduit, vers 1350°C dans un four électrique à électrode immergée dans lequel a 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 subit ensuite, dans une poche de coulée, un soufflage de dioxygène qui permet 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 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**, en 2014 : monde : 78 000 t.

Chine	41 000 t	Russie	15 000 t
Afrique du Sud	21 000 t	Australie	400 t

Source : USGS

En 2013, le minerai de la mine de Windimurra, en Australie, propriété d'Atlantic, a commencé à être exploité avec une production prévue de 6 300 t de  $V_2O_5$ /an. Les réserves sont, en juin 2012, de 159,9 millions de t contenant 0,47 % 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 TiO<sub>2</sub>. Par ailleurs, la production prévue de minerai de fer, destiné à l'exportation, est de 1 million de t/an. L'oxyde de vanadium est transformé sur place en ferrovanadium contenant 80,3 % de V. Le 4 février 2014, un incendie a détruit l'usine d'enrichissement et depuis, la production est arrêtée.

Au Brésil, a débuté, en août 2014, la production de la mine de Maracás Menchen, exploitée par Largo Resources. La production prévue est de 11 400 t/an de  $V_2O_5$ . Les réserves prévues et probables sont de 13,1 millions de t de minerai renfermant 1,34 % de  $V_2O_5$ .

**Réserves minières** : en 2014, en milliers de t. Monde : 15 millions de t.

Chine	5 100	Afrique du Sud	3 500
Russie	5 000	Australie	1 800

Source : USGS

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

**Principaux producteurs** :

Evrax, groupe russe, est de loin le principal producteur mondial, en produisant de l'oxyde de vanadium et du ferrovanadium, en Russie, en Afrique du Sud, en République tchèque et aux États-Unis. En 2014, la production de vanadium contenu dans des laitiers a été de 18 361 t, en Russie et en Afrique du Sud. Le vanadium extrait de ces laitiers a donné une production de 14 076 t contenues dans du ferrovanadium, 2 463 t dans du vanadium nitré, 1 822 t dans des oxydes et composés chimiques.

En Russie, Evraz exploite, à Kachkanarsky, avec 3 mines à ciel ouvert, le dépôt de titanomagnétite de vanadium de Gusevogorskoye, qui possède des réserves de 1,2 milliard de t de minerai contenant 16 % de fer, 5 % de  $TiO_2$  et 0,14 % 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, en 2014, une production de 7 309 t d'oxyde de vanadium et 2 755 t de ferrovanadium.

Par ailleurs, le gisement de Kachkanar Proper possède 6,9 milliards de t de réserves prouvées et probables renfermant 16,4 % de fer et 0,14 % de  $V_2O_5$ .

En Afrique du Sud, Evraz exploite, à 65 %, la mine de Mapochs, à Roosenekul dans la province de Limpopo, produit des laitiers à eMalahleni dans la province de Mpumalanga et des oxydes de vanadium et du vanadium nitré, à Brits dans la province du Nord-Ouest, avec, en 2014, 3 206 t d'oxyde de vanadium et 2 463 t de vanadium nitré. En août 2015, la participation de Evraz dans la mine de Mapochs a été mise en vente.

En République tchèque, à Mnisek pod Brdy, Evraz a produit, en 2014, 4 803 t de vanadium contenu dans du ferrovanadium à partir d'oxyde produit à Tula.

Aux États-Unis, la production d'oxyde de haute pureté et de divers composés chimiques du vanadium est effectuée à Hot Springs, dans l'Arizona, par Stratco filiale à 78,76 %, avec une capacité de production de 2 750 t/an d'oxyde de vanadium.

Les principaux groupes chinois sont : Pangang Group Steel Vanadium & Titanium, dans la province du Sichuan, et Chengde XinXin Vanadium & Titanium, dans la province de Hebei.

Glencore, exploite à 74 %, en Afrique du Sud, dans le complexe du Bushveld, la mine de Rhovan et a produit, à Brits, en 2014, 9 480 t d'oxyde de vanadium et du ferrovanadium. Les réserves prouvées et probables sont de 20,3 millions de t renfermant 0,5 % de  $V_2O_5$ .

Vanchem, en Afrique du Sud, filiale de Duferco, possède 35 % de la mine de Mopachs et a produit, en 2014, 4 166 t de vanadium contenu dans du ferrovanadium et des composés chimiques du vanadium.

China Vanadium Titano-Magnetite Mining Company, exploite dans la province du Sichuan, en Chine, 4 mines : Baicao, Xiushuihe, Yangqueqing et Cizhuqing. Les réserves prouvées et probables de la mine de Baicao sont de 35,7 millions de t de minerai contenant 25,8 % de Fe, 10,3 % de  $TiO_2$  et 0,22 % de  $V_2O_5$ . Celles de la mine de Xiushuihe sont de 55,4 millions de t contenant 24,3 % de Fe, 9,1 % de  $TiO_2$  et 0,21 % de  $V_2O_5$ .

### **Commerce international :**

Il a porté, en 2011, sur 41 028 t de ferrovanadium et 31 219 t d'oxyde. En 2013, les exportations de la Chine ont été de 6 074 t, celles de la Russie, de 1 416 t.

### **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 2013, 11 % de la consommation.

### SITUATION FRANÇAISE : en 2014.

Pas de production.

Importations :

- Oxyde et hydroxyde : 659 t d'Afrique du Sud à 47 %, de Chine à 20 %, des Pays Bas à 10 %, de Thaïlande à 9 %.
- Ferrovanadium : 704 t d'Afrique du Sud à 34 % de Chine à 29 %.
- Métal brut : 95 t d'Afrique du Sud à 51 %, d'Allemagne à 45 %.

Exportations :

- Ferrovanadium : 36 t vers le Canada pour 44 %, l'Italie pour 19 %, la Russie pour 11 %, l'Allemagne pour 11 %.
- Métal brut : 34 t vers l'Afrique du Sud pour 71 %, le Canada pour 15 %, la République tchèque pour 12 %.

### UTILISATIONS :

**Consommations**, en 2013. Monde : 80 000 t.

Chine	39 %	Japon	9 %
Europe	18 %	Russie et CIS	8 %
Amérique du Nord	12 %	Inde	3 %

Source : VanadiumCorp

**Secteurs d'utilisation** : dans le monde, en 2014.

Aciers	91 %	Chimie	3,5 %
Alliages de titane et d'aluminium	4,5 %	Autres (batteries...)	1 %

Source : Roskill

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 2013, dans le monde, la teneur des aciers en vanadium est de 0,056 kg de V/t d'acier, avec 0,091 kg/t en Amérique du Nord, 0,080 kg/t en Europe, 0,073 kg/t au Japon, 0,044 kg/t en Chine. 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 avec une consommation mondiale, en 2012, de 1 100 t. 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 avec, en 2012, une consommation mondiale de 200 t. 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,  $Li_3V_2(PO_4)_3$ , 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 est 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.