

PLATINOIDES 2012

Le platine (Pt), avec le palladium (Pd), le rhodium (Rh), le ruthénium (Ru), l'iridium (Ir) et l'osmium (Os) forme la famille des métaux du groupe du platine (PGM en anglais) ou platinoïdes. Ces éléments, possédant des propriétés chimiques proches sont associés dans leurs gisements. Par contre, leurs propriétés physiques sont différentes : le platine et le palladium sont ductiles et faciles à mettre en forme alors que le ruthénium et l'osmium sont durs et cassants.

MATIÈRES PREMIÈRES :

Les teneurs de l'écorce terrestre sont de 0,005 ppm (mg/kg) pour le platine, 0,015 ppm pour le palladium, 0,0015 pour l'osmium, 0,001 pour le rhodium, l'iridium et le ruthénium.

Les gisements de platinoïdes se trouvent généralement dans des roches magmatiques qui sont remontées en surface au travers de la croûte terrestre. C'est le cas du principal gisement mondial, celui du complexe du Bushveld, en Afrique du Sud, mais aussi de ceux de Great Dyke, au Zimbabwe, de Stillwater, aux Etats-Unis, de Norilsk en Russie. Dans ces gisements, les platinoïdes sont associés à des sulfures de nickel et de cuivre.

La teneur en platinoïdes des minerais d'Afrique du Sud est comprise entre 3 et 10 g/t. Aux Etats-Unis, cette teneur est, en moyenne, de 14 g/t. En Russie, dans le gisement de Norilsk-Talnakh, les teneurs varient entre 8 et 11 g/t pour les platinoïdes présents avec les sulfures massifs de nickel ou de cuivre et 3 et 9 g/t pour les platinoïdes présents dans les sulfures dissimulés. Pour récupérer une once (31,1035 g) de platinoïdes, il faut extraire de 8 à 16 t de minerai.

En Afrique du Sud et aux Etats-Unis, les gisements sont exploités pour les platinoïdes contenus, le nickel et le cuivre étant coproduits. A Norilsk, en Russie, et à Sudbury, au Canada, les platinoïdes sont coproduits de mines de nickel.

Il existe une faible production alluviale, sous forme de platine natif, en Colombie et en Russie.

PRODUCTIONS MINIERES : en 2012, en t.

Les exploitations minières sont le plus souvent souterraines. Les minerais extraits sont broyés puis concentrés par flottation dans des installations proches de la mine qui donnent des concentrés sulfurés de nickel et de cuivre renfermant les platinoïdes.

Platine : monde : 183 t, Union européenne (Finlande) : 0,425 t.

Afrique du Sud	133,0	Canada	7,0
Russie	24,6	États-Unis	3,7
Zimbabwe	11,0	Colombie	1,0

Source : USGS

Palladium : monde : 201 t, Union européenne (Finlande) : 1,115 t.

Russie	82,0	États-Unis	12,3
Afrique du Sud	74,0	Zimbabwe	9,0
Canada	12,2	Botswana	2,6

Source : USGS

Autres platinoïdes : 67,9 t dont ruthénium : environ 30 t, rhodium : environ 25 t, iridium : environ 6 t.

Afrique du Sud	53,0	Zimbabwe	2,2
Russie	12,0	Canada	0,7

Source : USGS

En Afrique du Sud, l'énorme gisement du Bushveld (voir ci-dessous dans le paragraphe producteurs) s'étend sur une surface de 66 000 km² et une profondeur d'environ 15 km. Il s'est formé pendant 1 à 5 millions d'années, il y a 2 053 millions d'années, par l'intrusion d'un magma basique au travers de la croûte terrestre. Lors de son refroidissement, les minéraux de composition et de température de solidification différentes se sont déposés par cristallisation fractionnée en couches homogènes. Le gisement affleure selon trois lobes :

- à l'ouest, selon un arc de 300 km de long, de Prétoria à Thabazimbi, en passant par Rustenburg,
- à l'est, sur 100 km de long, au nord-est de Middleburg,
- au nord, sur 100 km au nord de Mokopane.

Les platinoïdes se trouvent dans 3 couches, dénommées reefs, à environ 2 000 m de profondeur : Merensky Reef d'une épaisseur moyenne de 30 cm, Upper Group 2 (UG-2) d'une épaisseur comprise entre 0,4 et 2,5 m, située de 20 à 400 m sous Merensky Reef, et Platereef.

Merensky Reef, est constituée d'environ 60 % d'enstatite (pyroxène) et 20 % de plagioclase (feldspath). Les platinoïdes sont associés à des sulfures constitués de pyrrhotite (sulfure de fer) pour 40 %, pentlandite (sulfure de fer et de nickel) pour 30 %, chalcopyrite (sulfure de fer et de cuivre) pour 15 %. Les platinoïdes, sont présents sous forme de coopérite (PtS), braggite ((Pt,Pd)NiS), pseryllite (PtAs₂), laurite (RuS₂)... dans des particules d'environ 15 micromètres. Le niveau UG-2 est constitué par 60 à 90 % de chromite (oxyde de fer et de chrome) et de silicates dont 5 à 30 % de pyroxène et 1 à 10 % de plagioclase.

Le gisement, outre les platinoïdes, contient du cuivre, du nickel, du cobalt, du chrome, du vanadium, du titane, de l'étain, de l'or, de l'argent...

En Russie, les platinoïdes sont principalement coproduits par Norilsk dans les mines de nickel des péninsules de Taimyr et de Kola. Il existe dans ce pays une production alluviale, en 2012, de 4 070 kg de platine natif, avec les gisements de Kondyor, près de Khabarovsk, en Sibérie Orientale, où a été trouvé une pépite de 3,5 kg, et de Koryak, dans le Kamchatka.

Au Zimbabwe, les mines de platinoïdes exploitent l'intrusion magmatique du Great Dyke. Anglo American Platinum possède la mine d'Unki et raffine les concentrés obtenus, en Afrique du Sud et Impala Platinum possède les mines de Zimplats, à 87 % et Mimosa, à 50 %, en joint venture avec Aquarius Platinum.

Au Canada, des platinoïdes sont extraits d'une part de la mine du Lac des Iles, dans l'Ontario et d'autre part sont coproduits dans les mines de Sudbury, dans l'Ontario, et de Raglan, au nord du Québec.

Le gisement du Lac des Iles qui s'étend sur 1 x 0,815 km et 650 m de profondeur est exploité par North American Palladium, à ciel ouvert depuis 1993 et souterrainement, à l'aide d'une rampe d'accès, depuis 2006. En 2012, la production a été de 5,1 t de palladium, 348 kg de platine, 345 kg d'or, 227 kg d'argent, 1 177 t de nickel, 612 t de cuivre et 6 t de cobalt. Les réserves sont de 8 millions de t de minerai contenant 4,21 g/t de palladium, 0,30 g/t de platine, 0,29 g/t d'or, 0,11 % de nickel et 0,08 % de cuivre.

Les mines de Sudbury, exploitées par Vale, principalement pour le nickel contenu, ont donné, en 2012, 4,2 t de platine et 7,8 t de palladium. Les platinoïdes sont concentrés à Port Colborne, dans l'Ontario et raffinés, à Acton, au Royaume Uni.

Xstrata exploite des platinoïdes dans la mine de Nickel Rim South, à Sudbury et dans celle de Raglan.

Aux Etats-Unis, la production est assurée par Stillwater Mining Co. (SMC), qui exploite la couche géologique dénommée J-M Reef, dans le sud du Montana, près de la ville de Nye, avec deux mines souterraines : Stillwater et East Boulder. La teneur moyenne du minerai extrait est de 19 g de platinoïdes par t à Stillwater et de 12 g/t à East Boulder. En 2012, la mine de Stillwater a donné 2,74 t de platine et 9,02 t de palladium, celle de East Boulder, 0,93 t de platine et 3,30 t de palladium. Par ailleurs, la production totale de rhodium a été de 124 kg. Les réserves de SMC, dans le Montana, sont de 46,1 millions de t de minerai avec une teneur moyenne en platinoïdes de 14 g/t et un rapport Pd/Pt de 3,58. Les opérations métallurgiques sont effectuées à Columbus dans le Montana.

Réserves minières : en 2012, en t de platinoïdes. Monde : 66 000 t.

Afrique du Sud	63 000	États-Unis	900
Russie	1 100	Canada	310

Source : USGS

Principaux producteurs :

- Anglo American Platinum (Amplats) est le principal producteur de platinoïdes, avec environ 40 % de la production primaire mondiale. Le groupe exploite, en Afrique du Sud, le complexe du Bushveld avec, en propre, les mines de Bathopele, Dishaba, Khomanani, Khuseleka, Mogalakwena, Siphumelele, Thembelani, Tumela et Twickenham. Toutes les mines sont souterraines sauf celle de Mogalakwena qui a produit, en 2012, 21 t de platinoïdes dont 9,3 t de platine, 10,2 t de palladium et 619 kg de rhodium ainsi que 9 000 t de nickel, 5 800 t de cuivre et 1,4 t d'or. Le groupe exploite également la mine d'Unki, au Zimbabwe qui a produit, en 2012, 3,8 t de platinoïdes dont 1,9 t de platine, 1,4 t de palladium et 162 kg de rhodium ainsi que 1 300 t de cuivre, 1 000 t de nickel et 227 kg d'or.

Par ailleurs, le groupe participe à l'exploitation d'autres mines, en joint venture : à 49 % avec Atlatsa Resources Corporation pour la mine de Bokoni, à 50 % avec ARM Mining Consortium Limited pour la mine de Modikwa, à 33 % avec Royal Bafokeng Resources pour le combiné minier de Bafokeng-Rasimone, à 85 % avec Bakgatla-Ba-Kgafela pour les mines d'Union North and South, à 42,5 % avec Eastern Platinum Limited (filiale de Lonmin), Bapo-Ba-Mogale et Mvelaphanda Resources pour la mine de Pandora, à 50 % avec Xstrata Kagiso Platinum pour la mine de Mototolo, à 50 % avec Aquarius Platinum pour les mines de Kroondal et Marikana.

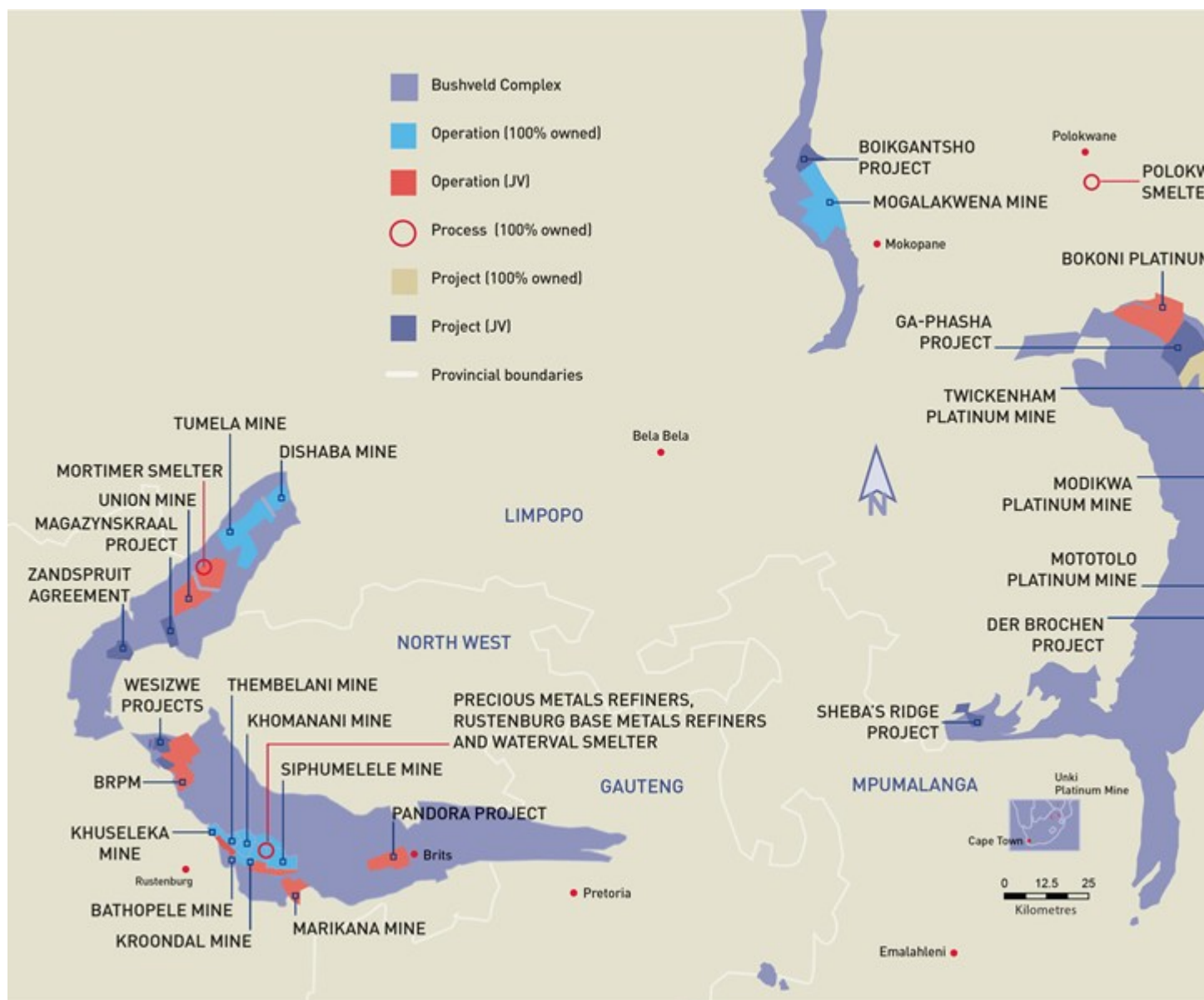
La teneur moyenne des minerais a été, en 2012, de 4,05 g/t pour les mines souterraines et de 1,07 g/t pour la mine à ciel ouvert de Mogalakwena.

En 2012, l'extraction souterraine de minerai a porté sur 23,9 millions de t, l'exploitation à ciel ouvert sur 66,8 millions de t et la récupération de déchets miniers sur 4,9 millions de t. Cette production a été concentrée sur place pour donner 1,15 million de t de concentrés destinés aux installations métallurgiques.

En 2012, la production a été de 144,3 t de platinoïdes dont 74,0 t de platine, 43,4 t de palladium, 9,7 t de rhodium, ainsi que 14 900 t de nickel, 9 900 t de cuivre et 3,3 t d'or.

En 2012, les réserves prouvées et probables de platinoïdes sont de 1 663 t dont 1 610 t en Afrique du Sud et 54 t au Zimbabwe.

Mines exploitées, dans le complexe de Bushveld, par Anglo American Platinum



Source : Anglo American Platinum

Impala Platinum (Implats), est le deuxième producteur mondial de platine (22 % de la production mondiale) et le 3^{ème} de palladium (15 % de la production mondiale), avec, en 2012, une production de 45,1 t de platine, 29,5 t de palladium, 6,5 t de rhodium et 15 400 t de nickel. Cette société exploite, en Afrique du Sud, les mines d'Impala, de Marula, à 73 %, de Two Rivers, à 45 %, en joint venture avec ARM et au Zimbabwe les mines de Zimplats, à 87 % et Mimosa, à 50 %, en joint venture avec Aquarius. Les réserves prouvées et probables du groupe sont, à mi-2012, de 510,6 millions de t de minerai contenant 4,19 g/t de platinoïdes.

Lonmin, est le troisième producteur mondial de platine (12 % de la production mondiale), avec, en 2012, une production de 39,2 t de platinoïdes dont 21,1 t de platine. Les principales mines sont situées, en Afrique du Sud, à Marikana. Par ailleurs, le groupe possède 42,5 % de la mine sud-africaine de Pandora. Les réserves prouvées et probables sont de 327,9 millions de t de minerai contenant 3,92 g/t de platinoïdes.

Norilsk, est le 4^{ème} producteur mondial de platine (11 % de la production mondiale) et le premier producteur mondial de palladium (41 % de la production mondiale) avec, en 2012, une production de 21,2 t de platine et 84,9 t de palladium. Norilsk est d'abord un producteur de nickel (n°1 mondial) et de cuivre, avec, en 2012, une production de 300 000 t de nickel et 364 000 t de cuivre, les platinoïdes étant coproduits. Le groupe exploite principalement des mines en Russie, dans la péninsule de Taimyr (Polar Division) et dans celle de Kola (Kola MMC) mais aussi des mines de nickel, contenant des platinoïdes, au Botswana, avec 85 % de la mine de Tati et en Afrique du Sud, avec 50 % de la mine de Nkomati, en joint venture avec ARM. Les réserves prouvées et probables du groupe sont de 467 t de platine et 1 742 t de palladium.

En Russie, 5 mines sont exploitées dans la péninsule de Taimyr : 4 mines souterraines (Komsomolsky, Oktyabrsky, Taimyrsky, Zapolyarny) et une mine à ciel ouvert (Medvezky-Ruchey) et 3 mines dans la péninsule de Kola : Severny (souterraine et à ciel ouvert) et Kaula-Kotselvaara.

Commerce international :

En 2012, les Etats-Unis, ont importé 164 t de platine (d'Afrique du Sud à 42 %, du Royaume Uni à 17 %, d'Allemagne à 14 %), 81,5 t de palladium, (d'Afrique du Sud à 29 %, de Russie à 28 %, du Royaume Uni à 13 %), 13 t de rhodium, 12,5 t de ruthénium, 1,3 t d'iridium et 0,075 t d'osmium. Ils ont exporté 10 t de platine, 36 t de palladium, 1,6 t de rhodium et 0,8 t d'autres platinoïdes.

METALLURGIE :

Les concentrés provenant des exploitations minières subissent une succession de traitements. Exemple des opérations effectuées par Stillwater Mining Co. (SMC) sur les concentrés américains du Montana.

Une série de fusions, à plus de 1 500°C, dans des fours électriques, permet d'éliminer la silice sous forme d'un laitier fusible ainsi qu'une grande partie du fer contenu. On obtient des mattes sous forme de granulés qui contiennent sous forme de sulfures, du cuivre, du nickel, du cobalt et les platinoïdes.

Les mattes sont ensuite traitées selon le procédé Sherritt qui consiste à pratiquer des lixiviations à l'acide sulfurique, en présence de dioxygène. Une première étape à la pression atmosphérique et à chaud permet d'éliminer une grande partie du nickel et du cobalt qui sont récupérés sous forme de sulfates. Une deuxième étape, sous pression et plus haute température dans des autoclaves, fait passer une grande partie du cuivre en solution. Il est récupéré par électrolyse donnant des cathodes de cuivre. Une troisième étape, sous pression et haute température, permet l'élimination du cuivre et du nickel restant.

Les platinoïdes qui sont restés inattaqués lors des traitements de lixiviation se retrouvent dans les "gâteaux" issus des filtres-presses. L'or et l'argent, présents en faible quantité, accompagnent les platinoïdes. La teneur en platinoïdes est passée de 2 % dans les mattes, à 40 % dans les "gâteaux". Les opérations de séparation des éléments contenus sont réalisées à l'extérieur de la société pour fournir des éponges titrant 99,95 %. Ces opérations hydrométallurgiques consistent en une attaque par l'acide chlorhydrique en présence de dichlore qui permet de solubiliser l'or puis le palladium et ensuite le platine. Les autres platinoïdes restent insolubles. Les traitements de séparation mis en œuvre font appel à des extractions par solvant, des distillations, des échanges d'ions.

Les concentrés miniers produits par Anglo American Platinum sont traités dans 3 complexes métallurgiques, à Mortimer, Waterval (Rustenburg) et Polokwane. En 2012, 1,15 million de t de concentrés ont donné 185 100 t de mattes qui après conversion ont fourni 29 600 t de métaux de

base (cuivre, nickel et cobalt) et 55 200 t de mattes converties qui après raffinage ont donné 144 t de platinoïdes.

RECYCLAGE :

L'une des caractéristiques des platinoïdes est leur grande capacité à être recyclés. Lorsqu'ils sont recyclés, plus de 96 % du métal contenu est récupéré.

En 2012, dans le monde :

- 56,9 t de platine ont été recyclées provenant, à 56,6 % de la catalyse automobile, 38,9 % de la bijouterie et 0,5 % d'applications industrielles.
- 69,7 t de palladium ont été recyclées provenant, à 73,9 % de la catalyse automobile, 23,2 % d'applications industrielles et 8,7 % de la bijouterie.
- 7,1 t de rhodium ont été recyclées provenant de la catalyse automobile.

En 2012, Stillwater Mining Co. (SMC) a recyclé, 4,8 t de platine, 8,0 t de palladium et 1,0 t de rhodium.

SITUATION FRANÇAISE : en 2012

Pas de production primaire.

Importations hors produits mi-ouvrés :

Platine : 1 452 kg à 37 % du Royaume Uni, 23 % d'Italie, 18 % d'Espagne, 12 % d'Allemagne.

Palladium : 6 254 kg à 79 % de Suisse, 8 % du Japon.

Rhodium : 49 kg à 92 % d'Italie.

Autre platinoïdes : 146 kg à 43 % du Royaume Uni, 41 % d'Allemagne, 8 % d'Italie.

Exportations hors produits mi-ouvrés :

Platine : 1 507 kg à 34 % vers les Etats-Unis, 18 % le Royaume Uni, 17 % l'Allemagne 14 % l'Italie.

Palladium : 2 184 kg à 59 % vers l'Allemagne, 18 % le Royaume Uni.

Rhodium : 74 kg à 49 % vers l'Italie, 41 % les Etats-Unis.

Autre platinoïdes : 20 kg à 50 % vers le Royaume Uni, 40 % la Suisse.

UTILISATIONS :

Consommations, en 2012.

	Platine	Palladium
Chine	71,7 t	59,3 t
Europe	61,6 t	63,9 t
Amérique du Nord	36,7 t	82,4 t
Japon	35 5 t	43,9 t

Total mondial	250,2 t	307,8 t
---------------	---------	---------

Source : Johnson Matthey

Consommations mondiales des autres platinoïdes, en 2012 :

Rhodium : 30,0 t

Ruthénium : 21,1 t

Iridium : 5,5 t.

Secteurs d'utilisation : dans le monde, en 2012.

Platine :

Catalyse automobile	40,3 %	Médical	2,9 %
Bijouterie	34,6 %	Industrie pétrolière	2,5 %
Investissements	5,7 %	<u>Industrie verrière</u>	2,2 %
Chimie	5,6 %	Électricité, électronique	2,1 %

Source : Johnson Matthey

La Chine, avec 60,7 t de platine consommé en bijouterie, représente 70 % de la consommation de ce secteur.

Le platine est utilisé en catalyse chimique principalement pour fabriquer des silicones mais aussi pour la synthèse du paraxylène destiné à produire de l'acide téréphtalique puis du polyéthylène téréphtalate (PET). Il est également employé dans les toiles permettant de catalyser l'oxydation de l'ammoniac en oxyde d'azote lui même transformé en acide nitrique.

Le platine, permet de catalyser la réaction du dihydrogène avec le dioxygène, avec formation d'eau, à la base du fonctionnement des piles à combustible.

Dans l'industrie verrière, le platine, allié à 5 à 20 % de rhodium, est employé dans la confection de filières pour la production de fibres de verre, et pour la fabrication d'écrans à cristaux liquide (LCD).

En électronique, le platine est utilisé à 95 % dans la fabrication de disques durs, sous forme d'alliages cobalt-chrome-platine, dans des couches minces magnétiques d'environ 20 nm.

Le platine a de nombreuses autres applications, du fait de sa résistance à la corrosion, en particulier à haute température. Il est employé comme creuset pour diverses fusions, dans des thermocouples (platine/platine-rhodié), comme électrodes, en particulier dans les pacemakers, comme revêtement, sous forme d'alliage avec l'aluminium, de pales de turbines de réacteurs...

Palladium :

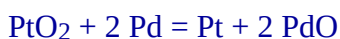
Catalyse automobile	66,9 %	Dentaire	5,4 %
---------------------	--------	----------	-------

Électricité, électronique	12,1 %	Investissements	4,7 %
Chimie	5,4 %	Bijouterie	4,5 %

Source : Johnson Matthey

En électronique, le palladium est utilisé pour la fabrication de condensateurs céramiques multicouches ainsi que pour remplacer l'or dans les dépôts destinés à faciliter les connexions électriques.

En chimie, dans la fabrication de l'acide nitrique, le catalyseur est constitué de plus de 50 toiles de platine rhodié de plus de 4 mètres de diamètre, avec un fil d'environ 0,07 mm de diamètre. Les pertes en platine varient entre 25 et 40 mg/t de HNO₃ pur. Elles sont dues à un effet mécanique et à l'oxydation du platine en PtO₂. Le platine perdu par effet mécanique est en partie récupéré dans des filtres. Celui qui est oxydé peut être, en partie, récupéré par ajout de toiles de palladium sur lesquelles l'oxyde de platine est réduit selon la réaction :



A une température supérieure à 750°C, l'oxyde de palladium est décomposé en palladium qui forme un alliage métallique avec le platine. Ainsi, plus de 80 % du platine et 30 % du rhodium peuvent être récupérés. La durée moyenne de vie du catalyseur est comprise entre 3 et 18 mois.

Par ailleurs, en chimie, le palladium est utilisé comme catalyseur dans la purification de l'acide téréphtalique et dans la fabrication du peroxyde d'hydrogène.

La Chine, avec 7,5 t de palladium consommé en bijouterie, représente 54 % de la consommation de ce secteur.

Le palladium déposé sur des zéolithes, absorbe l'éthylène et est employé pour retarder le mûrissement des fruits et légumes frais lors de leur stockage. Il absorbe également le dihydrogène et est utilisé pour sa purification à l'aide de membranes en alliage palladium-argent.

Rhodium :

Catalyse automobile	81,0 %	<u>Industrie verrière</u>	3,2 %
Chimie	8,4 %	Électricité, électronique	0,1 %

Source : Johnson Matthey

Le rhodium est utilisé en catalyse chimique dans la production d'acide acétique, d'oxo-alcools ainsi que comme élément d'alliage des catalyseurs de platine et des filières de platine utilisées dans l'industrie verrière.

Ruthénium :

Électricité, électronique	55,5 %	Chimie	14,9 %
---------------------------	--------	--------	--------

Electrochimie	18,7 %		
---------------	--------	--	--

Source : Johnson Matthey

Le ruthénium est utilisé comme catalyseur dans la production d'ammoniac à partir de gaz naturel et avec l'iridium, comme revêtement d'électrodes dans l'électrolyse de saumures pour la fabrication du dichlore et de l'hydroxyde de sodium. L'ajout de 0,1 % de Ru au titane permet d'augmenter considérablement sa résistance à la corrosion. Le ruthénium est également utilisé pour élaborer des cibles de pulvérisation cathodique pour des dépôts en couche mince sur les disques durs. Ces dépôts, très minces, de 4 couches atomiques, séparent deux couches magnétiques pour créer un couplage antiferromagnétique qui permet d'augmenter la densité du stockage sur le disque dur.

Iridium :

Electrochimie	39,3 %	Chimie	10,7 %
Électricité, électronique	24,0 %		

Source : Johnson Matthey

L'iridium est utilisé pour élaborer des creusets destinés à la fabrication de monocristaux de saphir. Il a été utilisé dans l'alliage (90 % Pt - 10 % Ir) du mètre étalon réalisé par George Matthey et livré au gouvernement français le 4 octobre 1879.

L'osmium, qui s'oxyde à l'air lorsqu'il est à l'état divisé en donnant du tétroxyde (OsO₄), très toxique, est employé dans les revêtements d'or sur verre. Le tétroxyde d'osmium est utilisé dans la détection des empreintes digitales et des traces d'ADN lors des enquêtes de la police scientifique.

Utilisations diverses :

Catalyse automobile : c'est de très loin le principal secteur d'utilisation des platinoïdes, il compte pour 56 % des emplois du platine, du palladium et du rhodium réunis.

- pour les véhicules fonctionnant à l'essence, c'est principalement le palladium, associé au rhodium qui est utilisé. Lorsque le platine est utilisé, il est associé au palladium et au rhodium. Dans les pots catalytiques 3 voies, le platine ou le palladium permettent la conversion du CO et des hydrocarbures imbrûlés en CO₂ et en eau alors que le rhodium permet la conversion des oxydes d'azote en diazote et eau lorsque le rapport air/carburant est de 14,7.

- pour les véhicules diesel, c'est principalement le platine qui est utilisé.