

## MAGNESIUM 2022

### Matières premières

La teneur en magnésium de l'écorce terrestre est d'environ 2 %. Il est abondant et bien réparti dans le monde en étant présent dans plus de 60 minéraux, dont les plus importants sont :

- la magnésite ou giobertite :  $MgCO_3$ , voir le chapitre [carbonate de magnésium](#).
- la dolomite qui renferme de la dolomie  $(Ca,Mg)CO_3$ , avec une teneur de 38 % de MgO après calcination,
- la carnallite :  $KCl,MgCl_2,6H_2O$ , présente dans des [gisements de potasse](#). Elle est utilisée, en particulier, comme source de magnésium dans les engrais,
- la bischofite :  $MgCl_2,6H_2O$ , voir le chapitre [chlorure de magnésium](#).
- la kiesérite :  $MgSO_4,H_2O$ , utilisée dans l'industrie des engrais,
- la brucite :  $Mg(OH)_2$ ,
- l'olivine : silicate de magnésium et de fer avec une composition comprise entre celle de la forstérite  $(Mg_2SiO_4)$  et celle de la fayalite  $(Fe_2SiO_4)$ . La qualité commercialisée comme source de magnésium renferme de 45 à 51 % de MgO et de 7 à 8 % de  $Fe_2O_3$ . Le principal producteur mondial est la Norvège.

Le magnésium est également récupéré dans l'eau de mer et dans des saumures, voir le chapitre [chlorure de magnésium](#). La teneur de l'[eau de mer](#) est en moyenne de  $1,3 \text{ kg/m}^3$  soit 0,13 %.

Certaines mers ou lacs fermés en contiennent jusqu'à  $35 \text{ kg/m}^3$ . Par exemple, la teneur du Grand Lac Salé dans l'Utah, aux États-Unis, est, en masse, de 5 % en magnésium. Le magnésium est extrait sous forme de chlorure de magnésium  $MgCl_2$  et éventuellement transformé en oxyde MgO, en d'autres composés : hydroxyde, sulfate... ou en métal. Par exemple, aux États-Unis, en 2021, le magnésium extrait de l'eau de mer ou de saumures est à l'origine de 64 % de la production de sels de magnésium du pays. En 2017, dans le monde, la part provenant de l'eau de mer et des saumures est de 5,6 %. Toute la production primaire de magnésium métal des États-Unis et d'Israël provient du Grand Lac Salé pour l'un et de la Mer Morte pour l'autre.

Par exemple, en 2020, aux États-Unis, la production provient, exprimée en capacités annuelles de production d'équivalent en MgO :

- d'une carrière de magnésite à Gabbs, dans le Nevada par [Premier Magnesia](#) avec 140 000 t/an,
- d'une carrière d'olivine à Bellingham, dans l'État de Washington par Olivine Corp.,
- d'eau de mer à Chula Vista, en Californie par South Bay Salt Works avec 3 000 t/an,
- d'eau de mer à Lewes, dans le Delaware par [SPI Pharma](#) avec 5 000 t/an,
- de puits d'extraction de saumure à Manistee, dans le Michigan avec 314 000 t/an et d'une carrière de dolomie à Woodville dans l'Ohio, par [Martin Marietta Magnesia Specialties](#),
- de lac salé à Ogden, dans l'Utah par [Compass Minerals](#) avec 288 000 t/an,
- de lac salé à Wendover, dans l'Utah par [Intrepid Potash](#) avec 45 000 t/an.

## Métallurgie

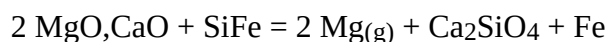
Elle est réalisée actuellement selon 2 voies :

- Par réduction thermique de MgO issu de la calcination de dolomite ou de magnésite en présence de calcaire selon les procédés Pidgeon, Bolzano ou Magnetherm. Le principal procédé utilisé est le procédé Pidgeon, employé pour la plus grande partie de la production chinoise.
- Par électrolyse, en sel fondu, de MgCl<sub>2</sub> extrait de l'eau de mer, de saumures ou obtenu à partir de carnallite selon les procédés Dow, Norsk Hydro ou IG Farben.
- Par ailleurs, des projets sont en cours de développement, au Canada, dans la province de Québec, afin de traiter les résidus de l'exploitation de l'amiante, renfermant de la serpentine (3MgO,2SiO<sub>2</sub>,2H<sub>2</sub>O).
- Un projet développé par [Latrobe Magnesium](#) est également en cours de construction, en Australie, dans l'État de Victoria, afin de récupérer, avec un taux de récupération de 90 %, le magnésium contenu dans des cendres volantes issues de la centrale thermique de Yallourn produisant de l'électricité à partir de lignite. Le stock accumulé est considérable avec 25 millions de t renfermant jusqu'à 12 % de MgO contenu dans de la magnésioferrite, Mg(Fe<sup>3+</sup>)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> de structure spinelle, et la production annuelle de 320 000 t.

### Réduction thermique par le silicium selon le procédé Pidgeon

Ce procédé mis au point en 1940, au Canadian National Research Council par Lloyd Montgomery Pidgeon a été industrialisé en 1942, à Haley, en Ontario, par la société Dominion Magnesium. L'usine a été fermée par la société Timminco Metals en 2008.

La dolomite (voir le produit [carbonate de magnésium](#)) ou la magnésite en présence de calcaire est d'abord décarbonatée dans un four rotatif entre 1000 et 1200°C. Ensuite, après broyage, ajout de [ferrosilicium](#) (à 78 % de [Si](#)) comme agent réducteur et de [fluorure de calcium](#), pressage et briquetage, la matière première est introduite dans un four porté à 1200°C, sous vide (avec une pression d'environ 100 Pa). Le chauffage est effectué extérieurement (en Chine, le gaz de chauffage est souvent issu de [cokeries](#)). La réaction représentée par l'équation suivante a lieu :



Le magnésium, à l'état de vapeur, est condensé, dans une chambre refroidie par circulation extérieure d'eau. La réduction dure environ 6 h. Le magnésium obtenu possède une pureté élevée qui peut atteindre 99,95 %. Ce procédé présente l'inconvénient d'être discontinu, de faible productivité avec une production de 40 à 70 kg par four et de consommer une importante quantité d'énergie, avec environ 300 GJ/t. Toutefois, les investissements nécessaires sont réduits.

En Chine, les coûts de production à l'aide du procédé Pidgeon se répartissent entre le ferrosilicium pour 48 %, l'énergie pour 15 %, la dolomite pour 6 %.

### Électrolyse de MgCl<sub>2</sub> selon le procédé Dow

C'est le procédé le plus ancien.

Mg<sup>2+</sup> contenu dans des solutions de [chlorure de magnésium](#) provenant soit d'eau de mer, soit de saumures, est précipité, à l'aide de dolomie calcinée, en Mg(OH)<sub>2</sub> qui est récupéré par filtration.

L'hydroxyde est ensuite transformé en  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  par attaque chlorhydrique, puis déshydraté partiellement en  $\text{MgCl}_2 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$  ou totalement pour alimenter les cuves d'électrolyse.

L'électrolyte qui fond vers 720-780 °C a la composition suivante :

<a href="#">NaCl</a>	$\text{CaCl}_2$	$\text{MgCl}_2$
50-60 %	15 %	20-30 %

Les anodes sont en [graphite](#). Dans le cas des cellules Dow, les anodes sont entourées par des cathodes en [acier](#) percées de déflecteurs dont la forme permet de guider le magnésium formé vers le pourtour de la cellule, à l'abri de l'oxydation. Le magnésium, liquide, surnage sur le mélange de sels fondu. La consommation énergétique est de 12 000 kWh/t, pour les cellules les plus modernes.

L'un des problèmes lié à l'obtention du magnésium par électrolyse est l'utilisation l'hexafluorure de soufre  $\text{SF}_6$ , servant à protéger le magnésium fondu de l'oxydation à l'air. L'hexafluorure de soufre est un gaz à effet de serre qui possède un potentiel de réchauffement global 22 800 fois plus important que le [dioxyde de carbone](#) (voir le chapitre [effet de serre](#)). Il est remplacé par du dodécafluoro-2-méthyl-3-pentanone ou par du [dioxyde de soufre](#).

### **Projets québécois de traitement de la serpentine**

Au Québec, l'exploitation de l'amiante sous forme de chrysotile ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) de 1877 à 2011 a laissé des quantités considérables de rejets miniers, environ 800 millions de t, d'une roche, la serpentine, famille de minéraux à laquelle appartient le chrysotile, avec une teneur en magnésium d'environ 25 %. Diverses sociétés envisagent de produire du magnésium à partir de cette matière première située dans le sud-est de la province à Asbestos et à Thetford Mines.

- [Alliance Magnésium](#) (AMI) envisage un procédé hydrométallurgique de lixiviation à l'aide d'[acide chlorhydrique](#) avec formation de [chlorure de magnésium](#) suivi d'une électrolyse donnant le métal et une capacité de production de 11 700 t/an en 2022, pouvant être portée à 50 000 t/an.
- [Mag One Products](#) développe un procédé hydrométallurgique donnant de l'[oxyde de magnésium](#) avec une capacité de production de 30 000 t/an ainsi que de la [fumée de silice](#) et du magnésium par réduction de  $\text{MgO}$  par [aluminothermie](#) et une capacité de production de 5 000 t/an.

### **Projet australien de traitement de cendres volantes**

Il associe un traitement hydrométallurgique donnant de l'oxyde  $\text{MgO}$  à un traitement pyrométallurgique de réduction à l'aide de ferrosilicium de type procédé Pidgeon. Le traitement hydrométallurgique consiste en une série de dissolutions dans de l'hydroxyde de sodium puis dans de l'acide chlorhydrique afin de dissoudre la magnésioferrite. Du carbonate de calcium et de l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) précipitent puis du chlorure de magnésium est récupéré et par calcination transformé en oxyde, le chlorure d'hydrogène formé étant recyclé pour donner de l'acide chlorhydrique. Cet oxyde, par pyrométallurgie, est réduit par du ferrosilicium en magnésium.

La production prévue pour 2021 est de 3 000 t/an et elle pourrait ensuite être portée à 40 000 t/an.

## Production

[fc-chart id="production-magnesium"]

En 2022, productions. Monde : 1 million de t.

en tonnes

Chine	900 000	Brésil	20 000
Russie	50 000	Kazakhstan	15 000
États-Unis	40 000	Turquie	13 000
Israël	20 000	Ukraine	2 000

Source : USGS

Il n'y a pas de production primaire dans l'Union européenne.

La production des États-Unis est estimée.

Fin 2018, la capacité mondiale de production de magnésium primaire est estimée à 1,855 million de t/an.

Il y a, en 2018, en Chine, plus de 60 usines utilisant le procédé Pidgeon, avec 58 % de la production provenant de la province du Shaanxi et 26 % de celle du Shanxi.

**Commerce international** : en 2022, pour le magnésium brut d'une teneur > 99,8 %.

Principaux pays exportateurs sur un total de 353 307 t :

en tonnes

Chine	272 818	Belgique	3 567
Turquie	27 396	États-Unis	3 235
Israël	21 784	Canada	2 860
Pays Bas	10 892	Allemagne	1 511
Russie	5 819	Slovénie	634

Source : ITC

Les exportations de la Chine sont destinées à 25 % aux Pays Bas, 8 % au Canada, 8 % à l'Inde, 7 % à la Turquie...

Principaux pays importateurs sur un total de 275 994 t, en 2021.

en tonnes

Canada	30 177	Norvège	16 522
Allemagne	23 162	Sri Lanka	16 030
Inde	22 138	Brésil	15 840
Japon	17 493	Turquie	15 555
Pays Bas	16 943	Émirats Arabes Unis	14 031

Source : ITC

Les importations des Pays Pays proviennent à 98 % de Chine.

**Principaux producteurs de magnésium**, en 2019, hors celui auto-consommé pour produire l'éponge de titane, avec un total mondial de 935 000 t :

en milliers de t

Sociétés chinoises	809	<a href="#">Rima Industrial</a> (Brésil)	15
<a href="#">US Magnesium</a> (États-Unis)	63	<a href="#">VSMPO-Avisma</a> (Russie)	6
<a href="#">Dead Sea Magnesium</a> (Israël)	20	<a href="#">Royal Metal</a> (Iran)	5
Solikamsk Magnesium Works (Russie)	15	<a href="#">Esan</a> (Turquie)	5

Source : [Solikamsk Magnesium Works](#)

- [Rare Earth Magnesium Technololy Group](#) filiale du groupe [Century Sunshine Group Holdings Ltd.](#) exploite une mine à ciel ouvert de dolomite à Baishan dans la province de Jilin et produit du magnésium à Hami dans la région autonome ouïghoure du Xinjiang avec, en 2021, 16 901 t d'alliages de magnésium.
- La société [QingHai Salt Lake](#) exploite le chlorure de magnésium contenu dans le lac salé de Qarham, à 2800 m d'altitude sur le plateau tibétain, dans la province de Qinghai et produit, à Golmud, par électrolyse, du magnésium. Celui-ci approvisionne l'usine d'élaboration d'alliages de magnésium de la société australienne [Magontec](#). La production, par électrolyse, selon le procédé Norsk Hydro, a débuté en octobre 2018 avec une capacité de production de 56 000 t/an. Le [dichlore](#) coproduit lors de l'électrolyse est destiné à la production de [PVC](#). Toutefois les difficultés de fonctionnement de Qinghai Salt Lake n'ont pas permis un approvisionnement suffisant et, en 2021, la production de magnésium n'a été que de 5 660 t.
- [Yinguang Magnesium Industry](#) possède, à Yaocun, dans la province du Shanxi, une capacité de production de 80 000 t/an.
- [US Magnesium LLC](#) (Utah, États Unis) est le seul producteur aux États Unis, à Rowley, dans l'Utah, avec une usine exploitant les saumures du Grand Lac Salé et produisant du magnésium par électrolyse avec une capacité de production de 63 500 t/an.
- [Dead Sea Magnesium](#), filiale de [Israel Chemicals Ltd.](#) (Israël), avec une capacité de production de 24 000 t/an, exploite, à Sodom, l'eau de la Mer Morte. En 2021, la production a été de 18 000 t. La solution de chlorure de magnésium obtenue à partir de la carnallite extraite de la Mer Morte est électrolysée pour donner du magnésium et du dichlore employé dans la production de [dibrome](#) (voir ce chapitre).
- En Russie, les sociétés productrices Solikamsk Magnesium Works et [VSMPO-Avisma](#) sont aussi productrices de titane. En conséquence, une partie de leur production est auto-consommée par cette application. [Solikamsk Magnesium Works](#) possède une capacité de production de 18 200 t/an par électrolyse et a vendu, en 2019, 15 336 t de magnésium à partir de carnallite et [VSMPO-Avisma](#) a vendu, 6 000 t.
- [Rima](#) (Brésil) à Bocaiuva, dans l'État du Minas Gerais possède une capacité de production de 22 000 t/an à partir d'une production minière de 180 000 t/an de dolomite.
- [Kar Magnesium Smelter](#) produit du magnésium en Turquie depuis 2016, avec une capacité de production de 15 000 t/an, à Emirdag, dans la province d'Afyonkarahisar, à l'aide du procédé Pidgeon, à partir de dolomite. En 2019, la production est de 4 500 t.
- "[UKTMK](#)" (Ust-Kamenogorsk Titanium-Magnesium Combine) (Kazakhstan) possède une capacité de production de 30 000 t/an et auto-consomme la plus grande partie de sa production pour la fabrication d'éponge de titane.
- [Zaporozhye Titanium & Magnesium Combine](#) (Ukraine) possède une capacité de production de 15 000 t/an par électrolyse en sel fondu de chlorure de magnésium et de carnallite. La quasi totalité de la production est employée à fabrication d'éponge de titane.

- [Mg Serbien](#) (Serbie) produit 5 000 t/an à Baljevac, selon le procédé Magnetherm à partir de dolomite.

## Recyclage

La production mondiale de magnésium secondaire est estimée à 200 000 t/an, hors recyclage du magnésium contenu dans les alliages d'aluminium directement recyclés. La production de magnésium de deuxième fusion est, en 2021, de 98 000 t aux États-Unis, dont 69 000 t provenant de chutes neuves et 29 000 t de métal récupéré, les alliages d'aluminium comptant pour 57 % de l'approvisionnement. Toutefois, aux États-Unis, le chlorure de magnésium sous-produit de la métallurgie du titane et recyclé avec la production de magnésium primaire n'est pas pris en compte. En 2012, dans l'Union européenne, le recyclage a porté sur 63 300 t dont 51 700 t de chutes neuves de fabrication et 11 700 t de vieux déchets.

## Situation française

En 2022.

La production de magnésium qui était réalisée par Pechiney Électrométallurgie à Marignac (31), selon le procédé Magnetherm, à partir de dolomite, avec 12 500 t/an, a cessé en juillet 2001.

### Commerce extérieur :

Les exportations s'élevaient à 1 623 t à destination à :

- 55 % d'Allemagne,
- 34 % de Pologne,
- 3 % de Roumanie.

Les importations s'élevaient à 8 878 t en provenance principalement à :

- 67 % de Chine,
- 15 % d'Allemagne,
- 9 % d'Israël.

## Utilisations

### Consommations

En 2019, la consommation mondiale de magnésium primaire est de 940 000 t.

[fc-chart id="secteurs-dutilisation-magnesium"]

Aux États-Unis, en 2021, la part des alliages de magnésium est de 45 %, celle des alliages d'aluminium de 35 % et celle de la désulfuration de l'acier de 16 %.

- [Alliages d'aluminium](#) : le magnésium entre dans la composition des alliages (série 5000) utilisés pour élaborer les [boîtes-boisson](#). Aux États-Unis, une grande partie du magnésium utilisé est recyclé lors du recyclage de ces boîtes. En moyenne, les alliages d'aluminium renferment 0,8 % de magnésium, soit, en 2015, une consommation de 350 000 t de magnésium.
- [Alliages de magnésium](#) : utilisés en fonderie sous pression, à 70 % dans l'industrie automobile. Le plus utilisé est G-A9Z1 (9 % [Al](#), 1 % [Zn](#), 0,5 % [Mn](#)). En moyenne, par

véhicule il y a 2,3 kg de magnésium mais le poids peut atteindre 23 kg pour certains modèles. Utilisés également en aéronautique et, par exemple, pour fabriquer le corps de taille-crayons. Un cadre de bicyclette, en alliage de magnésium, ne pèse que 2,5 kg. En 2015, l'élaboration des alliages de magnésium a consommé 315 000 t.

- Le magnésium est employé comme agent de réduction (par magnésiothermie) dans diverses métallurgie dont principalement celle du [titane](#), mais aussi celles du [zirconium](#), du [hafnium](#), du [béryllium](#), de l'[uranium](#) (voir ces éléments). En 2015, la production de l'éponge de titane a consommé 130 000 t de magnésium mais une partie de celui-ci est recyclé par électrolyse du chlorure de magnésium formé selon le procédé Kroll et en conséquence, la consommation de magnésium primaire a été proche de 80 000 t.
- En sidérurgie, le magnésium intervient dans la désulfuration des fontes de hauts fourneaux, en concurrence avec le carbure de calcium et dans la nodulisation des fontes, le magnésium favorisant les structures à graphite nodulaire sphéroïdal. En moyenne, la consommation est de 50 g de Mg/t d'acier, soit, en 2015, une consommation de 95 000 t.

### Utilisations diverses

Quelques autres exemples d'utilisations :

- Chimie : fabrication d'organomagnésiens.
- Automobiles : le magnésium est utilisé afin de réduire le poids des véhicules et ainsi diminuer leur consommation en carburant. Il y a 14 kg de magnésium utilisé pour les VW Passat, Audi A4 et A6. Le concept car de Volvo utilise environ 50 kg de magnésium dans les roues, les châssis et les moteurs.
- Les coques des sièges, les accoudoirs et les tablettes des TGV à 2 étages sont, en 2<sup>ème</sup> classe, en magnésium. Le siège en magnésium pèse 14 kg au lieu de 26 kg lorsqu'il était en [aluminium](#).
- Le magnésium est utilisé pour fabriquer des cadres de téléphones portables.
- Débismuthage du [plomb](#).
- Pyrotechnie : Mg ou Al-Mg sous forme de poudres très fines.
- Piles et anodes sacrificielles : l'utilisation comme anode sacrificielle représente 1 010 t, en 2014, aux États-Unis.
- Les rubans de magnésium utilisés en chimie sont obtenus par fraisage de lingots ou tournage de billettes (cylindres de 30 à 50 cm de diamètre et plusieurs mètres de long).
- La réaction exothermique du magnésium avec l'[eau](#) est utilisée, en particulier par l'armée américaine, pour chauffer des rations de combat. En 15 minutes, une température de 60 °C est atteinte.