

Panorama 2012 du marché des platinoïdes

Rapport public

BRGM/RP-63169-FR
Janvier 2014

Panorama 2012 du marché des platinoïdes

Rapport public

BRGM/RP-63169-FR

Janvier 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2013

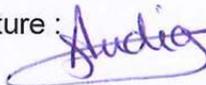
J.-F. Labbé
avec la collaboration de
J.-J. Dupuy

Vérificateur :

Nom : Anne-Sophie AUDION

Date : 21/01/2014

Signature :



Approbateur :

Nom : Anne BOURGUIGNON

Date : 21/01/2014

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008

Mots-clés : Platinoïdes, Platine, Palladium, Rhodium, Iridium, Ruthénium, Stratégie économique, Stratégie des matières premières, Économie, Matières premières minérales, Industrie, Politiques publiques.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Labbé J.F., avec la collaboration de **Dupuy J.J.** (2014) - Panorama mondial 2012 du marché des platinoïdes. Rapport public. BRGM/RP-63169-FR, 215 p., 78 fig., 42 tab.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Résumé

LES MÉTAUX DU GROUPE DU PLATINE, OU PLATINOÏDES

Les éléments du groupe du platine (EGP), ou platinoïdes, sont six métaux voisins dans le tableau de Mendeleïev : le ruthénium (Ru), le rhodium (Rh), le palladium (Pd), l'osmium (Os), l'iridium (Ir) et le platine (Pt).

Ces six éléments sont parmi les plus rares de l'écorce terrestre. Les plus abondants d'entre eux, le palladium et le platine (de l'ordre de 5 mg/t, variable selon certains auteurs), se classent au-delà du 70^{ème} rang par ordre d'abondance décroissante, et les autres comptent parmi les métaux les plus rares de l'écorce terrestre avec le tellure et le rhénium (1 mg/t ou moins).

Ces six métaux ont des propriétés chimiques voisines et sont pratiquement toujours associés dans leurs gisements naturels, mais à des teneurs inégales. Platine et palladium sont toujours majoritaires, mais selon les types de gisements, c'est l'un ou l'autre métal qui domine, les quatre autres n'en sont que des sous-produits.

Le platine et le palladium ont une production significative (180 à 200 t/an de production primaire) et une grande importance économique et industrielle, suivis par le rhodium (~25 t/an de production primaire). Le ruthénium et l'iridium ont des applications spécialisées. L'osmium, quant à lui, n'a qu'une production très minime (<1 t/an) et des usages de micro-niche.

Les platinoïdes sont considérés comme des métaux précieux, avec l'or et l'argent.

Propriétés

Les six éléments du groupe du platine sont tous, à l'état pur, des métaux de couleur gris-acier à gris-argenté. Ils ont des points de fusion élevés.

Les trois platinoïdes « légers », Ru, Rh et Pd, ont une densité comprise entre 12 et 12,5, et les trois platinoïdes « lourds » sont les trois métaux les plus denses connus, avec des densités comprises entre 21,45 (Pt) et 22,59 (Os), supérieures à celle de l'or (19,3).

Le platine et le palladium sont relativement tendres, tandis que l'osmium est un métal très dur. Le platine est ductile et malléable et a une bonne aptitude à la soudure et à l'usinage.

Sous forme métallique massive, les EGP résistent bien à l'oxydation dans l'air, à toute température. Ils résistent largement à la corrosion chimique.

Le platine, le palladium et le rhodium ont des propriétés catalytiques exceptionnelles, qui sont mises à profit dans leurs usages majeurs.

Les éléments du groupe du platine n'ont pas de rôle biologique connus. Sous leur forme métallique, le platine, le palladium, le rhodium, le ruthénium et l'iridium ne sont pas toxiques aux doses auxquelles on peut être raisonnablement confronté. Mais certains composés de ces métaux peuvent être toxiques à haute dose. L'osmium, quant à lui, n'est pas toxique en tant que métal massif, mais dès qu'il est finement divisé, il s'oxyde à l'air en tétr oxyde d'osmium OsO_4 volatil et extrêmement toxique, même à l'état de traces.

Certains composés du platine comme le cisplatine sont cytotoxiques et sont utilisés en chimiothérapie de certains cancers.

Usages

Les six métaux du groupe du platine ont des usages de volume et d'importance économique variés. Le platine et le palladium sont ceux utilisés le plus abondamment, le rhodium et le ruthénium ont aussi des usages industriels significatifs.

Les usages majeurs du platine, du palladium et du rhodium sont la catalyse, et en particulier la catalyse automobile (pots catalytiques).

- **Usages du platine**

En 2012, les usages du platine se sont répartis de la manière suivante :

- catalyseurs des pots catalytiques pour l'automobile : 40,3 % ;
- bijouterie - joaillerie : 34,6 % ;
- catalyse industrielle : 8,1 % (dont industrie chimique : 5,6 % et industrie pétrolière : 2,5 %) ;
- investissements (ETF, thésaurisation) : 5,7% ;
- usages médicaux et biomédicaux : 3,0 % ;
- industries verrières : 2,2 % ;
- industries électriques et électronique : 2,1 % ;
- divers autres, dont pile à combustible : 4,2 % ;

pour une demande totale mondiale estimée à 250 t Pt en 2012, dont 175 t issue de la production minière, 63 t issues du recyclage, et 12 t du déstockage.

La répartition de la demande est variable selon les ensembles économiques géographiques. Ainsi, la joaillerie représente 85 % de la demande en platine en Chine et seulement 9,1 % en Europe, où le secteur des catalyseurs pour automobile en représente 67,2 %.

Les analystes s'attendent à une croissance modérée de la demande en platine dans les secteurs traditionnels : pour la catalyse automobile, une grande part de la croissance du marché automobile mondial concerne des zones où la motorisation essence domine (Chine), et en Europe, le diesel, encore très répandu, pourrait perdre

sa suprématie avec la fin attendue des avantages fiscaux du gazole. La demande devrait cependant continuer à être tirée par les poids-lourds, largement diesel, et la généralisation des normes antipollution aux engins de chantier et agricoles, etc. À moyen terme, un basculement d'une partie du parc automobile vers la voiture électrique sur batterie rechargeable, qui n'a pas besoin de platine, pourrait faire baisser la demande. À l'inverse, un développement probable, dans les prochaines décennies, de la voiture à pile à combustible la ferait augmenter fortement. En effet, si une voiture diesel nécessite 2 à 3 g de platine, une voiture à pile à combustible en nécessitera 15 à 30 g. Certains analystes évaluent le besoin de cette filière jusqu'à 200 t/an en 2030, ce qui en ferait le secteur dominant pour la consommation de platine.

L'évolution des demandes pour les investissements (ETF) est plus imprévisible, en raison de sa composante spéculative.

- **Usages du palladium**

En 2012, les usages du palladium se sont répartis de la manière suivante :

- catalyseurs des pots catalytiques pour l'automobile : 66,9 % ;
- industrie électrique et électronique : 12,1 %
- dentaire : 5,4 % ;
- industrie chimique : 5,4 % ;
- investissements : 4,7 % ;
- bijouterie - joaillerie : 4,5 % ;
- divers : 1,1 % ;

pour une demande totale mondiale estimée à 308 t Pd en 2012, dont 196 t issues de la production minière, 71 t issues du recyclage, 8 t des ventes des stocks russes, et 33 t du déstockage.

La demande pour la catalyse automobile représente partout l'usage majoritaire (>> 50 % de la consommation), mais pour les usages secondaires, la répartition est variable selon les ensembles économiques géographiques : la joaillerie et l'industrie chimique dominant en Chine, alors que ce sont plutôt les usages électriques et électroniques ainsi que les investissements qui dominent en Europe, et le dentaire, avec les usages électriques et électroniques au Japon.

Les analystes s'attendent à une croissance significative de la demande en palladium, en raison de la croissance du parc automobile mondial et de la généralisation progressive de normes antipollution de plus en plus strictes dans nombre de pays.

- **Usages du rhodium**

En 2012, les usages du rhodium se sont répartis de la manière suivante :

- catalyseurs des pots catalytiques pour l'automobile : 81,0 % ;
- industrie chimique : 8,4 % ;

- verrerie : 3,2 % ;
- industrie électrique et électronique : 0,6 % ;
- investissements (ETF) : 3,7 % ;
- autres : 3,1 % ;

pour une demande totale mondiale estimée à 30 t Rh en 2012, dont 22 t issue de la production minière, 7 t issues du recyclage et 1 t du déstockage.

La demande pour la catalyse automobile représente partout plus de 75 % de la consommation en rhodium depuis 25 ans. Les analystes s'attendent à une certaine croissance de la demande en rhodium, comme pour le palladium, en raison de la croissance du parc automobile mondial et de la généralisation progressive de normes antipollution.

- **Usages du ruthénium**

En 2012, les usages du ruthénium se sont répartis de la manière suivante :

- industrie électrique et électronique (disques durs, contacteurs, puces résistives) : 55,5 % ;
- électrochimie (production de chlore et de soude) : 18,7 % ;
- industrie chimique (catalyses) : 13,1 % ;
- autres (dont alliages et superalliages) : 10,9 % ;

pour une demande totale mondiale estimée à 21 t Ru en 2012.

Le ruthénium est utilisé en couche ultramince sur les disques durs de dernière génération. La demande avait été forte en 2010 et 2011 mais a baissé en 2012 en raison d'achats excédentaires les années précédentes, combinés à une relative accalmie du marché des PC face aux tablettes et autres dispositifs utilisant des mémoires flash, et à une amélioration de l'efficacité de la déposition du ruthénium. La demande devrait reprendre, en raison d'une résorption des stocks et d'une demande soutenue par les centres de stockage données.

La demande pour les superalliages devrait poursuivre sa croissance des dernières années.

- **Usages de l'iridium**

En 2012, les usages de l'iridium se sont répartis de la manière suivante :

- industrie électrique et électronique : 39,3 % ;
- électrochimie (production de chlore et de soude) : 23,6 % ;
- industrie chimique : 13,1 % ;
- autres : 26,4 % ;

pour une demande totale mondiale estimée à 5,5 t Ir en 2012.

Dans les industries électriques et électroniques, l'iridium est utilisé dans les creusets destinés à la production de galettes cristallines de saphir pour la fabrication de diodes électroluminescentes (LED). Sa demande avait donc connu une forte croissance en 2010 avec l'augmentation des capacités de production d'écrans (téléviseurs et moniteurs d'ordinateurs) à rétro-éclairage LED. Mais la demande a ensuite fléchi avec l'atteinte de maturité des capacités de production.

- **Usages de l'osmium**

Il n'y a pas de statistiques publiées sur les usages et la consommation d'osmium, estimée à moins d'une tonne par an.

C'est le plus dur des platinoïdes. Il est rarement utilisé seul, en raison de la toxicité de son oxyde, mais plutôt en alliage avec d'autres platinoïdes qu'il induit.

Par exemple, un alliage platine 90 % - osmium 10 % est utilisé pour réaliser divers implants comme des stimulateurs cardiaques ou des valvules cardiaques artificielles. De tels alliages sont parfois utilisés pour des plumes de stylos, des pivots de boussoles, certains contacts électriques.

Substituabilité

Il n'y a pas de substituabilité efficace des platinoïdes dans la plupart de leurs applications catalytiques. Ils peuvent néanmoins partiellement se substituer entre eux : platine et palladium sont relativement interchangeable pour la catalyse des échappements des moteurs à essence, et leurs proportions dépendent beaucoup de leurs prix respectifs. Et on peut substituer jusqu'à environ 20 % du platine par du palladium pour les pots catalytiques diesel. Mais il n'a pas été trouvé de substitution efficace au rhodium pour la dissociation des oxydes d'azote.

Pour les alliages dentaires, diverses substitutions sont possibles avec des métaux moins nobles (chrome-cobalt, etc.), l'or, ou des céramiques.

Dans la verrerie, on peut utiliser des filières en carbure de tungstène pour la production de la fibre de verre.

Dans la filière des piles à combustible, les piles à basse température qui exigent du platine pourraient être remplacées par des piles à haute température à oxydes solides qui n'en exigent pas, ce qui est déjà le cas pour les installations stationnaires. Mais cette technologie ne semble pas adaptée (ou pas encore adaptée) aux installations mobiles pour les véhicules, avec les exigences de sécurité, d'encombrement et de masse associées.

Ressources

Dans la nature, les métaux du groupe du platine sont presque toujours associés entre eux, en proportions relatives variables.

Les gisements de platinoïdes sont toujours liés à des roches magmatiques basiques ou ultrabasiques d'origine mantellique, et aux placers qui résultent de leur érosion.

Les types de gisements sont bien identifiés mais leur classification et leur regroupement en familles varie selon les auteurs. On distingue généralement :

- les gisements à platinoïdes dominants et assez peu de sulfures, où la teneur en platine domine généralement celle en palladium : Bushveld (Afrique du Sud), Great Dyke (Zimbabwe), Stillwater (USA), avec un peu de nickel et de cuivre en sous-produits ;
- les gisements de nickel-cuivre sulfurés, avec platinoïdes en sous-produits, où la teneur en palladium surpasse généralement celle en platine : Norilsk-Talnakh (Russie), Sudbury (Canada), Jinchuan (Chine), et, plus marginalement, Kambalda (Australie), Pechenga (Russie), etc.

Globalement, de tels complexes ignés lités basiques et ultrabasiques, ayant concentré des ressources importantes en platinoïdes, sont peu nombreux. Ce sont essentiellement :

- le Bushveld, en Afrique du Sud, qui s'étend sur une zone de 450 km x 160 km, le plus important et de loin pour ses ressources et réserves en platine. Il est exploité actuellement sur 25 sites (chaque site pouvant inclure une ou plusieurs mines), par une douzaine de sociétés dont les principales sont Anglo American Platinum (« Amplats »), Impala Platinum (« Implats »), Lonmin, Aquarius Platinum et Northam ;
- le Grand Dyke du Zimbabwe, qui s'étend sur environ 500 km de long sur 3 à 12 km de large, exploité actuellement par trois mines de platine en activité (il est aussi exploité par des mines de chrome) ;
- le complexe de Norilsk-Talnakh, en Russie, dont la partie où se concentrent les gisements s'étend sur environ 60 km sur 20 km, qui produit surtout du nickel et du cuivre sulfurés, et des platinoïdes en sous-produits (palladium dominant). Il est exploité actuellement sur cinq mines principales par la société russe Norilsk Nickel ;
- le complexe de Sudbury, au Canada, qui s'étend sur environ 70 km x 35 km. Il est exploité essentiellement pour le nickel et le cuivre sulfurés, avec platinoïdes en sous-produits, en plusieurs mines, principalement par Vale Canada Ltd, Glencore-Xstrata, KGHM International et First Nickel Inc.

Les autres complexes sont de moindre extension (Stillwater aux États-Unis, Lac des Îles au Canada, Jinchuan en Chine, et quelques autres) ou plus faiblement minéralisés en platinoïdes (complexe de Duluth, aux États-Unis).

Les placers fluviatiles fournissent encore environ 3 % de la production de platinoïdes (Russie, Colombie, etc.), mais ils ont été la seule source de platinoïdes jusqu'à la découverte des gisements de platine primaire du Bushveld dans les années 1920.

Les réserves mondiales actuellement identifiées sont évaluées à 14,6 kt de platine + palladium + rhodium (7,9 kt Pt, 6,1 kt Pd, et > 0,6 kt Rh, ces dernières n'étant pas évaluées partout), dont 70 % en Afrique du Sud (complexe du Bushveld), 15 % en

Russie, 7 % au Zimbabwe, 4 % aux États-Unis et 3 % au Canada. Elles équivalent à 45 ans de production de platine et 31 ans de production de palladium au rythme de 2012.

Les ressources actuellement identifiées en platine sont estimées à 43,6 kt Pt, dont 79 % en Afrique du Sud (complexe du Bushveld), 9,4 % au Zimbabwe, 8,4 % en Russie, 1,1 % aux États-Unis et 1,1 % au Canada. Elles correspondent à environ 250 ans de production au rythme de 2012. Celles en palladium sont estimées à 39,4 kt Pd, dont 59 % en Afrique du Sud (complexe du Bushveld), 25 % en Russie, 8,4 % au Zimbabwe, 3 % aux États-Unis et 2,5 % au Canada. Elles correspondent à environ 200 ans de production au rythme de 2012.

Ces évaluations restent cependant imprécises. Plusieurs pays, comme la Chine, ne publient pas leurs ressources et réserves.

Mais ces durées seront réduites si l'on prend comme hypothèse une poursuite de la croissance moyenne de la demande. Ces durées ne doivent pas être prises à la lettre, mais seulement comme des indicateurs. En effet, les ressources évoluent au fur et à mesure des travaux d'exploration et de leurs éventuelles nouvelles découvertes, et les réserves évoluent au fur et à mesure des travaux de certification, et avec l'évolution des prix qui fait varier les teneurs de coupure économiques. D'autre part les rythmes de consommation peuvent subir des variations significatives en fonction des évolutions technologiques (usages, substitutions) et des conjonctures économiques générales.

Les gisements riches en platine du Bushveld en Afrique du Sud, et, dans une moindre mesure, du Grand Dyke du Zimbabwe, n'ont pas d'équivalents connus ailleurs dans le monde. Vu le degré atteint par la connaissance de la géologie de la planète, il est peu probable que d'autres gisements équivalents existent en surface. Il est vraisemblable que l'Afrique du Sud restera encore longtemps le principal fournisseur minier de platine.

Ressources en France

Il n'existe pas en France métropolitaine de gisements de platine ni de contextes géologiques favorables à leur existence. Les formations ultrabasiques sont rares et peu développées. Seuls quelques très petits indices de platinoïdes, d'intérêt purement académique, ont été signalés, de manière ponctuelle, mais aucun d'entre eux n'est susceptible d'approcher une dimension économique.

Quelques occurrences très ponctuelles de platine ont été signalées dans des concentrés alluvionnaires en Guyane, et exceptionnellement en roche. Certains de ces indices auraient pu mériter des investigations complémentaires, mais leur potentiel est très modeste. De plus, ces indices sont presque tous situés dans les zones qui ont été interdites à l'exploration et à l'exploitation minière par le Schéma Département d'Orientation Minière (SDOM) en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2012.

En Nouvelle-Calédonie, des concentrations locales de platinoïdes ont été identifiées par les travaux de l'Inventaire Minier de la Nouvelle-Calédonie de 1990 à 1995. La principale cible principale étudiée a été la Rivière des Pirogues, avec quelques teneurs

intéressantes mais très ponctuelles en roche. Dans l'état actuel des connaissances, il semble assez peu probable que ces minéralisations puissent atteindre des dimensions économiques, mais cela resterait à démontrer.

Production

La production mondiale de platinoïdes primaires aurait été de l'ordre de 435 t de platinoïdes contenus en 2012, dont 175,4 t de platine, 196,6 t de palladium et 22,4 t de rhodium, en baisse de 13 % pour le platine, de 4 % pour le palladium, et de 5,8 % pour le rhodium par rapport à 2011. Ces baisses sont surtout imputables aux conflits sociaux (grèves et violences) qui ont affecté les mines de platine sud-africaines en 2012.

Les productions globales d'iridium et de ruthénium ne sont pas publiées, on peut les estimer à 20 à 30 t pour le ruthénium et 3 à 10 t pour l'iridium.

L'Afrique du Sud est de loin le premier producteur mondial de platine primaire, avec près de 73 % de la production, suivie de la Russie avec 14 %. Elle est aussi le premier producteur mondial de rhodium, avec 80% de la production, suivie de la Russie avec 12,5 %. Pour le palladium, c'est la Russie qui est en tête avec 41 % de la production, suivie de l'Afrique du Sud avec 38 %.

Quatre sociétés majeures assurent les trois quarts de la production minière mondiale de platine, de palladium et de rhodium. Ce sont les sociétés sud-africaines Anglo American Platinum (« Amplats »), Impala Platinum (« Implats ») et Lonmin Plc, et la société russe Norilsk Nickel (« Norilsk »).

La production de platinoïdes a connu une croissance globale moyennée de 2,82 % par an depuis 1975, avec des irrégularités et baisses épisodiques par crises.

La production minière cumulée historique de platinoïdes atteint 14 800 tonnes, dont plus de la moitié ont été extraits ces 18 dernières années (1995 à 2012).

Recyclage

En raison de leurs prix élevés, les platinoïdes sont largement recyclés en fin de vie, avec une bonne efficacité, sauf dans certaines applications où les quantités intégrées dans les produits sont infimes (silicones, par exemple, mais aussi platine et ruthénium dans les disques durs d'ordinateurs).

Le recyclage en fin de vie contribue depuis quelques années pour environ un quart à l'approvisionnement du marché en platine (taux d'approvisionnement par recyclage de 26,5 % en 2012), en palladium (25,4 % en 2012) et en rhodium (26,6 % en 2012). Ces contributions étaient minimales dans les années 1980 puis ont crû progressivement.

Le taux de recyclage global en fin de vie est de l'ordre de 2/3 (60 à 70 %) pour le platine et le palladium, un peu inférieur pour le rhodium (dont les applications en joaillerie sont moins recyclées du fait qu'il est surtout utilisé en plaquage et non sous forme massive). Il est assez faible pour le ruthénium, en raison d'une part de ses

teneurs très faibles dans ses usages dominants (électronique) et de son prix bien inférieur à celui des autres platinoïdes.

Prix

Le platine et le palladium font l'objet de cotations journalières sur diverses places financières, comme le London Platinum and Palladium Market. Le raffineur britannique Johnson Matthey publie de son côté un « prix de base » quotidien du platine, du palladium, du rhodium, de l'iridium et du ruthénium.

Le platinoïde le plus cher est actuellement le platine : 1 516 US\$/oz (soit 35 531 €/kg) en moyenne sur les neuf premiers mois de 2013, supérieur au prix de l'or (1 456 US\$/oz en moyenne sur la même période). Mais le rhodium a longtemps été plus cher (pic à 10 100 US\$/oz, soit 209 446 €/kg, en juin 2008), et le palladium, environ deux fois moins cher que le platine actuellement (724 US\$/oz en moyenne sur les neuf premiers mois de 2013), l'a dépassé ponctuellement en 2000-2001.

Le prix de l'iridium était de 700 US\$/oz, celui du ruthénium de 60 US\$/oz en septembre 2013. Les quelques références de prix de l'osmium le situent à 400 US\$/t.

Les marchés du platine et du palladium étaient excédentaires en 2011, pour devenir déficitaires en 2012, avec comme facteurs principaux, au niveau de l'offre, une baisse de la production minière sud-africaine consécutive aux mouvements sociaux, et une nette diminution de la vente des stocks russes de palladium, probablement due à un relatif épuisement de ces stocks.

Malgré cela, les prix du platine et du palladium (ainsi que ceux du rhodium) ont baissé en 2012 par rapport à 2011. Parmi les explications, un basculement des surplus de 2011 sur 2012, mais peut-être aussi les incertitudes sur les données probablement du même ordre de grandeur que ces déficits ou excédents. Dans son analyse publiée en mai 2013, Johnson Matthey anticipait que les déficits allaient se poursuivre en 2013.

Les acteurs français

La France n'a pas de production minière, ni de production métallurgique primaire de platinoïdes.

La principale industrie consommatrice de platinoïdes est l'industrie automobile, et en particulier Renault et PSA ainsi que leurs équipementiers spécialisés dans les échappements comme Faurecia, pour la dépollution catalytique de gaz d'échappements. Ce secteur consomme probablement plus des deux tiers du platine, du palladium et du rhodium consommés en France (quelques tonnes par an de platine et de palladium, plusieurs dizaines à quelques centaines de kilogrammes par an de rhodium).

Les industries pétrolières (Total, Esso SAF) et pétrochimiques, ainsi que des industries chimiques (Rhodia/Solvay, etc) ainsi que les fabricants de catalyseurs destinés à ces industries (Axens) représentent le deuxième secteur consommateur de platinoïdes.

Les industries pharmaceutiques et médicales sont aussi consommatrices de platinoïdes, pour des catalyses ou des sondes.

Les bijoutiers-joailliers et les horlogers de luxe utilisent aussi du platine pour certaines de leurs créations, et du rhodium en alliage ou en placage.

Le platine, le palladium et le ruthénium sont utilisés par divers producteurs de composants électroniques (ST-Microelectronics) ou de sondes thermiques.

Les industries aéronautique, spatiale et de défense peuvent utiliser du platine dans certaines pièces de moteurs, et du ruthénium dans certains superalliages pour turbines, ainsi que du platine et du palladium dans leurs composants électroniques.

Commerce extérieur

Les statistiques douanières individualisent trois nomenclatures de platine (platine brut et deux catégories de platine mi-ouvré), deux de palladium, deux de rhodium et deux des autres platinoïdes regroupés (Ru, Ir, Os), où les quantités de ces métaux sont renseignés. Elles contiennent aussi trois autres nomenclatures concernant le platine (plaqué, déchets contenant du platine, et catalyseurs sous forme de toiles ou treillis), mais les tonnages enregistrés concernent les produits dans leur ensemble et pas seulement le platine contenu. Il n'y a pas de nomenclature spécifique pour les monolithes de catalyseurs automobiles, ni d'évaluation des quantités de platine, palladium ou rhodium échangés dans ces catalyseurs neufs ou en fin de vie pour récupération. Il est par ailleurs reconnu que ces enregistrements d'import-export contiennent des erreurs.

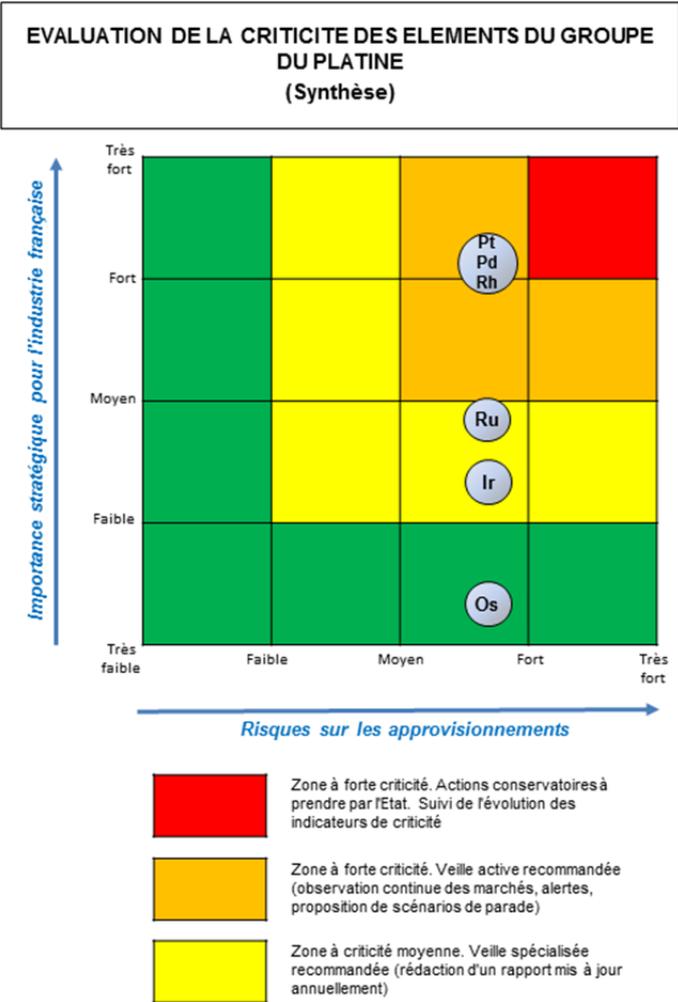
Sur la période 2009-2012, la plupart des postes sont déficitaires pour le commerce extérieur français, à quelques exceptions près (platine brut en 2012 ; déchets et débris de platine ou contenant du platine, en 2009, 2010, 2011 et 2012, et rhodium brut en 2012).

En 2012, la balance commerciale française a été déficitaire pour le platine (trois nomenclatures de platine, -2,7 t et -59,6 M€, ou, si on étend aux trois autres nomenclatures incluant du platine, -34,45 M€), le palladium (-5,5 t, -15,8 M€) et pour l'ensemble iridium + osmium + ruthénium (-0,70 M€), et légèrement excédentaire pour le rhodium (+14,8 kg, 0,19 M€).

Sachant que la France ne produit pas de platinoïdes, les importations nettes peuvent être un certain indicateur, à prendre avec grande prudence, de la consommation par l'industrie française. En plus des erreurs possibles dans l'enregistrement des données, il y a interférence du jeu des stocks, qui peut expliquer par exemple le solde positif de la balance du rhodium en 2012 alors que la France n'est pas productrice nette de rhodium.

En fait, il n'y a pas de statistiques disponibles suffisamment précises qui permettraient de bien évaluer la consommation de platinoïdes par la France.

Criticité



Sommaire

Résumé	5
1. Introduction	27
1.1. DÉFINITIONS	27
1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE	28
1.3. SOURCES DES DONNÉES	29
2. Les métaux du groupe du platine, propriétés.....	31
2.1. DONNÉES DE BASE	31
2.2. HISTORIQUE.....	34
2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	35
2.4. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	36
2.4.1. Propriétés chimiques du platine.....	36
2.4.2. Propriétés chimiques du palladium.....	37
2.4.3. Propriétés chimiques du rhodium	38
2.4.4. Propriétés chimiques du ruthénium	39
2.4.5. Propriétés chimiques de l'iridium.....	39
2.4.6. Propriétés chimiques de l'osmium.....	40
2.5. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES ET TOXICITÉ.....	41
2.6. UNITÉS ET FACTEURS DE CONVERSION.....	43
3. La demande : usages et consommation	45
3.1. USAGES DU PLATINE	45
3.1.1. Les catalyseurs automobiles.	49
3.1.2. La joaillerie	56
3.1.3. Les investissements et placements	57
3.1.4. Industries chimiques et pétrolières	60
3.1.5. Verrerie.....	63
3.1.6. Industries électrique et électronique.....	64
3.1.7. Usages médicaux	64
3.1.8. Les piles à combustible	65
3.1.9. Autres usages.....	72

3.2. USAGES DU PALLADIUM	72
3.2.1. Les catalyseurs automobiles	76
3.2.2. Industries électriques et électronique	79
3.2.3. Industries chimiques	80
3.2.4. Usages dentaires	81
3.2.5. La joaillerie	82
3.2.6. Les investissements et placements	82
3.2.7. Autres usages du palladium	85
3.3. USAGES DU RHODIUM	85
3.3.1. Les catalyseurs automobiles	88
3.3.2. Industries chimiques	89
3.3.3. Verrerie	90
3.3.4. Industries électriques et électronique	90
3.3.5. Les investissements et placements	90
3.3.6. Autres usages du rhodium	91
3.4. USAGES DU RUTHÉNIUM	91
3.5. USAGES DE L'IRIDIUM	94
3.6. USAGES DE L'OSMIUM	96
3.7. CONSOMMATION	97
3.7.1. Évolution récente de la consommation	97
3.7.2. Perspectives d'évolution de la demande	100
3.8. SUBSTITUTIONS	102
4. L'offre : ressources et production mondiale	103
4.1. LES SOURCES DE PLATINOÏDES	103
4.1.1. Abondance des platinoïdes dans l'écorce terrestre	103
4.1.2. Minéraux et minerais	104
4.1.3. Principaux types de gisements	106
4.1.4. Gisements liés au magmatisme basique et ultrabasique	107
4.1.5. Gisements sulfurés en contexte sédimentaire	112
4.1.6. Placers	112
4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES	114
4.2.1. Évaluation globale des ressources et réserves en platinoïdes	114
4.2.2. Les gisements de platinoïdes dans le monde	120
4.2.3. Les indices de platinoïdes en France	129

4.3. PRODUCTION.....	133
4.3.1. Statistiques de production courante	133
4.3.2. Production historique	139
4.4. PROCÉDÉS DE PRODUCTION.....	143
4.4.1. Extraction minière	143
4.4.2. Minéralurgie, concentration des minerais	144
4.4.3. Métallurgie	145
4.4.4. Séparation des différents platinoïdes	147
4.5. RECYCLAGE.....	149
4.5.1. Le recyclage au niveau mondial	149
4.5.2. Le potentiel de recyclage en France.....	155
4.6.3. La situation géopolitique et la politique commerciale des principaux producteurs.....	160
4.7. STOCKAGES STRATÉGIQUES ET DÉSTOCKAGES	161
4.7.1. Stockages nationaux	161
4.7.2. Stockages par les industriels	163
4.7.3. Stockage par les ETF	163
4.8. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION.....	164
5. Prix des platinoïdes	165
5.1. ÉVOLUTION RÉCENTE DES PRIX	165
5.2. ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION FUTURE DES PRIX.....	170
6. La filière industrielle	175
6.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS MINIERS DE PLATINOÏDES.....	175
6.1.1. Sociétés opérant principalement en Afrique du Sud et au Zimbabwe ...	175
6.1.2. Sociétés opérant principalement en Russie	180
6.1.3. Sociétés opérant principalement en Amérique du Nord	181
6.1.4. Sociétés opérant en Europe	183
6.1.5. Producteurs chinois	184
6.2. LES PRINCIPAUX RAFFINEURS, TRANSFORMATEURS, FABRICANTS DE PRODUITS INTERMÉDIAIRES, RECYCLEURS ET NÉGOCIANTS DE PLATINOÏDES	184
6.2.1. Les principaux fondeurs-raffineurs	185
6.2.2. Les autres fabricants ou recycleurs de catalyseurs.....	189

6.2.3. Les négociants, sociétés d'investissement et sociétés financières impliquées dans le commerce des platinoïdes	191
6.2.4. Les fondeurs, transformateurs, fabricants de produits intermédiaires, recycleurs et négociants en France	191
6.3. LES UTILISATEURS FRANÇAIS FINAUX	192
6.3.1. Constructeurs et équipementiers automobiles.....	193
6.3.2. Industrie pétrolière	194
6.3.3. Industries chimiques.	194
6.3.4. Piles à combustible	194
6.3.5. Secteurs pharmaceutique et médical.....	195
6.3.6. Industries électrique et électronique	195
6.3.7. Bijouterie-joaillerie.....	195
6.3.8. Prothésistes dentaires.....	195
6.3.9. Défense et aérospatiale	196
7. Commerce extérieur et consommation de la France	197
7.1. COMMERCE EXTÉRIEUR	197
7.2. CONSOMMATION FRANÇAISE DE PLATINOÏDES.....	204
8. Criticité.....	207
Bibliographie	209

Liste des figures

Figure 1 - Position des six métaux du groupe du platine (ruthénium, rhodium, palladium, osmium, iridium, platine) dans le tableau périodique des éléments.	31
Figure 2 - Répartition des usages du platine par filières dans le monde en 2012.	47
Figure 3 - Répartition des usages du platine par filières en Chine (à gauche) et en Europe (à droite) en 2012.	47
Figure 4 - Évolution de la demande brute en platine par filières depuis 1975.	48
Figure 5 - Vue en coupe d'un canal de monolithe de pot catalytique. © Société Chimique de France, division catalyse (www.societechimiquedefrance.fr).	50
Figure 6 - Écorché et schéma d'un pot catalytique simple (© Johnson Matthey Plc).	50
Figure 7 - Évolution des normes européennes antipollution des échappements des véhicules légers essence (en haut) et diesel (en bas). THC = hydrocarbures imbrûlés totaux. PM = particules fines. © Johnson Matthey.	52

Figure 8 -	Évolution de la consommation de platine pour la catalyse automobile depuis 1975, avec part issue de recyclage.....	53
Figure 9 -	Évolution de la demande brute en platine pour la catalyse automobile par ensemble géographique.....	53
Figure 10 -	Évolution de la demande brute en platine pour la catalyse automobile par type de véhicule.....	54
Figure 11 -	Alliances de mariage en platine 95 %, en platine et diamant, en platine et or (© www.boutique-alliance.com). Bague émeraude et platine (© www.niederlander-joaillers.com)	56
Figure 12 -	Évolution de la demande brute de platine pour la joaillerie.....	57
Figure 13 -	L'œuvre « For the love of God » réalisée en 2007 par l'artiste britannique Damien Hirst avec 23,156 kg de platine et 8 601 diamants, en moulage d'un crâne humain du XVI ^e siècle dont il a conservé les véritables dents.....	57
Figure 14 -	Pièces d'une once de platine à 99,95 % des monnaies étatsunienne (« American Eagle », pile et face, © www.usmint.gov) et canadienne (« Maple Leaf », © www.mint.ca)	58
Figure 15 -	Lingots de platine d'une once (© www.kitco.com).	58
Figure 16 -	Évolution des quantités cumulées de platine détenues par les ETF par ensembles géographiques depuis leur lancement en 2007. Adapté d'après Johnson Matthey, 2012.	59
Figure 17 -	Évolution de la demande en platine pour placements (source : Johnson Matthey).....	60
Figure 18 -	Tubes médicaux à usage unique en silicones vulcanisés au platine (© www.advantapure.com).....	61
Figure 19 -	Creuset de laboratoire en platine (Laboratoire du BRGM).....	62
Figure 20 -	Évolution de la demande en platine dans les filières des industries chimiques et pétrolières.....	63
Figure 21 -	La Honda FCX Clarity à pile à combustible à hydrogène (images http://blogautomobile.fr).....	67
Figure 22 -	Prototypes de véhicules électriques à pile à combustible Peugeot (Partner H2Origin) et Renault (Scenic ZEV H2). © http://hydrogen-motors.com	67
Figure 23 -	Écorché de la Mercedes Classe B F-Cell (www.mercedes-benz.fr , 2013).	67
Figure 24 -	La Hyundai ix35 Fuel Cell à Copenhague en juin 2013 (© www.hyundai.ch).....	68
Figure 25 -	Bus à pile à combustible en usage pilote dans le Connecticut (© www.chfcc.org).....	69
Figure 26 -	Prototype d'ordinateur portable à pile à combustible présenté par Casio en 2002 (© www.casio.com).....	70
Figure 27 -	Générateurs à piles à combustibles De gauche à droite : Générateur miniature à méthanol Dynario® de Toshiba (© www.toshiba.co.jp). Générateur à méthanol Efoy® de SFC AG (© www.efoy.com). Générateur à hydrogène CommPac500® d'Axane (© www.airliquide-hydrogen-energy.com).	70
Figure 28 -	Répartition des usages du palladium par filières dans le monde en 2012 (source : Johnson Matthey, 2013).....	74

Figure 29 - Répartition des usages du palladium par filières en Chine (à gauche) et en Europe (à droite) en 2012 (source : Johnson Matthey, 2013).	74
Figure 30 - Évolution de la demande brute en palladium par filières depuis 1980 (source : Johnson Matthey).	75
Figure 31 - Évolution de la consommation de palladium pour la catalyse automobile depuis 1980, avec part issue de recyclage.	77
Figure 32 - Évolution de la demande brute en palladium pour la catalyse automobile par ensemble géographique.	78
Figure 33 - Évolution de la demande brute en palladium pour la catalyse automobile par type de véhicule.	78
Figure 34 - Évolution de la demande en palladium dans les industries électriques et électroniques (source : Johnson Matthey).	80
Figure 35 - Évolution de la demande en palladium pour les couronnes dentaires (source : Johnson Matthey).	81
Figure 36 - Évolution de la demande brute de palladium pour la joaillerie.	82
Figure 37 - Pièce d'une once de palladium à 99,95 % de la monnaie canadienne (« Maple Leaf ») et lingot d'une once du Crédit Suisse (© www.apmex.com)	83
Figure 38 - Évolution des quantités cumulées de palladium détenues par les ETF par ensembles géographiques depuis leur lancement en 2007. Adapté d'après Johnson Matthey, 2012.	84
Figure 39 - Évolution de la demande en palladium pour placements (source : Johnson Matthey)	85
Figure 40 - Répartition des usages du rhodium par filières dans le monde en 2012 (source : Johnson Matthey, 2013).	86
Figure 41 - Évolution de la demande en rhodium par filières depuis 1985 (source : Johnson Matthey).	87
Figure 42 - Évolution de la consommation de rhodium pour la catalyse automobile depuis 1985, avec part issue de recyclage.	89
Figure 43 - Lingot d'une once de rhodium du britannique Bairds & Co. (© www.libertygoldandsilver.com).	91
Figure 44 - Répartition des usages du ruthénium par filières dans le monde en 2012 (source : Johnson Matthey, 2013).	93
Figure 45 - Évolution de la demande en ruthénium par filières depuis 2005 (source : Johnson Matthey).	94
Figure 46 - Répartition des usages de l'iridium par filières dans le monde en 2012 (source : Johnson Matthey, 2012).	95
Figure 47 - Évolution de la demande en iridium par filières depuis 2005 (source : Johnson Matthey, 2012).	96
Figure 48 - Évolution de la demande globale en platine par zone géographique (en haut) et par origine primaire ou secondaire (en bas) depuis 1975. Source : Johnson Matthey.	98

Figure 49 - Évolution de la demande globale en palladium par zone géographique (en haut) et par origine primaire ou secondaire (en bas) depuis 1980. Source : Johnson Matthey.	99
Figure 50 - Évolution de la demande globale en rhodium depuis 1985. Source : Johnson Matthey.	100
Figure 51 - À gauche, cristal cubique de platine natif (Konder/Kondyor, Khabarovsk, Russie). À droite : cristal de sperrylite (Talnakh, Norilsk district, Russie) (photos JF. Labbé).	104
Figure 52 - Pépite de platine de 204 g de Nijni Tagilsk (Oural, Russie) exposée à la galerie de minéralogie du Museum National d'Histoire Naturelle de Paris (Photo L.-D. Bayle, © MNHN).	113
Figure 53 - Répartition des réserves mondiales en platinoïdes par pays (adapté d'après SLN-MEG et les rapports des sociétés minières).	117
Figure 54 - Répartition des ressources mondiales en platine (en haut) et en palladium (en bas) par pays (adapté d'après SLN-MEG et les rapports des sociétés minières).	118
Figure 55 - Localisation des principales mines et principaux gisements mondiaux de platinoïdes (BRGM, 2013).	121
Figure 56 - Localisation des principales mines de platinoïdes en Afrique australe.	122
Figure 57 - Localisation des indices de platinoïdes en France métropolitaine, en Guyane et en Nouvelle-Calédonie.	131
Figure 58 - Répartition de la production minière mondiale de platine, palladium et rhodium par pays en 2012 (Sources : Johnson Matthey, USGS, AS3M).	137
Figure 59 - Répartition de la production minière mondiale de platine, palladium et rhodium par société en 2012 (Source : Tableau 21).	138
Figure 60 - Évolution de la production mondiale primaire de platinoïdes (d'après USGS, 2013).	140
Figure 61 - Évolution de la production primaire de platine par pays de 1975 à 2012.	141
Figure 62 - Évolution de la production primaire de palladium par pays de 1975 à 2012 (y inclus le déstockage russe).	142
Figure 63 - Évolution de la production primaire de rhodium par pays de 1975 à 2012.	142
Figure 64 - Perforateurs au travail à Marikana (Lonmin). Photo Alamy, The Guardian du 2 octobre 2008 (www.theguardian.com/business/2008/oct/02/lonmin.xstrata)	143
Figure 65 - Mines à ciel ouvert de Mogalakwena (Platreef, Bushveld, Afrique du Sud). Capture d'écran de Google Earth.	144
Figure 66 - Exemple de flowsheet de séparation et raffinage d'EGP (adapté d'après Halwachs, www.halwachs.de).	148
Figure 67 - « Cycle de vie » des EGP dans l'exemple des catalyseurs automobiles (adapté d'après Umicore & Öko-Institut, 2006).	150
Figure 68 - Évolution de la contribution de la production secondaire de platine (recyclage en « fin de vie ») dans la production totale (source : Johnson Matthey).	152

Figure 69 - Évolution de la contribution de la production secondaire de palladium (recyclage en « fin de vie ») dans la production totale (source : Johnson Matthey).	152
Figure 70 - Évolution de la contribution de la production secondaire de rhodium (recyclage en « fin de vie ») dans la production totale (source : Johnson Matthey).	153
Figure 71 - Estimation de la répartition des revenus des opérations russes de Norilsk Nickel par substance en 2011.....	160
Figure 72 - Évolution des cours du platine et du palladium au fixing de Londres, comparés à ceux de l'or, depuis 1990 (source : www.kitco.com).....	166
Figure 73 - Évolution des prix des platinoïdes (source : www.platinum.matthey.com).....	167
Figure 74 - Évolution récente de l'offre (production primaire + production secondaire + déstockage russe de palladium) et de la demande (consommation totale) du platine, du palladium et du rhodium depuis 1985.	171
Figure 75 - Galerie de la mine souterraine de Bakofeng-Rasimone au niveau de l'UG2 reef. (© www.bakofengplatinum.co.za).	178
Figure 76 - La structure circulaire du massif ultrabasique zoné de Kondyor (Khabarovsk, Russie) et l'exploitation de platine alluvionnaire en aval.	181
Figure 77 - Monolithes usagés de catalyseurs automobiles, imprégnés de platinoïdes, pour recyclage (© Umicore, Rapport Annuel 2012).....	187
Figure 78 - Synthèse de la criticité des platinoïdes.....	207

Liste des tableaux

Tableau 1 - Quelques paramètres atomiques et physiques de base des six métaux du groupe du platine (ainsi que ceux des autres métaux précieux, argent et or).....	32
Tableau 2 - Les isotopes des platinoïdes (source : RSC (www.rsc.org)).	33
Tableau 3 - Les principaux composés du platine utilisés.....	37
Tableau 4 - Quelques composés du palladium utilisés.....	38
Tableau 5 - Quelques composés du rhodium utilisés.	39
Tableau 6 - Quelques composés du ruthénium utilisés.	40
Tableau 7 - Quelques composés de l'iridium utilisés.	40
Tableau 8 - Quelques composés de l'osmium utilisés.....	41
Tableau 9 - Récapitulatif de la demande brute en les six métaux du groupe du platine, classés par valeur brute de marché 2012 décroissante (source : Johnson Matthey, mai 2013).	45
Tableau 10 - ETF basés sur le platine listés par ETF Database, données au 24/06/2013 (source: http://etfdb.com).	59

Tableau 11 - ETF basé sur le palladium listé par ETF Database, données au 17/06/2013 (source: http://etfdb.com).....	84
Tableau 12 - Composition de quelques superalliages de nickel contenant du ruthénium, pour turbines (source : www.tms.org).	92
Tableau 13 - Composition de quelques alliages de titane contenant du ruthénium, pour tuyauterie-chaudronnerie en milieu acide (source : www.titaniuminformationgroup.co.uk).	92
Tableau 14 - Les treize éléments les plus rares sur les 83 éléments significativement présents dans l'écorce terrestre. (source : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2011).	103
Tableau 15 - Les principaux minéraux des éléments du groupe du platine reconnus par l'Association Minéralogique Internationale (www.ima-mineralogy.org).....	105
Tableau 16 - Classification des gisements de métaux du groupe du platine, adapté d'après Wilbur & Bleiwas, USGS, 2004.	106
Tableau 17 - Quelques compositions typiques de platine alluvionnaire.....	114
Tableau 18 - Récapitulatif des réserves connues en éléments du groupe du platine (EGP) par pays, en t d'EGP contenus.....	116
Tableau 19 - Récapitulatif des ressources connues en éléments du groupe du platine (EGP) par pays, en t d'EGP contenus.....	116
Tableau 20 - Les principaux gisements de platinoïdes en exploitation (Sources : SLN et rapports des sociétés).	123
Tableau 21 - Les principaux projets d'exploitation de platinoïdes en étude ou développement avancé.	126
Tableau 22 - Les indices de platinoïdes en France métropolitaine.	129
Tableau 23 - Indices de platinoïdes de Guyane.	130
Tableau 24 - Principaux indices de platinoïdes en Nouvelle-Calédonie.....	132
Tableau 25 - Productions primaires et secondaires de platinoïdes (Source : Johnson Matthey, 2013).....	135
Tableau 26 - Répartition des productions minières mondiales de platine, palladium et rhodium en 2011 et 2012 (Sources : Johnson Matthey, USGS, AS3M, Sociétés, etc.).....	135
Tableau 27 - Production minière cumulée historique de platinoïdes (sources : USGS, 2013 pour les données 1900-2012, et Bouladon, 1968, pour les données antérieures à 1900).	139
Tableau 28 - Bilan de la production primaire de platinoïdes de 1735 à 1966 (Bouladon, 1968).....	140
Tableau 29 - Contribution de la production secondaire (recyclage) dans l'offre et la demande en platine, palladium et rhodium (source des données : Johnson Matthey, 2013).....	151
Tableau 30 - Estimation des taux de recyclage des platinoïdes en « fin de vie » des équipements dans lesquels ils ont été utilisés (Graedel <i>et al.</i> , UNEP, 2011).	153
Tableau 31 - Estimations du recyclage des platinoïdes en France, selon Monier <i>et al.</i> , 2010.....	156

Tableau 32 - Résumé des étapes ayant affecté la production minière de platine en Afrique du Sud en 2012 (traduit et adapté de Johnson Matthey, 2013).	158
Tableau 33 - Intensité de main d'œuvre dans certaines des principales mines de platine sud-africaines et zimbabwéennes (sources : Tab. 21 et rapports annuels des sociétés).....	159
Tableau 34 - Stocks gouvernementaux étatsuniens de platinoïdes, en 1994 et 2012 (Reese, USGS, 1996, et Loferski, USGS, 2013).	162
Tableau 35 - Récapitulatif des ventes de palladium issues du déstockage par la Russie depuis 2005 (source : Johnson Matthey).....	163
Tableau 36 - Prix moyens annuels du platine, du palladium, du rhodium, de l'iridium et du ruthénium, en US\$/oz (prix de base Johnson Matthey).....	166
Tableau 37 - Exemples de compositions d'alliages dentaires contenant des platinoïdes au catalogue de Fransor Industries (source : www.fransor-industries.fr).	192
Tableau 38 - Statistiques françaises d'import-export de platine brut ou mi-ouvré. Données CAF-FAB hors matériel militaire (données 71101980 2009 et 2010 manquantes). Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr	200
Tableau 39 - Statistiques françaises d'import-export de plaqués, déchets et débris et de catalyseurs contenant du platine. Données CAF-FAB hors matériel militaire.	201
Tableau 40 - Statistiques françaises d'import-export de palladium. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr	202
Tableau 41 - Statistiques françaises d'import-export de rhodium. Données CAF-FAB hors matériel militaire.	203
Tableau 42 - Statistiques françaises d'import-export d'iridium, osmium et ruthénium. Données CAF-FAB hors matériel militaire.....	204

1. Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention 2013 n° 2101125281 relative aux eaux souterraines, aux ressources minérales, au littoral et à l'organisation des connaissances sur la nature et les paysages, signée le 26 août 2013 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) et le BRGM.

1.1. DÉFINITIONS

Le glossaire ci-dessous donne la définition de certains termes utilisés de manière récurrente dans ce rapport. Il importe, notamment pour permettre des comparaisons entre différentes sources nationales et internationales relatives aux matières premières minérales, que ces termes soient utilisés de manière standardisée et rigoureuse. C'est malheureusement loin d'être le cas, des termes aussi importants que ressources et réserves étant utilisés de manière disparate.

- **Criticité** : cette étude vise notamment à déterminer les facteurs de criticité pouvant impacter la sécurité des approvisionnements nécessaires aux industries françaises utilisant la/les matière(s) première(s) minérale(s) étudiée(s). Les facteurs sont déterminés et notés selon la grille suivante :

Évaluation de la criticité	Note
Très forte	5
Forte	4
Moyenne	3
Faible	2
Très faible	1

- **Gisement** : concentration naturelle de minéraux, économiquement exploitable.
- **Indice ou prospect** : il s'agit d'une minéralisation dont l'existence est connue grâce à des observations de terrain, éventuellement étayées par quelques sondages et petits travaux miniers (tranchées, galeries de reconnaissance...) et/ou par des observations indirectes (géochimie, géophysique) mais dont l'intérêt économique n'est pas encore démontré.
- **Minéral/minéraux** : désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière.
- **Minerai** : désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable.

- **Minéralisation** : désigne une concentration naturelle élevée de minéraux dont l'exploitation pourrait présenter un intérêt économique. Il s'agit d'un concept plus large que le terme minerai qui, dans les gisements, désigne la partie exploitable de la minéralisation.
- **Primaire** : ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir d'un minerai, en dehors de tout recyclage.
- **Potentiel géologique** : il s'agit d'une première estimation, basée sur des critères et des raisonnements géologiques, de l'existence de gisements dans une région ou un pays.
- **Réserves** : il s'agit de la partie de la ressource dont l'exploitabilité technologique et économique a été démontrée lors d'une étude de faisabilité.
- **Ressource** : il s'agit d'une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet de premières estimations, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes par géochimie, géophysique, etc. Les ressources sont qualifiées de « inférées », « indiquées » et « mesurées » par ordre de précision croissante obtenue en fonction de la quantité et du détail des travaux réalisés.
- **Secondaire** : ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir du recyclage de déchets, qui peuvent être des produits manufacturés usagés en fin de vie, mais aussi des chutes de fabrication (copeaux, poussières, coulures, bavures, etc.).

1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE

Cette étude a été réalisée par la Direction des Géoressources du BRGM dans le cadre d'un contrat de sous-traitance. La complexité de la filière, les limites des données et de la documentation disponibles, ainsi que le temps limité pour réaliser cette étude en conditionnent le contenu.

Malgré l'utilisation des meilleures sources ouvertes disponibles et le soin apporté à la rédaction de cette étude, le BRGM n'est pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées. L'industrie des platinoïdes n'est pas toujours transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non.

À noter que les éléments du groupe du platine, ou platinoïdes, font partie, dans leur ensemble, des quatorze substances minérales considérées comme particulièrement critiques dans le cadre de l'étude sur les matières premières critiques pour l'Union Européenne (« Critical Materials for the E.U. ») publiée le 30 juillet 2010 par la Commission Européenne dans le cadre de l'Initiative Matières Premières.

1.3. SOURCES DES DONNÉES

Le présent rapport a été produit à partir de l'importante documentation technique du BRGM, incluant notamment (voir liste bibliographique en fin de rapport) :

- les bases de données et rapports publics de l'United States Geological Survey (USGS) (Loferski, 2013, 2012, 2011, etc.) ;
- les publications annuelles et périodiques de Johnson Matthey (Butler, 2013, 2012, 2011) et l'abondante documentation publiée en ligne sur le site de Johnson Matthey (www.platinum.matthey.com) ;
- les documents « Métallurgie des platinoïdes, minerais et procédés » (Blazy et Jdid, juin 2008) publié par « Techniques de l'Ingénieur » ;
- le document « Platinum » publié par le British Geological Survey (BGS) en 2009 ;
- le site Internet de l'International Platinum Group Metals Association (www.ipa-news.com) ;
- les publications du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), et de son International Panel on Sustainable Resource Management (www.unep.org/resourcepanel/) ;
- la base de données sur les mines et les gisements de SNL (Metals Economic Group) (www.snl.com) ;
- le rapport sur les matières premières stratégiques de la Commission Européenne de juin 2010 ;

ainsi que nombre d'informations ouvertes rassemblées ou consultées dans le cadre de cette étude, et en particulier les sites Internet et les rapports annuels des sociétés productrices ou consommatrices.

2. Les métaux du groupe du platine, propriétés

2.1. DONNÉES DE BASE

Les éléments du groupe du platine (EGP, ou « PGE » dans les publications anglo-saxonnes), ou platinoïdes, sont six éléments métalliques de transition du groupe VIII des lignes 5 et 6 du tableau de Mendeleïev (fig. 1). Sur la base de leur numéro atomique, leur masse atomique et leur densité, on peut distinguer trois platinoïdes légers, le ruthénium (Ru), le rhodium (Rh) et le palladium (Pd), de la ligne 5 du tableau de Mendeleïev, et trois platinoïdes lourds, l'osmium (Os), l'iridium (Ir) et le platine (Pt), de la ligne 6 du tableau.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Lan- thanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Acti- nides	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn						
Lanthanides :	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Actinides :	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Figure 1 - Position des six métaux du groupe du platine (ruthénium, rhodium, palladium, osmium, iridium, platine) dans le tableau périodique des éléments.

Les principales caractéristiques atomiques et physiques de ces six éléments sont récapitulées dans le tableau 1 ci-après. Ont été indiqués aussi sur le tableau, à titre de comparaison, les caractéristiques de l'argent (Ag) et de l'or (Au), les métaux qui suivent immédiatement les platinoïdes légers et les platinoïdes lourds respectivement dans le tableau de Mendeleïev, et qui constituent avec eux ce qu'il est d'usage d'appeler les « métaux précieux ».

	Platinoïdes légers			Argent	Platinoïdes lourds			Or	Unité
	Ruthénium	Rhodium	Palladium		Osmium	Iridium	Platine		
Symbole	Ru	Rh	Pd	Ag	Os	Ir	Pt	Au	
Numéro atomique	44	45	46	47	76	77	78	79	
Masse atomique	101.07	102.9055	106.42	107.868	190.23	192.217	195.078	196.965	
Rayon ionique	0.133	0.134	0.138	0.160	0.134	0.136	0.139	0.136	nm
Densité	12.45	12.41	12.02	10.5	22.587	22.562	21.45	19.3	
Point de fusion	2 333°C	1 963°C	1 555°C	962°C	3 033°C	2 446°C	1 768°C	1 064°C	°C
Point d'ébullition	4 147°C	3 695°C	2 963°C	2 162°C	5 008°C	4 428°C	3 825°C	2 836°C	°C
Résistivité à 0°C	7.1	4.3	9.78	1.47	8.1	4.7	9.6	2.05	10 ⁻⁸ Ω.m
Dureté Mohs	6.5	5.5	4.75	2.5	7	6.5	4-4.5	2.5	
Coeff. dilatation thermique	0.9	0.8	1.2	2.0	0.6	0.7	0.9	1.4	10 ⁻⁵ K ⁻¹
Abondance naturelle	1 ppb	1 ppb	15 ppb	75 ppb	1.5 ppb	1 ppb	5 ppb	4 ppb	ppb

Tableau 1 - Quelques paramètres atomiques et physiques de base des six métaux du groupe du platine (ainsi que ceux des autres métaux précieux, argent et or).
(Sources : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2011 ; www.rsc.org)

Il existe divers isotopes stables de chacun des six éléments du groupe du platine, récapitulés dans le tableau 2, ainsi que des isotopes instables et radioactifs artificiels, dont les principaux sont aussi indiqués dans le tableau 2.

Les six métaux du groupe du platine sont des métaux très rares. L'estimation de leur abondance naturelle dans la croûte terrestre varie selon les auteurs (cf. 4.1.1), mais à titre indicatif, selon le récapitulatif du CRC Handbook of Chemistry and Physics (2011), le plus abondant d'entre eux dans la croûte terrestre, le palladium, aurait une abondance naturelle estimée à 15 ppb (soit 15 mg/t), ce qui le place au 70^{ème} rang des éléments par ordre d'abondance décroissante. Il est cinq fois moins abondant que l'argent. Il est suivi par le platine (5 ppb), l'osmium (1,5 ppb), l'iridium, le ruthénium et le rhodium (de l'ordre de 1 ppb).

Ces six métaux ont des propriétés chimiques voisines et se sont concentrés, au cours des processus géologiques et métallogéniques, dans les mêmes gisements. Les six métaux s'y rencontrent donc pratiquement toujours associés, mais à des teneurs inégales. Les plus abondants sont le platine et le palladium, et, selon les types de gisements, c'est l'un ou l'autre métal qui domine, les quatre autres métaux en sont des sous-produits.

Source : www.rsc.org/periodic-table/

Isotope	Abondance naturelle	Période radioactive
Ruthénium		
⁹⁶ Ru	5.54%	> 3.1 x 10 ¹⁶ a
⁹⁸ Ru	1.87%	stable
⁹⁹ Ru	12.76%	stable
¹⁰⁰ Ru	12.60%	stable
¹⁰¹ Ru	17.06%	stable
¹⁰² Ru	31.55%	stable
¹⁰⁴ Ru	18.62%	stable
¹⁰⁶ Ru	artificiel	373.59 j
Rhodium		
¹⁰¹ Rh	artificiel	3.3 a
¹⁰² Rh	artificiel	2.9 a
¹⁰³ Rh	100.00%	stable
Palladium		
¹⁰² Pd	1.02%	stable
¹⁰⁴ Pd	11.14%	stable
¹⁰⁵ Pd	22.33%	stable
¹⁰⁶ Pd	27.33%	stable
¹⁰⁷ Pd	artificiel	6.5 Ma
¹⁰⁸ Pd	26.46%	stable
¹¹⁰ Pd	11.72%	stable
Osmium		
¹⁸⁴ Os	0.02%	>5.6 x 10 ¹³ a
¹⁸⁶ Os	1.59%	>2 x 10 ¹⁵ a
¹⁸⁷ Os	1.96%	stable
¹⁸⁸ Os	13.24%	stable
¹⁸⁹ Os	16.15%	stable
¹⁹⁰ Os	26.26%	stable
¹⁹² Os	40.78%	stable
¹⁹⁴ Os	artificiel	6 a
Iridium		
¹⁷⁹ Ir	artificiel	1.82 a
¹⁹¹ Ir	37.30%	stable
¹⁹² Ir	artificiel	241 a
¹⁹³ Ir	62.70%	stable
Platine		
¹⁹⁰ Pt	0.01%	4.5 x 10 ¹¹ a
¹⁹² Pt	0.78%	stable
¹⁹³ Pt	artificiel	50 a
¹⁹⁴ Pt	32.97%	stable
¹⁹⁵ Pt	33.83%	stable
¹⁹⁶ Pt	25.24%	stable
¹⁹⁸ Pt	7.16%	stable

Tableau 2 - Les isotopes des platinoïdes (source : RSC (www.rsc.org)).

Le platine et le palladium ont une production significative (180 à 200 t/an de production primaire) et une grande importance économique et industrielle, suivis par le rhodium (< 25 t/an de production primaire). Le ruthénium et l'iridium ont des applications spécialisées. L'osmium, quant à lui, n'a qu'une production très minime (< 1 t/an) et des usages de micro-niche.

2.2. HISTORIQUE

Le platine plus ou moins allié avec les autres métaux du groupe du platine peut se trouver à l'état natif, métallique, dans la nature, et en particulier, comme l'or, sous forme de grains et pépites dans certaines alluvions. Ses occurrences sont cependant beaucoup plus localisées que celles de l'or.

La plus ancienne utilisation de platine travaillé connue est un étui de l'Égypte antique du VII^e siècle avant J.-C., découvert à Thèbes et exposé au Louvre, qui présente des hiéroglyphes incrustés de métal qui s'est avéré être du platine (Blazy et Jdid, 2008). Mais ce métal est ensuite resté inconnu en Europe et dans l'Ancien Monde jusqu'après la découverte de l'Amérique.

Le platine était utilisé en joaillerie en Amérique du Sud précolombienne, déjà par des artisans pré-incas du début de notre ère (artefacts en platine retrouvés dans des tombes datées d'il y a 2 000 ans).

La première mention européenne du métal date de 1557, dans un écrit de l'humaniste italien Jules-César Scaliger à propos d'un métal mystérieux et infusible¹ provenant d'exploitations d'or en Amérique Centrale.

Les chercheurs d'or espagnols du XVI^e au XVIII^e siècle trouvaient en Nouvelle-Grenade (Colombie actuelle) un métal qui accompagnait l'or et l'argent dans les gisements alluvionnaires, mais qui était infusible et compliquait de ce fait le travail des métaux précieux. Ils appelèrent péjorativement ce métal « platina » (« petit argent ») pour le différencier de « plata » (« argent » en espagnol).

C'est le chimiste suédois Henrik Teofilus Scheffer (1710-1759) qui identifia le platine comme un nouvel élément et en publia la description en 1752.

Le médecin puis chimiste anglais William Hyde Wollaston (1766-1828), effectuant des travaux sur le platine, découvrit le palladium puis le rhodium en 1803, et son ami et collaborateur Smithson Tennant (1761-1815) découvrit ensuite l'osmium et l'iridium en 1804 (Griffith, 2004).

Le ruthénium a ensuite été identifié et isolé en 1844 par le chimiste allemand, sujet de l'Empire Russe, Karl Karlovich Klaus (1796-1864).

¹ Cf. dans le tableau 1 le comparatif des températures de fusion de l'or, de l'argent et des platinoïdes : les moyens utilisés alors pour fondre l'or ou l'argent ne permettaient pas la fusion des platinoïdes.

En 1838, les métallurgistes anglais Percival Norton Johnson et George Matthey s'associèrent pour travailler sur le raffinage des métaux du groupe du platine. Le groupe Johnson & Matthey développa et perfectionna des techniques de séparation et de raffinage de ces métaux, dont il reste un des leaders aujourd'hui.

Les premières propriétés catalytiques de ces métaux furent découvertes en 1823. D'autres usages sont apparus au cours du XIX^e siècle : industrie électrique (1870), thermométrie (1880), joaillerie, dentisterie, monnaies. Les applications catalytiques se sont ensuite largement développées et diversifiées au cours du XX^e siècle.

Le platine a eu son importance historique, en alliage avec de l'iridium, pour la réalisation d'étalons ayant servi à définir certaines unités du système métrique.

Le mètre, d'abord défini en 1791 comme le dix-millionième de la distance du pôle Nord à l'équateur le long du méridien de Paris, fut redéfini à partir de 1889 par une barre de platine iridié (90 % Pt – 10 % Ir) fournie par Johnson & Matthey à la demande de l'Académie française des Sciences. Cet alliage avait été choisi en raison de son inaltérabilité et de sa très faible dilatation thermique. Cette barre, le « mètre-étalon », est conservée au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) au Pavillon de Breteuil à Sèvres (92, France). Elle est restée la référence de la définition du mètre jusqu'en 1960².

Le kilogramme, d'abord défini comme 1000 grammes, le gramme ayant été défini en 1795 alors comme la masse d'un cm³ d'eau à 0 °C, fut ensuite défini en 1889, et encore jusqu'à aujourd'hui, comme la masse du « prototype international du kilogramme » sous forme d'un cylindre de platine iridié (90 % Pt – 10 % Ir) conservé au BIPM à Sèvres. Il en a été réalisé plusieurs copies pour les divers pays membres du BIPM³.

Le platine est également utilisé dans la définition de l'électrode standard à hydrogène qui sert de point 0 pour la définition des potentiels d'oxydo-réduction.

2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Les six éléments du groupe du platine sont tous, à l'état pur, des métaux de couleur gris-acier à gris-argenté.

Leurs densité, dureté, températures de fusion et d'ébullition et résistivité électrique sont récapitulées dans le tableau 1.

² Le mètre a été redéfini en 1960 comme 1 650 763,73 longueurs d'onde d'une radiation orangée émise par l'isotope 86 du krypton, puis en 1983 par rapport à la vitesse de la lumière, comme la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 seconde.

³ La masse des copies a généralement diminué de quelques µg à quelques dizaines de µg en raison de leur manipulation (micro-usures), et même le prototype de référence a probablement perdu quelques microgrammes. Une nouvelle définition du kilogramme, plus absolue et indépendante d'un artefact humain, est toujours à l'étude et en débat en 2013.

Ils ont tous des points de fusion élevés, et ont la propriété de garder leur propriétés mécaniques sur une large gamme de température, même en cas de forts changements de température répétés.

Les trois platinoïdes « légers », Ru, Rh et Pd, avec une densité comprise entre 12 et 12,5, sont un peu plus denses que le plomb (densité 11,35), tandis que les trois platinoïdes « lourds » sont les trois métaux les plus denses connus, avec des densités comprises entre 21,45 (Pt) et 22,587 (Os), supérieures à celle de l'or (19,3).

Avec une densité supérieure à 22,5, l'osmium et l'iridium sont les plus denses de tous les métaux. Lequel était le plus dense des deux a fait l'objet de longues controverses, mais les mesures les plus récentes donneraient pour l'osmium une densité de $22,587 \pm 0,009$ et pour l'iridium une densité de $22,562 \pm 0,009$ (Griffith, 2004).

Le tableau 1 montre aussi des duretés assez variées, avec des métaux relativement tendres comme le platine et le palladium (mais plus durs que l'or ou l'argent), et un métal très dur, l'osmium.

Ces métaux ont aussi des coefficients de dilatation thermique modérés à faibles (cf. tab. 1), plus élevés toutefois que celui du tungstène ($0,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

Le platine a une bonne ductilité, une bonne malléabilité, une bonne aptitude à la soudure, une excellente aptitude à l'usinage. On peut en faire des fils de 76 μm de diamètre facilement tissables, des fils ultrafins de 10 μm , et des feuilles de 8 μm d'épaisseur (Blazy & Jdid, 2009).

L'alliage équiatomique Pt-Co (76,7 % Pt - 23,3 % Co en masse) est fortement ferromagnétique et forme un aimant très puissant.

2.4. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Le platine et, d'une manière générale, les éléments du groupe du platine, résistent bien, sous forme massive, à l'oxydation dans l'air, à toute température. Ils résistent largement à la corrosion chimique, aux acides nitrique et sulfurique même à chaud. Ils résistent assez bien à la corrosion par les halogènes, le soufre ou les alcalis caustiques.

Le platine, le palladium, le rhodium et le ruthénium ont par ailleurs de fortes propriétés catalytiques, sous forme métallique ou sous forme de certains composés. En particulier, de nombreux composés organométalliques complexes, à base de l'un ou l'autre de ces quatre éléments, ont été développés récemment pour des catalyses spécifiques.

Certaines de leurs propriétés sont résumées ci-après par élément.

2.4.1. Propriétés chimiques du platine

Le platine est un métal peu réactif, il est inoxydable à l'air ou dans l'oxygène. C'est ainsi qu'on peut le rencontrer à l'état natif dans la nature. Sauf à l'état de poudre fine, il

n'est pas attaqué par l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique, mais il se dissout dans l'eau régale. Sa résistance aux acides et à de nombreux réactifs ainsi qu'à la chaleur en fait un matériau de choix pour des instruments de laboratoire (creusets, etc.).

Le platine en revanche a de fortes propriétés catalytiques. Il catalyse en particulier la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène. Un mélange d'hydrogène et d'oxygène gazeux explose en présence de platine : le platine catalyse la réaction, exothermique, et l'élévation de température provoque un emballement et une explosion.

Les états d'oxydation du platine sont essentiellement 0, +2 et +4. Le platine donne des composés essentiellement di- et tétravalents, dont ceux qui sont les plus utilisés sont récapitulés dans le tableau 3 ci-après.

Le dioxyde de platine peut être réduit par l'hydrogène et permet d'obtenir du platine sous forme colloïdale, appelé « noir de platine », avec des capacités catalytiques accrues (plus grande surface active).

Composé	Formule	Usages
Platine métal	Pt	Catalyse, instruments de laboratoire, électrodes, thermocouples, joaillerie, etc.
Dichlorure de platine	PtCl ₂	Catalyse
Tétrachlorure de platine	PtCl ₄	Catalyse
Monoxyde de platine	PtO	
Dioxyde de platine	PtO ₂	Catalyse
Acide chloroplatinique	H ₂ PtCl ₆	Produit intermédiaire pour la fabrication des autres composés. Catalyse dans l'industrie chimique.
Hexachloroplatinate de potassium	K ₂ PtCl ₆	Photographie
Tétrachloroplatinate de potassium	K ₂ PtCl ₄	Photographie, production des composés bivalents de platine
Hexachloroplatinate d'ammonium	(NH ₄) ₂ PtCl ₆	Procédés de séparation du platine, platinage, fabrication de mousse de platine
Cis-diamine-dichloroplatine ("cisplatine")	PtCl ₂ (NH ₃) ₂	Médecine (chimiothérapie anticancéreuse)

Tableau 3 - Les principaux composés du platine utilisés.

2.4.2. Propriétés chimiques du palladium

Le palladium ne s'oxyde pas à l'air et ne réagit pas avec l'oxygène à température ambiante. Sous forme massive, il s'oxyde en PdO à l'air à 800 °C. Sous forme d'éponge, il forme PdO dans l'oxygène à 350 °C. PdO se redécompose en palladium et oxygène au-dessus de 900 °C.

Le palladium se dissout lentement dans les acides sulfurique, nitrique et chlorhydrique.

Le palladium existe principalement aux degrés d'oxydation 0, +2 et plus rarement +4. Ses composés les plus utilisés sont récapitulés dans le tableau 4 ci-après.

Composé	Formule	Usages
Palladium métal	Pd	Catalyse (pots catalytiques automobiles ; catalyse dans le crackage pétrolier, en particulier sous forme de palladium sur carbone), joaillerie, dentisterie, horlogerie, électronique, connectique, etc.
Dichlorure de palladium	PdCl ₂	Produit intermédiaire pour la fabrication des autres composés. Catalyse dans l'industrie chimique.
Monoxyde de palladium	PdO	Catalyse
Acétate de palladium	Pd(CH ₃ COO) ₂	Catalyse en chimie organique
Dichlorobis(triphénylphosphine) palladium	PdCl ₂ [(C ₆ H ₅) ₃ P] ₂	Catalyses de couplage en chimie organique. Produit intermédiaire pour la fabrication du tétrakis(triphénylphosphine)palladium
Tétrakis(triphénylphosphine) palladium	Pd[(C ₆ H ₅) ₃ P] ₄	Catalyses de couplage en chimie organique.
Tris(dibenzylidèneacétone) dipalladium	Pd ₂ (C ₁₇ H ₁₄ O) ₃	Catalyses de couplage en chimie organique.

Tableau 4 - Quelques composés du palladium utilisés.

Le palladium métallique a la particularité de pouvoir absorber jusqu'à 900 fois son propre volume de dihydrogène à température ambiante.

Le palladium réagit avec le chlore pour donner le chlorure de palladium PdCl₂, qui est utilisé comme produit intermédiaire pour la chimie du palladium et la production d'organométalliques et divers catalyseurs à base de composés de palladium ou de catalyseurs hétérogènes tels que le palladium sur sulfate de baryum, le palladium sur carbone, et le chlorure de palladium sur carbone.

Le palladium et certains de ses composés ont de fortes propriétés catalytiques. Ils favorisent en particulier le couplage de radicaux pour la synthèse en chimie organique (réactions de couplage pallado-catalysées⁴).

⁴ Ce sont leurs travaux sur les synthèses organiques par réactions de couplage pallado-catalysées qui ont valu à R.F. Heck, E. Negishi et A. Suzuki l'attribution du prix Nobel de Chimie 2010.

Source : www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2010/

2.4.3. Propriétés chimiques du rhodium

Le rhodium est relativement inaltérable. Il ne s'oxyde pas à l'air. Il n'est pas attaqué par les acides, sauf l'eau régale dans laquelle il ne se dissout que très lentement. Il réagit avec les bases fondues.

Ses principaux degrés d'oxydation sont 0 et +3, mais il existe aussi des composés à degré d'oxydation 2, 4, 5 et 6. Ses composés les plus utilisés sont récapitulés dans le tableau 5 ci-après.

Composé	Formule	Usages
Rhodium métal	Rh	Catalyse (pots catalytiques automobiles : conversion des oxydes d'azote NO _x en N ₂ +O ₂), joaillerie, thermocouples, électronique.
Trichlorure de rhodium anhydre	RhCl ₃	
Trichlorure de rhodium hydraté	RhCl ₃ .3H ₂ O	Produit intermédiaire pour la fabrication des composés complexes. Catalyse
Oxyde de rhodium (III)	Rh ₂ O ₃	Catalyse
Acétate de rhodium	Rh ₂ (CH ₃ COO) ₄	Catalyse en chimie organique
Chlorotris(triphénylphosphine) rhodium (= "Catalyseur de Wilkinson")	RhCl[(C ₆ H ₅) ₃ P] ₃	Catalyses (hydrogénation des alcènes, etc.)

Tableau 5 - Quelques composés du rhodium utilisés.

2.4.4. Propriétés chimiques du ruthénium

Le ruthénium est inaltérable à l'air et n'est attaqué par les acides qu'en présence de forts oxydants comme des chlorates alcalins.

Ses degrés d'oxydation vont de 0 et +8 et même -2, mais les plus courants sont 0, +2, +3 et +4. Ses composés les plus utilisés sont récapitulés dans le tableau 6 ci-après. Il forme une très grande variété de complexes organométalliques.

2.4.5. Propriétés chimiques de l'iridium

L'iridium est le plus inaltérable de tous les métaux. Il est inaltérable à l'air et n'est attaqué par aucun acide, ni même l'eau régale.

Ses degrés d'oxydation les plus courants sont 0, +3 et +4. Ses composés les plus utilisés sont récapitulés dans le tableau 7 ci-après.

Composé	Formule	Usages
Ruthénium métal	Ru	Superalliages (turbines avion), électronique (disques durs), catalyses (dont dissociation de l'acide formique HCOOH en H ₂ + CO ₂).
Trichlorure de ruthénium hydraté	RuCl ₃	
Dioxyde de ruthénium	RuO ₂	Puces résistives
Ruthénate de plomb	Pb ₂ Ru ₂ O _{6,5}	Puces résistives
Ruthénate de bismuth	Bi ₂ Ru ₂ O ₇	Puces résistives
Tétraoxyde de ruthénium	RuO ₄	Extrêmement toxique
Dodécacarbonyle de triruthénium	Ru ₃ (CO) ₁₂	
Ruthénocène	Ru(C ₅ H ₅) ₂	
Dichlorobis(triphénylphosphine) ruthénium	RuCl ₂ [(C ₆ H ₅) ₃ P] ₂	Catalyses

Tableau 6 - Quelques composés du ruthénium utilisés.

Composé	Formule	Usages
Iridium métal	Ir	Instruments de laboratoire, contacteurs, revêtement miroir de lunettes de ski et visières de casques de moto
Trichlorure d'iridium	IrCl ₃	
Dioxyde d'iridium	IrO ₂	Revêtement d'anodes dans certaines électrolyses
Acide chloroiridique	H ₂ IrCl ₆	
Hexachloroiridate (IV) de potassium	K ₂ IrCl ₆	
Hexachloroiridate (IV) d'ammonium	(NH ₄) ₂ IrCl ₆	
Hexachloroiridate (III) de potassium	K ₃ IrCl ₆	
Hexachloroiridate (III) d'ammonium	(NH ₄) ₃ IrCl ₆	

Tableau 7 - Quelques composés de l'iridium utilisés.

2.4.6. Propriétés chimiques de l'osmium

L'osmium sous forme massive est relativement inoxydable, mais, sous forme pulvérulente, il s'oxyde assez rapidement en tétraoxyde d'osmium OsO₄, volatil et

extrêmement toxique. C'est d'ailleurs l'odeur du tétroxyde d'osmium qui se dégage d'échantillons d'osmium qui a valu son nom au métal (du grec « osme », odeur).

Ses degrés d'oxydation vont de 0 et +8, mais les plus courants sont 0, +3, +4 et +8. Ses composés les plus utilisés sont récapitulés dans le tableau 8 ci-après.

Composé	Formule	Usages
Osmium métal	Os	Utilisé surtout en alliage avec le platine et autres platinoïdes (plumes de stylo, implants chirurgicaux, stimulateurs cardiaques, contacts électriques, etc.)
Tétroxyde d'osmium	OsO ₄	Puissant agent oxydant. Volatil et extrêmement toxique. Certains usages en catalyse.

Tableau 8 - Quelques composés de l'osmium utilisés.

2.5. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES ET TOXICITÉ

Les éléments du groupe du platine n'ont pas de rôle biologique connu et n'ont pas de fonction d'oligo-élément.

Sous leur forme métallique, le platine, le palladium, le rhodium, le ruthénium et l'iridium étant très résistants aux attaques chimiques et à la corrosion, ils ne sont pas toxiques aux doses auxquelles on peut être raisonnablement confronté. D'où l'usage du palladium mais aussi de certains alliages au platine pour des prothèses dentaires.

Mais certains composés de ces métaux, en particulier leurs composés solubles, peuvent être toxiques à haute dose.

L'osmium, quant à lui, n'est pas toxique en tant que métal massif, mais dès qu'il est finement divisé, il s'oxyde à l'air en tétroxyde d'osmium OsO₄ qui est volatil et extrêmement toxique. La Fiche Internationale de Sécurité Chimique sur le tétroxyde d'osmium publiée par le Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques (www.cdc.gov/niosh/ipcsnfrn/nfrn0528.html, accédé le 3/04/2013) fixe à 0,2 ppb et 1,6 µg/m³ d'air la valeur limite d'exposition moyenne pondérée admissible dans l'air, et à 0,6 ppb et 4,7 µg/m³ d'air la valeur limite d'exposition de courte durée. Le tétroxyde d'osmium est corrosif pour les yeux, la peau et les voies respiratoires, et son inhalation peut causer un œdème pulmonaire et entraîner la mort.

L'INERIS (Pichard *et al.*, 2005) a publié une « Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques » sur le platine, ses sels et ses complexes, qui récapitule les conclusions de diverses études spécialisées. Il n'a pas publié d'études équivalentes sur les autres métaux du groupe. Quelques éléments de cette fiche sont repris ci-après.

Le seul cas publié d'empoisonnement létal aux sels de platine daterait de 1896 et serait celui d'un enfant de deux mois qui aurait ingéré accidentellement un papier contenant 8 grammes de chloroplatinate de potassium.

Certains composés du platine sont cytotoxiques. C'est le cas en particulier du complexe Pt(NH₃)₂Cl₂, ou cis-diaminedichloroplatine, appelé aussi cisplatine. Il détruit

l'ADN en empêchant la double hélice de se dérouler, ce pourquoi il est utilisé pour traiter certains cancers (chimiothérapie) en bloquant le processus de division rapide de certaines cellules (dont celles qui font pousser les cheveux, d'où une chute des cheveux lors de certaines chimiothérapies). Le cisplatine s'insère de manière sélective au niveau des bases guanine de la double hélice de l'ADN, modifie la conformation locale, crée des ponts interbrins, bloque ainsi la réplication de l'ADN et la cellule (cancéreuse) meurt. Chez le rat, la dose létale à 50 %⁵ de cisplatine est de 20 mg/kg de masse corporelle.

Pour tous les autres composés communs du platine, les doses létales à 50 % chez le rat sont d'au moins 0,1 g par kg de masse corporelle (et même plus de 8 g/kg pour l'oxyde de platine PtO₂). La probabilité d'être confronté passivement à de telles doses, même en milieu professionnel est quasi nulle.

Les platinoïdes sont très rares et très peu concentrés naturellement dans l'environnement. Mais l'usage très large des pots catalytiques dans l'automobile finit, par usure, par libérer des nanoparticules de platine et de palladium dans l'atmosphère. Ainsi il est estimé qu'un pot catalytique actuel libère quelques nanogrammes de platine (ou de palladium) dans l'atmosphère par kilomètre parcouru. Les pots catalytiques plus anciens pouvaient libérer de 100 à 1 000 fois plus de platine (de l'ordre de 1 µg/km). Plus de 95 % du platine ainsi libéré l'est sous forme de particules de tailles comprises entre 0,4 et 65 µm. En ce qui concerne les catalyseurs industriels, seuls ceux utilisés pour l'oxydation de l'ammoniac et la production d'acide nitrique libèreraient des quantités notables de platine.

Une partie de ce platine se retrouve dans les sédiments des rivières. Les valeurs d'écotoxicité aiguë au platine sur les organismes aquatiques d'eau douce auraient été de 52 µg/l de Pt sous forme de PtCl₄ sur l'organisme le plus sensible (*Daphnia magna*). Par précaution, l'INERIS recommande donc une concentration maximale « sans effet prévisible sur l'environnement » de 0,07 µg/l (dose 700 fois moindre).

Par ailleurs, le platine et le palladium utilisés dans les pots catalytiques et les catalyseurs contiennent toujours des microtraces d'osmium (~0,2 ppb, selon Poirier, 2005). Leur libération par usure sous forme de particules fines libère donc fatalement aussi un peu d'osmium, qui s'oxyde en tétraoxyde d'osmium. Les concentrations générées sont cependant de très loin inférieures aux concentrations pouvant avoir un impact environnemental⁶.

⁵ C'est-à-dire la dose qui provoque la mort de 50 % des individus exposés.

⁶ Williams et Turekian ont publié en 2000 des mesures d'osmium atmosphérique à New Haven dans le Connecticut par pompage de grands volumes d'air à travers des filtres. Les résultats obtenus sont de 0,003 à 0,026 pg Os/m³ (pg = picogramme = 10⁻¹² g). Poirier (2005) évalue que plusieurs pg d'osmium pourraient être déposés annuellement par m² dans les zones à forte concentrations ce voitures. À comparer avec environ 1 pg d'osmium par m² et par an qui serait déposé naturellement (poussières volcaniques, érosion, météorites).

2.6. UNITÉS ET FACTEURS DE CONVERSION

Comme pour les autres métaux précieux, or et argent, les publications anglo-saxonnes expriment souvent les productions et les ressources et réserves en onces de Troie (Troy ounces, oz), et les prix en dollars étatsuniens par onces (US\$/oz).

Par souci d'homogénéisation, et étant donné que le système métrique est le système légal en vigueur, les masses ont été systématiquement converties en kg ou en tonnes, sur la base de :

1 oz (troy) = 31,1034768 grammes (souvent arrondi à 31,1035 g).

Les prix sont généralement laissés dans leurs unités de cotation, mais sont convertis chaque fois que de besoin.

3. La demande : usages et consommation

Les six métaux du groupe du platine ont des usages de volume et d'importance économique variés. Le platine et le palladium sont ceux utilisés le plus abondamment, le rhodium et le ruthénium ont aussi des usages industriels significatifs.

Les usages majeurs restent globalement la catalyse, et en particulier la catalyse automobile (pots catalytiques).

Le tableau 9 résume et compare les quantités utilisées de chacun des six métaux et leurs usages dominants. Ces usages seront détaillés et complétés par élément dans les sections 3.1 à 3.6 qui suivent.

Le tableau récapitule aussi, à titre indicatif, la valeur de marché 2012 de la quantité de métal ayant été consommée au cours de l'année 2012 : le platine a représenté un marché brut mondial de 12,5 milliards d'US\$, celui du palladium 6,4 milliards, celui du rhodium 1,2 milliards, celui de l'iridium 190 millions, celui du ruthénium 76 millions, et celui de l'osmium moins de 12 millions d'US\$.

Elément	Consommation brute (t)					Prix moyen 2012 en US\$/oz	Prix moyen 2012 en €/kg	Valeur brute du marché 2012	Usages dominants (2012)
	2008	2009	2010	2011	2012				
Pt	248.5 t	211.3 t	245.9 t	251.8 t	250.2 t	1 554 US\$/oz	38 861 €/kg	12 502 MUS\$	Catalyse automobile (40.3%) ; Joaillerie (34.6%) ; Placements (5.7%)
Pd	257.8 t	244.2 t	302.8 t	266.2 t	307.8 t	646 US\$/oz	16 140 €/kg	6 392 MUS\$	Catalyse automobile (66.9%) ; Industries électriques et électroniques (12.1%), Dentisterie (5.4%)
Rh	27.9 t	22.3 t	27.6 t	28.2 t	30.0 t	1 276 US\$/oz	31 890 €/kg	1 233 MUS\$	Catalyse automobile (81,0%) ; Industrie chimique (8.4%)
Ir	3.2 t	2.5 t	10.5 t	10.3 t	5.5 t	1 070 US\$/oz	26 790 €/kg	190 MUS\$	Électrochimie (39.3%) ; Industries électriques et électroniques (23.6%)
Ru	21.7 t	17.9 t	29.4 t	31.0 t	21.1 t	112 US\$/oz	2 812 €/kg	76 MUS\$	Industries électriques et électroniques (55.5%) ; Electrochimie (18.7%) ; Industrie chimique (13.1%)
Os	<< 1 t	<< 1 t	<< 1 t	<< 1 t	<< 1 t	400 US\$/oz	9 886 €/kg	< 12 MUS\$	<i>Production et consommation non publiées</i>

Tableau 9 - Récapitulatif de la demande brute en les six métaux du groupe du platine, classés par valeur brute de marché 2012 décroissante (source : Johnson Matthey, mai 2013).

3.1. USAGES DU PLATINE

Les utilisations majeures du platine sont liées à ses propriétés catalytiques : contrôle des émissions nocives (échappements des voitures et camions, mais aussi de certaines fumées d'usines), catalyses de réactions de production industrielle (raffinage et craquage du pétrole, fabrication de l'acide nitrique pour les nitrates, vulcanisation de

certaines silicones, etc.), et, dans un marché en émergence mais encore marginal, catalyse pour les piles à combustible de basse température. Les autres utilisations sont surtout liées à ses propriétés d'inaltérabilité (bijouterie, thésaurisation, ustensiles de laboratoire).

En 2012, la répartition de la demande de platine était la suivante (voir aussi fig. 2) (Johnson Matthey, 2013) :

- catalyseurs des pots catalytiques pour l'automobile : 40,3 % ;
- bijouterie - joaillerie : 34,6 % ;
- catalyse industrielle : 8,1 % (dont industrie chimique : 5,6 % et industrie pétrolière : 2,5 %) ;
- investissements (ETF, thésaurisation) : 5,7 % ;
- usages médicaux et biomédicaux : 3,0 % ;
- industries verrières : 2,2 % ;
- industries électriques et électronique : 2,1 %
- divers autres : 4,2 % ;

pour une demande totale (brute) mondiale de platine estimée à 250,2 t Pt en 2012, dont 175,4 t issues de la production minière, 63,1 t issues du recyclage, et 11,7 t du déstockage (cf. 4.3.).

La répartition de la demande est cependant très variable selon les ensembles économiques géographiques. Ainsi, la demande largement dominante de platine en Chine provient du secteur de la joaillerie (84,6 % de la demande), alors qu'en Europe ce secteur ne représente que 9,1 % de la demande et celui des catalyseurs pour l'automobile en représente 67,2 % (cf. fig. 3). Cependant, le durcissement récent des normes environnementales en Chine devrait conduire à un accroissement de la part de la catalyse automobile dans la consommation chinoise.

Cette répartition par filière a déjà évolué dans le temps au cours de ces dernières décennies : par exemple la consommation pour la catalyse automobile ne représentait que 14 % de la consommation totale de platine en 1975 ; elle est montée à 55 % en 2006, pour s'infléchir à 34 % en 2012 (cf. fig. 4).

Le platine utilisé dans les filières de la catalyse automobile est par ailleurs largement recyclé en fin de vie depuis 1982 (cf. 3.1.1 et 4.5) : le platine issu du recyclage des catalyseurs automobiles contribue à hauteur de 30 à 40 % de la consommation de la filière depuis plusieurs années. L'autre source significative de platine secondaire est le recyclage de la joaillerie.

Répartition des usages mondiaux du platine en 2012

(source : Johnson Matthey, 2013)

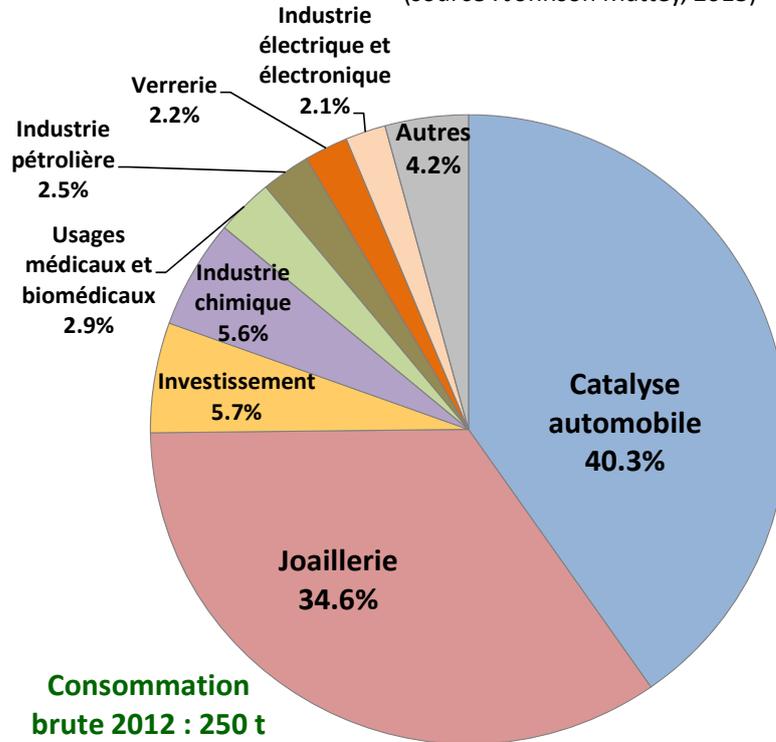
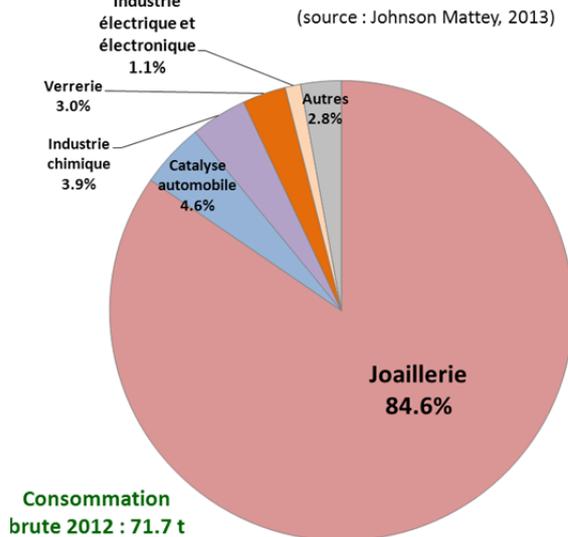


Figure 2 - Répartition des usages du platine par filières dans le monde en 2012.

Répartition des usages du platine en Chine en 2012

(source : Johnson Matthey, 2013)



Répartition des usages du platine en Europe en 2012

(source : Johnson Matthey, 2013)

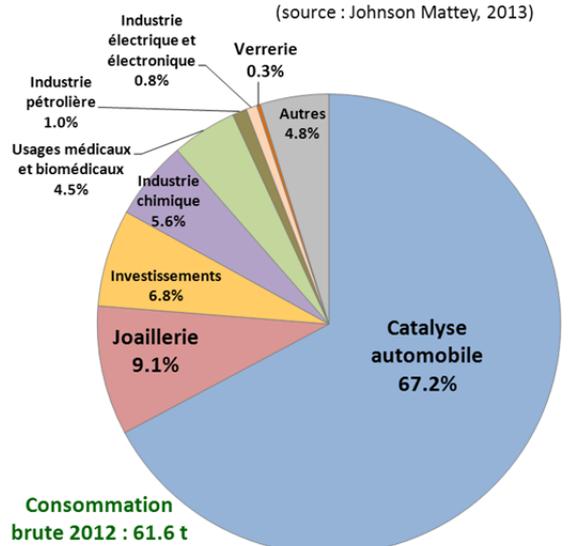


Figure 3 - Répartition des usages du platine par filières en Chine (à gauche) et en Europe (à droite) en 2012.

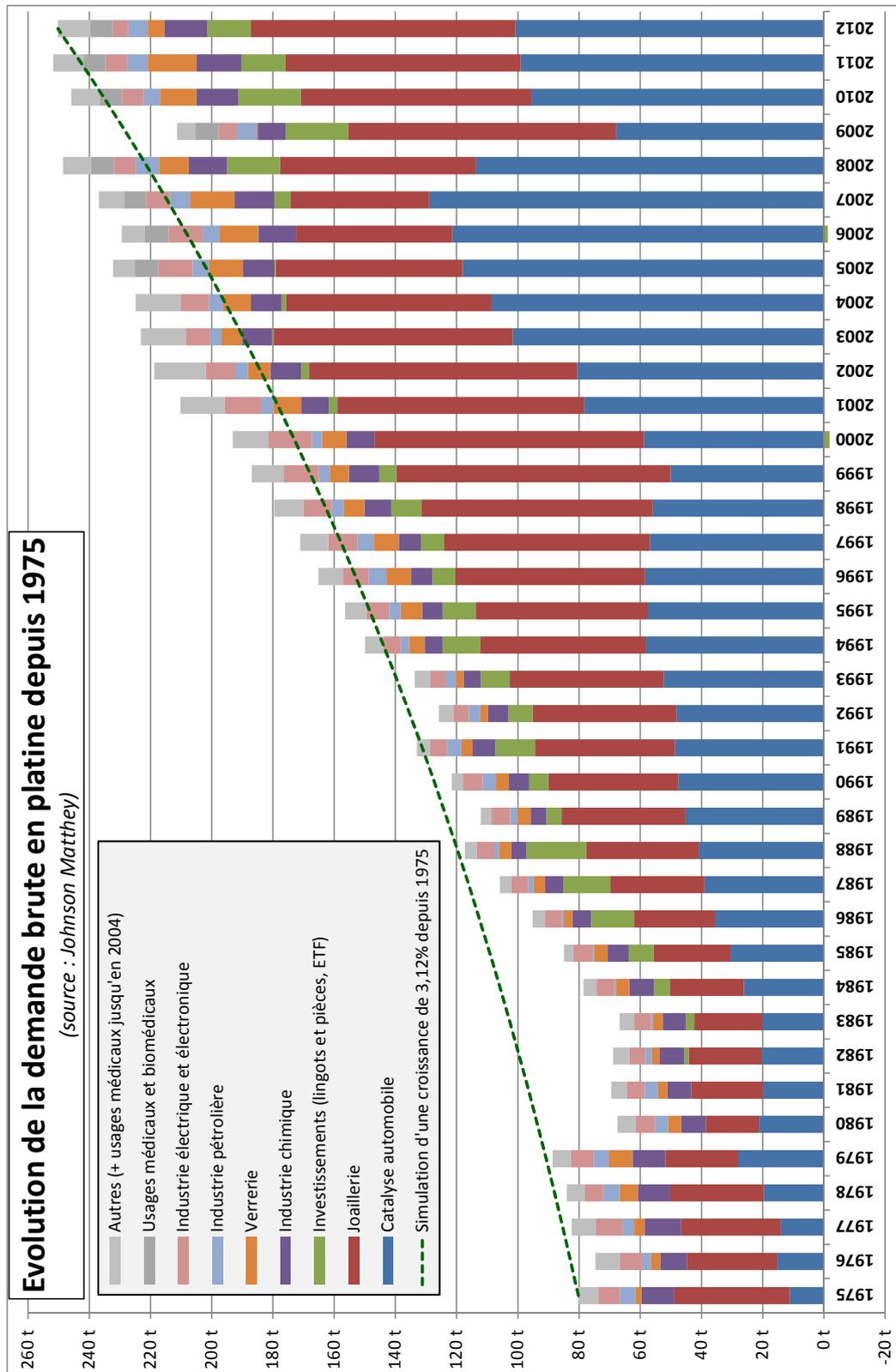


Figure 4 - Évolution de la demande brute en platine par filières depuis 1975.

Le platine est aussi utilisé comme catalyseur dans les piles à combustible à basse température⁷, dont l'usage reste encore limité à la recherche et au développement, ou à des applications extrêmement limitées (satellites, prototypes d'alimentation d'ordinateurs portables, quelques flottes de bus). Mais, une production et une commercialisation à échelle industrielle d'équipements utilisant des piles à combustibles pourraient avoir une influence considérable sur le marché du platine à l'avenir. Le prix très élevé du platine est d'ailleurs un des facteurs importants qui limite développement de la pile à combustible à grande échelle.

3.1.1. Les catalyseurs automobiles.

Le fonctionnement des moteurs thermiques (essence ou diesel) utilisés surtout pour les véhicules automobiles (voitures individuelles, véhicules utilitaires et de transport collectif) rejette surtout du dioxyde de carbone (CO_2) et de la vapeur d'eau (H_2O) qui sont les produits inévitables de la combustion des hydrocarbures. Mais il rejette aussi du monoxyde de carbone (CO), divers oxydes d'azote (NO_x), et quelques hydrocarbures imbrûlés (C_xH_y), nocifs par inhalation à l'homme et aux animaux. Le fonctionnement de ces moteurs, et plus particulièrement celui des moteurs diesels, rejette aussi des aérosols de particules fines (fumées).

L'accroissement de la circulation automobile dans les années 1960-1970, en particulier en Amérique du Nord, Europe de l'Ouest et Japon, et la pollution des zones densément peuplées qui s'en est suivie, ont conduit ces pays à rechercher des solutions pour réduire les polluants nocifs des échappements automobiles, puis à imposer des normes maximales de rejets de polluants, en imposant la systématisation de l'équipement des véhicules avec des pots d'échappement catalytiques.

Le rôle du pot catalytique est de convertir au maximum les composés polluants (CO , NO_x et C_xH_y) en composés non nocifs, CO_2 , N_2 et H_2O , grâce aux propriétés catalytiques du platine, du palladium et du rhodium.

Les pots catalytiques ont été développés à partir de 1974 (General Motors) puis ont été rendus obligatoires pour les constructeurs dans les années 1990⁸.

La systématisation des pots catalytiques dans les années 1990 a aussi accéléré la substitution du plomb tétraéthyle comme antidétonnant dans l'essence, celui-ci « empoisonnant » les catalyseurs.

⁷ Par opposition aux piles à combustible à oxydes solides, ou SOFC (Solide Oxyde Fuel Cells) qui fonctionnent à haute température et n'ont pas besoin de platine, et qui commencent à se diffuser pour des systèmes d'alimentation électrique de secours fixes.

⁸ Selon les décisions européennes, appliquées par la France, les pots catalytiques ont été rendus obligatoires pour tous les véhicules neufs à essence en 1992 (pour les modèles 1993), puis pour les véhicules diesel en 1996 (pour les modèles 1997). Ils étaient déjà obligatoires depuis 1989 pour les véhicules essence de plus de 2 l de cylindrée,

Les pots catalytiques sont composés d'une chambre en d'acier inoxydable contenant un ou plusieurs « monolithes » en série (le plus souvent 2 à 3), qui consistent généralement en une céramique à composition de cordiérite avec une texture en « nid d'abeille » (microconduits alvéolaires) tapissés d'alumine, oxyde de cérium (CeO_2) et métaux du groupe du platine (platine et/ou palladium éventuellement complétés d'un peu de rhodium qui améliore la dissociation des oxydes d'azote), cf. fig. 5 et 6 ci-après.

Leur efficacité dépend de la température : les pots catalytiques sont inefficaces à froid (au démarrage), puis l'efficacité s'améliore à partir de 250 °C pour devenir optimale à 400 °C, après plusieurs minutes de fonctionnement du moteur. Il faut aussi un mélange optimisé d'air et d'essence, d'où les calculateurs électroniques pour optimiser l'injection avec les mesures d'une sonde dans les échappements en sortie de moteur (« sonde lambda »).

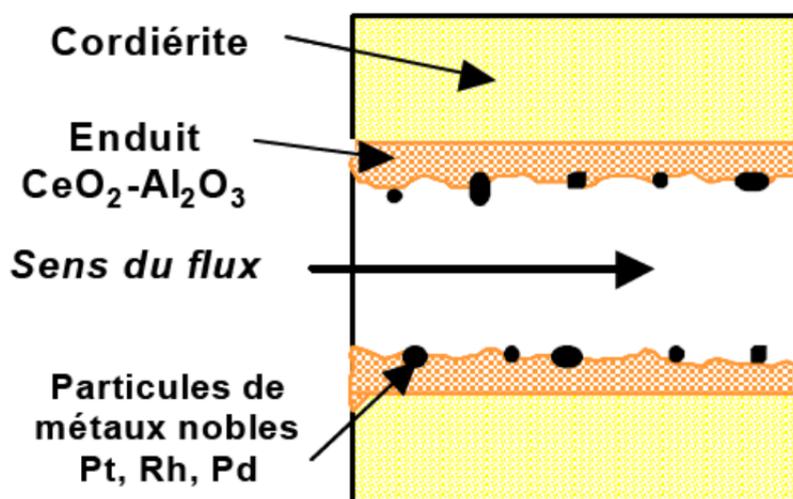


Figure 5 - Vue en coupe d'un canal de monolithe de pot catalytique.
 © Société Chimique de France, division catalyse (www.societechimiquedefrance.fr).

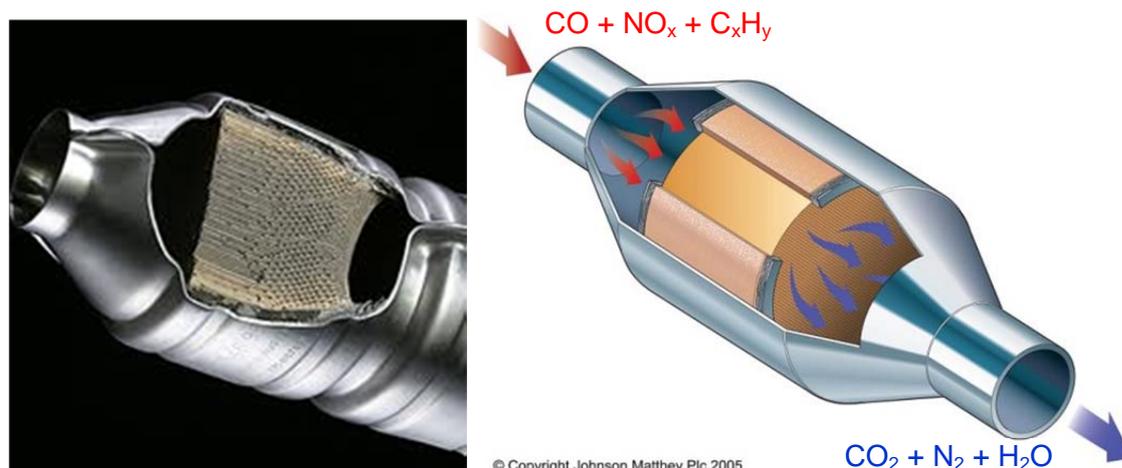


Figure 6 - Écorché et schéma d'un pot catalytique simple (© Johnson Matthey Plc).

Les proportions d'utilisation du platine et du palladium dans les divers pots catalytiques ont fluctué en fonction des évolutions technologiques, des exigences réglementaires et des prix relatifs de l'un et l'autre métal. Actuellement, dans les pays à économie mature, l'usage du palladium domine pour les pots catalytiques des moteurs à essence, et le platine pour ceux des moteurs diesel. Le palladium est préféré pour les moteurs à essence en particulier parce qu'il est moins cher actuellement, mais le platine est utilisé pour les moteurs diesel parce qu'il garde une bien meilleure efficacité catalytique dans l'atmosphère des échappements diesel qui reste relativement oxydante. Mais dans certains pays émergents où la qualité de l'essence est variable et parfois trop soufrée, le platine reste utilisé dans les moteurs à essence en raison de sa meilleure tolérance au soufre.

Depuis leur introduction en 1974 jusqu'en 1989, les catalyseurs automobiles étaient essentiellement à base de platine. En raison des prix élevés de ce métal, des catalyseurs au palladium se sont développés surtout à partir de 1989 (Ford), substituant environ 2 g de palladium à 1 g de platine. Après la bulle du prix du palladium en 2000-2001 (cf. 5.1), les progrès techniques ont permis d'abaisser le taux de substitution à 1 g pour 1 g.

Les constructeurs automobiles commandent en général des monolithes à des sociétés spécialisées dans l'imprégnation des céramiques des monolithes avec du platine, du palladium et du rhodium. Pour une efficacité donnée imposée par la norme, plusieurs compositions relatives en Pt, Pd et Rh sont possibles, et la composition est optimisée en fonction des prix relatifs de ces trois constituants, d'où des variations de composition au fil du temps même pour une norme et une efficacité similaire.

Les quantités de platinoïdes utilisés sont donc très variables selon les cylindrées, les constructeurs, les pays avec leurs normes et leurs qualités de carburant, et seules des moyennes très indicatives de consommation sont disponibles.

En Europe, les réglementations d'émissions des échappements successives, de plus en plus strictes, ont été baptisées normes Euro1, Euro2, etc., jusqu'à Euro5 actuellement en vigueur (2013) et Euro6 qui entrera en vigueur en septembre 2014⁹ (cf. fig. 7).

De nombreux pays d'Asie et d'Amérique Latine adoptent progressivement ces mêmes normes.

La quantité de platinoïdes utilisés par véhicule en Europe serait en moyenne de l'ordre de :

- véhicules à essence : 2 à 3 g de Pd-Pt, avec palladium très largement dominant, et 0,1 g Rh ;
- véhicules diesel : 2 à 3 g de Pt-Pd, avec platine largement dominant.

⁹ Cf. http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/l28186_fr.htm

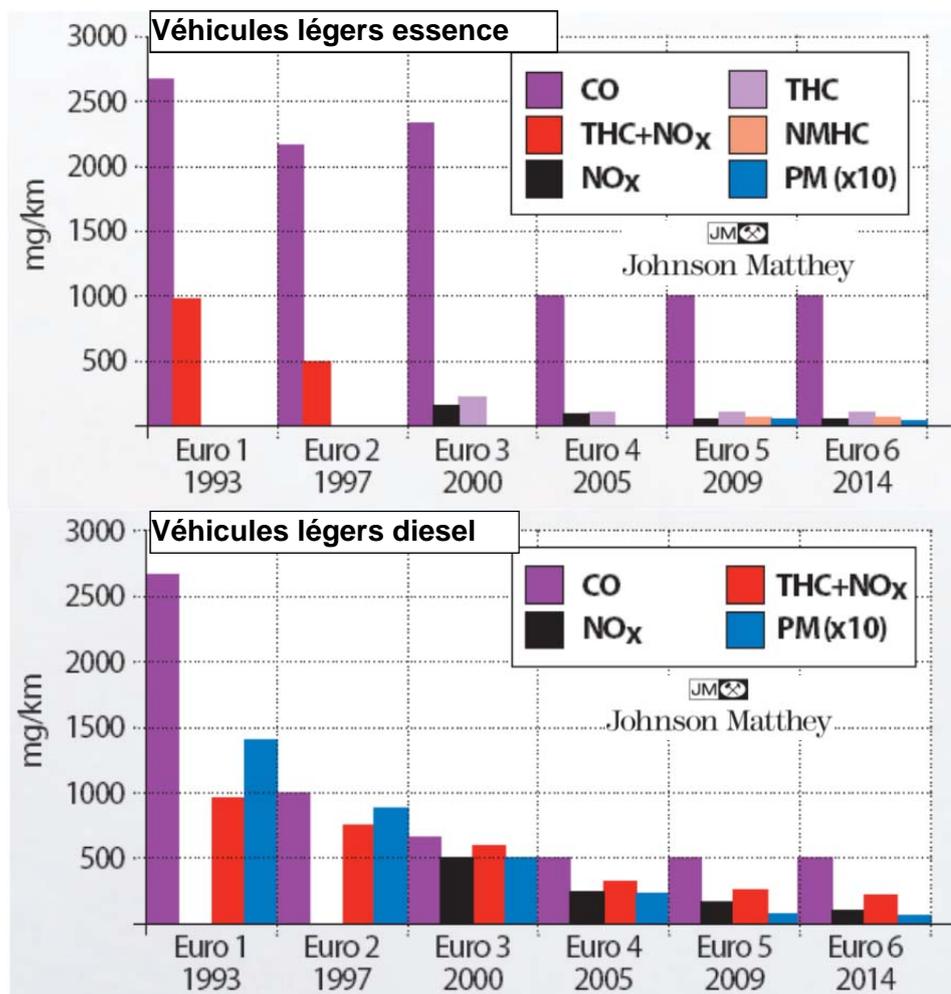


Figure 7 - Évolution des normes européennes antipollution des échappements des véhicules légers essence (en haut) et diesel (en bas). THC = hydrocarbures imbrûlés totaux. PM = particules fines. © Johnson Matthey.

Au niveau mondial, en 2012, 81 % du platine utilisé pour les pots catalytiques l'était pour des véhicules diesel, et 19 % pour des véhicules à essence (fig. 10).

Selon Johnson Matthey (mai 2013), la consommation totale de platine pour la catalyse automobile aurait été de 100,8 t en 2012. Cette consommation a augmenté de 1,7 % par rapport à 2011 (99,1 t), mais reste inférieure aux consommations de la période pré-crise de 2004-2008 (cf. fig. 4 et 8).

35,2 t (soit 34,9 % de la consommation totale) sont issues du recyclage de la filière. La part de la consommation issue du recyclage, inexistante avant 1981, s'est progressivement accrue et dépasse systématiquement 30 % depuis 2008 (fig. 8).

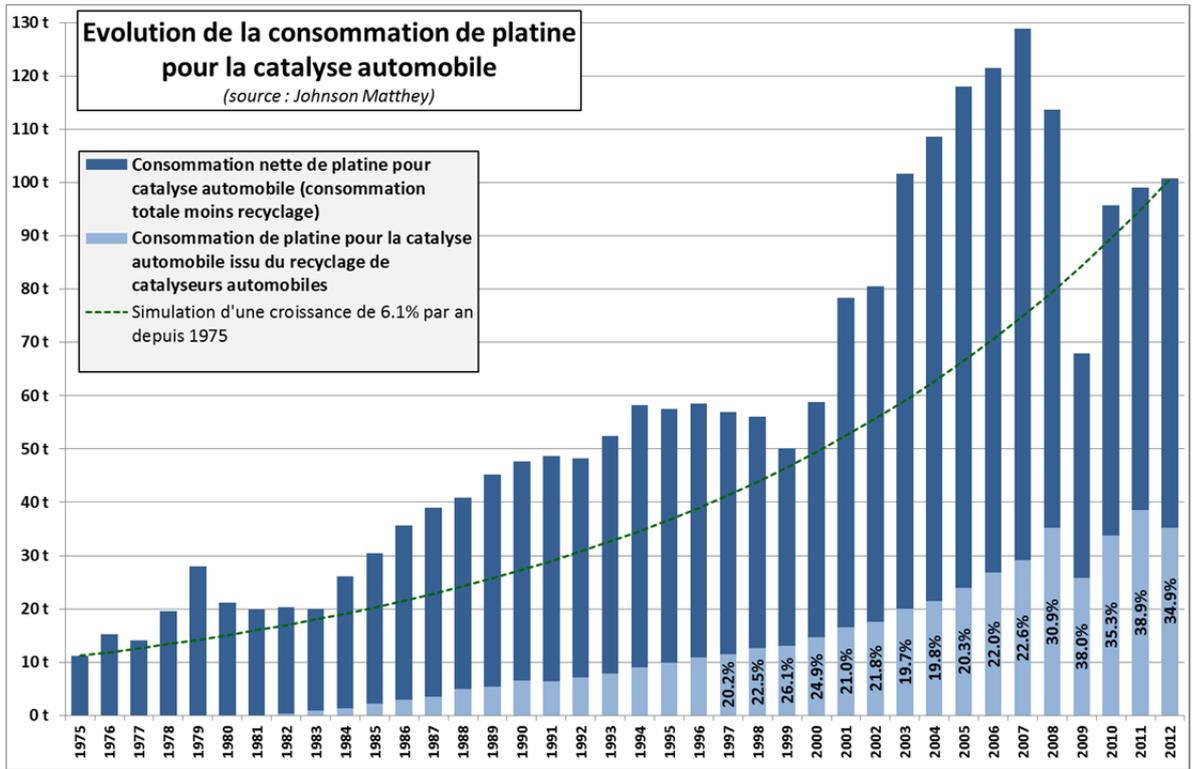


Figure 8 - Évolution de la consommation de platine pour la catalyse automobile depuis 1975, avec part issue de recyclage.

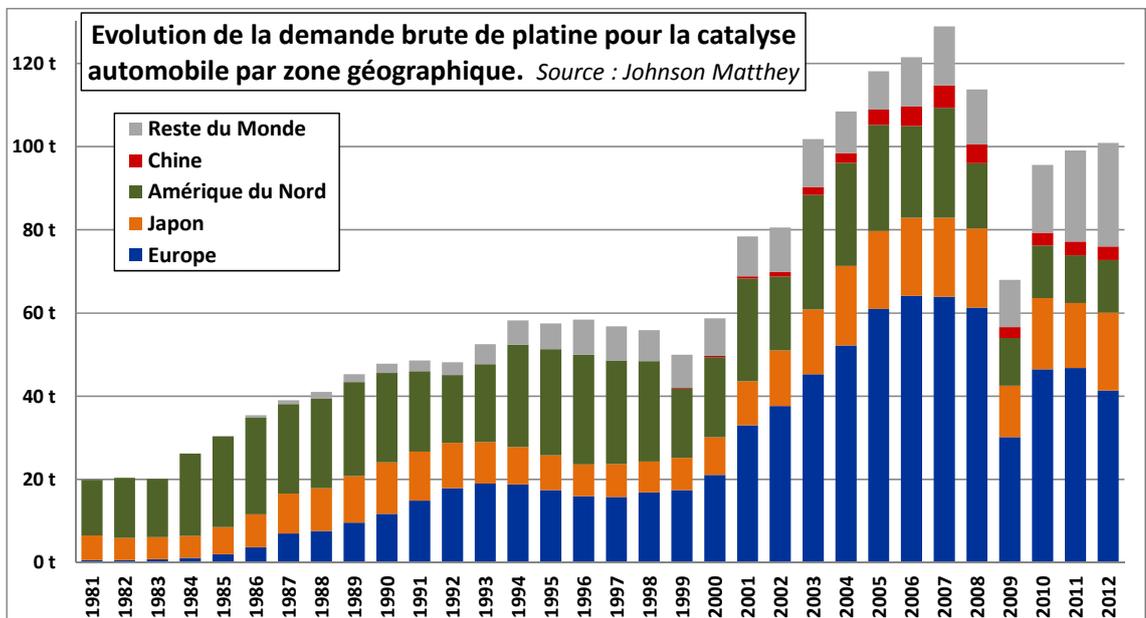


Figure 9 - Évolution de la demande brute en platine pour la catalyse automobile par ensemble géographique.

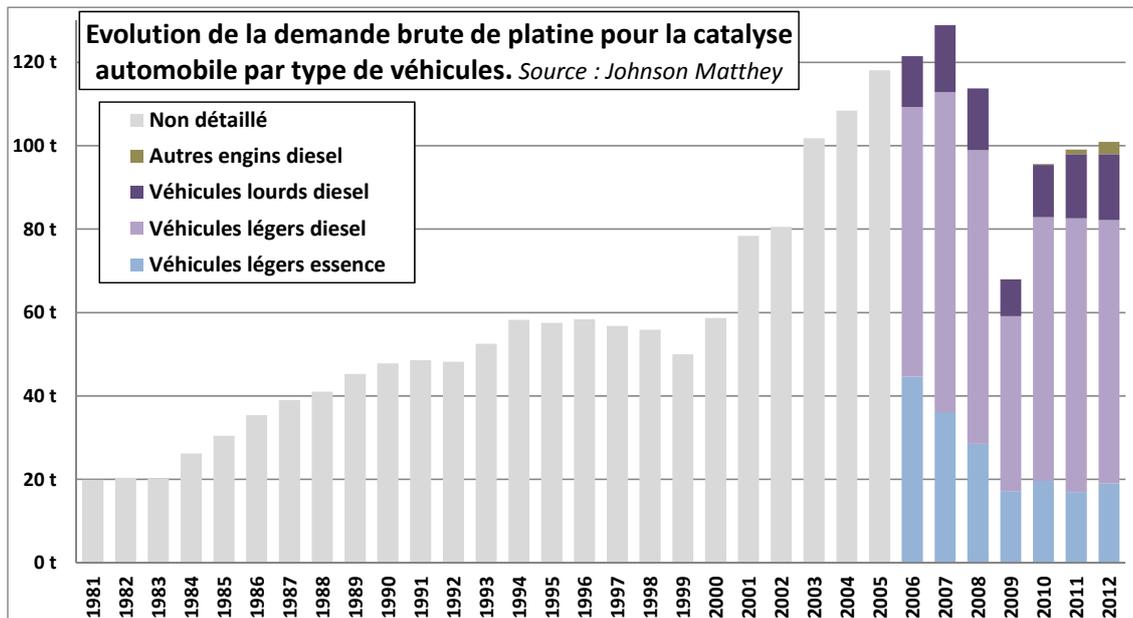


Figure 10 - Évolution de la demande brute en platine pour la catalyse automobile par type de véhicule.

Les figures 9 et 10 illustrent les évolutions de la consommation de platine pour la catalyse automobile par grands ensembles géographiques, et par type de véhicules, compilées d'après les publications de Johnson Matthey (2013 et antérieures).

La baisse de la construction automobile européenne, où le diesel est largement développé et donc la consommation de platine importante, entre 2011 et 2012, a été compensée par une bonne reprise de la construction automobile au Japon et surtout une bonne croissance de cette construction dans plusieurs autres pays émergents où le diesel se développe, comme l'Inde, la Thaïlande et l'Indonésie.

Schématiquement, les facteurs qui pourront continuer à influencer la demande en platinoïdes pour les pots catalytiques sont :

- facteurs tendant à augmenter la demande en platinoïdes :
 - . accroissement du parc de véhicules au niveau mondial,
 - . évolution, là où elles existent, des normes vers une plus grande sévérité (demandant généralement davantage de métaux catalyseurs),
 - . extension des normes à davantage de pays, en particulier à la Chine, qui est devenu le premier marché automobile de la planète et qui met en place en 2013 des normes environnementales proches des normes européennes (norme de type Euro4 dans les grandes villes, et prévision de passer à Euro5 en 2015),
 - . extension des exigences antipollution aux engins de chantiers, engins agricoles et groupes électrogènes mobiles, en cours de mise en place ;
- facteurs tendant à diminuer la demande en platinoïdes :
 - . ralentissement de la construction automobile en période de crise (Europe en 2012-2013),

- . progrès technologiques qui peuvent conduire à une moindre consommation de platinoïdes à efficacité constante (nanostructures des monolithes),
- . taux éventuel futur de pénétration du véhicule électrique, qui n'a pas besoin de catalyse et n'a pas besoin de platinoïdes,
- . taux de récupération des platinoïdes par recyclage ;
- facteurs influençant le ratio Pt/Pd :
 - . ratio véhicules diesel/véhicules essence,
 - . prix relatifs du platine et du palladium.

Malgré la contraction du marché automobile en Europe (2012-2013), la poursuite de la pénétration de l'équipement automobile en Chine (marché intérieur passé de 3,97 millions de voitures en 2005 à 15,5 millions en 2012) et une relative reprise des ventes aux États-Unis et au Japon ont conduit le marché automobile mondial à poursuivre sa croissance, avec un record de 81,74 millions de véhicules vendus en 2012 (dont 60,49 millions de voitures et 21,25 millions de « véhicules commerciaux »), en augmentation de 4,9 % par rapport à 2011 et de 14,8 % par rapport à 2007, avant le début de la crise financière (source : OICA).

Le marché automobile chinois devrait poursuivre sa croissance, de même que les marchés d'autres pays émergents. Avec, parallèlement, une plus grande généralisation des normes de dépollution des gaz d'échappement, il est vraisemblable que la demande en platinoïdes en général augmentera à moyen terme.

Mais, à quelques exceptions près, ces marchés en développement sont souvent à dominante de motorisation à essence, donc la mise en place des normes de dépollution devrait davantage accroître la demande en palladium qu'en platine¹⁰.

Le marché des véhicules diesel concerne, au niveau des véhicules individuels, surtout l'Europe, où la demande a fléchi. De plus, les remises en cause récurrentes par les groupes de pression environnementalistes des faveurs sur la fiscalité du gazole sur les marchés européens en général et français en particulier, combinés aux besoins pressants de recettes fiscales additionnelles des pays européens, pourraient finir par infléchir la domination de ce type de motorisation, le plus consommateur de platine.

Parmi les pays émergents, l'Inde a eu aussi une politique fiscale favorable au diesel et a contribué à la demande en platine. Mais le marché est en ralentissement en 2013, et l'Inde pourrait ne pas maintenir sa subvention au diesel (Johnson Matthey, mai 2013).

Les motorisations diesel restent cependant largement dominantes pour les poids-lourds et autres véhicules commerciaux. La croissance du parc et l'accroissement de la sévérité des normes de dépollution, en Europe (norme Euro6) mais aussi désormais en Chine (norme China4 courant 2013) et ailleurs, devraient donc tirer la demande en platine vers le haut.

¹⁰ Mais si une trop forte tension sur le marché du palladium devait conduire son prix à augmenter plus vite que celui du platine ou même le dépasser, comme ce fut le cas en 2001, certains constructeurs pourraient à nouveau modifier les ratios Pt/Pd des catalyseurs essence en faveur du platine.

Tous facteurs confondus, Johnson Matthey (2013) prévoit donc plutôt globalement un maintien de la demande en platine pour la catalyse automobile, sans croissance notable dans l'immédiat.

3.1.2. La joaillerie

Le platine est apprécié en joaillerie pour sa beauté, son inaltérabilité et sa résistance au ternissement, sa malléabilité et sa dureté, bien supérieure à celle de l'or ou de l'argent (cf. tab. 1). Il est largement utilisé pour le montage des diamants et autres pierres précieuses, dont il met l'éclat en valeur (fig. 11).

Le platine utilisé en joaillerie a une pureté de 95 % en Europe, parfois seulement 85 % dans certains pays.



Figure 11 - Alliances de mariage en platine 95 %, en platine et diamant, en platine et or (© www.boutique-alliance.com). Bague émeraude et platine (© www.niederlander-joaillers.com).

Jusqu'à la fin des années 1990, le premier marché consommateur de platine pour la joaillerie était le Japon (fig. 12). Au niveau mondial, la demande avait régulièrement augmenté de 17,4 t en 1980 à 89,6 t en 1999, puis est restée étale entre 1999 et 2002. Elle a ensuite été progressivement divisée par 2 jusqu'à seulement 45,3 t en 2007, et ce probablement en raison d'un fort renchérissement du platine, passé de 540 US\$/oz en moyenne sur 2002 à 1 305 US\$/oz en moyenne sur 2007 et même 1 948 US\$/oz en moyenne sur le premier semestre 2008 (cf. 5.1).

La demande a parallèlement fortement augmenté en Chine, qui est devenu désormais le premier marché consommateur de platine pour joaillerie. Tirée par les marchés chinois et indien, lui aussi en croissance, la demande en platine de joaillerie a atteint en 2012, avec 86,5 t, un niveau proche de ses maxima de 1999-2000. La joaillerie a représenté 34,6 % de la demande globale en platine, en deuxième position des secteurs de consommation après la catalyse automobile.

Pour Johnson Matthey, la demande globale en platine pour la joaillerie devrait rester en 2013 à un niveau équivalent à celui de 2012, peut-être très légèrement inférieur.

Pour l'anecdote, même s'il s'agit d'une œuvre ponctuelle unique, on peut citer le crâne de platine serti de diamants réalisée par le sculpteur britannique Damien Hirst en 2007, avec 2,15 kg de platine et 8 601 diamants (fig. 13).

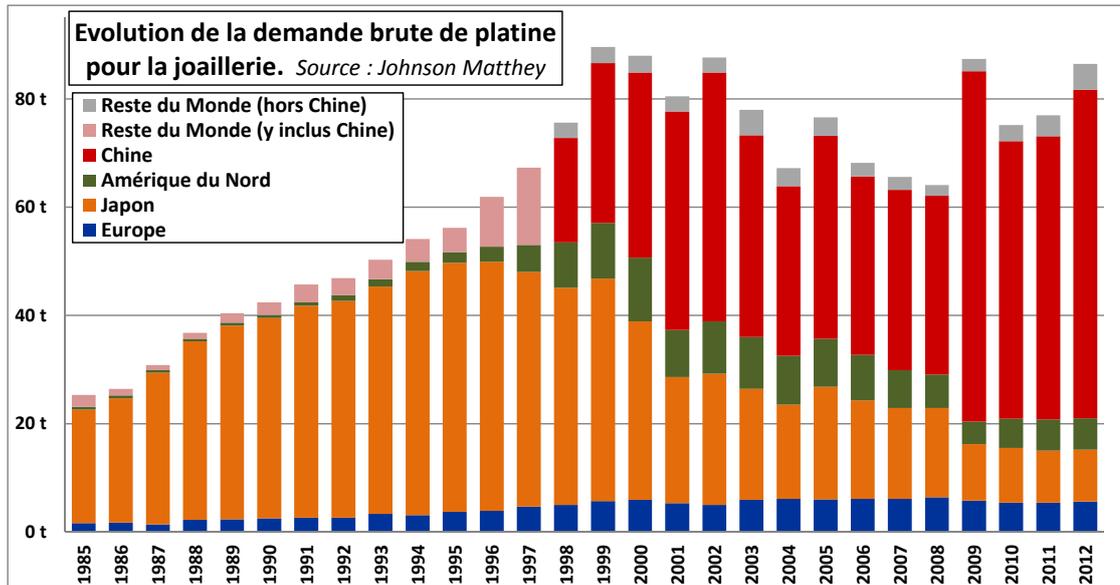


Figure 12 - Évolution de la demande brute de platine pour la joaillerie.



Figure 13 - L'œuvre « For the love of God » réalisée en 2007 par l'artiste britannique Damien Hirst avec 23,156 kg de platine et 8 601 diamants, en moulage d'un crâne humain du XVIII^e siècle dont il a conservé les véritables dents.

3.1.3. Les investissements et placements

Comme l'or et l'argent, le platine est une valeur matérielle tangible qui peut être achetée pour être stockée et thésaurisée dans la durée, le plus souvent sous forme de lingots et pièces.

Les monnaies de plusieurs pays frappent des pièces en platine à 99,85 % (« American Eagle » étatsunien, « Maple Leaf » canadien, « Koala » et « Platypus » australien, « Panda » chinois, « Noble » de l'Île de Man..., cf. fig. 14)

Certaines monnaies, des fondeurs et raffineurs et des banques produisent, poinçonnent et commercialisent aussi des lingots de platine pouvant aller de 1 g à 100 onces (fig. 15).



Figure 14 - Pièces d'une once de platine à 99,95 % des monnaies étatsunienne (« American Eagle », pile et face, © www.usmint.gov) et canadienne (« Maple Leaf », © www.mint.ca).



Figure 15 - Lingots de platine d'une once (© www.kitco.com).

Par ailleurs, des ETF sur le platine ont été lancés à partir de 2007.

Johnson Matthey évalue à 52 t la masse de platine accumulée dans les ETF à fin 2012, pour 2/3 en Europe et 1/3 en Amérique du Nord (fig. 16). À titre de comparaison, ceci représente quatre mois de consommation industrielle de platine (soit un tiers de la consommation de l'année 2012 abstraction faite de la joaillerie et des placements).

De son côté, le site « ETF Database » (<http://etfdb.com>) liste cinq ETF basés sur le platine physique échangeables aux États-Unis (tab.10), dont le plus important est le Physical Platinum Shares (PPLT) d'ETF Securities (www.etfsecurities.com) lancé en 2010, avec une valorisation totale de 920 MUS\$ au 23/05/2013.

Au cours récent de 1 456 US\$/oz en juin 2013, la valorisation globale de ces cinq ETF correspondrait à une masse de platine ainsi immobilisé d'environ 19,6 tonnes, ce qui couvrirait un peu plus du tiers de ce qu'enregistre Johnson Matthey mondialement.

La quantité de platine placée comme investissement (pièces, barres, lingots, ETF) était insignifiante jusqu'au début des années 1980, puis est devenue significative entre 1983 et 1999. La demande en platine pour placement s'est ensuite affaiblie dans la période 2000-2007 pendant laquelle les prix ont fortement augmenté, avec même deux années

de léger désinvestissement, en 2000 et 2006. À partir de 2008, elle est redevenue positive (14 à 20 t par an, cf. fig. 4 et 17).

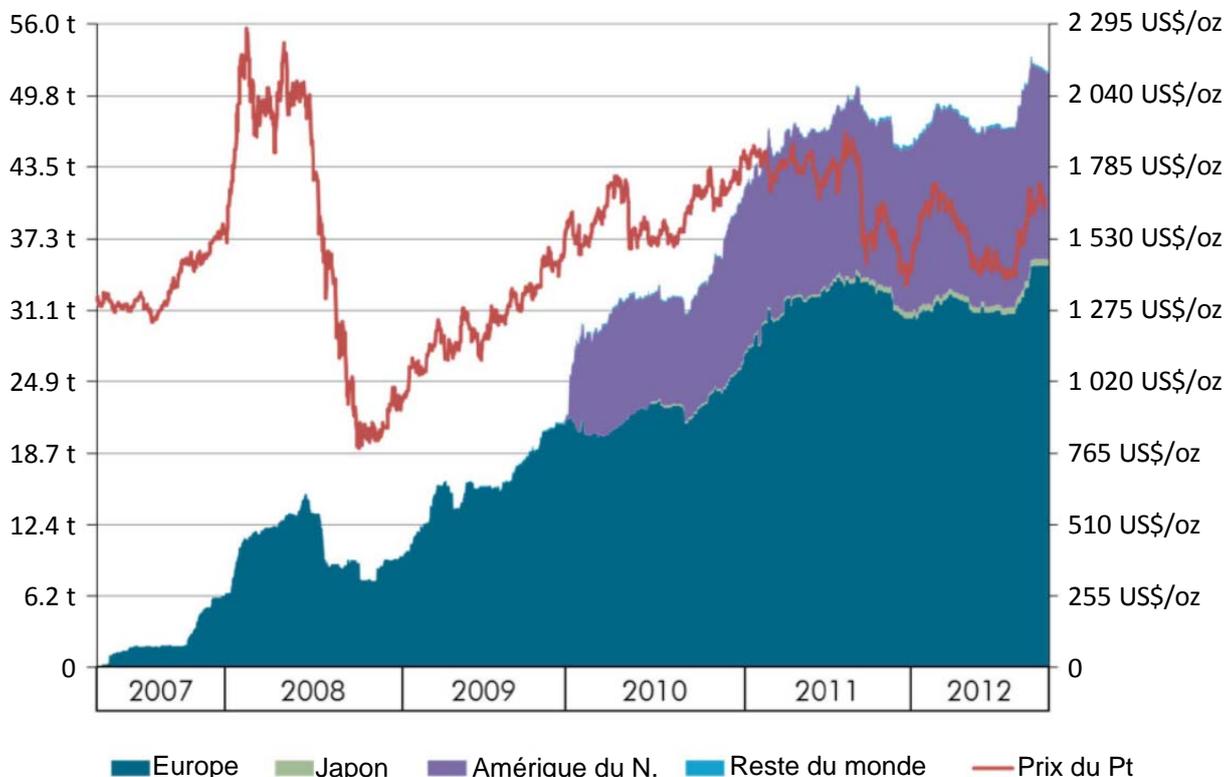


Figure 16 - Évolution des quantités cumulées de platine détenues par les ETF par ensembles géographiques depuis leur lancement en 2007. Adapté d'après Johnson Matthey, 2012.

Symbole	Nom	Prix de la part	Nbre de parts	Capitalisation totale
PPLT	ETFS Physical Platinum Shares	134.77 US\$	6.42 M	865.12 MUS\$
PTM	UBS E-TRACS CMCI Long Platinum Total Return ETN	15.50 US\$	2.00 M	31.00 MUS\$
PGM	iPath Dow Jones-AIG Platinum Total Return Sub-Index ETN	30.65 US\$	0.62 M	18.92 MUS\$
IPLT	VelocityShares 2x Inverse Platinum ETN	42.71 US\$	0.07 M	3.16 MUS\$
LPLT	VelocityShares 2x Long Platinum ETN	33.54 US\$	0.07 M	2.36 MUS\$
	Total			920.56 MUS\$

Tableau 10 - ETF basés sur le platine listés par ETF Database, données au 24/06/2013 (source: <http://etfdb.com>).

Ce secteur pourrait, matériellement, avoir un rôle d'ajustement et d'équilibrage du marché industriel du platine : en cas de pénurie de platine physique pour l'industrie et de la montée du prix qui s'ensuivrait, certains détenteurs auraient pu être amenés à revendre leur stock. En pratique, on observe aussi l'inverse (spéculation), avec des achats de platine pour investissement en période de montée des prix et des reventes en période de baisse, d'où un effet classique d'accroissement des mouvements de prix et de « bulles ».

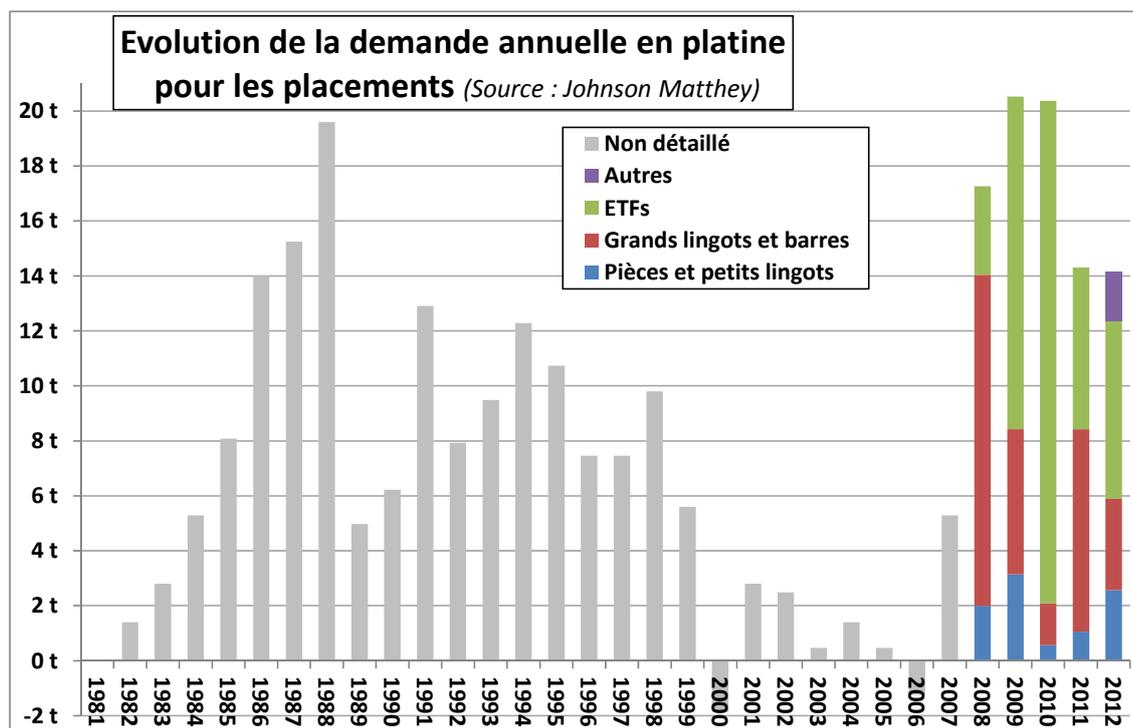


Figure 17 - Évolution de la demande en platine pour placements (source : Johnson Matthey).

3.1.4. Industries chimiques et pétrolières

Le platine est utilisé comme catalyseur dans diverses branches de l'industrie chimique.

Une de ses utilisations majeures est, sous forme de toile de platine ou de platine rhodié, la fabrication de l'acide nitrique par oxydation de l'ammoniac¹¹. L'industrie mondiale produit de l'ordre de 60 Mt d'acide nitrique par an (dont 6,5 Mt en France, selon la Société Chimique de France, 2012), dont les trois quarts sont utilisés pour la production d'engrais (nitrates), et une autre part importante pour la fabrication des explosifs, en particulier pour les applications militaires (poudre à canon, nitroglycérine et dynamite, TNT, penthrite et semtex, etc.).

Le platine est utilisé, en association avec des aluminosilicates et zéolites, pour le craquage catalytique du pétrole (conversion d'hydrocarbures lourds en molécules plus légères). Il est aussi utilisé dans l'industrie pétrochimique pour la production des composés intermédiaires à la fabrication de plastiques, de caoutchouc synthétique, de polyester, etc.

¹¹ L'ammoniac, quant à lui, est produit en grande quantité (production mondiale de 137 Mt en 2012, selon l'USGS) par le procédé Haber-Bosch à partir du méthane et de l'azote atmosphérique, mais le catalyseur utilisé par ce procédé est à base de fer et de potasse et ne requiert pas de platinoïdes.

Il est utilisé comme catalyseur pour diverses autres synthèses, comme la synthèse du paraxylène, produit intermédiaire à la production du téréphtalate de polyéthylène (PET) utilisé en particulier pour les bouteilles de boisson.

Le platine est aussi utilisé, sous forme de composés, comme catalyseur pour la vulcanisation des silicones élastomères bicomposants vulcanisables à froid (« RTV silicones » ou « Room-Temperature Vulcanizing Silicones », « platinum-cured silicones »), de plus en plus largement utilisés dans de nombreux domaines.

Ces produits sont préparés en mélangeant un silicone élastomère et quelques pourcents d'agent vulcanisant (« curing agent ») contenant le catalyseur induisant une réaction dite d'hydrosilylation. Divers catalyseurs au platine peuvent être utilisés, comme le « Speiers's catalyst », qui est l'acide chloroplatinique (H_2PtCl_4), avec une consommation de platine < 50 $\mu\text{g/g}$ de silicone (Brook, 2006), ou le « Karstedt's catalyst » ($\text{Pt}(\text{CH}_3)_2(\text{H}_2\text{C}=\text{CH})\text{SiOSi}(\text{CH}=\text{CH}_2)(\text{CH}_3)_2$), un complexe organométallique où le platine est à l'état d'oxydation 0.

La biocompatibilité du platine permet en particulier l'utilisation de tels silicones dans le domaine médical, pour des prothèses (dentiers, implants¹², etc.), pour des dispositifs jetables à usage unique (tubes, etc., fig. 18) et autres.

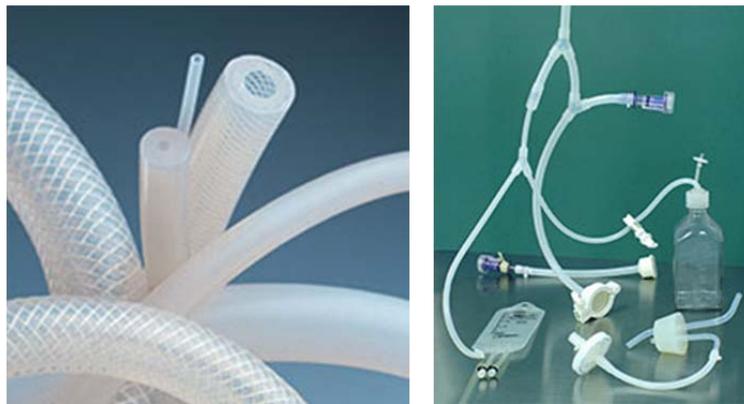


Figure 18 - Tubes médicaux à usage unique en silicones vulcanisés au platine
(© www.advantapure.com).

Contrairement aux usages du platine dans la catalyse automobile, la production d'acide nitrique ou le craquage pétrolier où le platine est utilisé mais n'est pas consommé (il garde ses propriétés catalytiques et sert en continu dans les réactions, seul un très faible pourcentage est perdu par usure), dans ces productions de silicones, une partie du catalyseur est incorporée au produit final et est donc

¹² Selon Brook (2006), les silicones des enveloppes d'implants mammaires, par exemple, contiennent de l'ordre de 6 à 8 μg de platine par g de silicone, et le gel de remplissage jusqu'à 5 $\mu\text{g/g}$ (teneurs variables selon les fabricants). Ainsi, une paire d'implants (volumes individuels allant de 80 à 800 cm^3 , avec une enveloppe représentant 2 à 15 % de la masse totale), contiendra une quantité de platine comprise entre 0,1 et 10 mg de platine. Cela représente des teneurs en platine équivalente ou supérieures à celles des minerais en exploitation (souvent inférieures à 5 g/t, c'est-à-dire à 5 $\mu\text{g/g}$).

« consommé ». Il ne pourrait être récupéré que par un recyclage des produits en fin de vie, qui n'est pas documenté.

D'après Johnson Matthey (2013), la filière des silicones représente la plus forte demande en platine de l'industrie chimique.

Dans le secteur de la chimie, le platine est aussi utilisé en laboratoire pour des creusets destinés à des fusions à haute température (fig. 19)¹³, pour des ustensiles de manipulation, et, à échelle industrielle, comme creusets pour la fabrication de monocristaux de semi-conducteurs.



Figure 19 - Creuset de laboratoire en platine (Laboratoire du BRGM).

La demande mondiale en platine pour l'industrie chimique¹⁴ a été de 20,2 t en 2012, dont 14 t pour les industries chimiques non-pétrolières et 6,2 t dans l'industrie pétrolière (raffinage et pétrochimie), en léger fléchissement par rapport à 2011, année qui avait connu un pic historique de la demande pour l'industrie chimique non-pétrolière (14,3 t) et un deuxième plus haut historique pour le secteur pétrolier (6,5 t en 2011, le maximum ayant été de 7,5 t en 2008) (Johnson Matthey, mai 2013).

Sur les trente dernières années, ces consommations ont été assez fluctuantes (fig. 4 et 20) :

- pour le secteur non-pétrolier, la consommation de platine a été de l'ordre de 10 t/an à la fin des années 1970, abaissée à 5 à 9 t/an entre 1980 et 1998, remontée à 10 t/an entre 1999 et 2005, puis à 12 à 14 t depuis lors (excepté le creux de 2009) ;
- pour le secteur pétrolier, elle a été de 4 à 5 t/an à la fin des années 1970 jusqu'à 1981, puis de moins de 3 t/an jusqu'en 1989, pour remonter ensuite progressivement et dépasser les 5 t/an à partir de 2005.

¹³ Par exemple pour la fusion des perles destinées aux analyses par fluorescence X, comme dans le laboratoire du BRGM à Orléans.

¹⁴ Johnson Matthey, qui publie les données de consommation de platine, ne précise pas si ses données « industrie chimique » concernent à la fois la catalyse industrielle et les ustensiles de laboratoire, ou si ces ustensiles de laboratoires sont comptabilisés dans la rubrique « autres ».

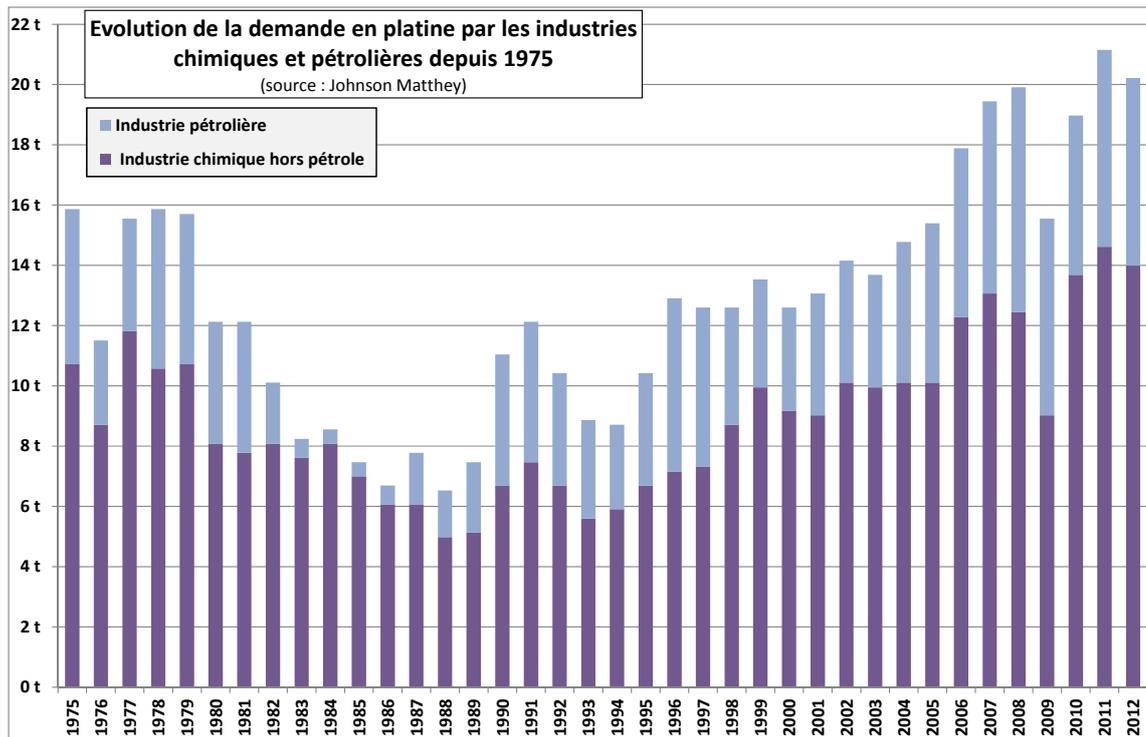


Figure 20 - Évolution de la demande en platine dans les filières des industries chimiques et pétrolières.

Mais vu la part relativement mineure des consommations de platine dans ces industries, ces fluctuations influent peu sur l'évolution de la demande totale, bien davantage impactée par les fluctuations de demande en catalyse automobile, joaillerie et même placements (fig. 4).

Johnson Matthey s'attend à ce que la consommation de platine par les industries chimiques évolue peu dans les prochaines années.

3.1.5. Verrerie

Grace à son point de fusion bien supérieur à celui du verre, à son inertie chimique et à sa résistance à l'abrasion par le verre fondu, le platine, ou du platine rhodié, est utilisé dans les filières de formage du verre fondu, en particulier pour la production de la fibre de verre, de fibres optiques, et pour la production des écrans plats.

Pour la production de la fibre de verre, à la sortie du four, le verre fondu alimente une filière en platine percée de trous de 1 à 2 mm de diamètre. Les gouttes de verre visqueux qui en sortent, maintenues à 1 250 °C, sont étirées pour former des filaments minuscules, de 5 à 13 µm de diamètre (www.verreonline.fr).

La demande en platine dans le secteur verrier est restée inférieure à 9 t/an jusqu'en 2004, puis s'est accrue au-dessus de 11 t/an à partir de 2005 (avec une baisse temporaire en 2008-2009) pour atteindre un pic de 16 t en 2011, avec la construction

des capacités de production d'écrans plats, qui ont progressivement remplacé les tubes cathodiques pour les écrans d'affichage (téléviseurs, moniteurs d'ordinateurs et autres) dans l'intervalle 2004-2008.

En verrerie, le platine n'est pas vraiment consommé, il n'est pas intégré dans les produits finis. Il équipe les capacités de production, et la demande additionnelle est surtout nécessaire pour accroître les capacités de production de produits verriers.

La demande a diminué à 5,6 t en 2012, une baisse en partie liée à une maturité atteinte par les capacités de production d'écrans plats. Johnson Matthey s'attend à un possible sursaut ponctuel de la demande de platine dans ce secteur en 2013 mais à une saturation du marché ensuite (Johnson Matthey, mai 2013).

3.1.6. Industries électrique et électronique

Le platine est un important composant du revêtement magnétique des disques durs d'ordinateurs. La demande correspondante a connu un palier haut (9 à 11 t/an) entre 1999 et 2006¹⁵, puis a fléchi ensuite jusqu'à seulement 5,1 t en 2012. Ce fléchissement est lié d'une part à la miniaturisation de plus en plus poussée des disques durs, et d'autre part au basculement d'une partie du marché des ordinateurs personnels vers des tablettes dépourvues de disques durs et une migration d'une partie des capacités de stockage de mémoire sur des mémoires flash qui n'utilisent pas de platine. À l'inverse, les volumes croissants de données et de fichiers à stocker conduisent les entreprises à accroître leur capacité de stockage de leurs serveurs sur des disques durs de très grande capacité.

Johnson Matthey (mai 2013) s'attend donc à une reprise dans la production de disques durs en 2013, et de la demande en platine correspondante.

Le platine est utilisé, avec le rhodium, dans des thermocouples (couple platine – platine rhodié) servant à mesurer les hautes températures dans les fours industriels, en verrerie, sidérurgie, fonderie, production de semi-conducteurs, et en laboratoire.

Le platine est utilisé comme électrode pour certaines applications électrochimiques. En particulier, son coefficient de dilatation proche des verres calcosodiques permet de l'utiliser comme électrode scellée dans le verre.

3.1.7. Usages médicaux

Le cisplatine ($\text{Pt}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$, ou cis-diaminedichloroplatine) et le carboplatine ($\text{Pt}(\text{NH}_3)_2\text{O}_4\text{C}_6\text{H}_6$, diamine-cyclobutane-dicarboxylatoplatine) sont certaines des substances les plus efficaces dans le traitement de certains cancers.

¹⁵ Selon Johnson Matthey (2003), 90 % des disques durs fabriqués en 2001 contenaient du platine, contre seulement 50 % en 1997.

Le « Vidal » (www.vidal.fr) fournit les précisions suivantes :

« Le cisplatine est un antinéoplasique cytostatique. Son mécanisme d'action est similaire à celui des alkylants. Il se lie avec l'ADN dont il inhibe la synthèse des ponts inter et intracaténaux. L'inhibition des synthèses de l'ARN et des protéines cellulaires n'intervient que secondairement. Le cisplatine est utilisé dans la prise en charge des cancers de l'endomètre, de l'œsophage, de l'ovaire, de la vessie, du col de l'utérus, du testicule, des cancers épidermoïdes et otorhinolaryngologiques. »

« Le carboplatine est un cytostatique dont les propriétés biochimiques sont similaires à celles du cisplatine. Le carboplatine se fixe sur la molécule d'ADN en produisant des liaisons alkyles responsables de la formation de ponts entre les deux chaînes de la molécule ou entre les chaînes de deux molécules d'ADN adjacentes. La synthèse par réplication et la séparation ultérieure de l'ADN sont ainsi inhibées, de même que, secondairement, les synthèses de l'ARN et des protéines cellulaires. Le carboplatine est utilisé dans la prise en charge des cancers bronchopulmonaires à petites cellules, des cancers de l'ovaire, des cancers otorhinolaryngologiques. »

Par ailleurs, un alliage platine 90 % - osmium 10 % est utilisé pour réaliser divers implants comme des stimulateurs cardiaques ou des valvules cardiaques artificielles.

Un peu de platine est utilisé, le plus souvent en composant minoritaire avec le palladium ou l'or (or platiné), pour des couronnes et prothèses dentaires.

3.1.8. Les piles à combustible

Les piles à combustible (« Fuel cells » en anglais) sont des dispositifs qui génèrent un courant électrique par l'oxydation lente de l'hydrogène. Elles peuvent fonctionner soit avec du dihydrogène (H₂), auquel cas elles ne rejettent que de l'eau, soit du méthanol (CH₃OH) ou même d'autres hydrocarbures, auquel cas elles rejettent aussi du CO₂, voire du CO.

L'effet pile à combustible est l'inverse de l'électrolyse de l'eau. Il est connu depuis 1839, mais son développement industriel ou commercial, au-delà des laboratoires de recherche et développement (R&D) et de quelques applications spatiales et militaires, n'a commencé à émerger qu'à partir de 2007.

Les technologies actuelles de piles à combustibles sont principalement de six types (Carter *et al.*, Fuel Cell Today, 2012).

- **Certaines fonctionnent à haute température**

- Les piles à combustibles à oxydes solides (« Solide Oxide Fuel Cells », ou SOFC), qui fonctionnent à 700° à 1 000 °C.
- Les piles à combustible à carbonate fondu (« Molten Carbonate Fuel Cells », ou MCFC), qui fonctionnent à 600 °C.

Ces technologies n'utilisent pas de platine, et certaines sont conçues pour fonctionner avec des hydrocarbures. Elles commencent à se répandre néanmoins pour des unités

fixes de sécurité de production électrique, comme par exemple les alimentations de secours des gros « data centers ». Elles sont en revanche inadaptées à des unités portables (ordinateurs, etc.), et pour l'instant mal adaptées à des unités mobiles (véhicules), mais la R&D pour ce secteur se poursuit.

D'autres technologies fonctionnent à moindre température et utilisent du platine comme catalyseur. Les trois premières utilisent de l'hydrogène, la dernière directement du méthanol :

- les piles à combustible alcalines (« Alkaline Fuel Cells », ou AFC), les premières utilisées, en particulier dans le domaine spatial depuis les années 1960 (missions Apollo, navettes spatiales, etc.) ;
- les piles à combustibles à membrane échangeuse de proton (« Proton Exchange Membrane Fuel Cells »). C'est surtout cette technologie qui est développée pour les véhicules électriques ;
- les piles à combustible à acide phosphorique (« Phosphoric Acid Fuel Cells », ou PAFC) ;
- les piles à combustibles à méthanol direct (« Direct Methanol Fuel Cells », ou DMFC). Elles nécessitent une alimentation en méthanol infiniment plus facilement conditionnable et transportable que l'hydrogène. Dans l'état actuel de leur développement, elles sont peu puissantes (donc inadaptées aux véhicules électriques, par exemple), mais peuvent délivrer une faible puissance sur une grande durée et peuvent être particulièrement adaptées à des unités de génération électrique pour des appareils portables comme des ordinateurs, téléphones ou tablettes.

Même si le dispositif lui-même a un excellent rendement énergétique (conversion de l'énergie chimique en énergie électrique), les piles à combustibles au dihydrogène sont pénalisées par le coût énergétique de la production de dihydrogène et de son stockage (compression, ou absorption dans un métal ou composé métallique). Au final, le rendement énergétique global reste moyen.

Les véhicules FCEV

La technologie des véhicules électriques à pile à combustible (« Fuel Cell Electric Vehicle », FCEV) commence à être au point, mais elle reste très chère, et, pour le grand public, elle reste dissuasive par la grande rareté des stations-service équipées pour livrer de l'hydrogène. En pratique, seules de petites flottes tests de voitures personnelles ont été mises en circulation, en particulier au Japon et en Californie où ont été implantées les premières stations-service de distribution d'hydrogène.

Ainsi la première voiture à pile à combustible mise en circulation a été la Honda FCX Clarity (fig. 21), à partir de 2008, uniquement au Japon et en Californie, en une série de démonstration limitée à 200 exemplaires. Mercedes-Benz a suivi avec quelques dizaines de véhicules Classe A, puis Classe B F-Cell mis en circulation pour tests à partir de 2010.



Figure 21 - La Honda FCX Clarity à pile à combustible à hydrogène (images <http://blogautomobile.fr>).



Figure 22 - Prototypes de véhicules électriques à pile à combustible Peugeot (Partner H2Origin) et Renault (Scenic ZEV H2). © <http://hydrogen-motors.com>.

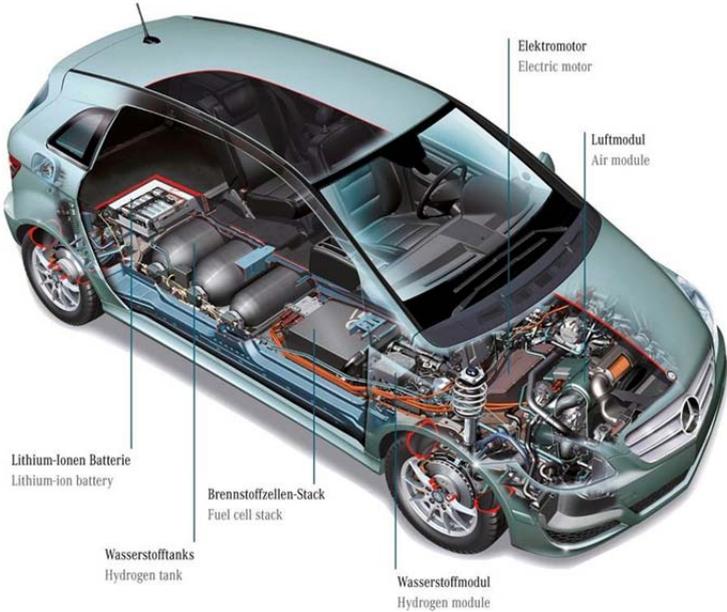


Figure 23 - Écorché de la Mercedes Classe B F-Cell (www.mercedes-benz.fr, 2013).

Nombre d'autres constructeurs automobiles ont aussi conçu et fabriqué des prototypes de véhicules électriques à pile à combustible, comme Peugeot avec son Partner H2Origin ou Renault avec son Scenic ZEV H2, tous deux présentés en 2008, mais, semble-t-il, restés sans suite.

Le coût des voitures électriques à piles à combustible reste encore très élevé¹⁶. Leur autonomie pratique reste encore un peu inférieure à celle des véhicules à carburant classique, en raison de la quantité d'hydrogène transportable limitée par les caractéristiques des réservoirs à hydrogène (épaisseur, résistance, masse). Leur autonomie est néanmoins bien meilleure que celle des véhicules électriques sur batterie actuels. La technologie des piles à combustibles a de bonnes chances de compléter ou de se substituer à l'offre des voitures électriques sur batteries à moyen terme (au-delà de 2030 ?), au moins pour les véhicules routiers, pour les longs déplacements. En effet les FCEV devraient atteindre les 600 km d'autonomie et peuvent refaire le plein d'hydrogène en quelques minutes, alors que les véhicules électriques sur batteries peinent à atteindre les 200 km d'autonomie et nécessitent souvent plusieurs heures de recharge. Ces derniers sont donc plutôt adaptés aux déplacements urbains.

Le développement des FCEV nécessitera d'être accompagné par une plus grande diffusion de stations-service équipées pour livrer de l'hydrogène. Fin 2011, il y avait 215 stations permettant de faire le plein d'hydrogène dans monde, 85 en Europe, 80 en Amérique du Nord, 47 en Asie-Pacifique et 3 dans le reste du monde (Carter *et al.*, 2012). Plus d'une dizaine de stations existent en Allemagne, mais aucune en France.

Début juin 2013, la ville de Copenhague a inauguré la première station-service à hydrogène du Danemark, et à cette occasion, le constructeur automobile sud-coréen Hyundai a livré à la ville 15 exemplaires de sa voiture à pile à combustible ix3.5 Fuel Cell (fig. 24), dont elle espère construire un millier d'exemplaires d'ici 2015. Le constructeur en annonce une autonomie de 594 km.



Figure 24 - La Hyundai ix35 Fuel Cell à Copenhague en juin 2013 (© www.hyundai.ch).

¹⁶ Copeland (2009) mentionne un coût de fabrication de la Honda FCX Clarity estimé à 300 000 US\$.

Le 6 décembre 2013, la société Air Liquide a annoncé avoir réceptionné, sur son site de Sassenage (38), les deux premières voitures électriques à pile à combustible à hydrogène immatriculées en France, des Hyundai ix35.

En raison de la rareté des stations à hydrogène, la technologie des piles à combustible émerge actuellement plus facilement pour des véhicules à trajets répétitifs, comme les bus ou les taxis, qui peuvent disposer de leur propre station de réapprovisionnement en hydrogène. Mais, il n'en existe encore que quelques flottes test (fig. 25).



Figure 25 - Bus à pile à combustible en usage pilote dans le Connecticut (© www.chfcc.org).

En juin 2013, l'Institut Technologique de Karlsruhe (Allemagne) s'est équipé de bus navettes Mercedes-Benz Citaro à pile à hydrogène, avec une station-service à hydrogène sur place.

Des prototypes de vélos et de motos électriques à pile à combustible ont aussi été testés ces dernières années.

Selon Carter *et al.* (2012), les livraisons mondiales de véhicules électriques à piles à combustibles (y compris les bus) auraient été de 2 600 unités en 2010, 1 600 en 2011, et étaient estimées à 3 000 en 2012. Il s'agit donc encore d'un marché de niche.

Autres secteurs de développement des piles à combustibles à catalyseur platine

Au-delà du secteur du transport, de nombreuses autres applications de la pile à combustible de basse température à catalyseur de platine sont testées et commencent à se commercialiser. Quelques exemples sont cités et illustrés ci-après :

Divers constructeurs japonais ou coréens ont présenté depuis une dizaine d'année des prototypes d'ordinateurs portables à alimentation par DMFC, mais sans commercialisation (NEC, Casio, Fujitsu, Samsung) (fig. 26).



Figure 26 - Prototype d'ordinateur portable à pile à combustible présenté par Casio en 2002 (© www.casio.com).

Toshiba (Japon) a lancé en octobre 2009 au Japon une petite pile à combustible portable de 2 W à méthanol direct (DMFC) en 2009 (Dynario®), capable d'alimenter ou recharger un ordinateur portable. Elle n'a été commercialisée qu'au Japon et reste chère¹⁷ pour une diffusion de masse.

La société allemande SFC-Energy AG construit et commercialise des générateurs électriques à pile à combustible à méthanol de quelques dizaines à quelques centaines de watts (Efoy®) pour les loisirs (camping-cars, caravanes, bateaux de plaisance, etc.), encore relativement chers. La société française Axane, filiale d'Air Liquide, fabrique et commercialise des générateurs à pile à combustible à hydrogène de 500 W (CommPac500®) à quelques kW (fig. 27).



Figure 27 - Générateurs à piles à combustibles.

De gauche à droite : Générateur miniature à méthanol Dynario® de Toshiba (©www.toshiba.co.jp).

Générateur à méthanol Efoy® de SFC AG (©www.efoy.com).

Générateur à hydrogène CommPac500® d'Axane (©www.airliquide-hydrogen-energy.com).

¹⁷ Le communiqué de presse de Toshiba d'octobre 2009 citait un prix de vente de 29 800 JPY, soit environ 230 €

La société étatsunienne Plug Power construit et commercialise des chariots élévateurs à pile à combustible à hydrogène « GenDrive »[®], commercialisés en Europe par HyPulsion (partenariat avec le français Axane), qui permettent de manipuler des charges dans des entrepôts fermés sans pollution.

Toutes ces applications industrielles et commerciales émergentes des piles à combustibles (véhicules et autres) restent encore limitées, avec une demande en platine marginale, qui n'est pas quantifiée dans les études disponibles (Johnson Matthey, etc.). Cette consommation reste comptabilisée dans « Autres » (cf. fig. 2, 3 et 4).

Certains des problèmes qui préviennent une industrialisation et une diffusion en masse de ces équipements se résolvent progressivement (durée de vie des membranes catalytiques au platine, diminution de la quantité de platine par une diminution de la granulométrie ou des recherches sur des alliages permettant de substituer une partie du platine, seuil de production permettant de réduire les coûts de fabrication par effet de masse). Mais l'équipement de davantage de stations-service pour la distribution d'hydrogène, qui ne pourra se faire que très progressivement, restera encore un certain temps un fort obstacle qui continuera à limiter la diffusion des véhicules électriques à pile à combustible.

Dans leur ouvrage « Rohstoffe für Zukunftstechnologien » (Les matières premières pour les technologies du futur) de février 2009, Angerer *et al.*, des Instituts de recherche allemands Fraunhofer, prévoyaient une demande en platine pour les piles à combustibles de 344 t/an en 2030, alors que ce secteur en requérait des quantités infinitésimales en 2006.

Suivant cette projection, cette seule filière de la pile à combustible demanderait en 2030 1,4 fois la demande totale de platine de 2012 (250 t). Même si les véhicules à pile à combustible et autres voitures électriques devaient faire disparaître les véhicules diesel et la demande en platine correspondante pour la catalyse des gaz d'échappements (~100 t/an en 2012), on voit que le besoin en platine s'accroîtrait fortement, et que la filière pile à combustible deviendrait très vraisemblablement le premier secteur utilisateur de platine. **Le développement ou non de la pile à combustible de basse température pour les équipements non-fixes est donc un enjeu crucial pour l'équilibre offre-demande du marché du platine.** Et inversement, des ressources en platine suffisantes seront cruciales pour soutenir un développement de cette filière, sauf substitution que permettrait une rupture technologique encore purement hypothétique.

Selon toute vraisemblance, le calendrier de développement des piles à combustible et des besoins en platine correspondant anticipé par Angerer *et al.* en 2009 prendra du retard et sera encore décalé dans le temps.

La quantité de platine nécessaire par voiture évolue avec les progrès technologiques. Elle serait passée d'une centaine de grammes dans les premiers prototypes (Wilburn & Bleiwas, 2004) à une trentaine de grammes actuellement (Hocquard, 2013, communication orale), et des efforts de R&D se poursuivent pour essayer d'aboutir à seulement une quinzaine de grammes, soit encore 5 à 6 fois plus que la quantité de platine nécessaire pour un pot catalytique diesel moyen actuel.

On peut probablement atténuer ou retarder la prévision de hausse à 344 t en 2030 d'Angerer *et al.* : en prenant l'hypothèse, pour 2030, de 20 g de platine par voiture et de 10 millions de voitures à piles à combustibles produites, la demande serait de 200 t de platine. Cela étant, même en retardant l'échéance, il est vraisemblable que, sauf rupture technologique majeure changeant complètement la donne énergétique ou sauf catastrophe économique globale, les véhicules électriques à pile à combustibles commenceront à prendre des parts significatives du marché au-delà de 2030, et cette filière deviendrait alors progressivement la principale consommatrice de platine.

3.1.9. Autres usages

Le platine est utilisé pour revêtir les embouts des électrodes des bougies d'allumage des véhicules à essence. Cet usage est assez généralisé en Amérique du Nord et se répand en Europe, en particulier pour les véhicules haut de gamme (meilleure durabilité).

Il peut être utilisé pour des revêtements de protection de pièces devant résister aux hautes températures, par exemple sous forme d'aluminure de platine (composé intermétallique Al-Pt) pour recouvrir les superalliages des pales de turbines de réacteurs (revêtements de quelques microns, par électrodéposition), ou encore le nez de missiles.

Le platine est aussi utilisé pour d'autres pièces de réacteurs d'avion comme les buses d'injection de carburant.

Des catalyseurs au platine avec éventuellement de l'iridium sont utilisés pour améliorer l'efficacité de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau lorsque le dispositif est alimenté par une source d'énergie électrique irrégulière et intermittente, par exemple pour stocker sous forme d'hydrogène les surplus d'énergie produits épisodiquement par les éoliennes et le photovoltaïque (CEA-Saclay, 2012). L'hydrogène produit sert ensuite à alimenter une pile à combustible dans les périodes de besoins complémentaires.

3.2. USAGES DU PALLADIUM

Comme le platine, le palladium est largement utilisé pour ses propriétés catalytiques : pots catalytiques automobiles, catalyses industrielles dans l'industrie chimique : production des molécules de bases à divers polymères (acide téréphtalique, acétate de vinyle...), réduction d'émissions nocives de certaines usines. Il est aussi utilisé pour ses propriétés d'inaltérabilité (prothèses dentaires, bijouterie, thésaurisation). Par ailleurs, il est utilisé dans l'électronique, en particulier pour des condensateurs céramiques multicouches. En 2012, la répartition de la demande de palladium était la suivante (fig. 28) (Johnson Matthey, 2013) :

- catalyseurs des pots catalytiques pour l'automobile : 66,9 % ;
- industrie électrique et électronique : 12,1 % ;
- dentaire : 5,4 % ;

- industrie chimique : 5,4 % ;
- investissements : 4,7% ;
- bijouterie - joaillerie : 4,5 % ;
- divers : 1,1% ;

pour une demande totale (brute) mondiale de palladium estimée à 307,8 t Pd en 2012 (dont 195,8 t issues de la production minière, 70,9 t issues du recyclage, 7,8 t des ventes de stocks russes et 33,3 t du déstockage, cf. 4.3.1 et 4.7.1).

La répartition de la demande est moins variable que celle du platine selon les ensembles économiques géographiques. La demande pour la catalyse automobile représente partout l'usage majoritaire, avec partout largement plus de 50 % de la consommation. Pour les usages secondaires en revanche, la répartition est plus variable : la joaillerie et l'industrie chimique dominant en Chine, alors que ce sont plutôt les usages électriques et électroniques ainsi que les investissements qui dominent en Europe (fig. 29), et le dentaire, avec les usages électriques et électroniques, qui dominent au Japon.

Cette répartition par filière a aussi évolué dans le temps au cours de ces dernières décennies, puisque par exemple la consommation pour la catalyse automobile ne représentait que 8 à 9 % de la consommation totale de palladium dans les années 1986 à 1991. Elle est montée progressivement jusqu'à 72 % en 2001. Cette proportion croissante a surtout été due à une forte augmentation de la demande, en valeur absolue, pour la catalyse automobile (passée de 30 t en 1994 à 175 t en 2000), laquelle a initié une hausse fulgurante du prix du palladium (cf. 5.1). Cette hausse des prix a conduit à la recherche de solutions alternatives et à une forte chute de la demande en 2002, progressivement rattrapée depuis lors (fig. 30).

Répartition des usages mondiaux du palladium en 2012

(source : Johnson Matthey, 2013)

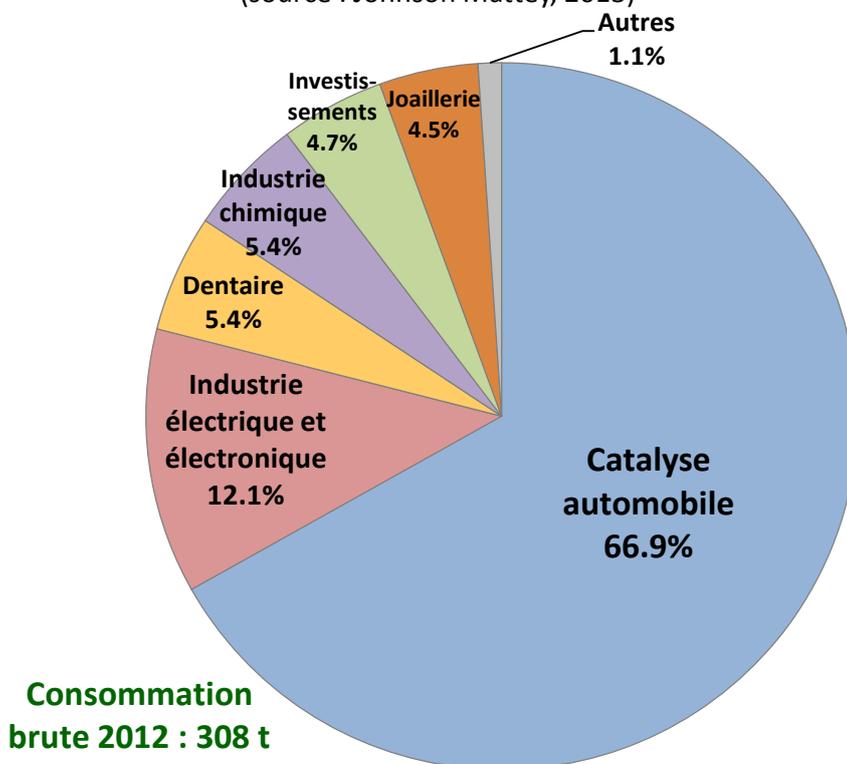
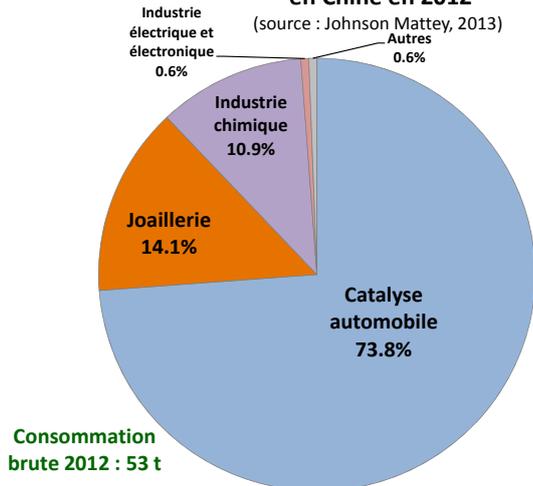


Figure 28 - Répartition des usages du palladium par filières dans le monde en 2012 (source : Johnson Matthey, 2013).

Répartition des usages du palladium en Chine en 2012

(source : Johnson Matthey, 2013)



Répartition des usages du palladium en Europe en 2012

(source : Johnson Matthey, 2013)

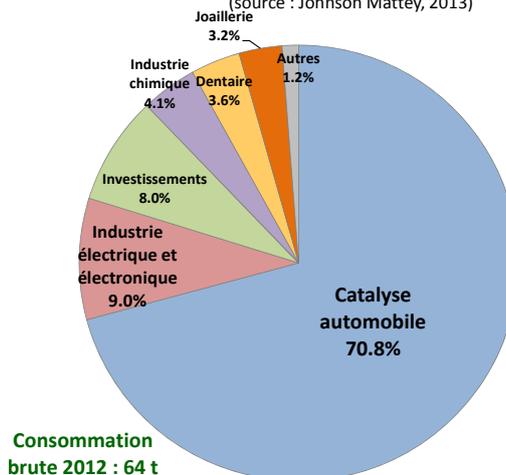


Figure 29 - Répartition des usages du palladium par filières en Chine (à gauche) et en Europe (à droite) en 2012 (source : Johnson Matthey, 2013).

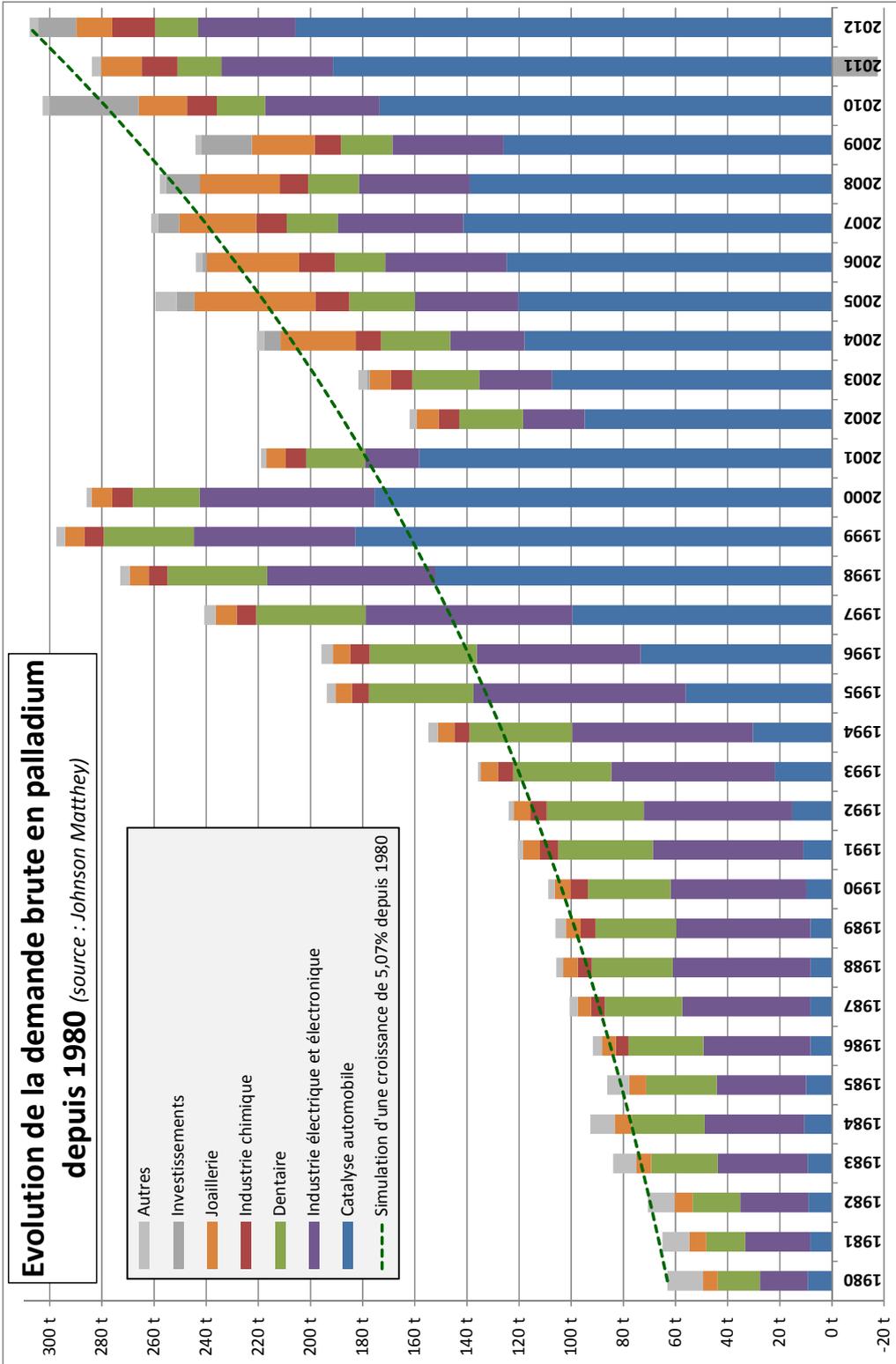


Figure 30 - Évolution de la demande brute en palladium par filières depuis 1980 (source : Johnson Matthey).

3.2.1. Les catalyseurs automobiles

Se reporter à la section 3.1.1 pour les généralités sur les pots catalytiques.

Comme déjà mentionné en 3.1.1., les proportions d'utilisation du platine et du palladium dans les divers pots catalytiques ont fluctué en fonction des évolutions technologiques, des exigences réglementaires et des prix relatifs de l'un et l'autre métal. Actuellement, dans les pays à économie mature, l'usage du palladium domine pour les pots catalytiques des moteurs à essence, et le platine pour ceux des moteurs diesel. Le palladium est préféré pour les moteurs à essence entre autres parce qu'il est moins cher actuellement. Mais dans certains pays émergents où la qualité de l'essence est variable et parfois trop soufrée, le platine reste utilisé dans les moteurs à essence en raison de sa meilleure tolérance au soufre.

Au niveau mondial, en 2012, 88 % du palladium utilisé pour les pots catalytiques l'était pour des véhicules à essence, et 12 % pour des véhicules diesel (fig. 33).

Selon Johnson Matthey (mai 2013), la consommation totale de palladium pour la catalyse automobile a été de 205,7 t en 2012. Cette consommation a augmenté de 7,4 % par rapport à 2011 (191,4 t) et a atteint un record jamais atteint auparavant (fig. 31).

Historiquement, avec l'émergence et le développement des normes de dépollution, la demande en palladium pour la catalyse automobile avait été multipliée brutalement par 16 en 8 ans, entre 1991 (11 t) et 1999 (182,9 t). Une telle hausse avait conduit à une flambée du prix (passé de 89 US\$/oz en moyenne en 1992 à 682 US\$/oz en moyenne en 2000, avec un pic à 1 092 US\$ courant janvier 2001 (cf. 5.1) dépassant à cette époque largement le prix du platine). Cette hausse des prix avait entraîné à son tour une chute de la demande en palladium, pratiquement divisée par 2 entre 1999 (182,9 t) et 2002 (94,8 t), essentiellement grâce à des progrès techniques qui ont permis de diviser par deux la quantité de palladium par pot catalytique, peut-être aussi par un rebasculé d'une partie des besoins sur le platine, dont la demande pour la catalyse automobile a bien, elle, doublé entre 1999 (50,1 t) et 2003 (101,7 t), mais surtout en raison de la systématisation de la catalyse sur les moteurs diesel en Europe.

Le palladium utilisé dans ce secteur est largement recyclé en fin de vie, avec 51,6 t de palladium secondaire récupérées en 2012, qui correspondent à 25,1 % de la demande de 2012 (fig. 31 et 4.5). La part de la consommation issue du recyclage, inexistante avant 1984, s'est progressivement accrue et dépasse systématiquement 20 % depuis 2006.

À titre indicatif, si l'on considère une « durée de vie » moyenne des voitures et de leurs pots catalytiques de 10 ans, on constate que le tonnage de palladium récupéré par recyclage des pots catalytiques une année « n » représente 47 % de la consommation brute du secteur de l'année « n-10 », en moyenne sur les 20 dernières années (n = 1993 à 2012). Le même calcul sur une durée de vie de onze ans donnerait un taux de récupération de 54 % en moyenne sur les 20 dernières années. Ce pourcentage est cohérent avec la fourchette de 50 à 55 % publiée par le PNUE (Graedel *et al.*, 2011).

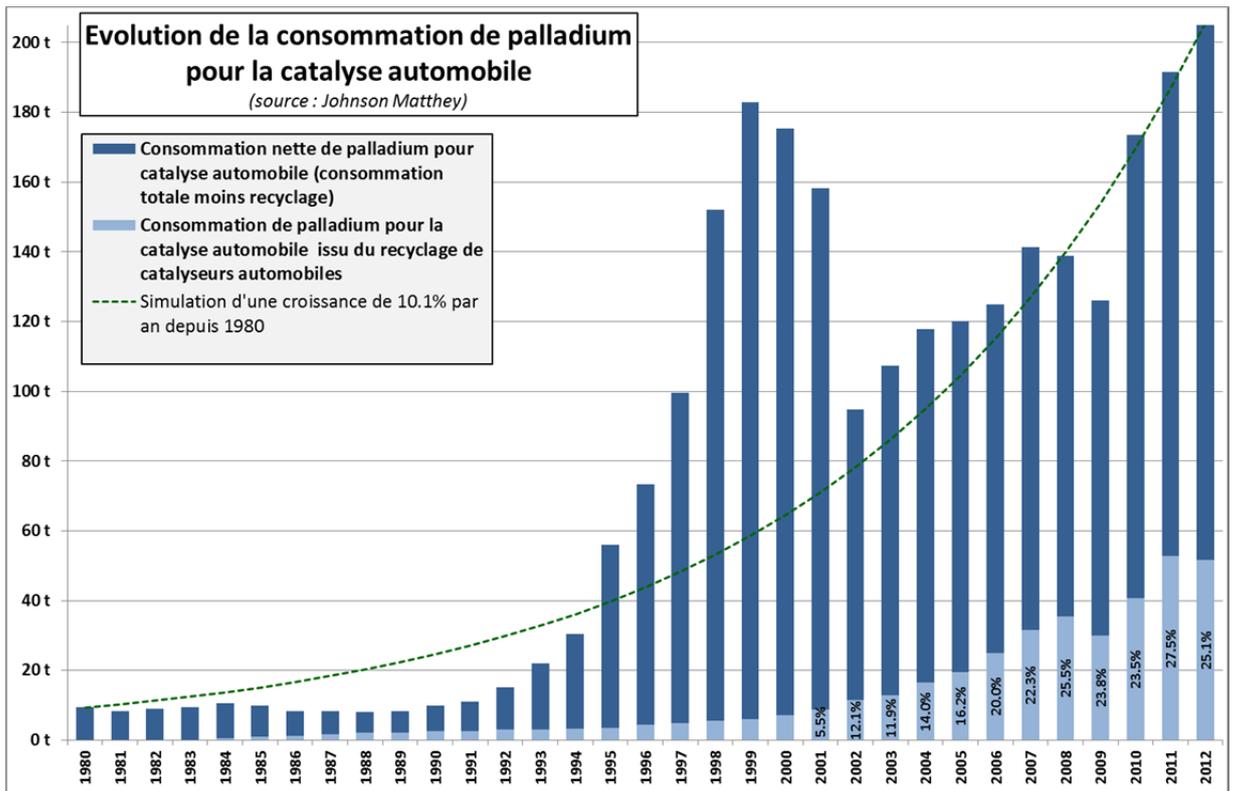


Figure 31 - Évolution de la consommation de palladium pour la catalyse automobile depuis 1980, avec part issue de recyclage.

Les figures 32 et 33 illustrent les évolutions de la consommation de palladium pour la catalyse automobile par grands ensembles géographiques, et par type de véhicules, compilées d'après les publications de Johnson Matthey (2013 et antérieures).

Le fléchissement de la construction automobile européenne entre 2011 et 2012 (-8 %) a été plus que compensé par une bonne croissance de la construction automobile en Chine (+4,6 %), en Amérique du Nord (États-Unis, Canada et Mexique, >10 %) et en Russie.

Entre 1997 et 2012, la construction automobile mondiale a progressé en moyenne de 3 % par an (+3,4 % par an pour les voitures et +1,9 % par an pour les véhicules commerciaux, source <http://oica.net>). Entre 1980 et 2012, la consommation brute de palladium pour la catalyse automobile a progressé en moyenne de 10,1 % par an (cf. fig. 31), et la consommation nette de 9,2 % par an.

Le marché automobile chinois devrait poursuivre sa croissance, de même que les marchés d'autres pays émergents. En parallèle, les normes de dépollution des gaz d'échappement se généralisent : la Chine a mis en place une norme « China 4 » pour les véhicules circulant à Pékin à partir de mars 2013, qu'elle compte généraliser à tout le pays dans les prochaines années. La Russie et la Thaïlande ont adopté la norme Euro 4 début 2013. La demande correspondante en palladium continuera à augmenter dans les prochaines années (Johnson Matthey, mai 2013), probablement d'au moins 3 à 5 % par an.

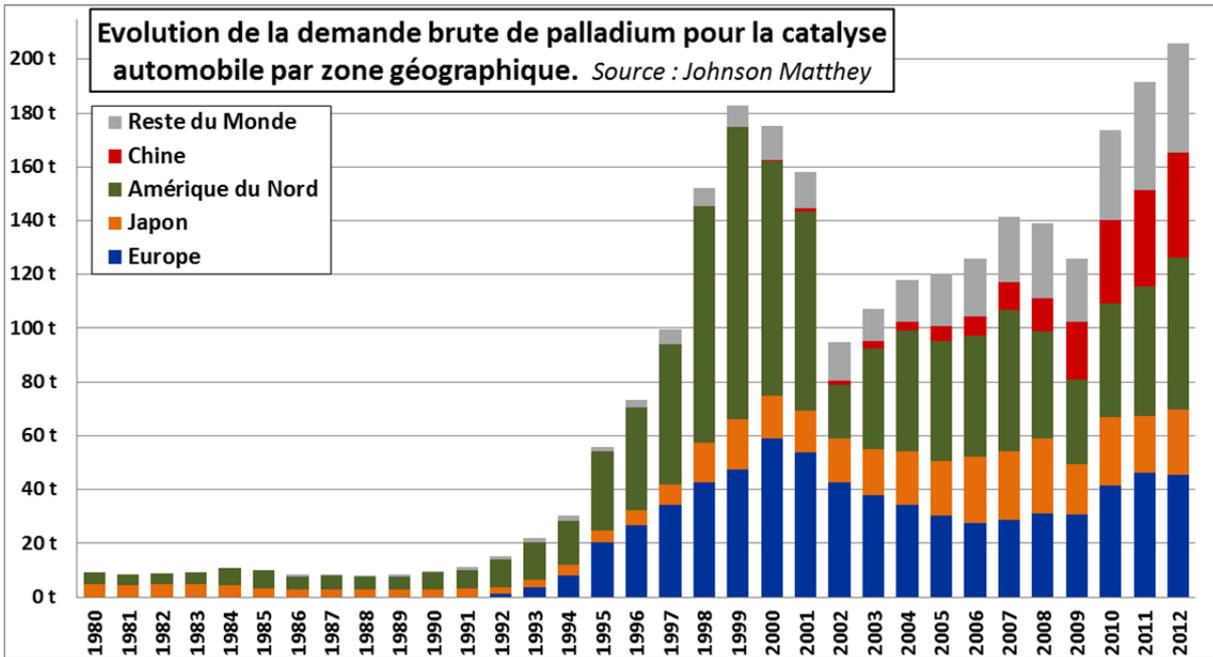


Figure 32 - Évolution de la demande brute en palladium pour la catalyse automobile par ensemble géographique.

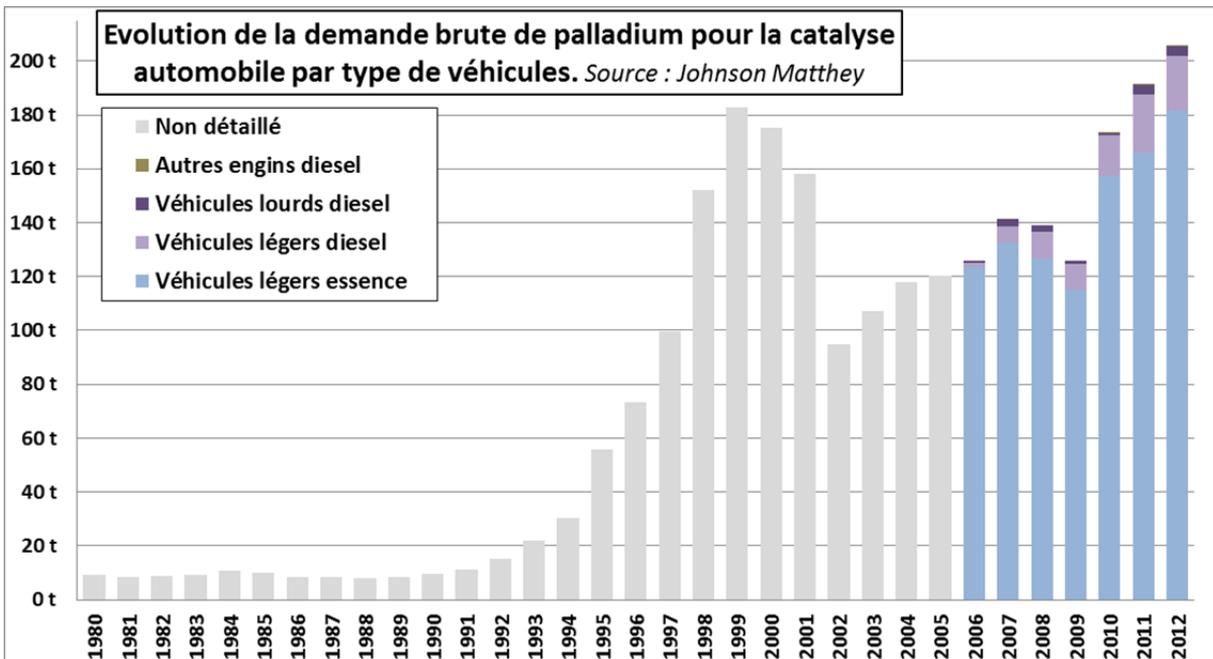


Figure 33 - Évolution de la demande brute en palladium pour la catalyse automobile par type de véhicule.

3.2.2. Industries électrique et électronique

Le secteur électrique et électronique est le deuxième secteur consommateur de palladium après la catalyse automobile.

L'usage dominant du palladium dans ce secteur est la fabrication des condensateurs céramiques multicouches. Ces condensateurs sont désormais omniprésents dans tous les appareils électroniques. Compte tenu de la multiplication des biens de consommation électroniques, le nombre de condensateurs augmente d'année en année et atteint désormais plusieurs centaines de milliards d'unités. Tous ne contiennent pas du palladium, et l'évolution technologique conduit à une réduction de la quantité de palladium nécessaire pour une capacité donnée. Il est estimé qu'un téléphone portable contient environ 15 mg de palladium (Willis *et al.*, 2012).

Le palladium peut être partiellement substitué par des métaux de base comme le cuivre et le nickel, sauf dans les applications nécessitant de très hauts niveaux de fiabilité (applications aéronautiques et militaires), où les condensateurs au palladium restent préférés. Globalement, Johnson Matthey s'attend à une relative stabilisation ou baisse de la demande en palladium pour ce secteur.

Le palladium est aussi utilisé en plaquage par électrodéposition sur les connecteurs et circuits imprimés, en substitution de l'or, en raison de son moindre coût actuel. La demande correspondante est attendue en augmentation.

Globalement, la demande brute mondiale en palladium pour les industries électriques et électroniques a été de 37,3 t en 2012, en baisse de 12,7 % par rapport à 2011 (Johnson Matthey, mai 2013). Elle avait été en accroissement régulier entre 1980 et 1995, où elle avait atteint un record de 81,6 t. Ce secteur était d'ailleurs le premier consommateur de palladium jusqu'à 1995, et s'est fait dépasser par le secteur de la catalyse automobile à partir de 1996. La demande électrique et électronique a ensuite légèrement décliné, avec des fluctuations, jusqu'en 2000, puis fortement chuté en 2001 suite à l'envolée fulgurante du prix du palladium (cf. 5.1). Elle s'est à nouveau accrue entre 2002 et 2007, et depuis s'est plus ou moins stabilisée ou a encore un peu fléchi, pour atteindre aujourd'hui un niveau deux fois moindre qu'au milieu des années 1990 (fig. 34).

Johnson Matthey (mai 2013) s'attend à une poursuite d'un certain déclin de la demande en palladium dans ces industries dans les prochaines années.

Le palladium utilisé dans ce secteur est en partie recyclé, avec 13,3 t de palladium secondaire récupérées en 2012, soit 35 % de la demande (cf. 4.5).

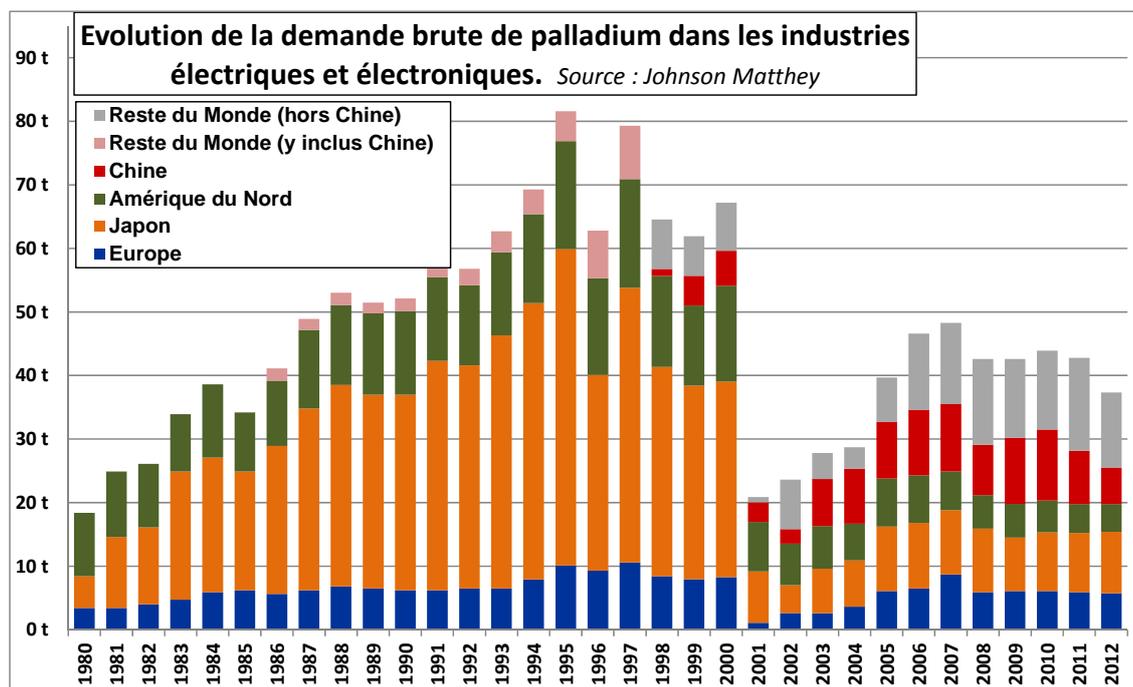


Figure 34 - Évolution de la demande en palladium dans les industries électriques et électroniques (source : Johnson Matthey).

3.2.3. Industries chimiques

Le palladium est utilisé comme catalyseur dans diverses branches de l'industrie chimique :

- production d'acide téréphthalique, destiné à la production de PET (Polyéthylène terephthalate) et des fibres polyester ;
- catalyse de la production d'eau oxygénée (ou peroxyde d'hydrogène, H₂O₂) ;
- dispositifs de récupération du platine et du rhodium perdus dans les usines d'acide nitrique ;
- dispositifs de dépollution d'effluents nocifs.

La demande mondiale en palladium pour la catalyse industrielle a été de 16,5 t en 2012, en forte augmentation (+ 20,5 %) par rapport à 2011, en raison d'une augmentation des capacités de production d'acide téréphthalique en Chine (+ 48 %). (Johnson Matthey, mai 2013).

Johnson Matthey s'attend à ce que la consommation de palladium par les industries chimiques se stabilise dans les prochaines années, les capacités de production chimique utilisatrices de palladium en Chine ayant atteint un niveau de maturité.

3.2.4. Usages dentaires

Le palladium est utilisé pour la confection de certaines couronnes et prothèses dentaires métalliques. Il s'est partiellement et progressivement substitué à l'or dans les années 1980-1990 pour cet usage, surtout au Japon qui en est le consommateur majeur, ainsi qu'en Europe et en Amérique du Nord. Il est en revanche inutilisé en Chine, où l'or reste préféré, ou dans le reste du monde.

Les couronnes dentaires en palladium sont généralement en alliage qui contient aussi de l'or ou de l'argent, voire du platine, en proportions variables selon les préférences des prothésistes, des patients et des coûts.

D'une manière générale, les couronnes dentaires métalliques sont de plus en plus substituées par des couronnes en céramiques, moins visibles dans la bouche, en particulier pour les dents frontales. Les couronnes métalliques restent généralement moins chères et sont essentiellement utilisées pour les molaires. Toutefois, avec la flambée des prix des métaux précieux, du palladium en 2000 puis de l'or à partir de 2003, des alliages de substitution à base de chrome ont été développés et se répandent de plus en plus.

La demande en palladium pour le secteur dentaire a donc décliné assez régulièrement depuis 1997, année qui avait connu un pic de demande à 42 t, avec une forte chute en 2000, année de la flambée du prix du palladium (fig. 35). La demande s'est réduite à 16,5 t en 2012, avec une nouvelle baisse de 1,9 % par rapport à l'année précédente (Johnson Matthey, mai 2013).

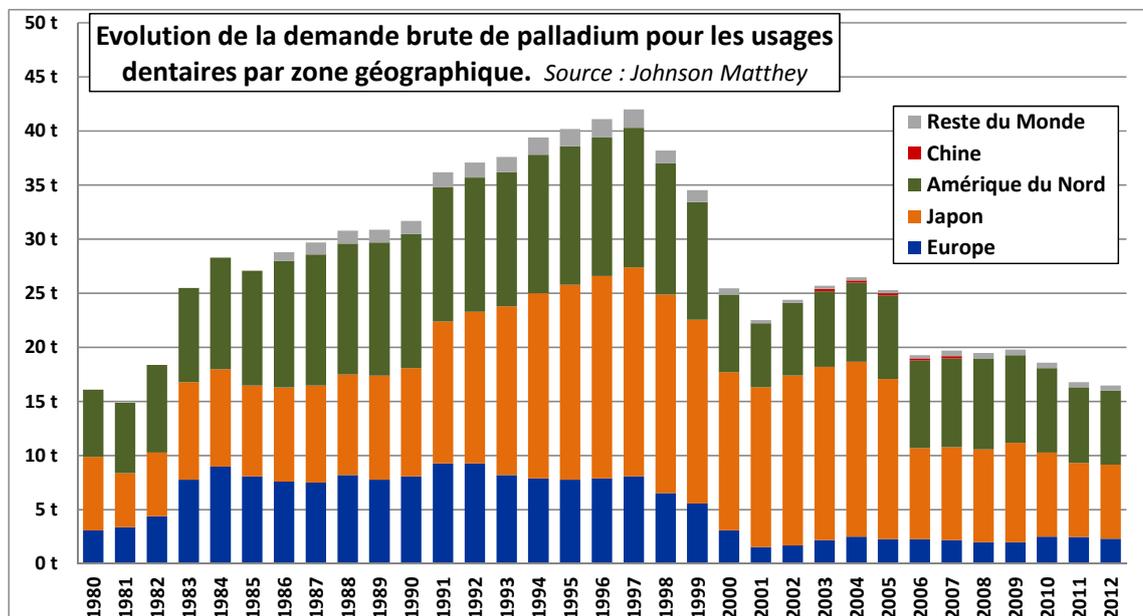


Figure 35 - Évolution de la demande en palladium pour les couronnes dentaires (source : Johnson Matthey).

Johnson Matthey s'attend à ce que la consommation de palladium par le secteur dentaire continue son déclin.

3.2.5. La joaillerie

Le palladium est un peu utilisé en joaillerie, mais dans des proportions bien moindres que la platine. Le palladium a des qualités de couleur, d'inaltérabilité et de résistance au ternissement, de malléabilité et de dureté comparables à celles du platine. Il est cependant près de deux fois moins dense (12,0 pour le palladium, 21,4 pour le platine), ce qui permet éventuellement de réaliser des bijoux suspendus, comme des boucles d'oreille, de taille plus grande sans être excessivement lourds. En revanche, il ne jouit pas du même prestige que le platine ou l'or.

En 2012, 13,8 t de palladium ont été utilisées en joaillerie, soit 4,5 % de la consommation mondiale (contre 86,5 t, soit 36,8 % de la consommation mondiale pour le platine). 54 % de cette consommation de palladium pour la joaillerie a été en Chine (fig. 36).

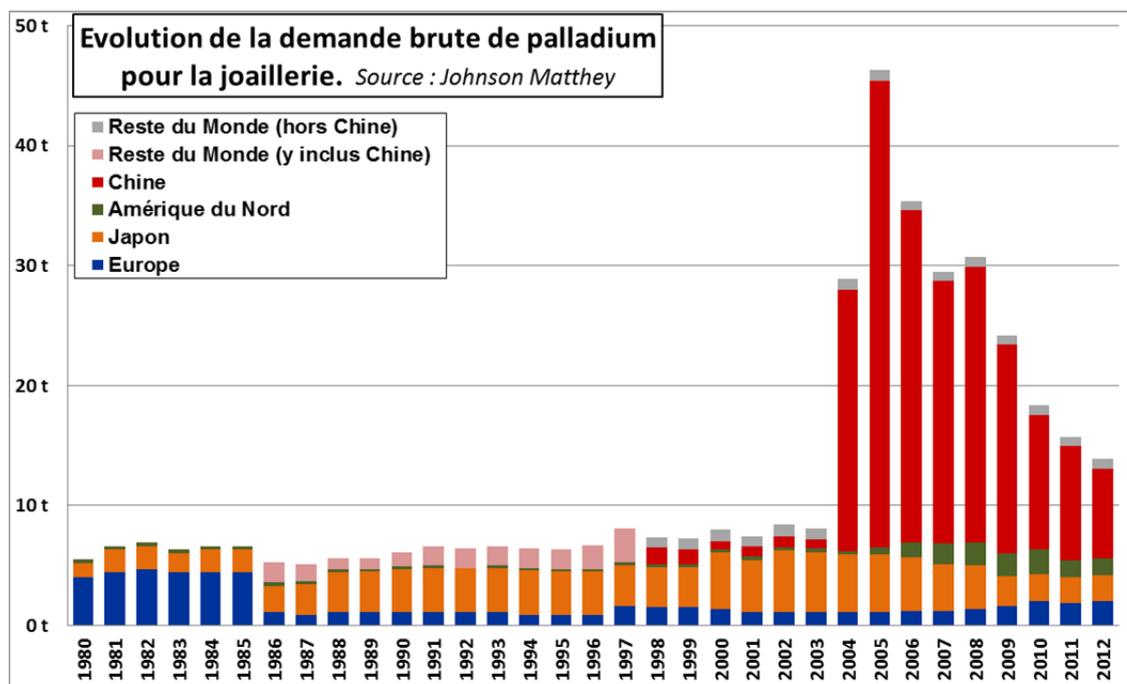


Figure 36 - Évolution de la demande brute de palladium pour la joaillerie.

En fait, dans le reste du monde, la consommation de palladium pour la joaillerie est restée relativement modeste, entre 5 et 8 t par an depuis 1980, en majorité au Japon. C'est la Chine seule qui a généré les importantes variations de demande, laquelle a connu une très forte hausse en 2004 et 2005, parallèlement au début de la flambée du prix du platine (passé de 600 US\$/oz début 2003 à 964 US\$/oz fin 2005, puis poursuivant sa hausse jusqu'à dépasser 2000 US\$/oz au premier semestre 2008, tandis que, de 2003 à 2005, le prix du palladium est resté pour l'essentiel confiné dans une fourchette de 180 à 250 US\$/oz). Cette seule consommation chinoise avait atteint 38,9 t en 2005, pour chuter

ensuite progressivement jusqu'à 7,5 t en 2012 (division par 5), les consommateurs se réorientant vers les métaux plus prestigieux comme l'or et le platine.

Ailleurs, le palladium est aussi utilisé en alliage avec l'or pour constituer l'« or blanc », surtout au Japon, mais aussi de plus en plus en Europe, où il remplace le nickel, de plus en plus évité en raison des allergies que provoque ce dernier chez une partie des consommateurs.

Pour Johnson Matthey, la demande globale en palladium pour la joaillerie ne devrait pas connaître d'augmentation significative.

3.2.6. Les investissements et placements

Comme l'or et le platine, le palladium peut être acheté pour être stocké et thésaurisé dans la durée, sous forme de lingots et pièces. La quantité de palladium affectée au placement n'a commencé à être significative qu'à partir de 2003 et n'est distinguée, dans les données statistiques de Johnson Matthey, qu'à partir de celle année-là.

Quelques pays ont frappé en quantité limitée des pièces en palladium à 99,95 % (« Maple Leaf » canadien entre 2005 et 2009, « Panda » chinois, 25 roubles soviétique). Certaines monnaies, des fondeurs et raffineurs et des banques produisent, poinçonnent et commercialisent aussi des lingots de palladium (fig. 37).



Figure 37 - Pièce d'une once de palladium à 99,95 % de la monnaie canadienne (« Maple Leaf ») et lingot d'une once du Crédit Suisse (© www.apmex.com).

Par ailleurs, comme sur le platine, des ETF sur le palladium ont été lancés à partir de 2007.

Johnson Matthey évaluait à 63,42 t la masse de palladium accumulée dans les ETF à fin décembre 2012, pour 3/5 en Europe et 2/5 en Amérique du Nord (fig. 38). À titre de comparaison, ceci représente à peine trois mois de consommation industrielle de platine (moins d'un quart de la consommation de l'année 2012 abstraction faite de la joaillerie et des placements).

Le site « ETF Database » (<http://etfdb.com>) liste un ETF basé sur le palladium physique échangeable aux États-Unis (tab. 11), le Physical Palladium Shares (PALL) d'ETF securities (www.etfsecurities.com) lancé en 2010, avec une valorisation totale de 518 MUS\$ au 17/06/2013.

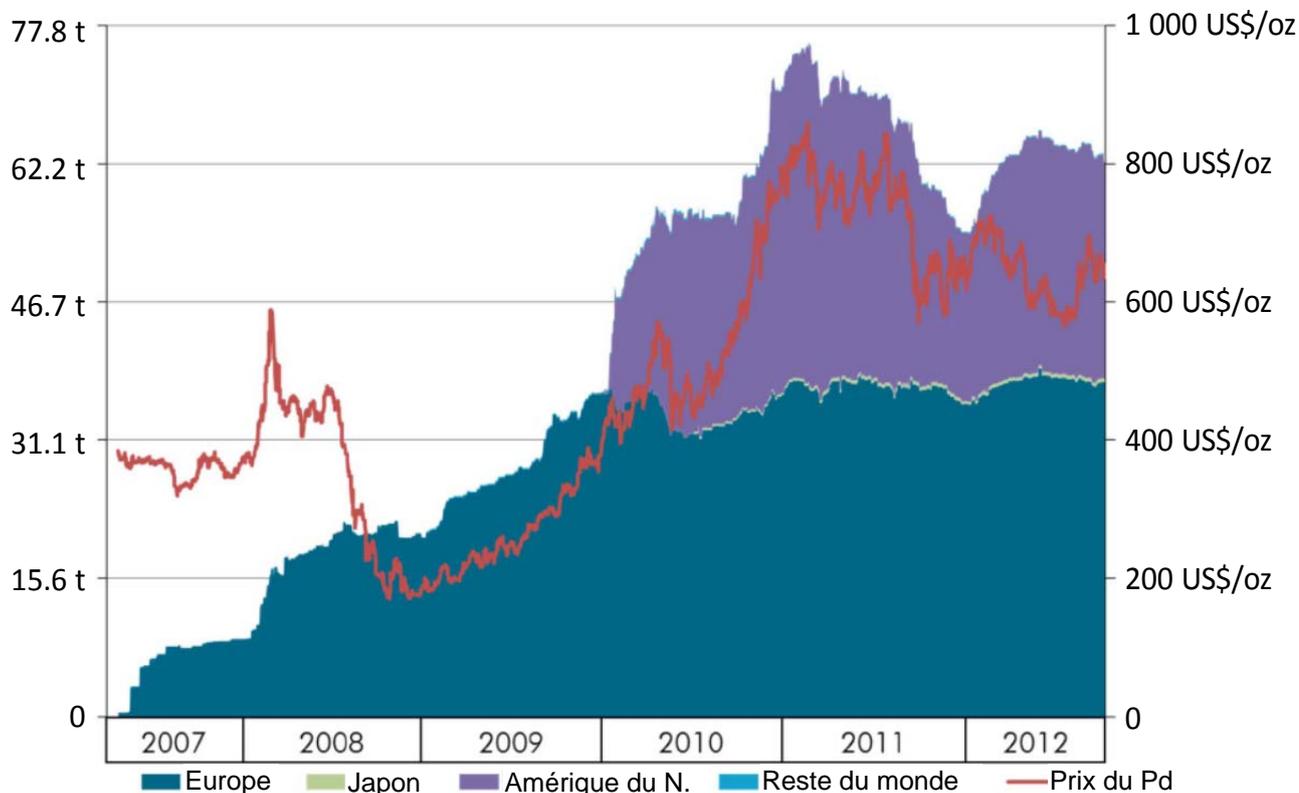


Figure 38 - Évolution des quantités cumulées de palladium détenues par les ETF par ensembles géographiques depuis leur lancement en 2007. Adapté d'après Johnson Matthey, 2012.

Symbole	Nom	Prix de la part	Nbre de parts	Capitalisation totale
PALL	ETFS Physical Palladium Shares	66.34 US\$	7.81 M	518.40 MUS\$

Tableau 11 - ETF basé sur le palladium listé par ETF Database, données au 17/06/2013 (source : <http://etfdb.com>).

Au cours récent de 730 US\$/oz en juin 2013, la valorisation globale de cet ETF correspondrait à une masse de palladium ainsi immobilisé d'environ 22 tonnes, ce qui couvrirait à peu près le tiers de ce qu'enregistre Johnson Matthey mondialement.

La quantité de palladium placée comme investissement (pièces et lingots) était insignifiante jusqu'en 2002. Elle a augmenté jusqu'en 2010, essentiellement en Europe et en Amérique du Nord. Elle est devenue négative en 2011 (17 t désinvesties) pour remonter en 2012 (14,6 t investies) (cf. fig. 30 et 39).

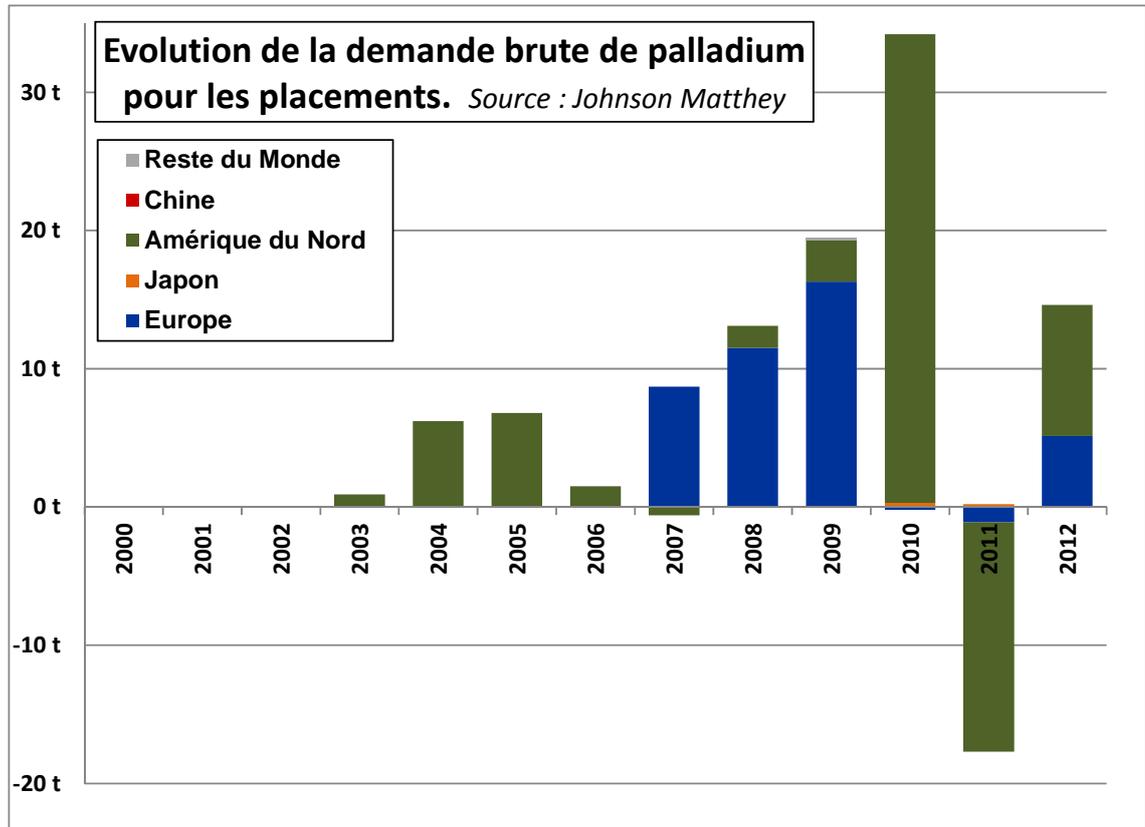


Figure 39 - Évolution de la demande en palladium pour placements (source : Johnson Matthey).

3.2.7. Autres usages du palladium

La quantité de palladium utilisée par des secteurs autres que les six classes d'usages citées plus hauts est peu élevée (3,3 t, soit 1,1 % de la demande totale en palladium en 2012).

Parmi ces usages, on pourra citer quelques alliages : des alliages de titane avec 0,05 à 0,15 % de palladium, plus résistants à la corrosion par l'eau salée que le titane pur, sont utilisés dans la « plomberie » des usines de dessalement de l'eau de mer.

Du palladium peut être utilisé marginalement comme catalyseur pour les piles à combustibles. Il peut aussi être utilisé pour sa capacité à absorber le dihydrogène gazeux.

3.3. USAGES DU RHODIUM

Le rhodium est essentiellement utilisé pour ses propriétés catalytiques, en complément du platine et du palladium dans les pots catalytiques automobiles, dans lesquels il améliore la dissociation des oxydes d'azote, et aussi dans certaines industries chimiques, par exemple pour la production d'acide acétique, de certains aldéhydes comme le butanal, et pour des synthèses organiques complexes. Il est aussi utilisé

pour ses propriétés d'inaltérabilité (joaillerie, thésaurisation). Par ailleurs, il est utilisé dans l'électronique (contacts, thermocouples, électrodes de bougies d'allumage de réacteurs d'avion, etc.). En verrerie, il est utilisé en alliage avec le platine pour les douilles pour la fabrication des fibres de verre. En 2012, la répartition de la demande de rhodium était la suivante (fig. 40) (Johnson Matthey, 2013) :

- catalyseurs des pots catalytiques pour l'automobile : 81,0 % ;
- industrie chimique : 8,4 % ;
- Verrerie : 3,2 % ;
- industrie électrique et électronique : 0,6 %
- investissements : 3,7 % ;
- autres : 3,1 % ;

pour une demande totale mondiale de rhodium évaluée à 30 t Rh en 2012, dont 21,9 t issue de la production minière, 7,1 t issues du recyclage, et 1,3 t du déstockage.

La consommation de rhodium pour les catalyseurs automobiles représente systématiquement plus de 75 % de la consommation totale de rhodium depuis plus de 25 ans (cf. fig. 41).

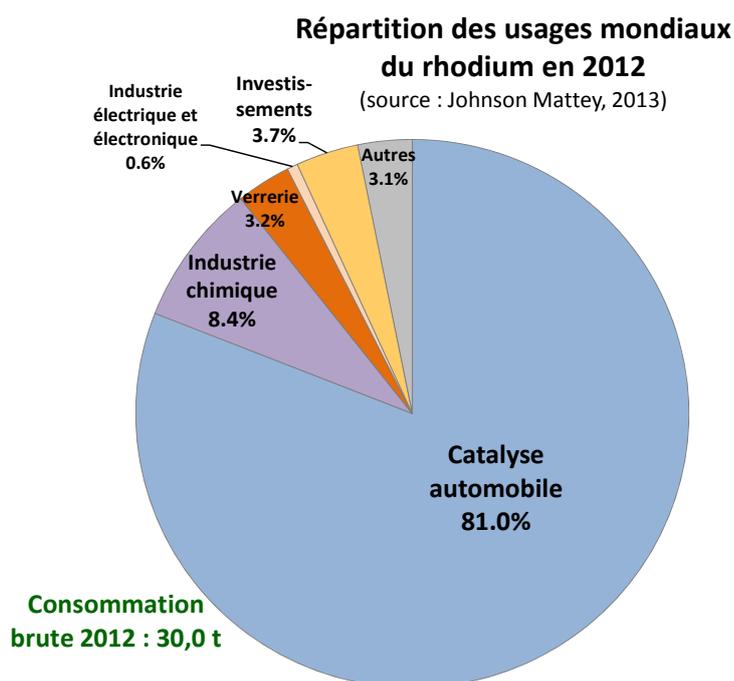


Figure 40 - Répartition des usages du rhodium par filières dans le monde en 2012
(source : Johnson Matthey, 2013).

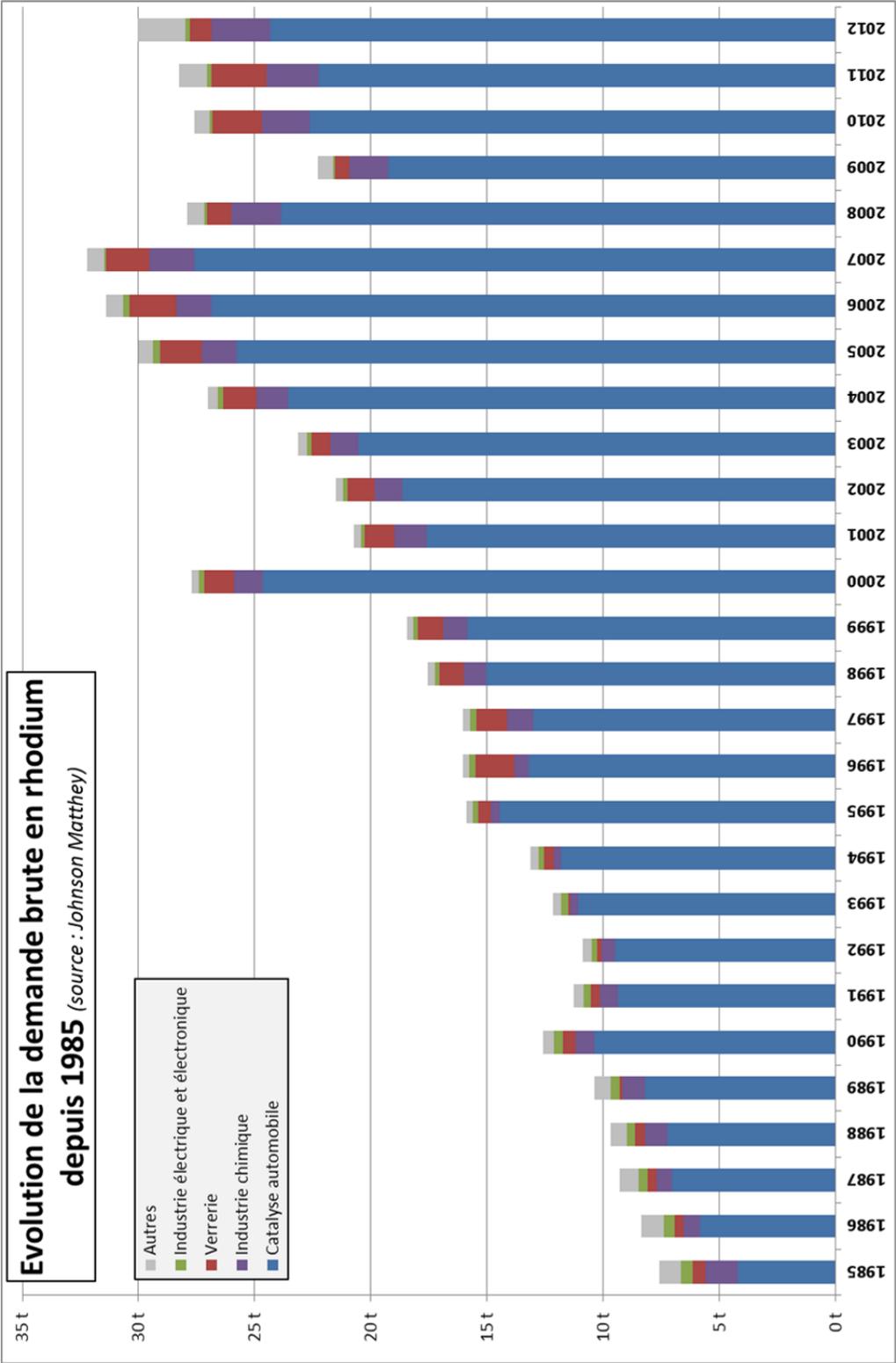


Figure 41 - Évolution de la demande en rhodium par filières depuis 1985 (source : Johnson Matthey).

3.3.1. Les catalyseurs automobiles.

Se reporter à la section 3.1.1 pour les généralités sur les pots catalytiques.

Dans les pots catalytiques, le rhodium est surtout utilisé en complément au palladium dans les pots catalytiques des moteurs à essence, plus particulièrement pour optimiser la dissociation des oxydes d'azote en azote et oxygène.

Selon Johnson Matthey (mai 2013), la consommation totale de rhodium pour la catalyse automobile a été de 24,3 t en 2012. Cette consommation a augmenté de 9,4 % par rapport à 2011 (22,2 t), sans pour autant atteindre le record de 27,6 t de 2007 (fig. 42).

Cette augmentation de la demande est liée à la reprise de la construction automobile au Japon (+18 % par rapport à 2011) et en Amérique du Nord (+19 % par rapport à 2011 aux États-Unis). Le Japon compte pour un bon quart de la demande en rhodium pour la catalyse automobile, et les usines des marques japonaises ailleurs dans le monde représentent aussi une demande importante.

La demande est plus faible en Europe où la production automobile a décliné en 2012 et où une forte proportion du parc est à moteur diesel.

La quantité de rhodium utilisée par véhicule est variable. Peu de données publiques sont disponibles. Sur la base de la consommation totale pour ce secteur, elle serait environ 9 fois moindre, en masse, que celle du palladium (24,3 t Rh vs 205,7 t Pd en 2012). Une estimation sur la base de 8,55 millions de voitures construites au Japon en 2012 (OICA, 2013) et 6 t de rhodium utilisées (1/4 de la demande mondiale du secteur, selon Johnson Matthey, 2013) représenterait 0,7 g de rhodium par voiture. D'autres sources mentionnent plutôt des masses de 0,1 à 0,2 g par voiture.

Le rhodium utilisé dans ce secteur est largement recyclé en fin de vie, avec 8,1 t de rhodium secondaire récupérées en 2012, qui correspondent à 33,1 % de la demande de 2012 (fig. 42 et 4.5). La part de la consommation issue du recyclage, inexistante avant 1987, s'est progressivement accrue et dépasse systématiquement 30 % depuis 2009.

À titre indicatif, comme pour le palladium, si l'on considère une « durée de vie » moyenne des voitures et de leurs pots catalytiques de 10 ans, on constate que le tonnage de rhodium récupéré par recyclage des pots catalytiques une année « n » représente 39 % de la consommation brute du secteur de l'année « n-10 », en moyenne sur les dix dernières années (n = 2003 à 2012). Le même calcul sur une durée de vie de onze ans donnerait un taux de récupération de 41 % en moyenne sur les dix dernières années. Ce pourcentage est un peu inférieur mais d'un ordre de grandeur comparable à celui publié par le PNUE de 45 à 50 % (Graedel *et al.*, 2011 ; Reck *et al.*, 2011).

Comme pour le palladium (cf. 3.2.1), la croissance attendue du marché automobile chinois et d'autres pays émergents, ainsi que la généralisation des normes antipollution, devrait conduire à une augmentation de la demande en rhodium dans les prochaines années (Johnson Matthey, mai 2013).

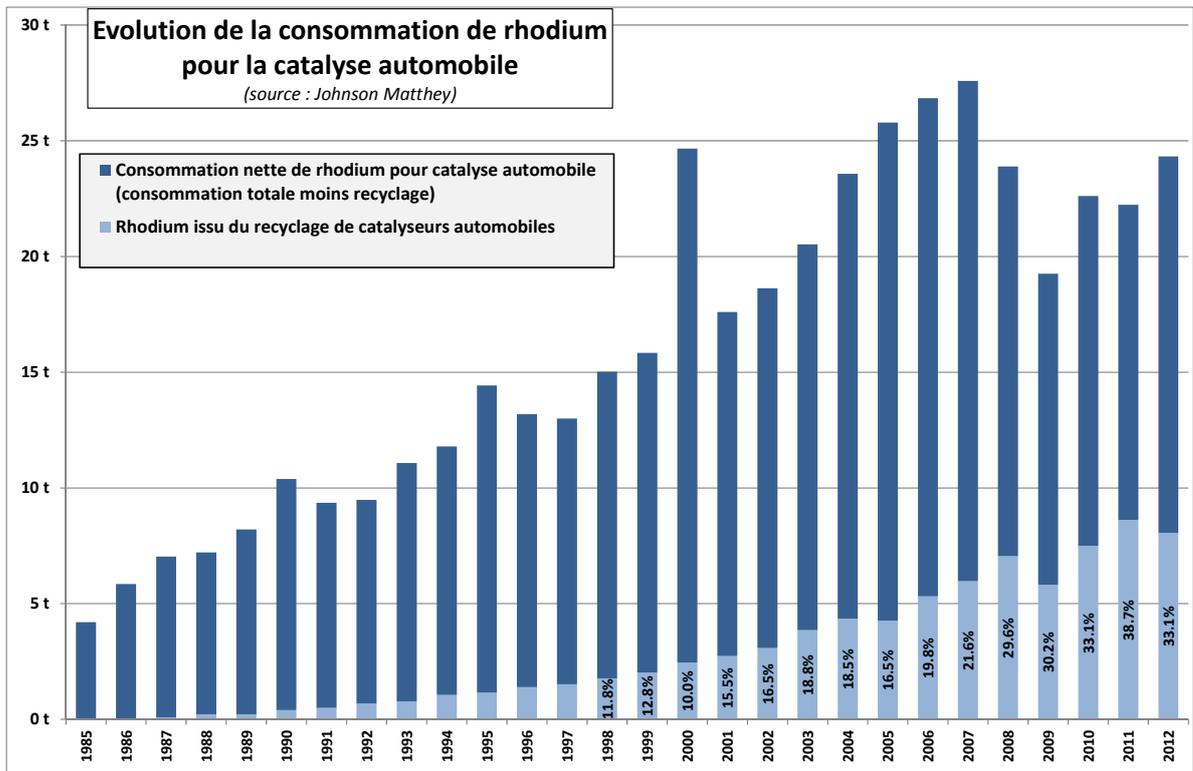


Figure 42 - Évolution de la consommation de rhodium pour la catalyse automobile depuis 1985, avec part issue de recyclage.

3.3.2. Industries chimiques

Le rhodium est utilisé comme catalyseur dans diverses branches de l'industrie chimique :

- production d'acide acétique, largement utilisé comme composé de départ pour de nombreuses synthèses de molécules de base, comme l'acétate d'éthyle, l'acétate de vinyle, l'acide téréphthalique, largement consommés eux-mêmes par les industries des polymères, des peintures et solvants, etc. ;
- production d'aldéhydes comme l'éthanal (aldéhyde acétique), par oxydation catalytique de l'éthylène, le butanal, etc., utilisés entre autres dans l'industrie des plastifiants ;
- dispositifs de dépollution d'effluents nocifs.

La demande mondiale en rhodium pour la catalyse industrielle a été de 2,5 t en 2012, en augmentation (+ 12,5 %) par rapport à 2011, en raison d'une augmentation des capacités chimiques concernées en Chine (Johnson Matthey, mai 2013).

3.3.3. Verrerie

Du platine rhodié est utilisé dans les filières de formage du verre fondu, en particulier pour la production de la fibre de verre, de fibres optiques, et pour la production des écrans plats (cf. section 3.1.5 similaire sur le platine).

Après avoir atteint des records en 2010 et 2011 (2,1 et 2,4 t Rh respectivement), la demande en rhodium pour la verrerie a chuté à 1 t en 2012, en partie lié à une maturité atteinte par les capacités de production d'écrans plats, une capacité excessive de production de fibre de verre, et une consommation en 2012 des stocks constitués par des achats excédentaires du secteur en 2011.

Johnson Matthey (2013) s'attend à une probable reprise de la demande de rhodium dans ce secteur en 2013, en particulier parce que les stocks de 2011 ont été résorbés, tout en restant à un niveau moindre que celui de 2011.

3.3.4. Industries électrique et électronique

L'adjonction d'un peu de rhodium au platine ou au palladium en augmente la dureté et la résistance à la corrosion. Ainsi, un peu de rhodium est utilisé dans diverses applications électriques de ces métaux (contacteurs, bougies d'allumage moteur dans l'aéronautique, etc.).

Du platine rhodié est utilisé en couplage avec du platine pour les thermocouples servant à mesurer les hautes températures dans les fours industriels, en verrerie, sidérurgie, fonderie, production de semi-conducteurs, etc. (cf. 3.1.6).

Du platine rhodié est aussi utilisé comme filament chauffant résistant à la corrosion dans diverses applications (systèmes d'allumage à filament chaud, systèmes de coupe du nylon, etc.), dans les résistances des fours électriques à moufle, etc.

Globalement, la demande brute mondiale en rhodium pour les industries électriques et électroniques est modeste, évaluée à 190 kg en 2012 (soit 0,6 % de la demande totale), similaire à celle de 2011 (Johnson Matthey, mai 2013). Elle a un impact marginal sur le marché du rhodium.

3.3.5. Les investissements et placements

Un ETF sur le rhodium a été lancé par la Deutsche Bank en mai 2011 (DB physical rhodium ETC).

Johnson Matthey (2013) évalue à 1,1 t la masse de rhodium accumulée par l'ETF en 2012. Sur la base de sa capitalisation publiée au 27/06/2013 (49,13 MUS\$) et du cours du rhodium à cette même date (1 000 US\$/oz), on peut estimer la masse totale de rhodium stockée par l'ETF à 1,5 t de rhodium, soit l'équivalent d'un peu plus de deux semaines de consommation industrielle de ce métal.

Quelques fondeurs et raffineurs privés produisent, poinçonnent et commercialisent depuis quelques années des lingots de rhodium (Cohen Mint aux États-Unis, Baird & Co au Royaume-Uni).



Figure 43 - Lingot d'une once de rhodium du britannique Bairds & Co.
(© www.libertygoldandsilver.com).

Johnson Matthey évalue à 6 000 oz, soit environ 186 kg, la masse de rhodium accumulée sous forme de lingots en 2012.

3.3.6. Autres usages du rhodium

La quantité de rhodium utilisée par des secteurs autres que les cinq classes d'usages citées plus hauts a été de l'ordre de 0,7 t en 2012, soit un peu plus de 2 % de la demande totale.

Du rhodium est utilisé en joaillerie, essentiellement en plaquage, sur des bijoux en platine, palladium, argent et or blanc, mais aussi sur des bijoux en acier, pour en renforcer l'éclat et la durabilité.

3.4. USAGES DU RUTHÉNIUM

Le ruthénium ajouté en petites quantités au platine ou au palladium en augmente la dureté et améliore ainsi la résistance à l'usure des contacteurs électriques de haute performance. Le dioxyde de ruthénium et les ruthénates de plomb ou de bismuth sont utilisés pour des circuits intégrés (« puces ») résistifs. Le ruthénium est aussi désormais utilisé, comme le platine ou en substitution du platine, pour la fabrication des disques durs récents, sous forme d'une couche de quelques nanomètres d'épaisseur, déposée à partir de cibles de pulvérisation (« sputtering targets »), entre deux couches magnétiques. C'est ce qui permet désormais une densité de stockage de 100 Go/cm² (propriété de magnéto-résistance géante qui a valu à ses découvreurs Albert Fert et Peter Grünberg leur prix Nobel de physique en 2007). Les progrès

technologiques permettent cependant de réduire progressivement la quantité de ruthénium nécessaire.

Le ruthénium est utilisé en association avec l'iridium en revêtement des électrodes utilisées pour la production par électrolyse de chlore et de soude caustique, en substitution progressive, pour des raisons environnementales, des anciennes électrodes au mercure.

Le ruthénium et certains de ses composés ont aussi des propriétés catalytiques utilisées en synthèse organique, pour la désulfuration dans les raffineries de pétrole.

Le ruthénium entre dans la composition de certains superalliages récents : certains superalliages à base de nickel utilisés pour les pales des turbines et des réacteurs en aéronautique peuvent désormais contenir 2 à 6 % Ru (tab. 12).

Réf.	Ni	Cr	Co	Mo	Al	Ta	W	Hf	Re	Ru
TMS-138	63.7 %	3.2 %	5.8 %	2.8 %	5.9 %	5.6 %	5.9 %	0.1 %	5.0 %	2.0 %
TMS-162	59.2 %	2.9 %	5.8 %	3.9 %	5.8 %	5.6 %	5.8 %	0.1 %	4.9 %	6.0 %
UCSX-1	61.0 %	2.6 %	6.0 %	1.5 %	5.5 %	8.1 %	7.0 %	0.1 %	6.2 %	2.0 %
UCSX-8	60.8 %	1.5 %	6.0 %	3.0 %	5.7 %	8.0 %	6.0 %		6.0 %	3.0 %

Tableau 12 - Composition de quelques superalliages de nickel contenant du ruthénium, pour turbines (source : www.tms.org).

Le ruthénium est aussi utilisé en adjonction (0,1 % Ru) au titane (tab. 13) pour améliorer considérablement la résistance à la corrosion en milieu acide agressif chaud (tuyauterie, chaudronnerie, pour des procédés industriels en milieu acide, des forages profonds, la géothermie, etc.).

Réf.	Ti	Al	V	Ru
ASTM Grade 28	94.4 %	3.0 %	2.5 %	0.1 %
ASTM Grade 29	89.9 %	6.0 %	4.0 %	0.1 %

Tableau 13 - Composition de quelques alliages de titane contenant du ruthénium, pour tuyauterie-chaudronnerie en milieu acide (source : www.titaniuminformationgroup.co.uk).

En 2012, la répartition de la demande de ruthénium était la suivante (fig. 44) (Johnson Matthey, 2013) :

- industrie électrique et électronique (disques durs, contacteurs, puces résistives) : 55,5 % ;
- électrochimie (production de chlore et de soude) : 18,7 % ;
- industrie chimique (catalyses) : 13,1 % ;
- autres (dont alliages) : 10,9 % ;

pour une demande totale mondiale de ruthénium évaluée à 21,1 t Ru en 2012.

Les statistiques annuelles de consommation par filières ne sont publiées par Johnson Matthey que depuis 2005 (fig. 45). La consommation de ruthénium a été assez variable ces dernières années.

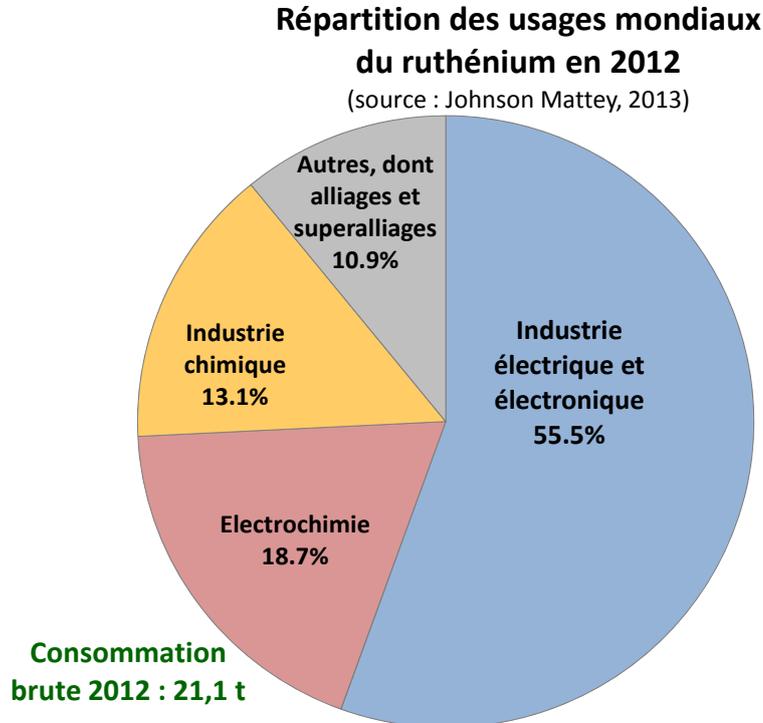


Figure 44 - Répartition des usages du ruthénium par filières dans le monde en 2012
(source : Johnson Matthey, 2013).

La demande mondiale en ruthénium du secteur électronique a été de 11,7 t en 2012, en chute de 30 % par rapport à 2011, après 2 années de demande particulièrement forte tirée par les disques durs de dernière génération. La baisse de la demande peut s'expliquer par des achats excédentaires de ruthénium par ce secteur en 2010-2011, combinés à une relative accalmie du marché des PC face aux tablettes et autres dispositifs utilisant des mémoires flash, et à une amélioration de l'efficacité de la déposition du ruthénium.

La demande pour les circuits intégrés n'a représenté que 155 kg en 2012 (Johnson Matthey, mai 2013).

Johnson Matthey (mai 2013) s'attend à une reprise de la demande en 2013 en raison d'une résorption des stocks et d'une demande soutenue par les centres de stockage données.

La demande pour l'électrochimie a été de 4 t en 2012, similaire à celle de 2011, et ne devrait guère augmenter.

La demande pour la catalyse chimique et pétrolière a été de 3,1 t en 2012, en forte baisse par rapport à 2011.

La demande pour les autres usages, dont les alliages et superalliages, a augmenté ces dernières années, passant de 1,3 t en 2010 à 1,8 t en 2011 et 2,3 t en 2012.

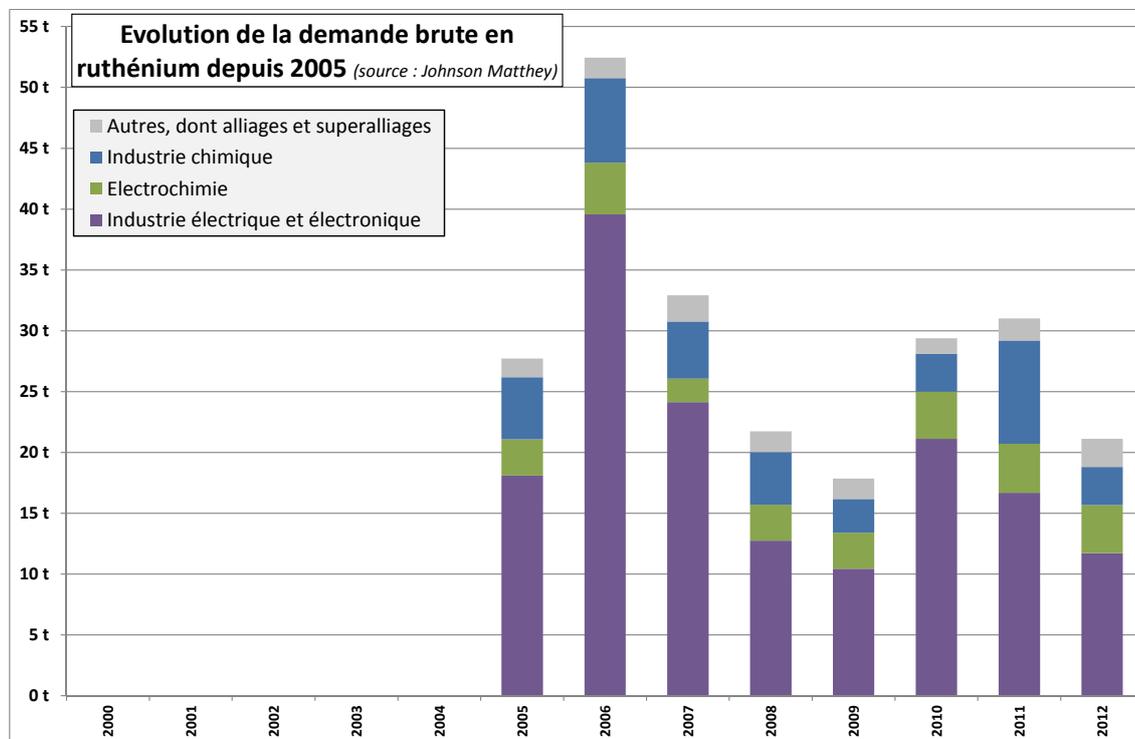


Figure 45 - Évolution de la demande en ruthénium par filières depuis 2005 (source : Johnson Matthey).

3.5. USAGES DE L'IRIDIUM

Dans les industries électriques et électroniques, l'iridium est utilisé dans les creusets destinés à la production de galettes cristallines de saphir pour la fabrication de diodes électroluminescentes (LED). Sa demande avait donc connu une forte croissance en 2010 avec l'augmentation des capacités de production d'écrans à rétroéclairage LED (téléviseurs et moniteurs d'ordinateurs). Mais la demande a ensuite fléchi avec l'atteinte de maturité des capacités de production. Certains complexes organo-métalliques à iridium sont utilisés pour des diodes électroluminescentes organiques (OLED) utilisées en particulier dans les smartphones.

L'iridium est aussi utilisé pour certains contacteurs et bougies d'allumage.

En électrochimie, l'iridium est utilisé en association avec le ruthénium en revêtement des électrodes utilisées pour la production par électrolyse de chlore et de soude caustique, en substitution progressive, pour des raisons environnementales, des anciennes électrodes au mercure (cf. 3.4).

En 2012, la répartition de la demande d'iridium était la suivante (voir aussi fig. 46) (Johnson Matthey, 2013) :

- industrie électrique et électronique : 39,3 % ;
- électrochimie (production de chlore et de soude) : 23,6 % ;
- industrie chimique : 13,1 % ;
- autres : 26,4 % ;

pour une demande totale mondiale d'iridium évaluée à 5,5 t Ir en 2012.

Les statistiques annuelles de consommation par filières ne sont publiées par Johnson Matthey que depuis 2005 (fig.47).

La consommation d'iridium avait été temporairement très élevée en 2010 et 2011 (10,5 t et 10,3 t respectivement, à comparer aux 3 à 4 t/an des années antérieures), avec la mise en place des capacités de production de LEDs.

Elle a nettement chuté en 2012 (- 46 %) avec le ralentissement des installations de nouvelles capacités de production de LEDs.

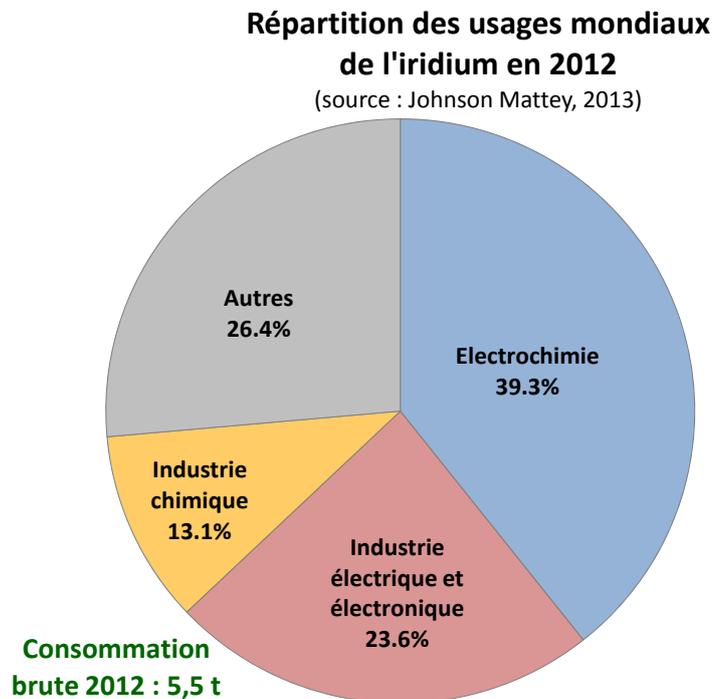


Figure 46 - Répartition des usages de l'iridium par filières dans le monde en 2012 (source : Johnson Matthey, 2012).

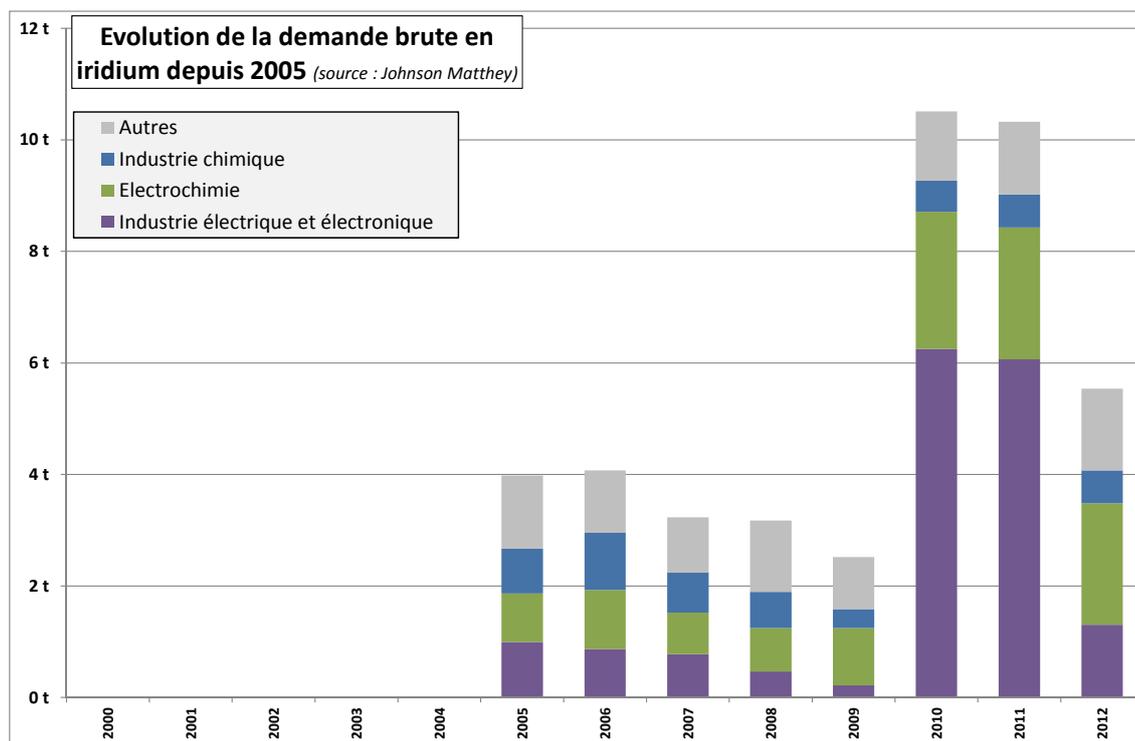


Figure 47 - Évolution de la demande en iridium par filières depuis 2005 (source : Johnson Matthey, 2012).

3.6. USAGES DE L'OSMIUM

Johnson Matthey, qui est une des principales sources d'informations statistiques publiées sur les platinoïdes, ne publie pas de statistiques sur l'osmium.

L'usage de ce métal est extrêmement restreint, sa consommation totale serait bien inférieure à 1 t/an, ce qui en fait probablement le métal stable le moins consommé du tableau de Mendeleïev (même les terres rares les plus rares comme le thulium et le lutétium ont des productions et consommations supérieures).

C'est le plus dur des platinoïdes. Il est rarement utilisé seul, en raison de la toxicité de son oxyde OsO_4 , mais plutôt en alliage avec d'autres platinoïdes qu'il induit.

De tels alliages sont utilisés pour des plumes de stylos, des pivots de boussoles, certains contacts électriques.

Par ailleurs, un alliage platine 90 % - osmium 10 % est utilisé pour réaliser divers implants comme des stimulateurs cardiaques ou des valvules cardiaques artificielles.

Le tétr oxyde d'osmium a quelques applications catalytiques en chimie organique.

3.7. CONSOMMATION

3.7.1. Évolution récente de la consommation

Le détail des consommations de chaque élément, par filière et zone géographique, a été passé en revue dans les sections 3.1 à 3.6, avec leur évolution respective.

Les figures 48, 49 et 50 récapitulent ces tendances globalisées, toutes filières utilisatrices confondues, par zone géographique et par origine (primaire ou secondaire), pour les trois métaux les plus importants du marché, platine, palladium et rhodium, pour lesquelles les données sont publiées par Johnson Matthey depuis 1975, 1980 et 1985 respectivement.

On constate qu'en moyenne :

- la demande brute en platine a augmenté de 3,12 %¹⁸ en moyenne sur les 37 dernières années (1975-2012), mais, compte tenu d'une mise en place progressive du recyclage, en particulier issu des pots catalytiques automobiles (cf. 3.1.1 et 4.5), la demande nette n'a augmenté que de 2,31 % sur cette même période¹⁹ ;
- la demande brute en palladium a augmenté de 5,07 % en moyenne sur les 32 dernières années (1980-2012), mais, compte tenu d'une mise en place progressive du recyclage, en particulier à partir des pots catalytiques automobiles, la demande nette n'a augmenté que de 4,24 % sur cette même période ;
- la demande brute en rhodium a augmenté de 5,23 % sur les 27 dernières années (1985-2012), mais, compte tenu d'une mise en place progressive du recyclage, en particulier à partir des pots catalytiques automobiles, la demande nette n'a augmenté que de 4,02 % sur cette même période.

On constate aussi que ces évolutions, même si elles sont globalement et significativement croissantes sur le moyen-long terme, peuvent être assez erratiques sur le court terme, surtout depuis 2008, au gré des aléas des crises économiques (chute des demandes fin 2008 et en 2009 avec la crise financière globale, puis baisse récente de la production automobile en Europe, par exemple) ou des fluctuations partiellement spéculatives sur les prix (chute temporaire de la demande en palladium après l'envolée passagère mais fulgurante de son prix au cours de l'année 2000).

¹⁸ Une croissance de 3,12 % par an équivalent à un doublement de la demande tous les 22 ans. Une croissance de 5,07 % ou 5,23 % par an équivalent à un doublement de la demande tous les 13,3 et 14 ans respectivement.

¹⁹ Il convient toutefois de noter que cette hausse de la demande nette plus faible que celle de la demande brute n'est permise que par un accroissement du taux de recyclage des produits en fin de vie. Une fois que ce taux de recyclage aura atteint un niveau optimal (il ne pourra pas être supérieur à 100 % des produits consommés un laps de temps auparavant correspondant à la durée de vie de ces produits), si la croissance de la demande brute se poursuit, la croissance de la demande nette devra suivre le même taux.

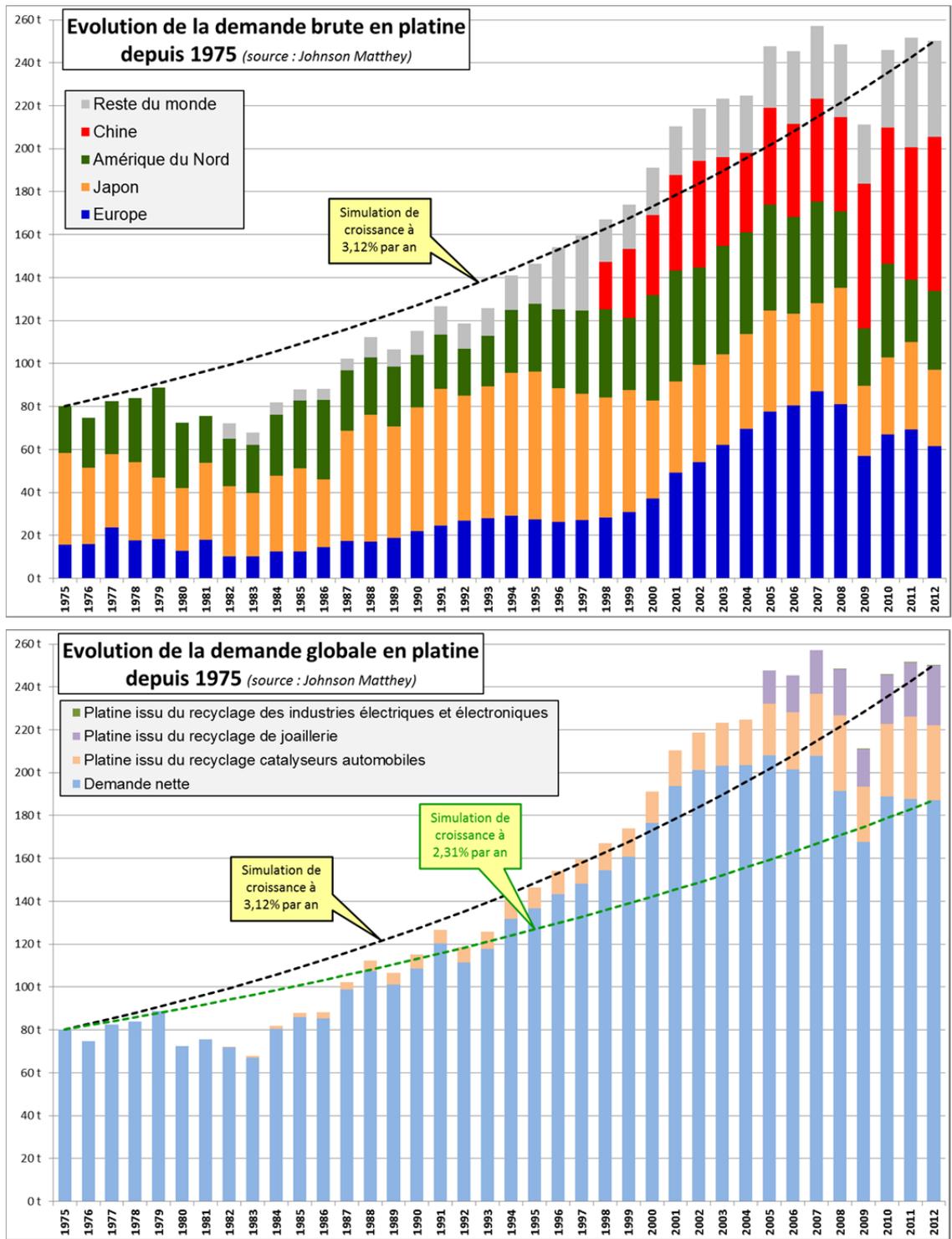


Figure 48 - Évolution de la demande globale en platine par zone géographique (en haut) et par origine primaire ou secondaire (en bas) depuis 1975. Source : Johnson Matthey.

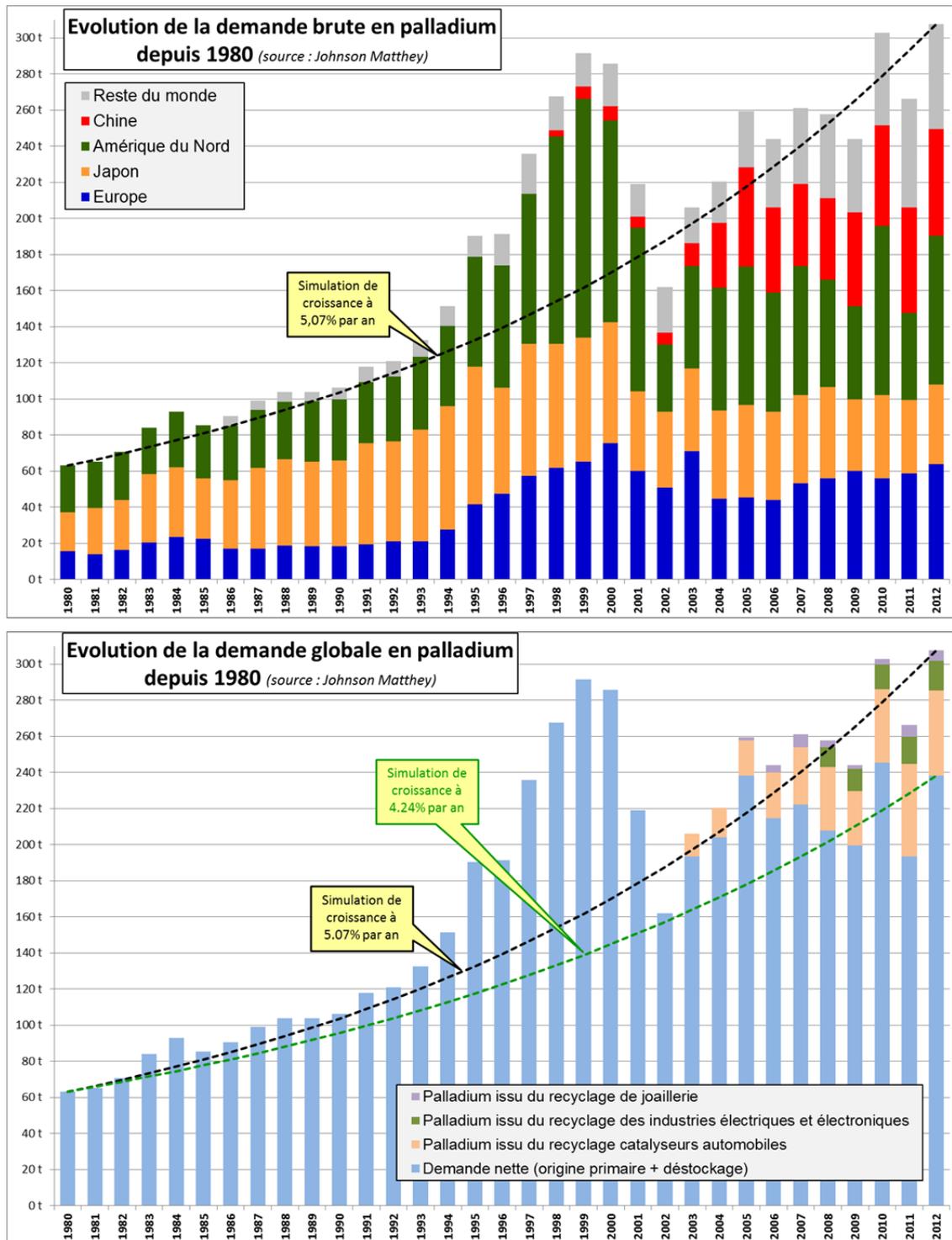


Figure 49 - Évolution de la demande globale en palladium par zone géographique (en haut) et par origine primaire ou secondaire (en bas) depuis 1980. Source : Johnson Matthey.

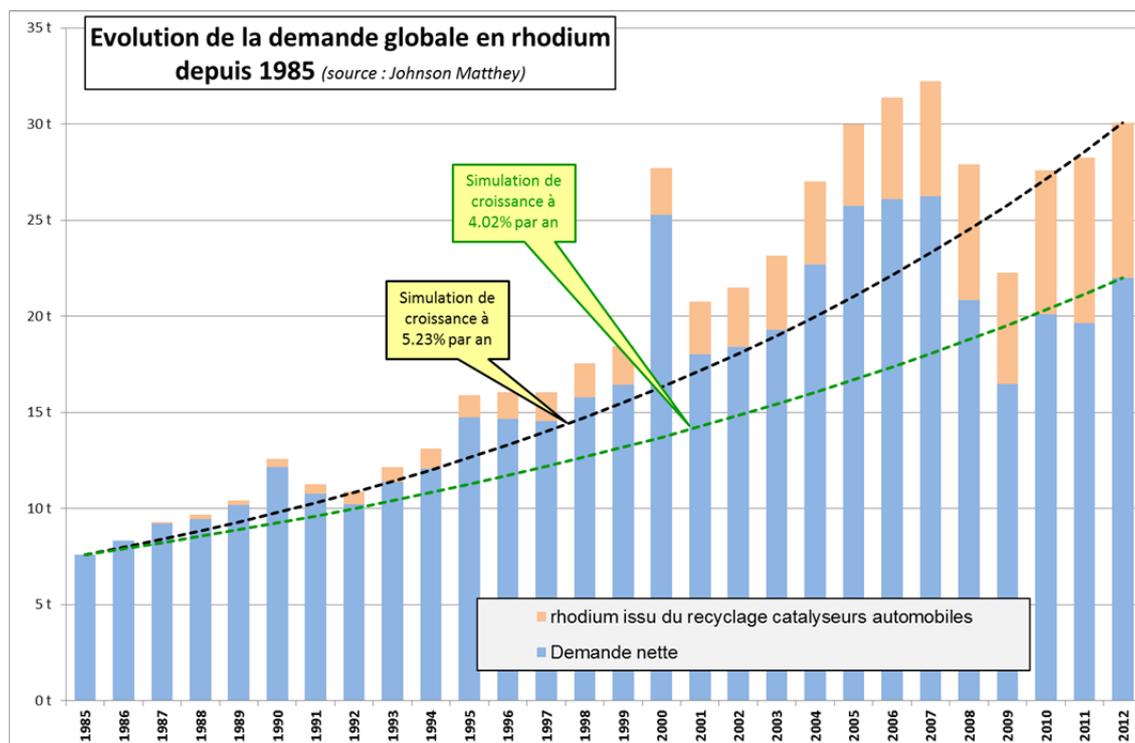


Figure 50 - Évolution de la demande globale en rhodium depuis 1985.
Source : Johnson Matthey.

Les consommations en ruthénium et en iridium ont été très fluctuantes ces dernières années et ne sont documentées que depuis peu (cf. fig. 45 et 47), il est difficile d'en dégager ou extrapoler des tendances.

3.7.2. Perspectives d'évolution de la demande

Les perspectives d'évolution des demandes par métal et par filière ont été évoquées au cours des sections 3.1 à 3.6.

En ce qui concerne les trois principaux métaux du groupe du platine (le platine, le palladium et le rhodium), la demande est largement dominée par le secteur de la catalyse automobile, qui sera déterminant pour anticiper l'évolution de cette demande.

Pour récapituler :

- La demande en équipement de catalyse automobile pour la dépollution des échappements devrait rester globalement orientée à la hausse au moins dans les dix prochaines années, en raison de la poursuite de la croissance du marché automobile mondial, toujours tiré par certains pays (Chine en tête), et de la généralisation de normes antipollution de plus en plus strictes dans nombre de pays. Ceci devrait se traduire par une poursuite des hausses des demandes correspondantes en palladium et en rhodium, mais moins en platine, dont la demande correspondante est attendue plus stable, en raison de l'affaiblissement des productions de véhicules diesel, plus développées en Europe où cette production est en crise, et parce que les avantages

fiscaux qui avaient conduit au fort développement du diesel sont de plus en plus remis en question. Cela étant, un éventuel nouveau déséquilibre du marché du palladium, comme en 1997-2000, qui conduirait à une forte hausse de son prix comparé à celui du platine, pourrait conduire à un basculement d'une partie de la demande vers le platine²⁰.

- Pour la plupart des autres usages industriels de ces métaux (catalyses dans les industries chimiques et pétrolières, industries électriques et électroniques, verrerie), les analystes de Johnson Matthey s'attendent à des demandes en platine, palladium et rhodium plutôt stabilisées, voire en baisse. Il en est de même pour les usages dentaires du palladium.
- Pour les usages médicaux du platine, le niveau de consommation ne devrait évoluer que modérément, ce qui ne devrait guère impacter la demande globale vu sa faible part de marché.
- La prévision de l'évolution de la demande en joaillerie est plus aléatoire. Johnson Matthey s'attend à une relative stabilité de la demande, mais elle pourra être assez dépendante des prix, et pourra donc servir en partie de « variable d'ajustement » à l'équilibre du marché.
- Enfin, la prévision de l'évolution de la demande est encore plus aléatoire dans le secteur des placements (ETFs, lingots et pièces), vu son caractère particulier et relativement spéculatif. De forts retournements de tendance ont pu s'observer récemment : les investissements en palladium en Amérique du Nord sont passés de 3 t en 2009 à 33,9 t en 2010, puis à un désinvestissement de 16,6 t en 2011 puis un réinvestissement de 9,5 t en 2012 (fig. 39). Ce secteur a représenté en 2012 5,7 %, 4,7 % et 3,7 % des demandes en platine, palladium et rhodium respectivement. Il devrait donc en partie pouvoir jouer un rôle de variable d'ajustement du marché en fonction de l'offre et de la demande industrielle, mais il peut jouer dans un sens comme dans l'autre : un déficit de d'offre conduirait à une hausse des prix, qui pourrait conduire les investisseurs à réaliser leurs bénéfices et vendre, ou au contraire à conserver leur placement en spéculant sur une poursuite de la hausse, jusqu'à l'éclatement probable de la bulle. Par ailleurs, les quantités stockées, qui représentent 3,7 à 5,7 % de la demande, ne correspondent guère qu'à une ou deux années d'augmentation probable de la demande industrielle : ces quantités pourraient donc matériellement lisser un déficit temporaire du marché, mais seront insuffisantes pour soutenir des croissances durables des demandes matérielles.
- Ce sont les taux de pénétration des innovations technologiques qui pourront avoir un impact fort, à échéance de 10 à 20 ans, sur les demandes en ces métaux : un taux de pénétration de la voiture électrique sur batterie (lithium-ion ou autres) important qui se traduirait par une baisse associée de la construction de véhicules thermiques conduirait à une réduction de la demande en platinoïdes pour la catalyse des gaz d'échappements. Inversement, un début de pénétration de la voiture électrique à pile à combustible devrait conduire à une hausse de la demande en platine. Les voitures

²⁰ Un différentiel d'évolution des prix s'est observé au premier semestre 2013 : dans une ambiance générale de prix des matières premières métalliques déprimés, le prix moyen du platine a baissé de 15,3 % entre le 1^{er} et le 2^{ème} trimestre 2013, et celui du palladium seulement de 3,4 %.

électriques sur batteries restent pénalisées, aux yeux de l'utilisateur, par une faible autonomie et un temps de recharge important, inconvénients évités par la pile à combustible, laquelle pourrait donc, à échéance de 15 à 20 ans, devenir une alternative crédible. Dans ce cas, la demande en platine devrait connaître une forte hausse, et cette filière devenir la première consommatrice de platine.

Les développements erratiques de la crise économique mondiale actuelle compliquent cependant ces prévisions.

3.8. SUBSTITUTIONS

Pour la catalyse automobile, les efforts de recherche pour se passer des platinoïdes, qui sont très chers, n'ont pas encore donné de résultats convaincants. Ces métaux restent difficilement substituables. Ils peuvent néanmoins partiellement se substituer entre eux : le palladium est actuellement préféré pour la catalyse des échappements des moteurs à essence non pas parce qu'il serait plus performant, mais surtout parce qu'il est moins cher que le platine. Les fabricants de catalyseurs ajustent les proportions relatives en fonction des prix. À l'inverse, on peut assez facilement substituer jusqu'à environ 20 à 25 % du platine par du palladium pour les pots catalytiques diesel. Il n'a pas été trouvé de substitution efficace au rhodium pour la dissociation des oxydes d'azote.

Pour les autres applications de catalyse industrielles, on peut souvent partiellement substituer un platinoïde par un autre, mais avec une perte d'efficacité, puisque les compositions retenues sont généralement celles qui sont optimales. Dans l'industrie chimique lourde (hors silicones), les catalyseurs ne sont pas « consommés » et, sauf usure, sont relativement durables. Le prix relatif de chaque élément est moins déterminant que l'optimisation de l'efficacité.

Pour les alliages dentaires, diverses substitutions sont possibles avec des métaux moins nobles (chrome-cobalt, etc.), l'or, ou des céramiques.

Dans la verrerie, on peut utiliser des filières en carbure de tungstène pour la production de la fibre de verre.

Pour les piles à combustible, les piles à basse température qui exigent du platine pourraient être remplacées par des piles à haute température à oxydes solides qui n'en exigent pas, ce qui est déjà le cas pour les installations stationnaires. Mais, cette technologie ne semble pas adaptée (ou pas encore adaptée) aux installations mobiles pour les véhicules, avec les exigences de sécurité, d'encombrement et de masse associées.

4. L'offre : ressources et production mondiale

4.1. LES SOURCES DE PLATINOÏDES

4.1.1. Abondance des platinoïdes dans l'écorce terrestre

Les six métaux du groupe du platine sont parmi les plus rares des métaux dans l'écorce terrestre. Ils se situent, par ordre d'abondance décroissante, entre les 70^e et 80^e rangs sur les 83 éléments significativement présents dans cette écorce²¹. Parmi les métaux, seuls le bismuth, l'or, le tellure et le rhénium ont des abondances d'ordres de grandeur aussi faibles.

Le tableau 14 récapitule les abondances moyennes dans la croûte terrestre (« clarke ») des treize éléments les moins abondants sur 83, telles qu'estimées dans le CRC Handbook of Chemistry and Physics (2011)²². Les six platinoïdes sont un peu plus abondants dans les roches ultrabasiques, avec des teneurs moyennes de 50 à 100 ppb.

Rang par ordre d'abondance naturelle	Élément	Clarke
70	Pd	15 ppb
71	Bi	8.5 ppb
72	He	8 ppb
73	Ne	5 ppb
74	Pt	5 ppb
75	Au	4 ppb
76	Os	1.5 ppb
77	Ru	1 ppb
77	Rh	1 ppb
77	Ir	1 ppb
77	Te	1 ppb
81	Re	0.7 ppb
82	Kr	0.1 ppb
83	Xe	0.03 ppb

Tableau 14 - Les treize éléments les plus rares sur les 83 éléments significativement présents dans l'écorce terrestre (source : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2011).

Les six platinoïdes sont surlignés en jaune orangé.

²¹ L'écorce terrestre est composée des éléments portant les numéros atomiques 1 (hydrogène) à 83 (bismuth) du tableau de Mendeleïev, moins les numéros 43 (technétium) et 61 (prométhium), plus les numéros 90 (thorium) et 92 (uranium). Les éléments 43, 61, 84 à 89 et 91 sont très instables et n'y existent qu'en extrêmement faible quantité de manière fugace, générés par la décomposition radioactive d'autres éléments.

²² À ces ordres de grandeur, les chiffres ne sont que des estimations approximatives et des ordres de grandeur. Ils peuvent varier selon les auteurs et les sources. Ainsi selon Rudnik & Gao (2003), cités par le British Geological Survey (2012), les abondances crustales des platinoïdes seraient de 1,5 ppb pour Pt et Pd, 0,57 ppb pour Ru, 0,041 ppb pour Os et 0,037 ppb pour Ir (Rh n'est pas cité).

Les météorites ferreuses contiennent davantage de platinoïdes, jusqu'à 30 g/t. Ceci laisse supposer que le noyau ferro-nickellifère de la terre pourrait en contenir des teneurs comparables.

Selon le CRC Handbook, l'eau de mer contiendrait environ 0,7 ng (soit $0,7 \cdot 10^{-9}$ g) de ruthénium par litre, et des quantités encore inférieures, indétectables, des autres métaux du groupe.

4.1.2. Minéraux et minerais

Dans la nature, les métaux du groupe du platine sont presque toujours associés entre eux, en proportions relatives variables. On les trouve principalement sous forme native et d'alliages et composés intermétalliques naturels (platinoïdes entre eux ou avec du fer, du nickel, du cuivre, de l'étain, plus accessoirement du mercure, de l'indium, etc.), et sous forme de composés avec le soufre, le tellure, l'arsenic, l'antimoine, le bismuth, le sélénium (sulfures, arséniures, sulfoarséniures, antimoniures, tellurures, bismuthures plus ou moins complexes, etc.). Un seul oxyde naturel est répertorié (tab. 15).

L'Association Minéralogique Internationale (www.ima-mineralogy.org) reconnaît 130 espèces minérales impliquant des platinoïdes, dont une cinquantaine est récapitulée dans le tableau 15²³. Les formules chimiques ne sont que théoriques, les minéraux naturels incluant généralement des impuretés et des substitutions élémentaires.



Figure 51 - À gauche, cristal cubique de platine natif (Konder/Kondyor, Khabarovsk, Russie).
À droite : cristal de sperrylite (Talnakh, Norilsk district, Russie) (photos JF. Labbé).

Seuls les éléments natifs et alliages, et quelques sulfures, arséniures (sperrylite), sulfoarséniures, antimoniures et tellurures sont significatifs pour l'économie. Les autres espèces minérales sont des curiosités minéralogiques n'existant que sous forme microscopique.

²³ À noter que les termes pourtant largement usités d'osmiridium et d'iridosmine utilisés pour désigner les alliages naturels d'osmium et d'iridium selon que l'un ou l'autre métal domine n'ont pas été validés par l'Association Minéralogique Internationale.

Ruthénium dominant		Rhodium dominant		Palladium dominant		Osmium dominant		Iridium dominant		Platine dominant	
Nom	Formule théorique	Nom	Formule théorique	Nom	Formule théorique	Nom	Formule théorique	Nom	Formule théorique	Nom	Formule théorique
Eléments natifs et alliages											
Ruthénium	Ru	Rhodium	Rh	Palladium	Pd	Osmium	Os	Iridium	Ir	Platine	Pt
Rutheniridosmine	(Ir,Os,Ru)			Atokite	(Pd,Pt) ₃ Sn	Iridosmine* (Os,Ir)	Os>Ir	Osmiridium*	(Ir,Os) Ir>Os	Isoferroplatine	Pt ₃ Fe
				Stannopalladinite	(Pd,Cu) ₃ Sn ₂	Chengdeite			Ir ₃ Fe	Tulameenite	Pt ₂ FeCu
				Potarite	PdHg					Rustenburkite	(Pt,Pd) ₃ Sn
Sulfures, sulfosarséniures											
Laurite	(Ru,Os) ₂ S ₂	Kingstonite	Rh ₂ S ₄	Vysotskite	(Pd,Ni)S	Erlchmanite	Os ₂ S	Kashinite	Ir ₂ S ₃	Cooperite	PtS
Ruarsite	(Ru,Os)AsS	Hollingworthite	RhAsS			Osarsite	OsAsS	Irarsite	IrAsS	Platarsite	PtAsS
		Bowieite	Rh ₂ S ₃							Daomanite	CuPtAs ₂ S ₂
Séléniures											
				Verbeekite	PdSe ₂					Sudovikovite	PtSe ₂
				Palladseite	Pd ₁₇ Se ₁₅						
				Oosterboschite	(Pd,Cu) ₇ Se ₅						
Tellures, telluroantimoniures, tellurobismuthures											
				Kotulskite	PdTe			Shuangfengite	IrTe ₂	Monchéite	(Pt,Po)(Te,Bi)
				Merenskyite	(Pd,Pt)(Te,Bi)			Mayingite	IrBiTe	Maslovite	PtBiTe
				Michenerite	Pd(Bi,Sb)Te						
				Sopcheite	Ag ₄ Pd ₃ Te ₄						
Arséniures, arsénoantimoniures											
Ruthenarsénite	(Ru,Ni)As	Cherepanovite	RhAs	Stillwaterite	Pd ₈ As ₃	Omeite	OsAs ₂	Iridarsénite	IrAs ₂	Sperryite	PtAs ₂
Anduoite	RuAs ₂	Zaccarinite	RhNiAs	Isomertieite	Pd ₁₁ As ₂ Sb ₂						
Antimoniures, antimobismuthures											
				Sudburyite	(Pd,Ni)Sb					Genkinité	(Pt,Pd,Rh) ₄ Sb ₃
				Stibiopalladinite	Pd ₅ Sb ₂					Geversite	Pt(Sb,Bi) ₂
Bismuthures											
				Froodite	PdBi ₂					Insizwaite	PtBi ₂
Oxydes											
				Palladinite	(Pd,Cu)O						

* Bien que les termes d'iridosmine et d'osmiridium soient largement répandus dans la littérature, ils ne sont pas validés comme espèces minérales par l'Association Minéralogique Internationale

Tableau 15 - Les principaux minéraux des éléments du groupe du platine reconnus par l'Association Minéralogique Internationale (www.ima-mineralogy.org).

4.1.3. Principaux types de gisements

Les gisements de platinoïdes sont toujours liés à des roches magmatiques basiques ou ultrabasiques d'origine mantellique, et aux placers qui résultent de leur érosion. Les types de gisements sont bien identifiés mais leur classification et leur regroupement en familles varient selon les auteurs. L'USGS (Wilbur et Bleiwas, 2004) a publié un tableau récapitulatif des gisements de platinoïdes, adapté ci-après (tab. 16).

Contexte	Type	Minéralisation	Exemples	Importance
Gisements liés au magmatisme basique et ultrabasique				
Intrusion basique/ ultrabasique litée	Couches à sulfures disséminés enrichis en EGP	EGP dominants (Pt ≥ Pd)	Merensky Reef du Bushveld (Afrique du Sud) ; Grand Dyke (Zimbabwe)	Ressources majeures en EGP
	Chromitites stratiformes enrichies en EGP	EGP dominants (Pt ≥ Pd)	UG2 Reef du Bushveld (Afrique du Sud) ; Panton (Australie)	Ressources majeures en EGP
	Pipes discordants de dunités	EGP dominants (Pt ≥ Pd)	Quelques pipes exploités jadis dans l'Eastern Limb du Bushveld (Afrique du Sud)	Petits gisements riches
	Sulfures massifs à disséminés au contact de l'encaissant	Minéralisations Cu, Ni, et Pd > Pt	Platreef du Bushveld (Afrique du Sud) ; Complexe de Duluth (Minnesota, USA), Marathon & River Valley (Canada)	Ressources majeures en EGP
Sills et dykes ayant alimenté de grands épanchements basaltiques continentaux	Sulfures massifs à disséminés	Minéralisations Ni, Cu, et Pd > Pt	Norilsk-Talnakh (Russie) ; Jinchuan (Chine)	Ressources majeures en EGP
Ceintures de roches vertes archéennes	Sulfures disséminés à massifs dans des komatiites	Minéralisation Ni, Cu, et Pd > Pt	Kambalda (Australie-Occid.) ; Thompson (Ontario, Canada)	Ressources significatives en EGP
Intrusion basique/ ultrabasique liée à un astroblème	Corps sulfurés en bordures des intrusions	Minéralisation Ni, Cu, et Pd > Pt	Sudbury (Ontario, Canada)	Ressources significatives en EGP
Orogène liée à une subduction	Sulfures disséminés aux contacts des différentes phases intrusives	Minéralisation Pd > Pt	Lac des Iles (Quebec, Canada)	Ressources significatives en EGP
Ophiolites	Sulfures disséminés dans des cumulats ultrabasiques	Minéralisations Cu, Ni, Pd, Pt	Acoje (Philippines)	Ressources marginales en EGP
Intrusions ultrabasiques zonées de type alaskéennes	Alliages Fe-Pt dans des chromitites et des dunités	Minéralisations Ti, V, PGE marginaux	Oural, Kondyor (Russie)	Peu de production primaire, mais source de minéralisations en placer
Gisements épigénétiques de surface				
Sur intrusions ultrabasiques zonées	Placers en EGP dérivés d'intrusions ultrabasiques zonées	Pt, Os, Ir	Oural, Kondyor (Russie) ; Colombie ; Alaska	Production historique significative d'EGP
Sur intrusions ultrabasiques zonées	Latérites développées sur des intrusions ultrabasiques	Ni, Co, EGP	Syerston (Australie)	Non exploité, en projet.

Tableau 16 - Classification des gisements de métaux du groupe du platine, adapté d'après Wilbur & Bleiwas, USGS, 2004.

4.1.4. Gisements liés au magmatisme basique et ultrabasique

Jébrak et Marcoux (2008) distinguent les deux principaux types primaires suivants :

- les complexes ignés lités basiques et ultrabasiques et basaltes de plateaux à cuivre, nickel, chrome et platinoïdes (la plupart des grands gisements de platinoïdes, Bushveld en Afrique du Sud, Great Dyke au Zimbabwe, Norilsk-Talnakh en Russie, Sudbury au Canada, etc.) ;
- les intrusions ultrabasiques à platine magmatique-hydrothermal (Lac des Îles).

Ils distinguent aussi des concentrations de platinoïdes de moindre importance économique :

- dans certaines komatiites à nickel ;
- dans certaines ophiolites à chrome.

Une synthèse pourrait distinguer trois grands types de complexes magmatiques basiques et ultrabasiques porteurs de minéralisation à nickel sulfuré et/ou platinoïdes :

- les complexes intrusifs ultrabasiques stratifiés, se mettant en place dans la lithosphère continentale. Ils sont liés à des rifts et points chauds continentaux, ou exceptionnellement à un impact météoritique (astroblème) comme à Sudbury. Ils peuvent être d'âge Archéen comme Mt Scholl/Radio Hill en Australie, Selebi/Phikwe au Botswana, Grand Dyke du Zimbabwe, Paléoprotérozoïque inférieur comme le Bushveld en Afrique du Sud, Sudbury au Canada, Pechenga en Russie, Mésoprotérozoïque moyen comme Kabanga en Tanzanie ou Voisey's Bay au Canada ;
- les basaltes continentaux, mis en place dans des contextes similaires. Les principales minéralisations associées aux cheminées d'alimentation sont celles de Jinchuan en Chine (Néoprotérozoïque), et Norilsk/Talnakh en Russie (charnière Permien/Trias) ;
- les komatiites, qui sont des roches ignées basiques très magnésiennes généralement archéennes ou minoritairement paléoprotérozoïques. Les systèmes komatiitiques s'étendent souvent sur plusieurs dizaines de kilomètres, avec des coulées effusives puissantes et des complexes de sills différenciés et intrusifs avec des cumulats à la base. Des minéralisations en nickel peuvent se présenter sous forme de grands gisements disséminés à basse teneur dans les cumulats des parties centrales des systèmes, et de petits gisements riches dans les parties distales des coulées et sills. Les nombreux gisements de nickel sulfurés de la ceinture de Kambalda, en Australie Occidentale, sont associés à des komatiites archéennes, ceux de Raglan et Thompson au Canada sont associés à des komatiites paléoprotérozoïques. Les minéralisations en platinoïdes associées sont mineures.

Tous ces types de gisements sont plus ou moins polymétalliques, avec nickel, cuivre, platinoïdes et parfois or associé. Les platinoïdes et l'or peuvent être récupérés soit comme sous-produits du nickel et du cuivre, soit comme produits principaux, avec un peu de nickel en sous-produit.

Si l'on classe les gisements plutôt par typologie économique selon les métaux dominants, on distinguera :

- les gisements à platinoïdes dominants et assez peu de sulfures, où la teneur en platine domine généralement celle en palladium : Bushveld (Afrique du Sud), Great Dyke (Zimbabwe), Stillwater (USA), avec un peu de nickel et de cuivre en sous-produits ;
- les gisements de nickel-cuivre sulfurés, avec platinoïdes en sous-produits, où la teneur en palladium surpasse généralement celle en platine : Norilsk-Talnakh (Russie), Sudbury (Canada), Jinchuan (Chine), et, plus marginalement, Kambalda (Australie), Pechenga (Russie), etc.

Globalement, les complexes ignés lités basiques et ultrabasiques, ayant concentré des ressources importantes en platinoïdes, sont peu nombreux à la surface des continents.

Ce sont essentiellement :

- le Bushveld, en Afrique du Sud, qui s'étend sur une zone de 450 km x 160 km, le plus important et de loin pour ses ressources et réserves en platine. Il est exploité actuellement sur 25 sites (chaque site pouvant inclure une ou plusieurs mines), par une douzaine de sociétés dont les principales sont Anglo American Platinum (« Amplats »), Impala Platinum (« Implats »), Lonmin, Aquarius Platinum et Northam ;
- le Grand Dyke du Zimbabwe, qui s'étend sur environ 500 km de long sur 3 à 12 km de large, exploité actuellement par trois mines de platine en activité (il est aussi exploité par des mines de chrome) ;
- le complexe de Norilsk-Talnakh, en Russie, dont la partie où se concentrent les gisements s'étend sur environ 60 km sur 20 km, qui produit surtout du nickel et du cuivre sulfurés, et des platinoïdes en sous-produits (palladium dominant). Il est exploité actuellement sur cinq mines principales par la société russe Norilsk Nickel ;
- le complexe de Sudbury, au Canada, qui s'étend sur environ 70 km x 35 km. Il est exploité essentiellement pour le nickel et le cuivre sulfurés, avec platinoïdes en sous-produits, en plusieurs mines, principalement par Vale Canada Ltd, Glencore-Xstrata, KGHM International et First Nickel Inc.

Les autres complexes sont de moindre extension (Stillwater aux États-Unis, Lac des Îles au Canada, Jinchuan en Chine, et quelques autres) ou plus faiblement minéralisés en platinoïdes (complexe de Duluth, aux États-Unis). Ils comptent pour une faible part de la production ou des ressources.

Le complexe du Bushveld (Afrique du Sud)

Le complexe du Bushveld est un objet géologique unique au monde au regard de son étendue, de sa continuité et de son contenu minéral. C'est un complexe igné mafique lité daté du Paléoproterozoïque (2 054 - 2 059 Ma). Il contiendrait, selon les auteurs, 70 % (Molyneux, 2011) à 95 % (Loferski, 2013) des réserves de platine du monde, 80 % de ses réserves de chrome et 40 à 50 % de celles en vanadium.

La présence de platine dans le Merensky Reef du Bushveld a été découverte par le Dr. Merensky en 1920.

Le complexe du Bushveld a fourni, chacune de ces dix dernières années (2003 à 2012), 73 à 77 % de la production minière mondiale de platine, 29 à 41 % de la production minière mondiale de palladium, et 79 à 86 % de la production minière mondiale de rhodium.

Le complexe du Bushveld s'étend sur 350 à 450 km E-W et 200 à 250 km N-S sur environ 66 000 km². Il comprend une suite basique/ultrabasique litée (la suite de Rustenburg), de 7 à 8 km d'épaisseur, qui affleure en trois zones distinctes sur ses flancs ouest (« Western Limb »), est (« Eastern limb ») et nord (« Northern limb ») (fig. 56), surmontée dans sa partie centrale par des granitoïdes et des volcanites felsiques du groupe de Rooiberg au sommet (Jébrak & Marcoux, 2008).

La suite litée basique/ultrabasique se divise elle-même en cinq ensembles dénommées successivement :

- « Zone marginale » (norite hétérogène), de 0 à 80 m de puissance ;
- « Zone inférieure » (dunites, norites et pyroxénites, de 800 à 1 700 m de puissance ;
- « Zone critique » (norites, anorthosites et pyroxénites), qui contient les minéralisations en chrome (chromitite) et en platinoïdes, de ± 1 400 m de puissance ;
- « Zone principale » (gabbros, norites, anorthosites, avec couches de titanomagnétite), de ± 2 800 m de puissance ;
- « Zone supérieure » (gabbro, anorthosite, diorite, avec plusieurs niveaux de magnétite vanadifère), de ± 2 100 m de puissance.

Les minéralisations en EGP se concentrent dans la « Zone critique » en essentiellement trois horizons platinifères, le « Merensky Reef », le « UG2 Reef » et le « Platreef », dans un ensemble composé de niveaux récurrents de chromitite, pyroxénite, norite et anorthosite lités dont chaque élément peut faire de quelques centimètres à quelques décamètres de puissance²⁴ (Blazy & Jdid, 2002).

Le Merensky Reef est constitué par une pyroxénite feldspathique d'une puissance irrégulière de 0,8 m en moyenne (allant de quelques décimètres à près de 10 m), bordée, de part et d'autre, par de fines couches de chromitite, et encaissée dans des norites. Il s'étend sur des centaines de kilomètres sur les Western et Eastern Limb du Complexe du Bushveld et plonge avec un pendage d'environ 10° vers le centre du complexe. Il a été reconnu par sondage jusqu'à plus de 1 900 m de profondeur.

Il contient très peu de sulfures. Ses teneurs sont régulièrement de l'ordre de 5 à 7 g/t EGP (Pt > Pd), surtout sous forme de composés intermétalliques, mais aussi de quelques sulfures, arséniures et tellurures (Gunn & Benham, 2009). Le contenu en Rh est de 3 à 5 % du total des EGP.

²⁴ La puissance d'une couche ou d'un filon est son épaisseur, en termes de géologie minière.

L'UG2 Reef est l'une des couches de chromitite submassive qui contient des sulfures et 4 à 8 g/t de platinoïdes, à platine dominant et des teneurs élevées en Rh et Ru, sous forme de ferroplatine, de braggite, cooperite, laurite, etc. Le contenu en Rh est de 8 à 11 % du total des EGP. La puissance de la couche minéralisée varie de 0,45 à 1,25 m.

Le Platreef est un niveau de pyroxénite à la base du complexe dans le Northern Limb, assez puissant (300 m) nettement plus riche en nickel et cuivre que les autres reefs, minéralisé en platinoïdes sur une trentaine de mètres de puissance et une extension d'environ 25 km, sous forme de sulfures, tellurures et arséniures. Les teneurs en platinoïdes sont de l'ordre de 1 à 4 g/t, inférieures à celles des autres reefs, avec Pd légèrement supérieur à Pt. La proportion de rhodium est plus faible, Rh ne représentant qu'environ 3 % des EGP.

En plus de ces reefs, des minéralisations en éléments du groupe du platine se trouvent dans des pipes de dunite qui recoupent localement le complexe dans l'Eastern Limb, avec des teneurs localement très élevées en platinoïdes (10 à 30 g/t en moyenne, jusqu'à 2 000 g/t cités), sous forme de ferroplatine et accessoirement de sperrylite et hollingworthite.

Le Merensky Reef est exploité pour les platinoïdes depuis 1928, en particulier dans la région de Rustenburg. L'UG2 Reef est exploité depuis 1983. Le Platreef avait été exploité épisodiquement dans le Northern Limb et se redéveloppe actuellement (mine de Mogalakwena (ex PP-Rust), projets d'Akanani, Aurora, etc.). Les pipes de dunite ont été exploités dans les années 1920 à 1930 et sont désormais épuisés (Gunn & Benham, 2009).

Le Grand Dyke (Zimbabwe)

Le Grand Dyke (« Great Dyke ») du Zimbabwe est une bande quasi rectiligne de 500 km de long et 3 à 12 km de large formée de roches basiques et ultrabasiques (norites, pyroxénites, harzburgites) différenciées en longue lentilles parallèles, dans lesquelles on trouve, comme dans la zone critique du Bushveld, des couches de chromitites et des niveaux platinifères. Il est daté du néoarchéen (2 550 Ma). Les platinoïdes sont concentrés sur deux niveaux de la série ultrabasique : la « Lower Sulfide Zone », de 30 à 60 m de puissance, à minéralisation disséminée non exploitable actuellement, et la « Main Sulfide Zone », de 2 à 8 m de puissance, enrichie en PGE à des teneurs de 3 à 4,7 g/t, et exploitée actuellement sur trois sites (Unki, Mimosa et Makwiro/Ngezi) et jusqu'à récemment sur le site de Hartley.

Le Grand Dyke du Zimbabwe a vu sa part dans la production mondiale de platine passer de 2,2 % en 2003 à 6 % en 2012, et celle en palladium de 1,7 à 4,4 %.

Le complexe de Norilsk-Talnakh (Kraï de Krasnoïarsk, Russie)

Le district de minéralisations à nickel-cuivre sulfurés et platinoïdes de Norilsk-Talnakh, dans la péninsule de Taimyr, dans le nord de la Sibérie (nord du Kraï de Krasnoïarsk) est associé à l'un des plus puissants épanchements de basaltes continentaux, à la

limite occidentale du craton sibérien (Jébrak et Marcoux, 2008). Il s'agit d'un complexe de sills de basaltes tholéitiques et de gabbros d'âge fin-Permien à Trias (248 à 216 Ma) qui correspondraient à des zones d'alimentation des basaltes effusifs. La minéralisation sulfurée à Cu, Ni et EGP est encaissée dans les intrusions en sills différenciés à olivine, pouvant atteindre 20 km de long, 2 à 3 de large et jusqu'à 300 m d'épaisseur. Il est exceptionnellement riche en palladium, avec un ratio Pd/Pt de l'ordre de 3,5 (Jébrak et Marcoux, 2008).

Le district porteur de minéralisations au sein du complexe magmatique s'étend sur environ 60 km SSW-NNE sur 20 km de largeur, et les cinq mines principales actuellement exploitées par la société russe Norilsk Nickel s'échelonnent sur une quarantaine de kilomètres (mines de Zapolyamy, Medvezhy Ruchey, Oktyabrsky, Taimyrsky et Komsomolsky). Cet ensemble est le plus gros producteur mondial de palladium (41 % de la production primaire mondiale en 2012) et le deuxième plus gros producteur mondial de platine (12 % de la production mondiale en 2012) après le Bushveld d'Afrique du Sud. Il a aussi été jusqu'à très récemment avec Sudbury l'un des deux plus gros districts producteurs de nickel au monde²⁵.

Le district de Sudbury (Ontario, Canada)

Le complexe de Sudbury est un complexe annulaire elliptique de 70 km de longueur WSW-ENE sur environ 35 km de large, avec une séquence magmatique unique mise en place il y a 1,85 milliards d'années, selon toute vraisemblance à la suite de la chute d'un astéroïde de plusieurs kilomètres de diamètre dans des terrains tardi-archéens et paléoprotérozoïques (Jébrak et Marcoux, 2008). Il a aussi été jusqu'à très récemment avec Norilsk l'un des deux plus gros districts producteurs de nickel au monde²⁶.

Le complexe de Sudbury est composé principalement d'une séquence différenciée avec norite quartzifère à la base, surmontée de gabbros quartzeux et de granophyres, avec un sous-niveau bréchique, puis d'une formation clastique vraisemblablement issue des retombées consécutives à l'impact, qui s'étend jusqu'à 50 à 80 km du complexe igné lité. Des dykes de norite ou de diorite recourent le socle. Les gîtes de nickel-cuivre sulfurés, massifs ou disséminés, sont associés aux dykes ou au sous-niveau bréchique. Les sulfures sont à fer, cuivre et nickel (chalcopyrite, cubanite, bornite, pentlandite, pyrite, pyrrhotite). Les EGP sont généralement sous forme de minéraux composés comme la sperrylite, la monchéite et la michénérite (cf. 4.1.2) (Jébrak et Marcoux, 2008). Les teneurs en EGP sont en moyenne plus faibles qu'à Norilsk (1 à 1,8 g/t vs 4,7 à 4,9 g/t à Norilsk), et le ratio Pd/Pt est de 1,1 à 1,5 à Sudbury, nettement moins élevé qu'à Norilsk.

²⁵ L'Indonésie et les Philippines ont désormais dépassé la Russie et le Canada pour la production de minière de nickel contenu depuis quelques années, à partir de gisements latéritiques, en particulier en approvisionnant la Chine pour sa filière de fonte au nickel (« Nickel pig iron »).

²⁶ Cf. note 25.

Les ophiolites

Des minéralisations en EGP peuvent être associées à des minéralisations en chromite de certaines ophiolites, comme à Acoje aux Philippines ou en Nouvelle Calédonie (cf. 4.2.3). Les teneurs économiques sont cependant rares et dispersées et aucune de ces concentrations n'a mené jusqu'à présent à des exploitations économiques de platine.

4.1.5. Gisements sulfurés en contexte sédimentaire

Un peu de platinoïdes est récupéré en sous-produit marginal de certains gisements de cuivre sulfuré en contexte sédimentaire, comme dans le Kupferschiefer en Pologne (mines des districts de Lubin et Polkowice exploitées par KGHM). Le platine et le palladium sont concentrés sur une couche de quelques décimètres de puissance (22 cm en moyenne) à la base de la couche cuprifère plurimétrique (1,6 m à 4,3 m), avec des teneurs moyennes citées de 0,14 g/t Pt et 0,08 g/t Pd (Piestrzynski, 2002). Mais rapportées au tonnage global de minerai traité, les quantités de platine et de palladium effectivement récupérées par KGHM correspondent à des teneurs récupérables globales encore bien plus faibles²⁷. Le platine et le palladium sont récupérés des boues anodiques résultant du raffinage électrolytique du cuivre.

Sarcia et Bouladon (1969) mentionnent des teneurs de 0,05 g/t Pt et 0,02 g/t Pd dans les minerais du Kupferschiefer en Allemagne (mine de Mansfeld), avec une production connue anecdotique de 0,9 kg Pt et 1,2 kg Pd entre 1928 et 1932.

De la même manière, des EGP à très faible teneur sont mentionnées dans certains gisements de cuivre et cobalt en contexte sédimentaire de la Copperbelt (R.D. du Congo et Zambie). Leur récupération dans le passé a été assez marginale (1,64 t de platinoïdes en auraient été récupérées au total entre 1922 et 1960, selon Bouladon, 1968). La récupération actuelle n'est pas publiée.

Le gisement de nickel sulfuré disséminé dans des schistes noirs de Talvivaara (Finlande), contient aussi un peu de platinoïdes, mais il n'y a pas de production publiée.

4.1.6. Placers

Les platinoïdes, plus particulièrement le platine et les autres platinoïdes lourds (Os, Ir), peu altérables, se concentrent, généralement avec l'or, dans certains placers alluviaux

²⁷ Pour 2011, KGHM publie avoir extrait et traité 29,5 Mt de minerai à 1,61 % Cu, et avoir produit 409,6 kt de cuivre raffiné à partir de 479,3 kt de cuivre contenu (taux de récupération du cuivre de 85 %). Elle a produit par ailleurs 31 kg de platine et 47 kg de palladium. KGHM publie ses réserves et ressources en cuivre et argent, mais ne les publie pas pour les EGP. Les quantités de Pt et Pd produites rapportées au tonnage total de minerai traité en 2011 correspondent à des teneurs récupérables de 1 ppb Pt et 1,6 ppb Pd (1 ppb = 0,001 g/t), soit inférieures au clarke. KGHM assume que 64 % du platine contenu initialement dans le minerai est perdu dans les déchets de flottation. À noter que le traitement des boues anodiques issues du raffinage électrolytique du cuivre permet aussi à KGHM de produire de l'or et du sélénium.

fluviales (Choco, Colombie ; Oural et Sibérie, Russie, Goodnews Bay, Alaska, etc.) et éluviaux (Rondônia, Brésil), voire dans des placers fossiles (des traces d'osmiridium accompagnent l'or dans le Witwatersrand en Afrique du Sud).

Les placers fluviaux ont été la seule source de platinoïdes au XIX^e siècle, jusqu'à la découverte des gisements de platine primaire du Bushveld et le démarrage de leur exploitation dans les années 1920, et en sont restés une part importante dans la première moitié du XX^e siècle.

Les ressources mondiales résiduelles en platine des placers étaient estimées, en 1987, entre 100 et 150 t Pt (Guilloux et Melloux, 1987), soit moins d'une année de production mondiale actuelle de platine. Les placers de l'Oural et d'Alaska sont pratiquement épuisés²⁸. La production de platine issu des placers est désormais marginale, elle représente de l'ordre de 3 % de l'approvisionnement mondial (Extrême-Orient russe, Colombie, Éthiopie).

Exceptionnellement, des pépites de plusieurs centaines de grammes ont été trouvées (fig. 52).



Figure 52 - Pépité de platine de 204 g de Nijni Tagilsk (Oural, Russie) exposée à la galerie de minéralogie du Museum National d'Histoire Naturelle de Paris (Photo L.-D. Bayle, © MNHN).

Les placers de l'Oural sont dérivés de l'altération et du démantèlement de massifs ultrabasiques différenciés de type alaskéen qui eux-mêmes n'ont que des teneurs primaires infra-économiques en EGP.

Les grains de platine récupérés dans les placers sont des alliages de platine impur. Quelques teneurs types sont indiquées dans le tableau 17.

²⁸ À titre d'exemple, la société britannique Eurasia Mining Plc (www.eurasiamining.co.uk) étudie le développement d'un nouveau placer à West Kytlim, dans l'Oural, dont les réserves sont évaluées à 1,7 t de platine.

Gisements ou districts	Pt	Os	Ir	Rh	Pd	Ru	Au	Fe	Cu	Source
Nijni Taguil (Oural, Russie)	83.0%	1.8%	1.9%	0.6%	0.3%			10.8%	1.3%	Sarcia et Bouladon, 1969
(Sibérie, Russie)	65.4%	10.7%	0.4%	3.9%	0.8%	2.3%				Guilloux et Meloux, 1987
Choco (Colombie)	86.2%	1.0%	0.9%	1.4%	0.5%		1.0%	7.8%	0.6%	Guilloux et Meloux, 1987
Yubdo (Ethiopie)	79.5%	1.4%	0.8%	0.8%	0.5%		0.5%	16.5%		Sarcia et Bouladon, 1969
Goodnews Bay (Alaska)	41.1%	8.6%								Guilloux et Meloux, 1987

Tableau 17 - Quelques compositions typiques de platine alluvionnaire.

Historiquement, les teneurs des placers de l'Oural ont pu atteindre bien plus de 5 g/t EGP. Dans certains placers de Sibérie, des teneurs de 0,1 à 0,2 g/t EGP ont été rapportées. En Colombie, les teneurs actuelles seraient généralement inférieures à 0,1 g Pt/m³.

Dans les conglomérats du Witswatersrand (Afrique du Sud) exploités pour l'or, des teneurs en osmiridium de 0,03 à 0,14 g/t sont mentionnées. Des chiffres sont disponibles pour la période 1925-1966, pendant laquelle 28 956 kg d'osmiridium auraient été extraits au total (Bouladon, 1968). La production actuelle n'est pas publiée.

4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES

4.2.1. Évaluation globale des ressources et réserves en platinoïdes

Dans son « Mineral Commodity Summary » publié janvier 2013, l'USGS évaluait les réserves mondiales d'éléments du groupe du platine (EGP) à 65,3 kt, dont 63 kt pour la seule Afrique du Sud. L'USGS publiait par ailleurs, en janvier 2009²⁹, les « reserve base » (la part des ressources les plus susceptibles de devenir des réserves) à 79,8 kt (cf. colonnes B des tableaux 18 et 19).

Toutefois, la compilation des données les plus récentes publiées par les sociétés³⁰, utilisées pour les colonnes C à G des tableaux 19 et 20, donne une consolidation totale des réserves minières identifiées de seulement 14,58 kt de métaux du groupe du platine (colonne C du tab. 18), et des ressources de 93,5 kt (colonne C du tab. 19).

Les réserves étant, par définition, la part des ressources dont l'exploitabilité économique a été démontrée par une étude de faisabilité, il faut considérer que les données publiées par les sociétés minières, qui mènent ces études, sont les références. Les « réserves » publiées par l'USGS ne correspondent donc vraisemblablement pas à ce qui pourrait être

²⁹ L'USGS, qui publie chaque année des « Mineral commodity summaries » pour la quasi-totalité des substances minérales d'intérêt économique, a cessé de publier les « reserve base » à partir de 2010.

³⁰ Le service MEG-Minesearch de SLN (www.sln.com) réalise de telles compilations détaillées à partir des données publiées par les sociétés. Elles peuvent donc aisément être vérifiées et, le cas échéant, mises à jour.

en toute rigueur qualifié de « réserves »³¹. Elles sont malgré tout citées ici pour mémoire, car les « Mineral Commodity Summaries » de l'USGS sont souvent pris comme référence dans de nombreuses études et publications. Mais seules les valeurs des réserves et ressources compilées des sociétés seront finalement retenues dans la présente analyse.

Certaines sociétés publient bien leurs ressources en précisant la part respective du platine, du palladium et du rhodium, mais certaines ne publient leurs ressources qu'en « 4^E », qui sont la somme des quatre éléments Pt+Pd+Rh+Au. L'or n'est pas un platinoïde et son inclusion dans les données biaise un peu l'évaluation finale. Toutefois, dans les gisements de platine, les teneurs en or sont en général marginales³².

Les colonnes D, E et F des tableaux 19 et 20 cumulent les données de ressources qui sont détaillées directement ou indirectement par les sociétés pour le platine, le palladium et le rhodium. Plusieurs sociétés ne publient pas leurs ressources pour le rhodium. Norilsk-Nickel par exemple, ne les publie pas sur ses gisements de Norilsk-Talnakh, ce qui ne signifie pas qu'il n'y a pas de rhodium, dont la société produit environ 2 t par an.

Seules quelques très rares sociétés publient des indications sur les ressources en Ru, Ir et Os. Ces informations sont trop parcellaires pour être globalisables.

Près de 70 % des réserves identifiées en platinoïdes sont situées en Afrique du Sud, presque entièrement dans le Bushveld (fig. 53).

Les gisements sud-africains sont généralement plus riches en platine qu'en palladium, et à l'inverse les gisements russes et nord-américains sont à palladium dominant. Ainsi, les ressources mondiales identifiées en platine sont situées à plus de 78 % en Afrique du Sud, et même à 88 % dans l'ensemble Afrique du Sud + Zimbabwe. Les ressources identifiées en palladium sont situées à près de 58 % en Afrique du Sud (et près de 67 % dans l'ensemble Afrique du Sud + Zimbabwe), à 25 % en Russie, et à 5,5 % en Amérique du Nord (USA + Canada).

³¹ Il est à noter que la valeur des « réserves » de 63 kt d'EGP pour l'Afrique du Sud citée dans le « Mineral Commodity Summary » de 2013 est reportée d'année en année depuis 1998 sans changement. Pourtant, une autre publication de l'USGS, « Platinum-Group metals, World supply and demand » (Wilburn & Bleiwas, 2004, cite, lui, un montant des « reserves » de 14 kt, qui est compatible avec la présente analyse et la colonne C du tableau 19.

³² Dans les tableaux 19 et 20, le fait que les quantités reportées en colonne G (sommées des ressources ou réserves détaillées en Pt, Pd et Rh) soient inférieures aux quantités indiquées en colonne C, s'explique d'une part parce que certaines sociétés ne publient que leurs ressources globales en EGP. De telles ressources sont incluses dans la colonne C mais exclues des colonnes D, E et F donc de la colonne G. D'autre part, certaines des ressources globalisées en EGP sont en réalité publiées en « 4E » (Pt, Pd, Rh, Au), incluant l'or, et par conséquent exagérées en ce qui concerne les seuls EGP.

A Pays	B Réserves en EGP selon USGS 2013	C Réserves en EGP fin 2012, compilation données sociétés	D Réserves par éléments lorsqu'elles sont distinguées dans les données disponibles, (compilation des données des sociétés minières)				H Production minière 2012 (selon J&M, mai 2013)		J Equivalence des réserves répertoriées en 2012 en nombre d'années de production au rythme de 2012*	
			E Pt	F Pd	G Rh	Pt+Pd+Rh	Pt	Pd	Pt	Pd
Afrique du Sud	63 000 t	10 176 t	6 457 t	3 177 t	543 t	10 177 t	127.4 t	74.6 t	~51 ans	~43 ans
Russie	1 100 t	2 234 t	469 t	1 765 t	n.d.	2 234 t	24.9 t	80.9 t	~19 ans	~22 ans
Zimbabwe	<i>inclus dans "autres pays"</i>	999 t	580 t	379 t	41 t	999 t	10.6 t	8.7 t	~55 ans	~43 ans
Etats-Unis	900 t	589 t	129 t	454 t	n.d.	583 t	3.7 t	12.3 t	~35 ans	~37 ans
Canada	310 t	413 t	130 t	283 t	n.d.	413 t	5.5 t	15.4 t	~23 ans	~18 ans
Autres pays	800 t	171 t	140 t	30 t	n.d.	170 t	3.3 t	4.7 t	~42 ans	~6 ans
TOTAL	65 310 t	14 582 t	7 905 t	6 088 t	583 t	14 576 t	175.4 t	196.6 t	~45 ans	~31 ans

* Ces durées ne doivent pas être considérées à la lettre, mais seulement comme des indicateurs. En effet, d'une part les réserves évoluent au fur et à mesure des travaux d'exploration et de certification, et avec l'évolution des prix qui fait varier les teneurs de coupure économiques. D'autre part le rythme de production a toujours évolué et continuera à évoluer dans les prochaines années et décennies.

Tableau 18 - Récapitulatif des réserves connues en éléments du groupe du platine (EGP) par pays, en t d'EGP contenus.

Les chiffres des réserves publiées par l'USGS (Loferski, 2013), reportées en colonne B ne sont pas certifiés. Les valeurs compilées à partir des données des sociétés (adaptées d'après MEG-Minerecherche et les rapports des sociétés) sont mieux étayées.

A Pays	B Reserve base en EGP selon USGS 2009	C Ressources en EGP fin 2012, compilation données sociétés	D Ressources par éléments lorsqu'elles sont distinguées dans les données disponibles, (compilation des données des sociétés minières)				H Production minière 2012 (selon J&M, mai 2013)		J Equivalence des ressources répertoriées en 2012 en nombre d'années de production au rythme de 2012*	
			E Pt	F Pd	G Rh	Pt+Pd+Rh	Pt	Pd	Pt	Pd
Afrique du Sud	70 000 t	66 749 t	33 354 t	22 093 t	4 106 t	59 553 t	127.4 t	74.6 t	~260 ans	~295 ans
Russie	6 600 t	14 071 t	3 663 t	9 851 t		13 514 t	24.9 t	80.9 t	~145 ans	~120 ans
Zimbabwe	<i>inclus dans "autres pays"</i>	7 764 t	4 098 t	3 316 t	350 t	7 764 t	10.6 t	8.7 t	~385 ans	~380 ans
Etats-Unis	2 000 t	1 683 t	490 t	1 193 t		1 683 t	3.7 t	12.3 t	~135 ans	~95 ans
Canada	390 t	1 718 t	477 t	973 t	2 t	1 452 t	5.5 t	15.4 t	~85 ans	~60 ans
Autres pays	850 t	1 544 t	533 t	826 t	3 t	3 550 t	3.3 t	4.7 t	~160 ans	~175 ans
TOTAL	79 840 t	93 530 t	42 615 t	38 252 t	4 460 t	87 516 t	175.4 t	196.6 t	~245 ans	~195 ans

* Ces durées ne doivent pas être considérées à la lettre, mais seulement comme des indicateurs. En effet, d'une part les réserves évoluent au fur et à mesure des travaux d'exploration et de certification, et avec l'évolution des prix qui fait varier les teneurs de coupure économiques. D'autre part le rythme de production a toujours évolué et continuera à évoluer dans les prochaines années et décennies.

Tableau 19 - Récapitulatif des ressources connues en éléments du groupe du platine (EGP) par pays, en t d'EGP contenus.

**Répartition des réserves
en platinoïdes par pays**

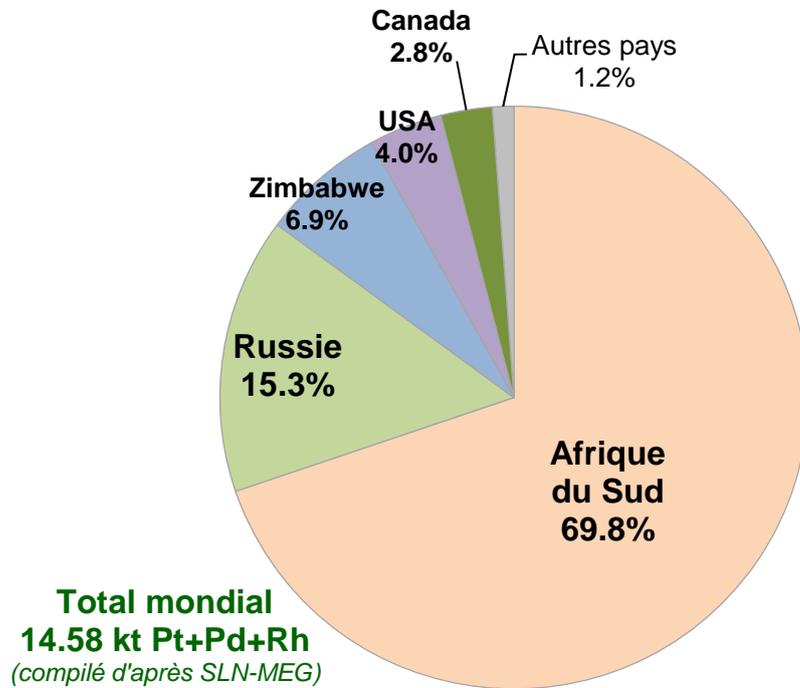
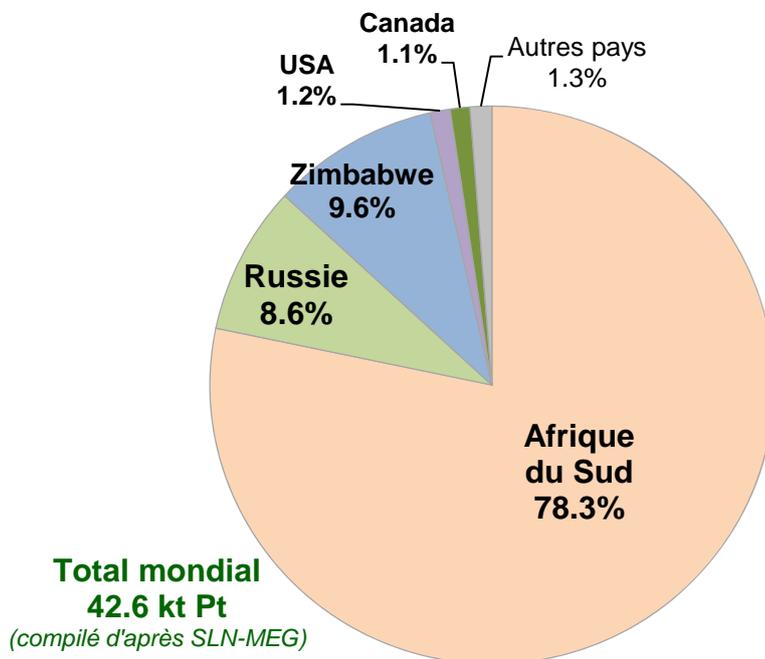


Figure 53 - Répartition des réserves mondiales en platinoïdes par pays
(adapté d'après SLN-MEG et les rapports des sociétés minières).

Répartition des ressources identifiées en platine par pays



Répartition des ressources identifiées en palladium par pays

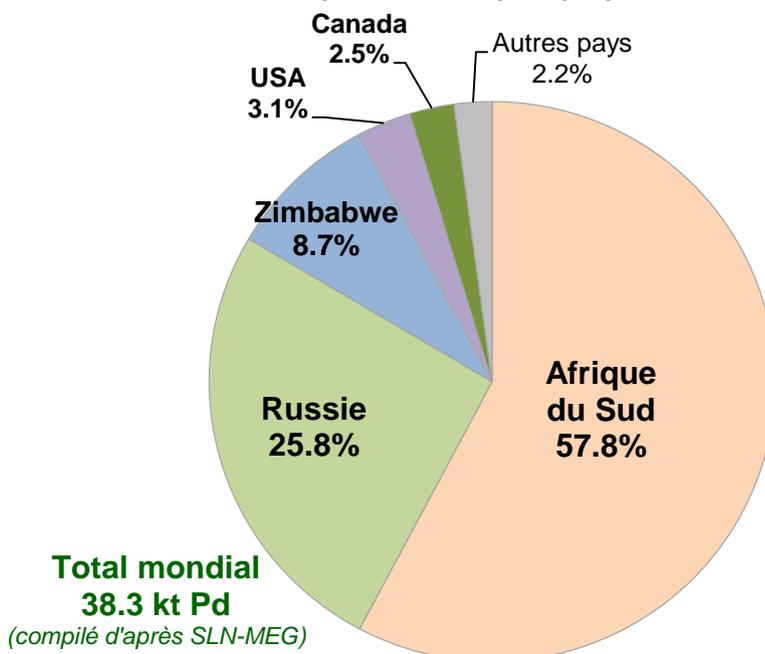


Figure 54 - Répartition des ressources mondiales en platine (en haut) et en palladium (en bas) par pays (adapté d'après SLN-MEG et les rapports des sociétés minières).

Si l'on fait abstraction des réserves en ruthénium, iridium et osmium, qui ne sont probablement pas intégrées car peu évaluées, et celles en rhodium, qui constituent au mieux 5 à 8 % des réserves, les réserves publiées par l'USGS correspondraient à environ 170 années d'exploitation au rythme constant de 2012 (379 t Pt+Pd extraites selon l'USGS, 394 t Pt+Pd+Rh extraites selon Johnson Matthey, cf. 4.3). Les réserves compilées à partir des données des sociétés correspondraient, quant à elles, à 37 années d'exploitation au rythme constant de 2012, dont 45 ans pour le platine et 31 ans pour le palladium.

Les ressources mondiales identifiées (tab. 19), correspondraient à 245 années de production au rythme constant de 2012 pour le platine, et 195 années pour le palladium.

Mais ces durées seront fortement réduites si l'on prend comme hypothèse une poursuite de la croissance moyenne de la demande à un taux similaire au taux moyen observé ces dernières décennies, de + 3,12 % pour le platine en moyenne de 1975 à 2012 et de +5,07 % pour le palladium en moyenne de 1980 à 2012 (cf. 3.7.1). Une telle croissance de la demande devra, pour être satisfaite, être soutenue par une croissance de la production minière globalement équivalente sur la durée³³. Les ressources identifiées de 42,6 kt de platine couvriraient ainsi une production qui continuerait à croître de 3,12 % par an pendant 69 ans (jusqu'en 2081) et celles de 38,2 kt de palladium couvriraient une production qui continuerait à croître de 5,07 % par an pendant 48 ans (jusqu'en 2060). Les analystes tablent cependant sur des prévisions de croissance de la demande plus modérées (cf. 3.7.2), ce qui allongera d'autant les « durées de vie » indicatives des ressources.

Concernant le rhodium, le tableau 16 indique des ressources de l'ordre de 11 % des ressources en platine ou de celles en palladium. Mais les données sont parcellaires. Sur la base d'une production de l'ordre de 15 % de celle en platine ou en palladium (30 t/an Rh vs environ 200 t/an Pt ou Pd), l'hypothèse de ressources en rhodium qui seraient globalement de l'ordre de 15 % des ressources en platine ou de celles en palladium est réaliste, et elles représenteraient aussi une couverture de la production pour plusieurs décennies.

Ces durées ne doivent pas être prises à la lettre, mais seulement comme des indicateurs. En effet, les ressources évoluent au fur et à mesure des travaux d'exploration et de leurs éventuelles nouvelles découvertes, et les réserves évoluent au fur et à mesure des travaux de certification, et avec l'évolution des prix qui fait varier les teneurs de coupure économiques. D'autre part, les rythmes de consommation peuvent subir des variations significatives en fonction des évolutions technologiques (usages, substitutions) et des conjonctures économiques générales.

³³ La demande est satisfaite par la production primaire (minière) et secondaire (recyclage), ainsi que par un éventuel déstockage. Mais à terme, une fois les taux de recyclage optimisés (et ils sont déjà assez développés pour le platine et le palladium), la production secondaire, issue d'une consommation antérieure, ne peut pas croître plus rapidement que la demande, lorsque cette croissance reste positive sur le long terme. La production minière, qui doit assurer la différence, devra donc aussi croître à un rythme similaire.

Ces indicateurs permettent toutefois de se rendre compte qu'il n'y a pas de problèmes de réserves physiques et de ressources géologiques en platine ou palladium pour satisfaire une demande même croissante à court et moyen terme (échéance de quatre ou cinq décennies). En revanche, pour une satisfaction au-delà de cinquante ans d'une demande qui resterait croissante, de nouvelles découvertes seront indispensables.

Les gisements riches en platine du Bushveld en Afrique du Sud, et, dans une moindre mesure, du Grand Dyke du Zimbabwe, n'ont pas d'équivalents connus ailleurs dans le monde. Vu le degré atteint par la connaissance de la géologie de la planète, il est peu probable que d'autres gisements équivalents existent en surface. Sauf à découvrir de tels gisements entièrement cachés (dans des socles qui seraient recouverts par d'épaisses couches de sédiments, voire, en Antarctique par exemple, sous des calottes glaciaires), il est vraisemblable que l'Afrique du Sud restera encore longtemps le principal fournisseur minier de platine.

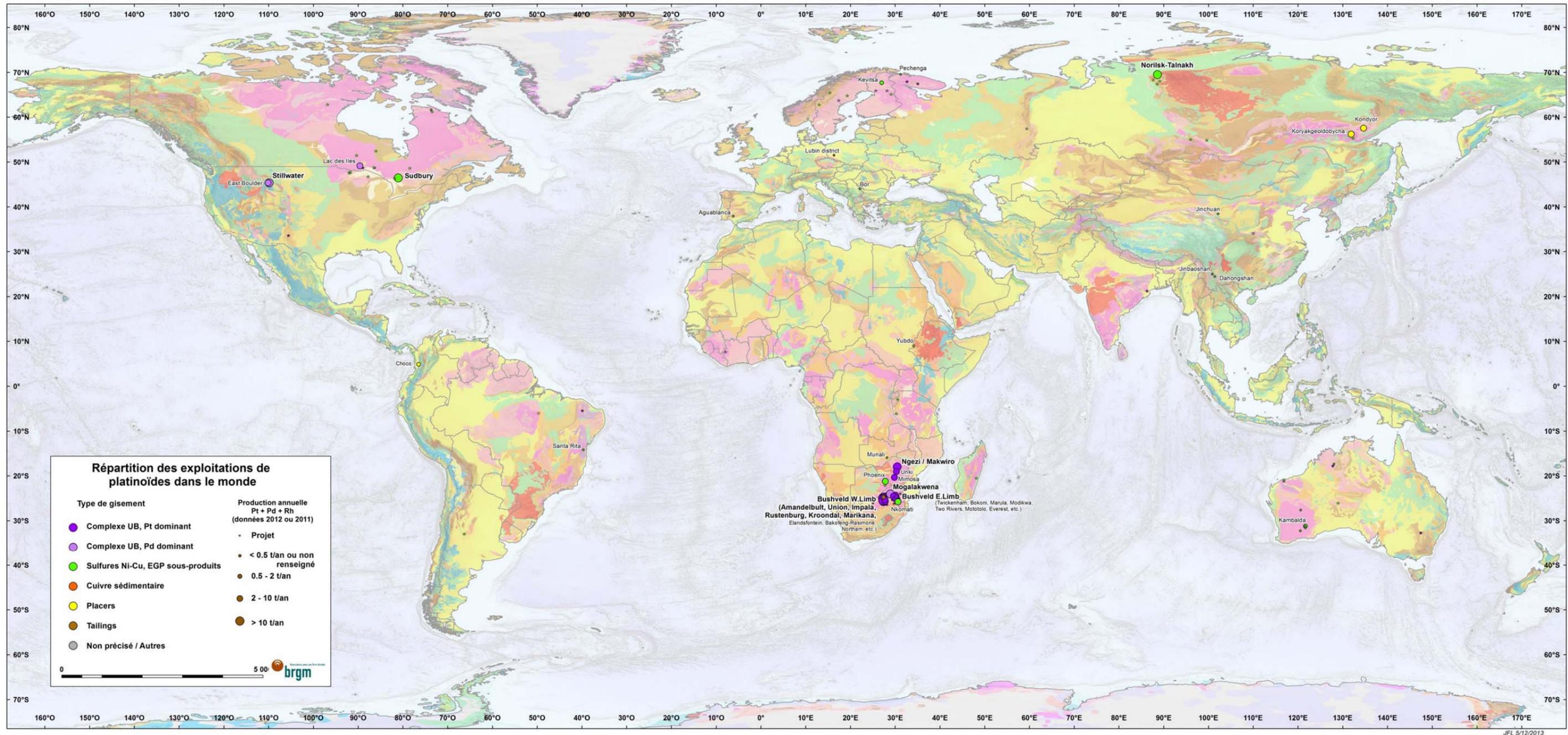
4.2.2. Les gisements de platinoïdes dans le monde

La figure 55 montre la répartition mondiale des principaux gisements de platinoïdes identifiés, par type, et la figure 56 montre un zoom sur les gisements d'Afrique australe.

Le tableau 20 récapitule les principaux gisements de platinoïdes en exploitation dans le monde³⁴, le tableau 21 récapitule les principaux nouveaux projets d'exploitation minière en étude ou développement avancés.

À titre indicatif, la base de données de l'USGS répertorie 905 gisements et indices de platinoïdes aux États-Unis seulement (pays où cette base est la plus détaillée), et 1 425 autres gisements et indices dans le reste du monde.

³⁴ Dans la colonne « type » du tableau 17, « ST » indique une exploitation souterraine, et « CO » une exploitation à ciel ouvert.



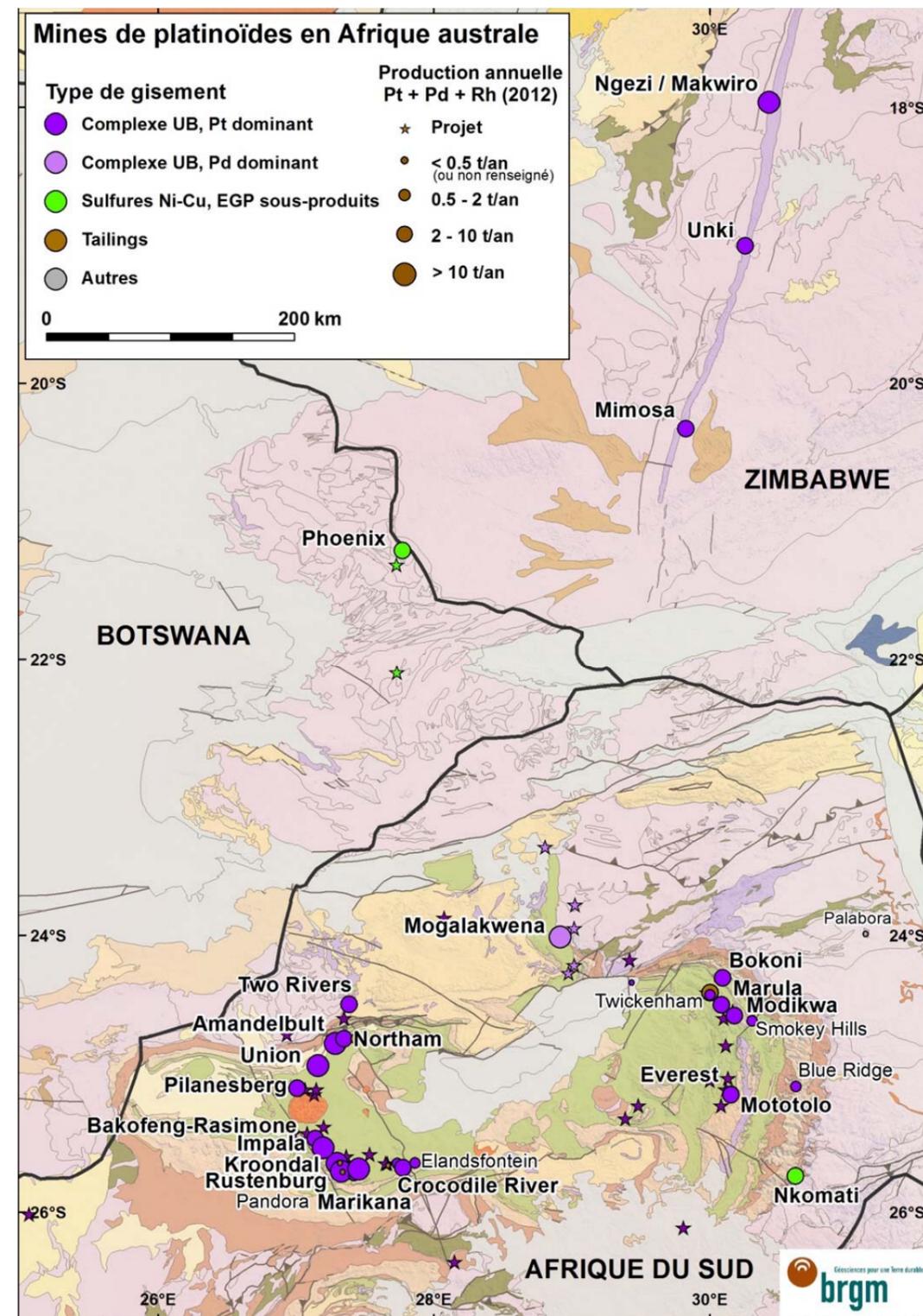


Figure 56 - Localisation des principales mines de platinoïdes en Afrique australe.

Pays	Province / Région	Gisement	Société	Type	Produits principaux	Ressources (mesurées + indiquées + inférées)				Date démarrage				Production Pt (t)				Production Pd (t)				Production Rh (t)										
						Minéral	4E	Pt	Pd	Rh	4E	Pt	Pd	Rh	2008	2009	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012			
Afrique du Sud	Limpopo	Amandelbult (2 mines : Turama & Dikobaj)	Amplats 100%	ST (+CO)	Pt,Pd,Rh	625 Mt	6.13	3.71	1.75	0.58	3 833	2 317	1 095	360	2000	14.34	13.81	14.29	13.88	11.51	6.76	6.25	6.61	6.29	5.35	1.78	2.05	2.03	2.09	1.85		
	Limpopo	Mogalakwena (ex "pp. Rust")	Amplats 100%	CO	Pt,Pd,Rh	3 533 Mt	2.36	0.98	1.15	0.07	8 328	3 449	4 075	263	1993	5.52	7.26	8.47	9.73	9.48	5.74	7.77	8.81	9.97	10.18	0.35	0.54	0.51	0.64	0.62		
	NW Prov.	Rustenburg (5 mines : Bathopelle, Kromani, Kruisele, Spilmelele, Thembeani, + satellites)	Amplats 100%	ST (+CO)	Pt,Pd,Rh	554 Mt	4.92	2.81	1.60	0.42	2 727	1 560	886	230	1929	17.65	18.23	17.67	17.44	16.23	8.70	8.99	8.96	8.64	8.22	2.33	2.65	2.21	2.22	2.29		
	Limpopo & NW Prov.	Union (N & S)	Amplats 85% BEE 15%	ST	Pt,Pd,Rh	258 Mt	5.81	3.45	1.69	0.52	1 498	888	435	133	1957	9.61	9.08	9.46	8.49	6.63	4.35	3.96	4.18	3.63	2.95	1.46	1.54	1.45	1.47	1.22		
	Limpopo	Western Limb Tailings	Amplats 100%	Tail.	Pt,Pd,Rh	103 Mt	1.09	0.56	0.18		112	58	18		2004	1.30	1.01	1.35	1.34	1.44	0.42	0.32	0.43	0.41	0.52	0.07	0.06	0.06	0.07	0.08		
	Limpopo	Modikwa	Amplats 50%, African Rainbow 41.5%	ST + CO	Pt,Pd,Rh	484 Mt	4.57	2.25	1.87	0.34	2 212	1 087	903	166	2002	4.08	4.21	4.20	4.04	4.05	3.88	3.98	3.95	3.65	3.74	0.75	0.85	0.75	0.78	0.65		
	Limpopo	Mototolo	Amplats 50%, Glencore-Xstrata 37%	ST	Pt,Pd,Rh	40 Mt	4.25	2.41	1.42	0.38	171	97	57	15	2006	2.61	3.31	3.44	3.58	3.85	1.52	1.91	2.02	2.08	2.32	0.42	0.53	0.58	0.55	0.57		
	NW Prov.	Kroondal	Amplats 50%, Aquarius 50%	ST	Pt,Pd,Rh	32 Mt	5.94	3.56	1.75	0.60	192	115	57	19	2005	6.11	7.18	8.30	6.77	6.95	2.92	3.45	4.12	3.31	3.54	0.95	1.26	1.34	1.28	1.08		
	NW Prov.	Merikana (Amplats-Aquarius)	Amplats 50%, Aquarius 50%	ST	Pt,Pd,Rh	33 Mt	5.03	3.07	1.41	0.52	166	101	46	17	2002	1.02	1.19	1.66	1.51	0.88	0.44	0.52	0.78	0.71	0.42	0.14	0.21	0.24	0.25	0.21		
	Limpopo	Twickenham	Amplats 100%	ST	Pt,Pd,Rh	371 Mt	5.38	2.62	2.21	0.33	1 996	973	822	122	2006/2015	9.90	7.50	3.60	0.90		10.10	7.20	3.20	0.70		1.70	1.60	0.60	0.30			
	NW Prov.	Bakofeng-Rasimone (+ syntif expansion project)	Royal Bafokeng 67%, Amplats 33%	STCO	Pt,Pd,Rh	365 Mt	6.18	3.83	1.74	0.46	2 254	1 395	634	168	2000	5.53	5.46	5.83	5.68	5.43	2.16	2.14	2.39	2.33	2.24	0.33	0.37	0.42	0.44	0.45		
	Limpopo	Bokoni	Amplats 49%, Atlas Resources 51%	ST	Pt,Pd,Rh	593 Mt	5.84	2.78	2.48	0.39	3 465	1 652	1 469	232	1968	2.26	1.96	1.95	1.90	1.72	1.57	1.34	1.31	1.30	1.17	0.24	0.28	0.20	0.22	0.20		
	NW Prov.	Pandora	Amplats 42.5%, Eastern Platinum (Afr-S)/ Lonmin 42.5%, Northern 7.5%	STCO	Pt,Pd,Rh	190 Mt	4.65	2.88	1.30	0.37	883	548	247	71	2006	1.52	1.44	0.80	0.79	0.95	0.66	0.65	0.38	0.37	0.44	0.20	0.20	0.13	0.12	0.15		
	Limpopo	Limpopo	Lonmin 82%, Shanduka 18%	STCO	Pt,Pd,Rh	370 Mt		2.03	1.52	0.23		751	563	87	2002	0.68	0.12	en suspens		0.51	0.10	en suspens		0.08	0.02	en suspens						
	NW Prov.	Merikana (Lonmin)	Lonmin plc 82%, Incwala 18%	STCO	Pt,Pd,Rh	929 Mt	4.58	2.93	1.18	0.38	4 253	2 722	1 095	349	1975	20.54	19.06	20.80	21.59	20.11	9.44	8.85	9.75	10.10	9.19	2.80	2.64	2.89	2.85	2.59		
	NW Prov.	Elandsfontein / Eland Platinum	Glencore Xstrata 73.99%, Ngazana 26%	STCO	Pt,Pd,Rh	151 Mt	4.40	1.87	0.82	0.32	663	282	123	48	2007		2.48	1.94	1.08	0.57		1.14	0.84	0.42	0.25		0.39	0.32	0.19	0.14		
	NW Prov.	Impala	Amplats 100%	ST	Pt,Pd,Rh	543 Mt	6.50	3.94	1.89	0.51	3 532	2 143	1 030	275	1969	32.47	29.56	27.10	29.27	23.33	13.58	13.23	14.29	15.88	12.71	3.88	3.86	3.79	3.94	3.08		
	Limpopo	Marula	Amplats 73%, 3 BEEs 27%	ST	Pt,Pd,Rh	103 Mt	6.47	3.12	2.61	0.47	665	320	268	49	2004	2.19	2.30	2.18	2.20	2.15	2.26	2.37	2.26	2.27	2.21	0.46	0.49	0.46	0.46	0.46		
	Limpopo	Two Rivers	African Rainbow 55%, Implats 45%	ST	Pt,Pd,Rh	106 Mt	3.40	1.93	1.04	0.25	361	205	111	27	2006	3.07	3.67	4.38	4.53	4.62	1.75	2.10	2.54	2.60	2.76	0.50	0.59	0.73	0.75	0.78		
	Mpumalanga	Blue Ridge	Aquarius Platinum 50%, Imbani Platinum 50%	ST	Pt,Pd,Rh	81 Mt	3.19	1.91	0.94	0.30	259	155	76	24	2009		1.09	0.33	en susp.		0.54	0.16						0.17	0.05			
NW Prov.	Chromite Tailings Retirement Project (Kroondal)	Aquarius Platinum 50%, Sylvania Platinum 25%, Ivanplats 25%	Tail.	Pt,Pd,Rh										2005	0.19	0.13	0.12	0.09	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03			

Tableau 20 - Les principaux gisements de platinoïdes en exploitation (Sources : SLN et rapports des sociétés).

Pays	Province / Région	Gisement	Société	Type	Produits principaux	Ressources (mesurées + indiquées + inférées)				Date démarrage				Production Pt (t)				Production Pd (t)				Production Rh (t)										
						Minéral	4E	Pt	Pd	Rh	Rh	Pd	Pt	4E	Pt	Pd	Rh	2008	2009	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012
Afrique du Sud	Mpumalanga	Everest (+ Everest extension)	Aquarius Platinum 100%	ST,CO	Pt,Pd,Rh	429 Mt	2.82	1.66	0.85	0.28	1.209	712	366	121	2005	2.94	1.17	0.16	1.80	1.33	1.43	0.60	0.08	0.99	0.69	0.51	0.20	0.02	0.30	0.23		
		Platinum Mile	Aquarius Platinum 50% / Mvelaphanda 50%	Tail.	Pt,Pd,Rh											2008	0.19	0.29	0.36	0.41	0.23	0.07	0.16	0.19	0.22	0.12	0.05	0.05	0.06	0.06	0.08	
	NW Prov.	Crocodile River (Zandfontein & Marzelabuit)	Eastplats (Canada) 100%	ST,CO	Pt,Pd,Rh	63 Mt	4.04	2.55	1.05	0.42	255	161	66	27	2000	2.31	2.55	2.59	1.45	1.68	0.92	1.01	1.06	0.63	0.68	0.37	0.41	0.43	0.25	0.27		
		Northam / Zondereinde	Northam Platinum 100%	ST	Pt,Pd,Rh	421 Mt	6.03	3.64	1.81	0.47	2 541	1 534	763	197	1993	5.43	5.60	5.96	4.51	5.21	2.78	2.87	3.05	2.41	2.78	0.72	0.75	0.79	0.78	0.90		
	NW Prov.	Phoenix	Pan African Resources 100%	Tail.	Pt,Pd,Rh	5 Mt	1.73	0.98	0.47	0.27	8	5	2	1	2011					0.11												
		Smokey Hills	Platinum Australia 69.8% / Corridor Mining 15%	CO,ST	Pt,Pd,Rh	4 Mt	4.49	2.74	1.26	0.31	18	11	5	1	2009			0.14	0.71	0.98				0.07	0.33	0.27		0.02	0.08	0.07		
	NW Prov.	Piannesberg	Platinum 72.4% / Sedibelo 27.6%	CO	Pt,Pd,Rh	101 Mt	3.00	1.83	0.84	0.21	303	185	85	21	2009			0.53	1.14	1.80				0.24	0.52	0.55	0.82		0.06	0.13	0.14	0.21
		Sylvania Dump Operations	Sylvania Platinum 100%	Tail.	Pt,Pd,Rh	7 Mt									2006	0.27	0.40	0.46	0.77	0.76		0.13	0.20	0.23	0.38	0.38	0.04	0.07	0.08	0.13	0.13	
	Mpumalanga	Nkomati	African Rainbow 50% / Norlisk Nickel 50%	ST,CO	Ni,Cu,Co,Pd	346 Mt			0.85						1997	0.35	0.35	0.35	0.56	0.75		0.92	0.60	1.19	1.50	2.00						
		Palabora	Palabora Mining	ST	Cu,U,Vern.	136 Mt									1965				0.06	0.04						0.08	0.05					
Zimbabwe	Zimplats / Ngezi / Makwiro	Implats 86.9%	CO,ST	Pt,Pd,Rh	1 904 Mt	3.61	1.75	1.42	0.15	6 874	3 341	2 699	282	2002	2.93	2.99	5.41	5.66	5.82	2.37	2.35	4.36	4.61	4.64	0.26	0.26	0.48	0.52	0.53			
	Mimosa	Implats 50% / Aquarius 50%	ST	Pt,Pd,Rh	135 Mt	3.70	1.82	1.43	0.16	498	246	193	22	1994	2.38	2.85	3.15	3.26	3.30	1.81	2.16	2.38	2.50	2.56	0.19	0.22	0.25	0.26	0.26			
Zambie	Unki	Amplats 100%	ST	Pt,Pd,Rh	246 Mt	4.30	2.08	1.72	0.18	1 058	512	424	46	2010				1.58	2.01						1.05	1.38				0.09	0.16	
	Munali	Jinchuan Group 100% (ex Albidon Ltd)	ST	Ni,Cu,Co,Pd,LP	6 Mt									0.09		0.23																
Botswana	Phoenix	Norlisk Nickel 85% / Goult. Botswana 15%	CO	Ni,Cu,Pd,Pt	130 Mt		0.04	0.22			5	28		1995	0.59	0.53	0.56	0.37	0.44	2.96	3.11	3.33	2.12	2.61								
	Phoenix	Petites mines / mines artisanales	Placer	Pt,Au											0.01	0.01	0.01	0.01	0.01													
USA	Montana	Stillwater	Stillwater Mining 100%	ST	Pd,Pt	14 Mt		3.69	13.30					1987	2.52	2.86	2.52	2.79	2.72	8.34	9.38	8.43	9.25	9.02								
	Montana	East Boulder	Stillwater Mining 100%	ST	Pd,Pt	25 Mt		2.55	8.79					2002	1.06	0.96	0.93	0.91	0.95	3.61	3.28	3.20	3.16	3.29								
Canada	Quebec	Raglan	Glencore Xstrata 100%	CO,ST	Ni,Cu,Co,Pd,Pt	33 Mt		0.91	2.30					1997																		
	Ontario	Sudbury Xstrata (2 mines : Nickel Rim South et Fraser)	Glencore Xstrata 100%	ST	Ni,Cu,Co,Pd,Pt	50 Mt		0.79	0.86					1929																		
Ontario	Sudbury KGHM (3 mines : Morrison, McCreech-West, Padolski)	KGHM International 100%	ST	Cu,Ni,Pd,Pt	23 Mt		0.36	0.55						2004	0.58	0.67	0.82	0.76	0.54	0.75	0.89	1.16	1.15	0.93								
	Ontario Division	Vale 100%	ST	Ni,Cu,Co,Pd,Pt	98 Mt		0.80	1.00						1885	5.16	3.20	1.09	5.41	4.17	7.18	4.73	1.87	7.71	7.81								
Ontario	Shakespeare	Prophesy Platinum 86% / Glencore Xstrata 14%	CO	Ni,Cu,Pd,Pt	17 Mt		0.32	0.40						2010			0.06	0.05														
	Lac des Iles	North American Palladium 100%	ST,CO	Pd,Pt,Au,Ni	42 Mt		0.30	3.90						1993	0.51		0.22	0.28	0.35	6.60		2.96	4.56	5.10								

Tableau 20 (suite) - Les principaux gisements de platinoïdes en exploitation.

Pays	Province / Région	Gisement	Société	Type	Produits principaux	Ressources (mesurées + indiquées + inférées)								Date démarrage	Capacité annuelle				
						Minéral	teneurs (g/t)				Métaux contenus (t)				4E	Pt	Pd	Rh	
Afrique du Sud	Limpopo	Der Brochen	Amplats 100%		Pt,Pd,Rh	579 Mt	4.12	2.28	1.42	0.27	2 385	1 321	824	155			2.8 t	2.2 t	
	Limpopo	Ga-Phasha	Amplats 49% Atlatsa Resources 51%		Pt,Pd,Rh	460 Mt	5.64	2.87	2.22	0.35	2 593	1 320	1 022	159					
	NW Prov.	Magazynskraal	Amplats 20% Bakgatla 47% Pallinghurst 33%		Pt,Pd,Rh	102 Mt	4.96	1.05			506								
	Limpopo	Boikgantsho	Amplats 49% Atlatsa Resources 51%		Pt,Pd,Rh	79 Mt	1.29				102								
	Mpumalanga	Sheba's ridge	Amplats 35% Aquarius 39% IDC : 26%		Ni,Cu,Pt,Pd	605 Mt	0.94				569						2.6 t	7.6 t	
	NW Prov.	Impala RBR JV	Implats 49% (RBR?) 51%		Pt,Pd,Rh	49 Mt	6.82	4.23	1.96	0.46	331	205	95	22					
	NW Prov.	Afplats Leeuwkop	Implats 74% Ba-Magopa 26%		Pt,Pd,Rh	193 Mt	5.17	3.16	1.37	0.59	998	610	265	115	2013		5.3 t	2.3 t	0.8 t
	NW Prov.	Imbasa	Implats 60% Pfula Investment		Pt,Pd,Rh	63 Mt	4.59	2.27	1.23	0.53	289	143	78	34					
	NW Prov.	Inkosi	Implats 49% Pfula Investment		Pt,Pd,Rh	96 Mt	4.97	1.97	1.32	0.38	479	190	127	36					
	Limpopo	Tamboti	Implats 100%		Pt,Pd,Rh	319 Mt	4.79	2.64	1.64	0.37	1 527	843	523	117					
	Limpopo	Akanani	Lonmin 74% Incwala Resources 26%		Pt,Pd,Rh	216 Mt	3.84	1.57			829	339					19.4 t		
	Mpumalanga	Loskop	Lonmin 50% Platmin 50%		Pt,Pd,Rh	10 Mt	4.04	2.55	1.21		41	26	12						
	Limpopo	Zondernaam	Aquarius Platinum 74% Bakgaga 26%		Pt,Pd,Rh	105 Mt	6.48				677								
	Mpumalanga	Everest North	Aquarius Platinum 50% Sylvania Platinum 50%		Pt,Pd,Rh	1 Mt	5.11				7								
	Mpumalanga	Chieftains	Aquarius Platinum (100%?)		Pt,Pd,Rh	260 Mt	5.92				1 537								
	NW Prov.	Hoedspruit	Aquarius Platinum 74% Savannah Resources 26% Sylvania Platinum 50%		Pt,Pd,Rh	33 Mt	5.46				178								
	NW Prov.	Kruidfontein	Aquarius Platinum 74% Savannah Resources 26% Sylvania Platinum 50%		Pt,Pd,Rh	149 Mt	6.62				985								
	Mpumalanga	Booyendal	Northam Platinum 100%		Pt,Pd,Rh	834 Mt	3.85	2.23	1.24	0.22	3 212	1 860	1 037	186	2013	5.0 t			
	Mpumalanga	Kennedy's Vale	Eastplats 100%		Pt,Pd,Rh	515 Mt	3.67	2.03	1.26	0.25	1 890	1 046	650	131			5.3 t	3.5 t	
	Mpumalanga	Spitzkop	Eastplats 50% Spitzkop Platinum 50%		Pt,Pd,Rh	91 Mt	3.77	2.08	1.28	0.28	342	189	116	25					
	Mpumalanga	Mareesburg	Eastplats 87% Lion's head platinum 13%		Pt,Pd,Rh	16 Mt	3.92								2013				
	Limpopo	Platreef	Ivanhoe Mines 90% Itoshu/JOGMEC/IGC 10%		Pt,Pd,Rh	629 Mt	3.70	1.65	1.75	0.04	2 327	1 038	1 101	25					
	NW Prov.	Rooderand / Ruighoek	Chrometco Ltd 54% Nkwe Platinum		Pt,Pd,Rh	37 Mt	3.79	2.20	1.10	0.39	139	81	40	14					
	Limpopo	Sedibelo West	Platmin 72.4% Moepi 27.6%		Pt,Pd,Rh	43 Mt	4.38	2.63	1.29	0.33	186	112	55	14					
	Mpumalanga	Kliprivier	Realm Resources 95% Marang Platinum 5%		Pt,Pd,Rh	110 Mt	2.30				252								
	Limpopo	Aurora (Sylvania N.limb projects)	Sylvania Platinum 75% Implats 25%		Pt,Pd,Rh	120 Mt	1.30				156				2020				
	Limpopo	Volspruit	Sylvania Platinum 75% Implats 25%		Pt,Pd,Rh	77 Mt	1.25				96				2017				
	Limpopo	War Springs	Platinum Group Met. 70% Wesiswe Platinum 15% Platmin 15%		Pt,Pd,Rh	47 Mt		0.25	0.78			12	37						
	Limpopo	Waterberg	Platinum Group Met. 49.9% JOGMEC 37% Mnombo Wethu 13.1%		Pt,Pd,Rh	167 Mt	3.26	1.03	2.02		544	172	338						
	NW Prov.	Western Bushveld / Elandsfontein	Platinum Group Met. 74% Wesiswe Platinum 26%		Pt,Pd,Rh	45 Mt	5.72	3.63	1.52	0.39	255	162	68	17	2015	4.8 t	3.1 t	1.3 t	
	NW Prov.	Bakubung	Wesiswe Platinum 100%		Pt,Pd,Rh	79 Mt	5.24	3.28	1.45	0.38	414	259	114	30	2018	10.9 t			
	NW Prov.	Kalplats	Platinum Australia 49% African Rainbow 51%		Pt,Pd,Rh	137 Mt		1.53							2014	3.3 t			
Limpopo	Garatau / Genorah Farms	Glencore Xstrata 50% Nkwe Platinum 24% Genorah resources 26%		Pt,Pd,Rh	148 Mt	4.87				722				2016	9.0 t				
Limpopo	Tubatse	Glencore Xstrata 50% Nkwe Platinum 24% Genorah resources 26%		Pt,Pd,Rh	313 Mt	4.51				1 409									

Tableau 21 - Les principaux projets d'exploitation de platinoïdes en étude ou développement avancé.

Pays	Province / Région	Gisement	Société	Type	Produits principaux	Ressources (mesurées + indiquées + inférées)								Date démarrage	Capacité annuelle				
						Minerai	4E	Pt	Pd	Rh	4E	Pt	Pd		Rh	4E	Pt	Pd	Rh
Russie	Mourmansk	Fedorovo Tundra	Barrick Gold 79% Pana 21%		Pt,Pd,Ni, Cu,Au	376 Mt		0.34	1.03					2012					
	Krasnoyarsk	Maslovskoe	Norilsk Nickel MMC 100%		Ni,Cu,Pd,Pt, Co,Au	215 Mt		1.78	4.56					2022	11.2 t	28.7 t			
	Amur	Kun-Manie	Amur Minerals		Ni,Cu,Co,Pt, Pd														
		Kievey	Renova																
	Sverdlovsk	Urals Platinum / West Kytlim	Eurasia Mining	Placer	Pt,Pd,Au	5 Mt		0.32						2007	0.5 t				
	Sverdlovsk	Svetlobor	Polymetal International plc																
	Amur	Snezhinka	Gold Standard Mining Corp		Au,Pt,Ag							3							
	Krasnoyarsk	Kingash	InterGeo Resources LLC		Ni,Cu,Pt,Pd, Co,Au	593 Mt		0.22	0.21				128	126	2016	2.1 t	1.8 t		
	Irkutsk	Iisko-Tagulsk	Norilsk Nickel MMC 100%		Ni,Cu,Pt, Pd							750							
	Krasnoyarsk	Kulybinskaya	Norilsk Nickel MMC 100%		Ni,Cu,Pd,Pt, Rh	18 Mt		1.66	6.62				30	119					
	Krasnoyarsk	Kureisko-Gorbiachinskaya	Norilsk Nickel MMC 100%		Ni,Cu,Pd,Pt, Rh	35 Mt		0.51	2.06				18	72					
	Krasnoyarsk	Verhne-Turumakitskaya	Norilsk Nickel MMC 100%		Ni,Cu,Pd,Pt, Rh	29 Mt		0.93	3.72				27	108					
Murmansk	Vuruchuaivench	Norilsk Nickel MMC 100%		Pt,Pd,Rh,Au, Ni,Cu	10 Mt		0.39	2.90				4	30						
Krasnoyarsk	Chernogorskoye	Russian Platinum		Pt,Pd,Ni,Au, Cu	143 Mt	3.90						558		2015					
Groenland	East Coast	Skaergaard	Platina Resources 100%		Au,Pd,Pt,Ti, Mg,V	202 Mt		0.11	1.33			22	270	2014					
Finlande	Oulu	Kuhmo	Altona Mining 95%		Ni,Cu,Co,Pt, Pd	4 Mt		0.22	0.54			1	2						
	Lapland	Lantinen Koillismaa	Finore Mining 80%		Pd,Pt,Au,Cu, Ni	31 Mt		0.15	0.43			5	13						
	Lapland	Arctic Platinum	Gold Fields 100%		Pd,Pt,Au,Ni, Cu	209 Mt		0.36	1.46			75	305	2017	2.5 t	10 t			
Suède	Vasterbotten	Njuggtraskliiden	Blackstone Ventures 100%		Ni,Cu,Co,Pt, Pd,Au	1 Mt													
		Rockliiden	Boliden AB 100%		Zn,Pd,Au, Ag,Cu	5 Mt			0.56				3						
	Vasterbotten	Rönnbäcken	IGE Resources AB 90%		Ni,Co,Au,Pt	667 Mt								2015					
		Bottenbacken	Western Standard Metals 100%		Cu,Pd,Au, Pt	5 Mt			0.28				1						
Royaume-Uni	Ecosse	Arthrath	Alba Mineral Resources 100%		Ni,Cu,Pt, Pd														

Tableau 21 (suite) - Les principaux projets d'exploitation de platinoïdes en étude ou développement avancé.

4.2.3. Les indices de platinoïdes en France

France métropolitaine

Il n'existe pas en France métropolitaine de gisements de platine ni de contextes géologiques favorables à leur existence. Les formations ultrabasiques sont rares et peu développées. Seuls de très petits indices de platinoïdes, d'intérêt purement académique, ont été signalés, de manière ponctuelle (tab. 22), mais aucun d'entre eux n'est susceptible d'approcher une dimension économique.

Nom de l'indice	Dept	Substance	Latitude	Longitude	Type	Localisation	Commentaires
Monte Maggiore	Haute-Corse	Pt, Pd	43.0003°N	9.3529°E	Péridotite ophiolitique	NW du Cap Corse (Commune d'Ersa)	Micro-grains de platinoïdes en roche
Peyrolles	Bouches du Rhône	Pt, Os, Ir (Ru, Rh, Pd)	43.6608°N	5.5723°E	Placer (alluvions de la Durance)	Basse vallée de la Durance	Isoferroplatine, osmiridium et nombreux composés d'EGP décrits
Lherz	Ariège	Pt, Ir, Os, Pd, Ru	42.8057°N	1.3711°E	Lherzolite	Environs de l'Étang de Lherz (Lers)	Micro-dissémination de micro-minéraux d'EGP
Vallée de Cleurie	Vosges	Pt	~48.05°N	~6.48°E	Péridotite		Mention dans la presse, mais pas de publication académique

Tableau 22 - Les indices de platinoïdes en France métropolitaine.

Des grains d'EGP ont été trouvés dans les alluvions de la Durance dans les concentrés aurifères obtenus dans la gravière de Peyrolles (13) (Johan *et al.*, 1989). Les grains étudiés sont aplatis, de l'ordre de 130 µm de longueur sur 64 µm d'épaisseur. Les grains métalliques contiennent 92 % de grains de platine natif (alliage Pt-Fe), 3,5 % de grains d'osmiridium (alliages Os-Ir-Ru) et 4,5 % d'or natif (alliages Au-Cu-Ag). Les concentrés étudiés provenaient de moquettes destinées à la récupération de l'or à partir du lavage d'une grande quantité de gravier. Les teneurs originales des graviers ne sont pas documentées mais sont vraisemblablement très faibles. Les tentatives ponctuelles de prospection pour trouver la source primaire des EGP n'ont pas abouti.

Une petite concentration en EGP a été trouvée dans les péridotites du massif ophiolitique du Mont Maggiore, à l'extrémité NE du Cap Corse, sous forme de grains minuscules (de l'ordre du µm²), dans des échantillons de péridotites dont les plus riches en platine et en palladium titraient respectivement 0,13 g/t Pt et 0,07 g/t Pd.

Des minéraux microscopiques d'EGP (de dimension micronique) ont été identifiés en inclusion dans les sulfures disséminés eux-mêmes en faible quantité dans les lherzolites et harzburgites des environs de l'Étang de Lherz (ou de Lers) (09). Sur plus d'une centaine de grains d'EGP étudiés, plusieurs minéraux ont été identifiés : platine et alliages Pt-Ir-Os, sperrylite, monchéite, malanite, cooperite, laurite, erlichmanite, merenskyite (Johan *et al.*, 1990 ; Lorand, 2006 et 2010). L'intérêt de cette minéralisation est purement académique, vu l'extrême faiblesse des teneurs résultantes.

La presse quotidienne régionale de l'Est (Vosges-Matin, L'Est Républicain et La Liberté de l'Est) a publié le 10 mai 2010 la découverte de platine dans des péridotites de la vallée de la Cleurie, dans les Vosges. Cette annonce n'a pas encore été confirmée par des publications scientifiques. Même si elle était confirmée, cette découverte ne serait que très ponctuelle et sans intérêt économique.

Le potentiel minier de la France métropolitaine en platinoïdes est inexistant.

Guyane

Quelques occurrences très ponctuelles de platine ont été signalées dans des concentrés d'or alluvionnaire en Guyane, et exceptionnellement en roche dans des formations intrusives basiques.

Le SIG-Guyane (<http://gisguyane.brgm.fr/>), qui publie une synthèse des connaissances sur les indices miniers guyanais, cite trois occurrences de platine, et une anomalie géochimique dont le suivi n'a pas été concluant (tab. 23).

Code SIG Guyane	Nom de l'indice	Substance	Latitude	Longitude	Type	Localisation	Accessibilité
GUF-04319	Rivière Marouini	Pt	3.1863°N	54.0475°W	Placer	Centre-Ouest de la Guyane	Zone interdite à l'activité minière
GUF-04320	Toucouchi	Pt	4.1086°N	51.8931°W		NE de la Guyane, Est de la Montagne de Kaw	Zone interdite à l'activité minière
GUF-04321	Aïcoupai	Pt	4.0527°N	52.5633°W	Placer	Sur le fleuve Approuague, ~120 km au sud de Cayenne	
GUF-00158	Dachine IT33	Diamant (Pt ?)	3.4483°N	53.3128°W	Placer Diam. Anomalie Pt	25 km au SSW de Saül	Zone interdite à l'activité minière

* Selon Schéma Départemental d'Orientation Minière (SDOM) en vigueur depuis le 1/01/2012

Tableau 23 - Indices de platinoïdes de Guyane.

Mis à part l'indice en placer d'Aïcoupai, tous sont situés dans les zones qui ont été interdites à l'exploration et à l'exploitation minière par le Schéma Département d'Orientation Minière (SDOM) établi en 2011 et en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2012.

Par ailleurs, il existe en Guyane quelques massifs basiques / ultrabasiques différenciés qui pourraient être favorables à des minéralisations platinifères, et leur exploration à la recherche de platine est inachevée. Mais les plus importants sont aussi situés dans la partie sud de la Guyane, soustraite à l'exploration minière par le SDOM.

Pourtant, certains de ces indices de platinoïdes et de ces complexes basiques / ultrabasiques auraient pu mériter des investigations complémentaires. Il est vraisemblable cependant que leurs éventuelles minéralisations resteraient d'une importance modeste.

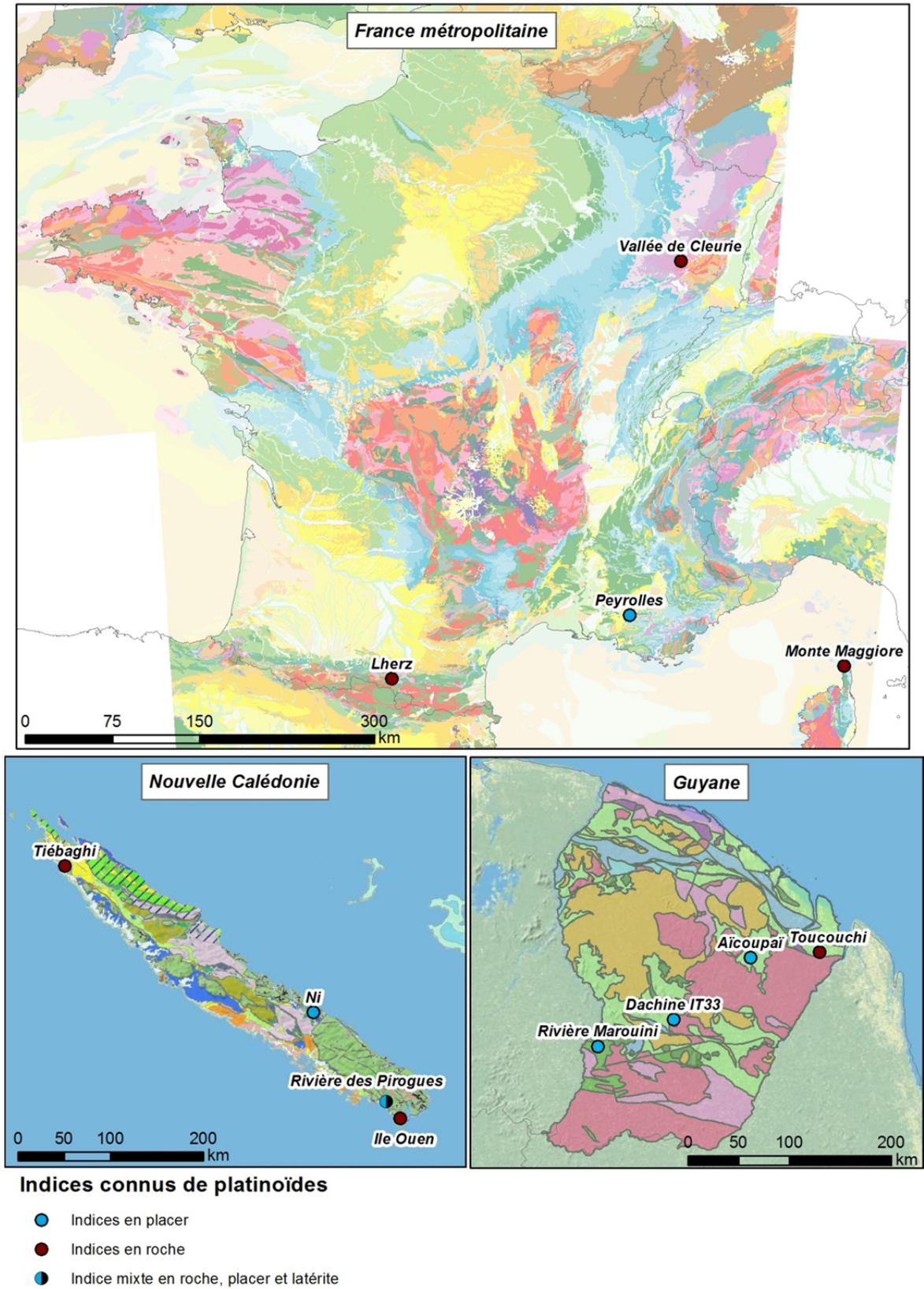


Figure 57 - Localisation des indices de platinoïdes en France métropolitaine, en Guyane et en Nouvelle-Calédonie.

Nouvelle-Calédonie

Après quelques mentions historiques ponctuelles, des concentrations locales de platinoïdes ont été identifiées par les travaux de l'Inventaire Minier de la Nouvelle-Calédonie de 1990 à 1993 et ses travaux complémentaires en 1994 et 1995, dans certains niveaux enrichis en chromite dans les ophiolites, qui constituent la géologie d'environ 40 % de l'île. Des enrichissements locaux dans les latérites ont été signalés et publiés (Augé, 1998) (tab. 24).

L'une des cibles principales étudiées a été la Rivière des Pirogues, sur la côte ouest de l'île, au Sud de Nouméa. La géochimie en sédiments de ruisseaux avait permis d'y cerner une anomalie significative (teneurs en platine des sédiments de ruisseaux de quelques dizaines de ppb jusqu'à 4,6 ppm). L'échantillonnage en roches primaires qui a suivi a montré que les dunites et wehrlites à rubans de chromite et les chromitites contenaient des teneurs potentiellement économiques en platine (0,2 à 11,5 g/t Pt), avec des teneurs en palladium quatorze fois moindres. Des reconcentrations jusqu'à 2 g/t ont aussi été trouvées dans les latérites (Augé *et al.*, 1998). Ces minéralisations ont été de beaux objets d'études scientifiques, mais une extension ayant un éventuel intérêt économique resterait à démontrer.

Une minéralisation similaire a été découverte à l'île Ouen, à l'extrême sud de l'archipel.

À Tiébaghi, le suivi d'anomalies géochimiques en sédiments de ruisseaux et d'occurrences de ferroplatine en concentrés alluvionnaires a conduit à l'identification de filons de pyroxénites à des teneurs de 0,15 à 0,25 g/t Pt.

À l'embouchure de la rivière Ni, un prélèvement de sable de plage de 1985 avait donné une teneur de 0,5 g/t Pt et un cortège de 14 minéraux d'EGP, mais les prélèvements ultérieurs sont restés négatifs.

Nom de l'indice	Substance	Latitude	Longitude	Type	Localisation	Commentaires
Rivière des Pirogues	Pt, Pd, Ru	~ 22.29°S	~ 166.69°E	Pt dans les chromites accumulées dans des pyroxénites et des wehrlites.	Côte ouest du Massif du Sud	0,2 à quelques g/t Pt dans les wehrlites. Jusqu'à 2 g/t en latérite
Ile Ouen	Pt, Os, Ir, Rh, Ru	~ 22.42°S	~ 166.80°E	Reconcentrations latéritiques.	Extrême Sud de la Nouvelle-Cal.	
Ni	Pt	21.8735°S	165.5658°E	Sables de plage	Embouchure de la rivière Ni, côte Est	Un prélèvement positif, prélèvements suivants négatifs.
Thiébaghi	Pt, Os, Ru	~ 20.45°S	~ 164.21°E	Pyroxénite	NO de l'île	Teneurs de 0,15 à 0,25 g/t en roche.

Tableau 24 - Principaux indices de platinoïdes en Nouvelle-Calédonie.

Ailleurs dans le monde, les minéralisations en platinoïdes liées aux ophiolites restent infra-économiques. Il est assez peu probable, mais pas forcément impossible, que ces minéralisations de Nouvelle-Calédonie puissent atteindre des dimensions économiques, mais cela resterait à démontrer. Et même si finalement des concentrations suffisantes finissaient par être identifiées, leurs ressources seraient vraisemblablement mineures par rapport aux gisements majeurs connus. Leur éventuelle exploitation, même si elle était intéressante pour l'économie locale, n'aurait probablement que peu d'impact sur le marché global des platinoïdes.

Le potentiel de la Nouvelle-Calédonie, et en particulier le secteur de la Rivière des Pirogues, pourrait éventuellement susciter un regain d'intérêt si le prix des platinoïdes devait encore fortement augmenter.

4.3. PRODUCTION

4.3.1. Statistiques de production courante

Avertissement

Les statistiques de production de platinoïdes ne sont pas toujours précises.

La société britannique Johnson Matthey, l'un des leaders mondiaux de la transformation des platinoïdes, publie depuis plus de 30 ans des statistiques annuelles de production primaire et secondaire et de consommation par pays qui servent de référence à la plupart des études publiées par les uns et les autres. Elle publie des statistiques d'offre et demande concernant le platine depuis 1975, concernant le palladium depuis 1980, et le rhodium depuis 1985. Elle ne publie sur le ruthénium et l'iridium que des statistiques concernant la demande depuis 2005. Elle ne publie pas de statistiques sur l'osmium. Pour Pt, Pd et Rh, elle ne publie les statistiques de production que pour 6 pays ou entités, l'Afrique du Sud, la Russie, le Zimbabwe, l'« Amérique du Nord » qui cumule sans distinction le Canada et les États-Unis, et les « Autres pays ».

Il n'y a pas de publications de la production chinoise. Il est possible qu'elle soit incluse dans la production des « Autres pays » de Johnson Matthey, mais ce n'est pas précisé et il est tout aussi possible que la production chinoise soit totalement absente des statistiques. Cette production est cependant probablement mineure par rapport à celle des producteurs majeurs, la Chine étant nettement importatrice de platinoïdes. L'USGS publie des informations sur la production par pays en distinguant les productions étatsunienne et canadienne, mais seulement pour le platine et le palladium. Le Canada (NRCan) ne publie ses statistiques de production que pour le platine et le palladium confondus. Il en est de même pour l'Australie. Les sociétés minières, quant à elles, publient de manière variable leur production.

Les exploitants miniers dont le platine et le palladium sont la production majeure, en particulier les producteurs sud-africains, zimbabwéens et le producteur étatsunien Stillwater ont une publication assez exhaustive de leur production de platine, palladium et rhodium, mais très peu publient aussi leur production de ruthénium et d'iridium. En Russie, Norilsk Nickel, le principal producteur de palladium et producteur de platine en sous-produit de ses mines de nickel-cuivre, publie ses productions de platine et de palladium depuis 2005 (avant 2005, la production de palladium était un secret d'État).

En revanche, les productions détaillées de platinoïdes des certains exploitants de nickel-cuivre canadiens et australiens peuvent être plus compliquées à obtenir, puisque ces éléments peuvent être produits ailleurs, dans des opérations de raffinage des mattes ou du cuivre. Par ailleurs les fonderies de certaines sociétés traitent, avec leur propre minerai, du minerai venant d'autres sociétés, voire des scraps (fonderie de Strathcona de Glencore-Xstrata à Sudbury, par exemple), et il peut être difficile de savoir au final l'origine du platine ou du palladium produits.

Certaines publications mentionnent ainsi une production de platine japonaise (7,53 t Pd et 1,76 t Pt en 2011). C'est le cas de l'USGS dans ses « Mineral Yearbooks » annuels (mais le Japon n'apparaît pas dans ses « Mineral Commodity Summaries », où la production correspondante est laissée dans les « autres pays »). Il est cependant bien précisé qu'il ne s'agit pas d'une production de mines japonaises, mais d'une production issue du traitement de concentrés miniers importés, et il faudrait s'assurer si ce même platine n'a pas déjà été compté dans la production minière du pays d'origine des concentrés. Johnson Matthey ne retient pas de production primaire par le Japon, mais, d'une année à l'autre, son total peut être supérieur ou inférieur au total de l'USGS. La confusion ne pourrait être levée que par une analyse détaillée, et il n'est pas sûr que les données qui permettraient une telle analyse existent. Les statistiques autrichiennes du BMWFJ ne retiennent pas non plus de production primaire japonaise, alors que l'AS3M français en indique une, comme l'USGS. Il est cependant difficile, lorsque plusieurs sources synthétiques diffèrent, de décider si l'une est plus fiable que l'autre, si les sources initiales précises des données rapportées dans ces synthèses ne sont pas spécifiées ou ne sont pas accessibles.

Les données et diagrammes ci-dessous sont un compromis, établi sur la base des statistiques de Johnson Matthey, adaptées et complétées lorsque cela était possible :

- *les données de production « Amérique du Nord » de Johnson Matthey ont été scindées en des données États-Unis rapportées par Stillwater Mining Company et l'USGS, et des données Canada comme étant le solde, puisque les données canadiennes ne sont pas publiées ;*
- *les données publiées du Botswana, de Colombie et des données partiellement publiées ou estimées de Finlande, de Pologne, d'Éthiopie ou de Serbie ont été intégrées et déduites du total « autres pays » de Johnson Matthey.*

On constatera aussi que les sommes des productions des mines sud-africaines du tableau 21 sont généralement légèrement supérieures à la production sud-africaine présentée par Johnson Matthey. Mais, si certaines sociétés produisent et raffinent les métaux, d'autres vendent leurs concentrés et publient comme quantité produite les métaux contenus dans leurs concentrés, qui ne seront pas récupérés à 100 % par la métallurgie, et ne seront donc pas à proprement parler « produits ». Faute de précisions, il a été choisi de retenir les productions sud-africaines publiées par Johnson Matthey.

Il convient donc de ne pas prendre les statistiques de production comme des données absolument certifiées. Telles qu'elles existent, avec leurs limites et leurs défauts, elles sont cependant un très bon indicateur pour appréhender le marché.

La production mondiale de platinoïdes primaires aurait été de l'ordre de 435 t de platinoïdes contenus en 2012, dont 175,4 t de platine, 196,6 t de palladium et 22,4 t de rhodium (Johnson Matthey, 2013), en baisse de 13 % pour le platine, de 4 % pour le palladium, et de 5,8 % pour le rhodium par rapport à 2011 (tab. 25). Les productions globales d'iridium et de ruthénium ne sont pas publiées, mais, au vu des consommations de ces métaux, en faisant l'hypothèse que les marchés sont *grosso-modo* équilibrés (l'industrie consomme ce qui est disponible, il n'est pas fait mention de stocks importants), on peut estimer leur production annuelle à 20 à 30 t pour le ruthénium et 3 à 10 t pour l'iridium (cf. fig. 45 et 47).

	Production primaire (t)					Production secondaire (recyclage) (t)					Production totale (t)				
	2008	2009	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012
Pt	184.8 t	187.4 t	188.2 t	201.7 t	175.4 t	56.9 t	43.7 t	56.9 t	64.1 t	63.1 t	241.7 t	231.1 t	245.1 t	265.8 t	238.5 t
Pd	197.6 t	191.0 t	197.7 t	204.7 t	196.6 t	50.2 t	44.5 t	57.5 t	72.9 t	69.7 t	247.8 t	235.5 t	255.2 t	277.6 t	266.3 t
Rh	21.7 t	24.0 t	22.9 t	23.8 t	22.4 t	7.1 t	5.8 t	7.5 t	8.6 t	8.1 t	28.8 t	29.8 t	30.4 t	32.4 t	30.5 t
Ir	5 à 10 t par an					non documenté									
Ru	20 à 30 t par an					non documenté									
Os	< 1 t par an					non documenté									

Tableau 25 - Productions primaires et secondaires de platinoïdes
(Source : Johnson Matthey, 2013).

Production par pays

L'Afrique du Sud est actuellement de loin le premier producteur mondial de platine primaire, avec près de 73 % de la production, suivie de la Russie avec 14 %. Elle est aussi le premier producteur mondial de rhodium, avec 80 % de la production, suivie de la Russie avec 12,5 %. Pour le palladium, c'est la Russie qui est en tête avec 41 % de la production, suivie de l'Afrique du Sud avec 38 %.

Pays	Platine			Palladium			Rhodium		
	2011	2012	Parts 2012	2011	2012	Parts 2012	2011	2012	Parts 2012
Afrique du Sud	151.2 t	127.4 t	72.6%	79.6 t	74.6 t	37.9%	19.9 t	17.9 t	79.9%
Russie	26.0 t	24.9 t	14.2%	84.1 t	80.9 t	41.1%	2.2 t	2.8 t	12.5%
Zimbabwe	10.6 t	10.6 t	6.0%	8.4 t	8.7 t	4.4%	0.9 t	1.0 t	4.2%
Canada	7.2 t	5.5 t	3.2%	15.6 t	15.4 t	7.8%	0.5 t	0.6 t	2.6%
Etats-Unis	3.7 t	3.7 t	2.1%	12.4 t	12.3 t	6.3%	0.2 t	0.1 t	0.6%
Colombie	1.2 t	1.5 t	0.8%						
Botswana	0.4 t	0.4 t	0.2%	2.1 t	2.6 t	1.3%			
Finlande	0.4 t	0.4 t	0.2%	1.1 t	0.4 t	0.2%			
Australie	0.08 t	0.12 t	0.1%	0.37 t	0.59 t	0.3%			
Pologne	0.03 t	0.03 t	0.02%	0.05 t	0.05 t	0.02%			
Ethiopie	0.01 t								
Serbie				0.03 t					
Autres pays	0.9 t	0.8 t	0.5%	1.0 t	1.1 t	0.5%	0.1 t	0.1 t	0.22%
Total	201.7 t	175.4 t		204.7 t	196.6 t		23.8 t	22.4 t	

Tableau 26 - Répartition des productions minières mondiales de platine, palladium et rhodium en 2011 et 2012 (Sources : Johnson Matthey, USGS, AS3M, Sociétés, etc.).

Le tableau 26 et la figure 58 illustrent la répartition par pays des productions primaires de ces trois métaux en 2012. Les figures 61 à 63 illustrent, plus loin, l'évolution de ces productions primaires depuis 1975 pour le platine, depuis 1980 pour le palladium et depuis 1985 pour le rhodium.

Production par société

Quatre sociétés majeures contrôlent les trois quarts de la production minière mondiale de platine, de palladium et de rhodium. Ce sont les sociétés sud-africaines Anglo American Platinum (« Amplats »), Impala Platinum (Implats) et Lonmin Plc, et la société russe Norilsk Nickel (« Norilsk ») (voir aussi 6.1).

En fait, elles en contrôlent bien davantage puisque les parts détenues par nombre d'autres sociétés, et en particulier par les sociétés de Black Economic Empowerment (BEE) sud-africaines, sont des parts minoritaires (souvent 15 à 18 %) dans des sociétés minières dont la majorité est détenue par l'une des sociétés majeures.

La figure 59 illustre la répartition de la production minière de platine, palladium et rhodium par société.

En cohérence avec la répartition de la production minière par pays, les deux majors sud-africaines Amplats et Implats dominent la production de platine et de rhodium, dont elles détiennent plus de la moitié de la production mondiale. Elles sont suivies par Norilsk Nickel puis par le 3^{ème} producteur sud-africain, Lonmin. Pour le palladium, c'est Norilsk Nickel qui domine de loin la production minière mondiale, avec 43 %, suivi des deux majeures sud-africaines Amplats et Implats, puis de la société étatsunienne Stillwater Mining Company (« Stillwater »).

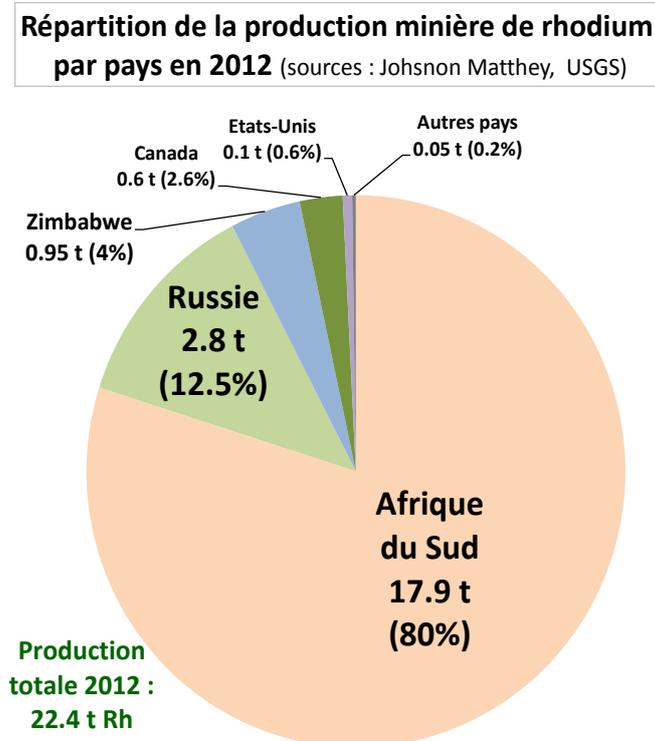
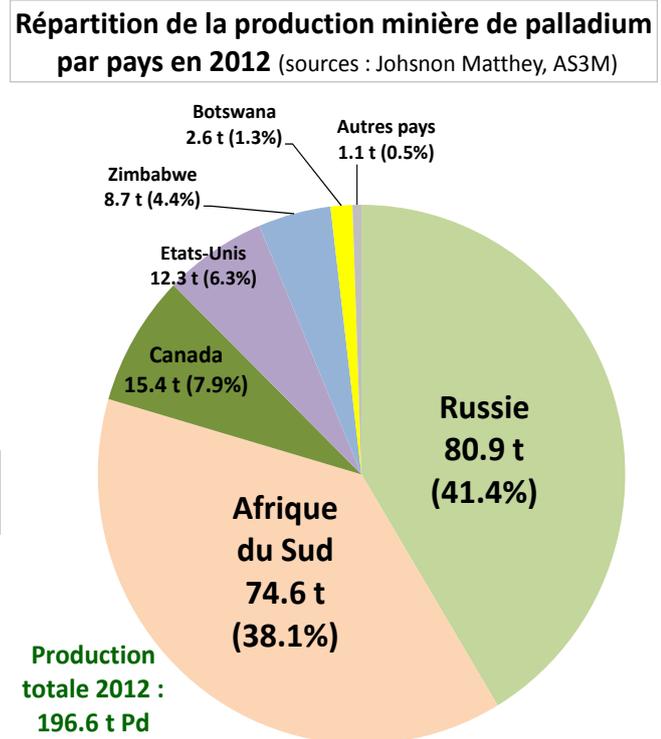
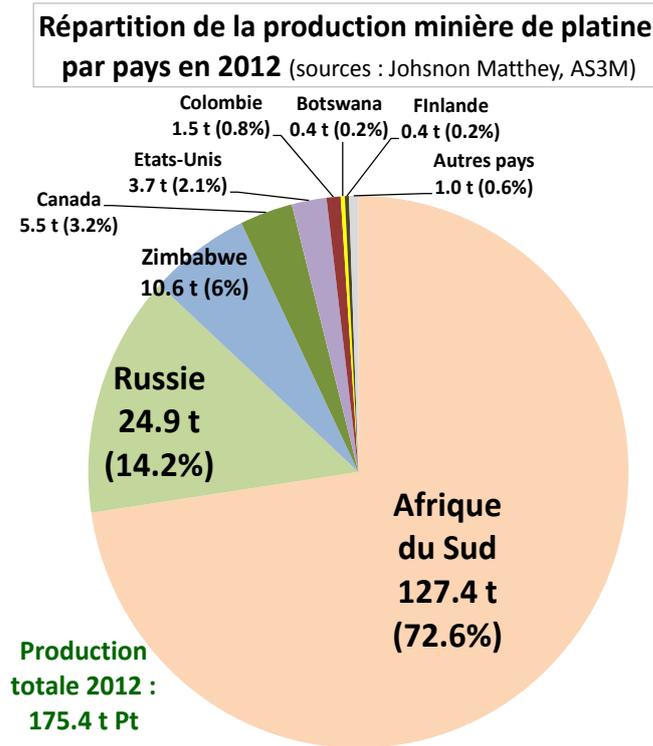
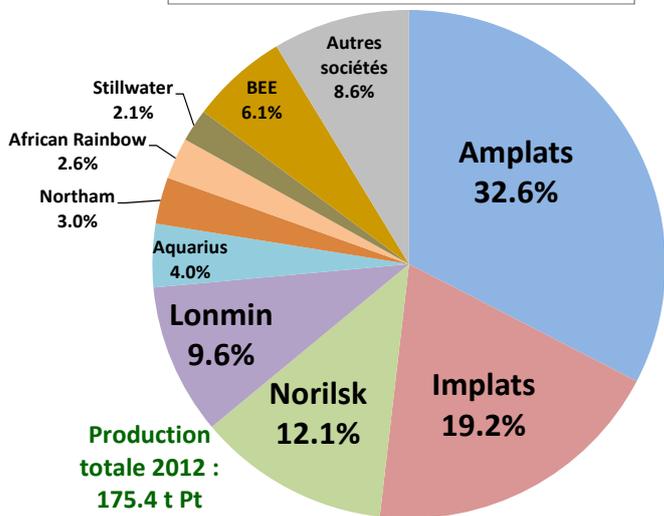
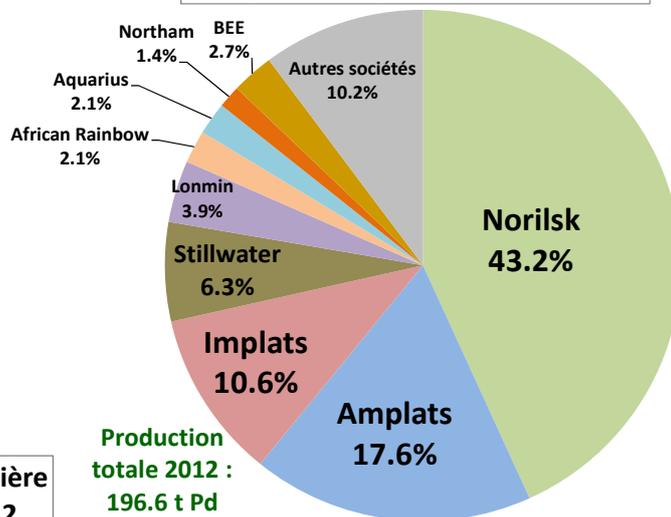


Figure 58 - Répartition de la production minière mondiale de platine, palladium et rhodium par pays en 2012 (Sources : Johnson Matthey, USGS, AS3M).

Répartition de la production minière de platine par société en 2012



Répartition de la production minière de palladium par société en 2012



Répartition de la production minière de rhodium par société en 2012

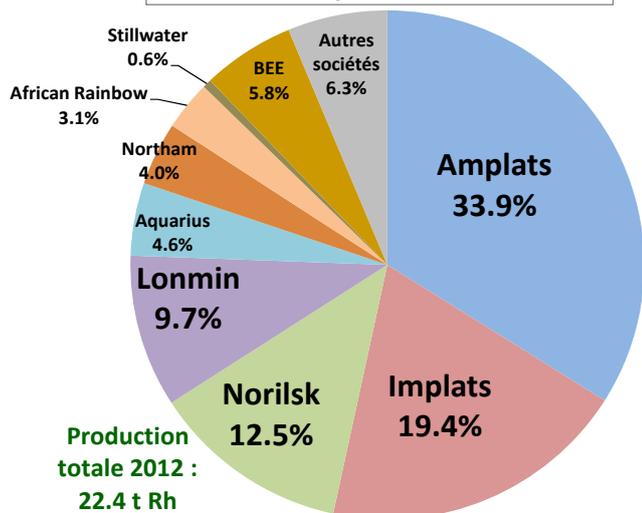


Figure 59 - Répartition de la production minière mondiale de platine, palladium et rhodium par société en 2012 (Source : Tableau 21).

4.3.2. Production historique

La Colombie a été le seul producteur de platine du monde depuis l'origine (environ 1735) jusqu'à 1819 et la découverte des placers de l'Oural. La Russie est alors rapidement devenue le premier producteur mondial de métaux du groupe du platine. Le Canada a ensuite commencé à récupérer les platinoïdes des minerais à cuivre-nickel sulfurés de Sudbury à partir de 1919, puis l'Afrique du Sud avec le Merensky Reef du Bushveld à partir de la fin des années 1920. La Russie (l'URSS alors) a commencé à récupérer à partir de 1947 les platinoïdes des mines de nickel de Norilsk, ouvertes en 1939.

La figure 58 illustre l'évolution de la production annuelle totale d'EGP depuis 1900, selon les données publiées par l'USGS³⁵. On constate que la production de platinoïdes a connu une croissance globale moyennée de 2,82 % par an depuis 1975, avec des irrégularités et baisses épisodiques par crises.

La production minière cumulée historique de platinoïdes atteint 14 800 tonnes, dont plus de la moitié ont été extraits ces 18 dernières années, de 1995 à 2012 (tab. 27).

Bouladon avait publié en 1968 un récapitulatif assez complet des productions cumulées jusqu'en 1966, reproduit plus bas pour son intérêt historique (tab. 29).

Période	Production cumulée d'EGP	Remarques
1735-1918	281.2 t	<i>Production exclusivement des placers</i>
1919-1946	280.5 t	<i>Démarrage progressif des exploitations en mines</i>
1947-1994	6 631.8 t	<i>A fin 1966, les mines avaient déjà produit 60% du cumul des EGP extraits, et les placers 40%</i>
Sous-total 1735-1994	7 193.5 t	
1995-2012	7 645.2 t	<i>En 2012, les mines ont fourni ~ 97 % de la production, les placers 3%.</i>
Total 1735-2012	14 838.7 t	

Tableau 27 - Production minière cumulée historique de platinoïdes (sources : USGS, 2013 pour les données 1900-2012, et Bouladon, 1968, pour les données antérieures à 1900).

³⁵ L'USGS publie des données historiques pour les 6 platinoïdes ensemble. Ces données sont à peu près cohérentes, à 2 ou 3 % près, avec les données de production publiées séparément pour Pt, Pd et Rh par Johnson Matthey (JM), auxquelles on ajouterait les données de consommation de Ru et Ir publiées par JM. En effet, JM ne publie pas des données de production pour ces derniers métaux, mais on peut faire l'hypothèse que les données de consommation représentent peu ou prou, même s'il y a probablement un décalage, les données de production. Ces données de l'USGS sont donc réalistes.

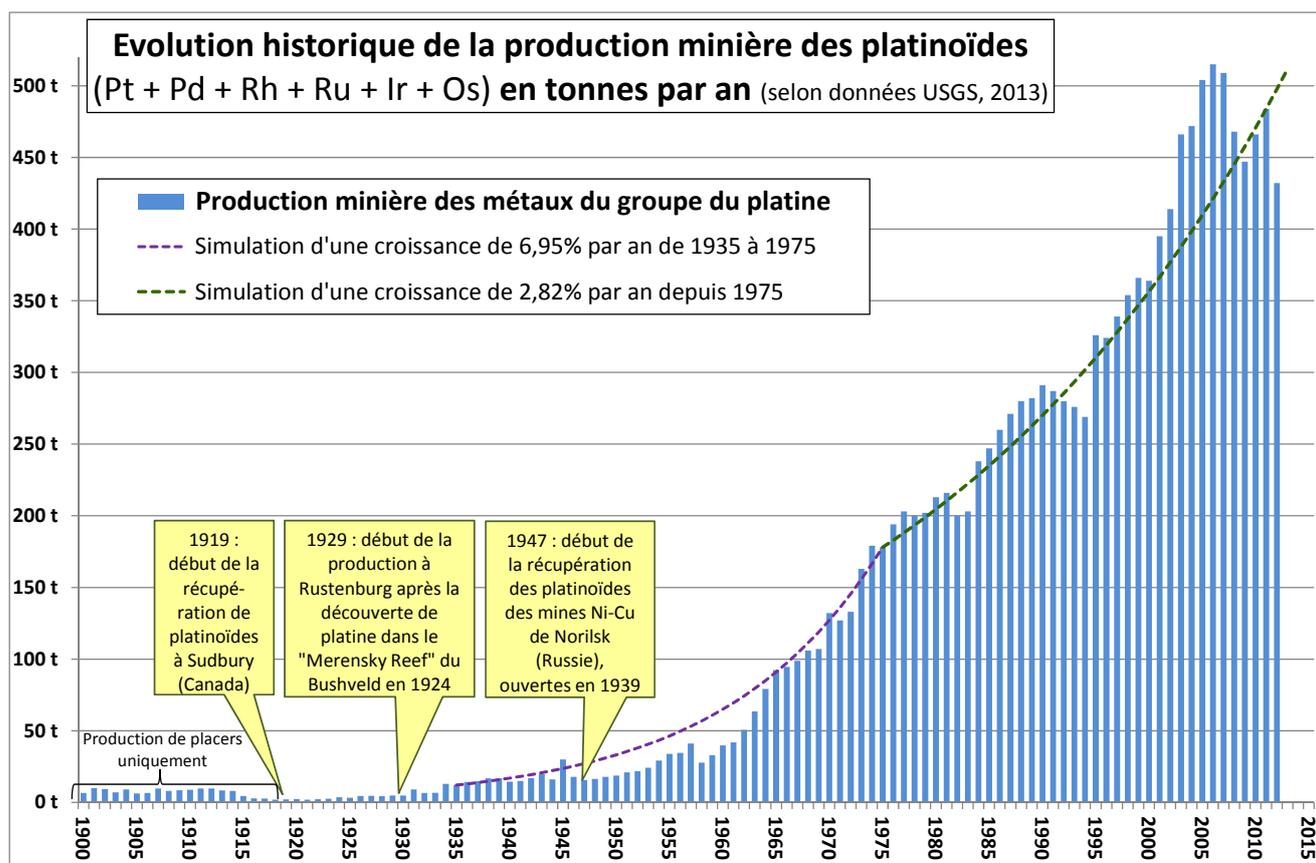


Figure 60 - Évolution de la production mondiale primaire de platinoïdes (d'après USGS, 2013).

Pays	Période	Production cumulée, en kg EGP
Placers		
URSS	1821-1966	416 000 kg
Colombie	1735-1966	108 910 kg
Etats-Unis	1876-1966	19 200 kg
Ethiopie	1926-1966	2 806 kg
Bornéo	1831-1922	2 806 kg
Australie	1866-1963	1 070 kg
Canada	1876-1942	587 kg
Sierra-Leone	1929-1958	173 kg
Nouvelle-Guinée	1936-1966	7 kg
Total placers		551 559 kg
Mines		
URSS	1947-1966	307 675 kg
Canada	1919-1966	253 227 kg
Afrique du Sud	1925-1966	233 807 kg
Etats-Unis	1921-1966	10 824 kg
Congo-Kinshasa	1922-1960	1 640 kg
Norvège	1928-1938	61 kg
Total mines		807 234 kg

Tableau 28 - Bilan de la production primaire de platinoïdes de 1735 à 1966 (Bouladon, 1968).

Les figures 61 à 63 illustrent la répartition par pays de la production plus récente de platine, palladium et rhodium, d'après les statistiques de Johnson Matthey depuis qu'elles sont disponibles (1975 pour Pt, 1980 pour Pd et 1985 pour Rh), complétées ou détaillées par d'autres sources (sociétés, USGS, AS3M) pour les pays non détaillés par Johnson Matthey.

En plus de sa production minière de palladium, la Russie approvisionne le marché depuis un certain nombre d'années par la vente progressive de stocks qu'elle avait constitué antérieurement. Le tableau 28 et la figure 58 n'illustraient que la production minière russe des années considérées, non compris les ventes de stocks issues de productions bien antérieures. En revanche, la figure 62 ci-après intègre, chaque année, la quantité de palladium déstockée par la Russie, distinguée seulement depuis 2005, par souci de cohérence historique, puisque les statistiques antérieures à 2005 confondaient la production minière et le déstockage.

On constate que l'Afrique du Sud domine largement les productions primaires de platine et de rhodium depuis plusieurs décennies, la Russie domine celle de palladium mais cette domination tend à décroître depuis 2004, d'autant que les stocks, constitués surtout à l'époque soviétique, puis écoulés progressivement ensuite en complément de la production primaire, commencent à approcher de leur fin.

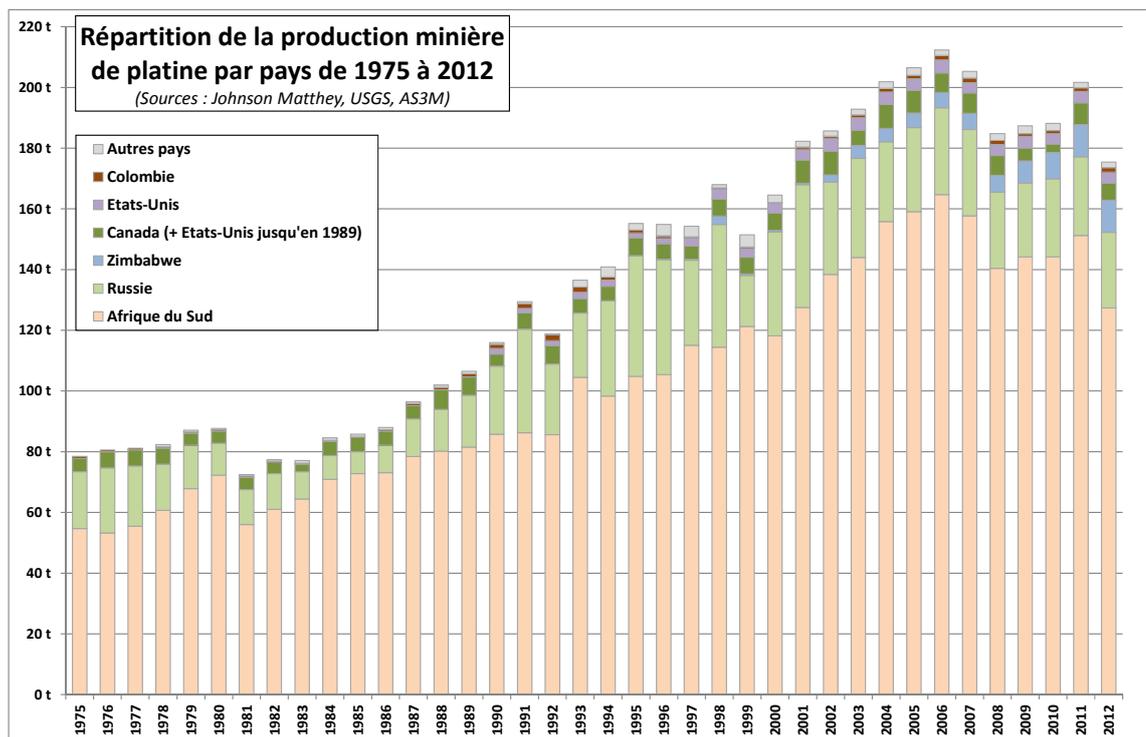


Figure 61 - Évolution de la production primaire de platine par pays de 1975 à 2012.

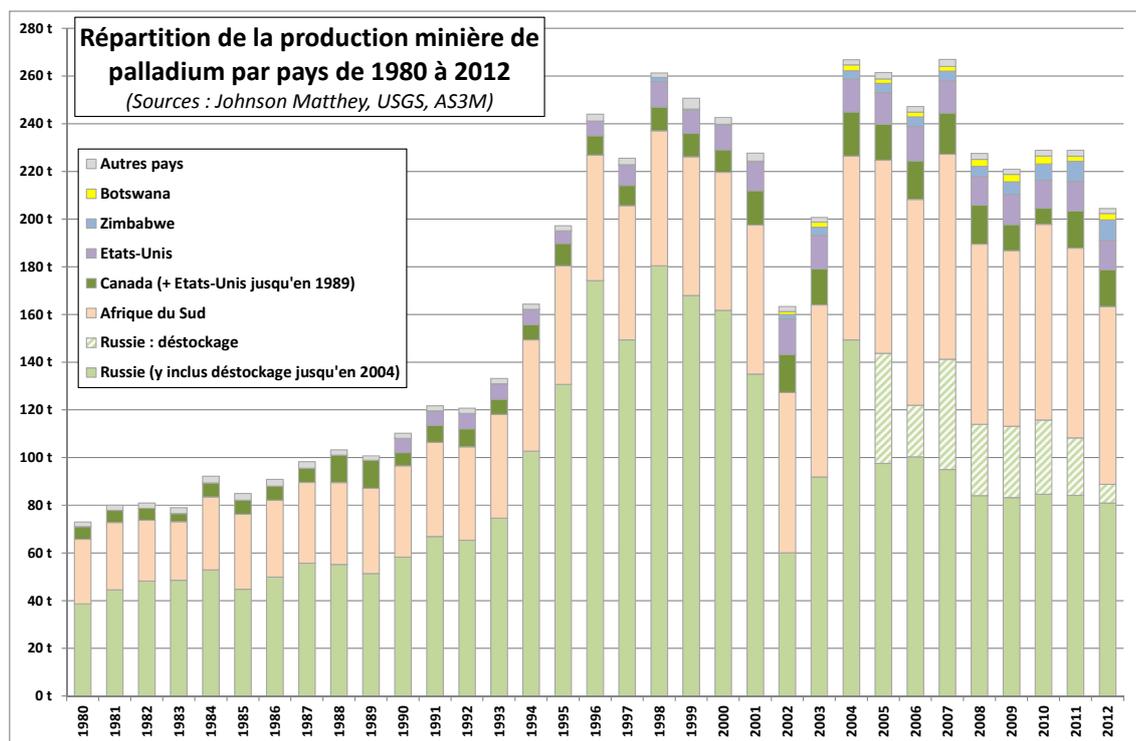


Figure 62 - Évolution de la production primaire de palladium par pays de 1975 à 2012 (y inclus le déstockage russe).

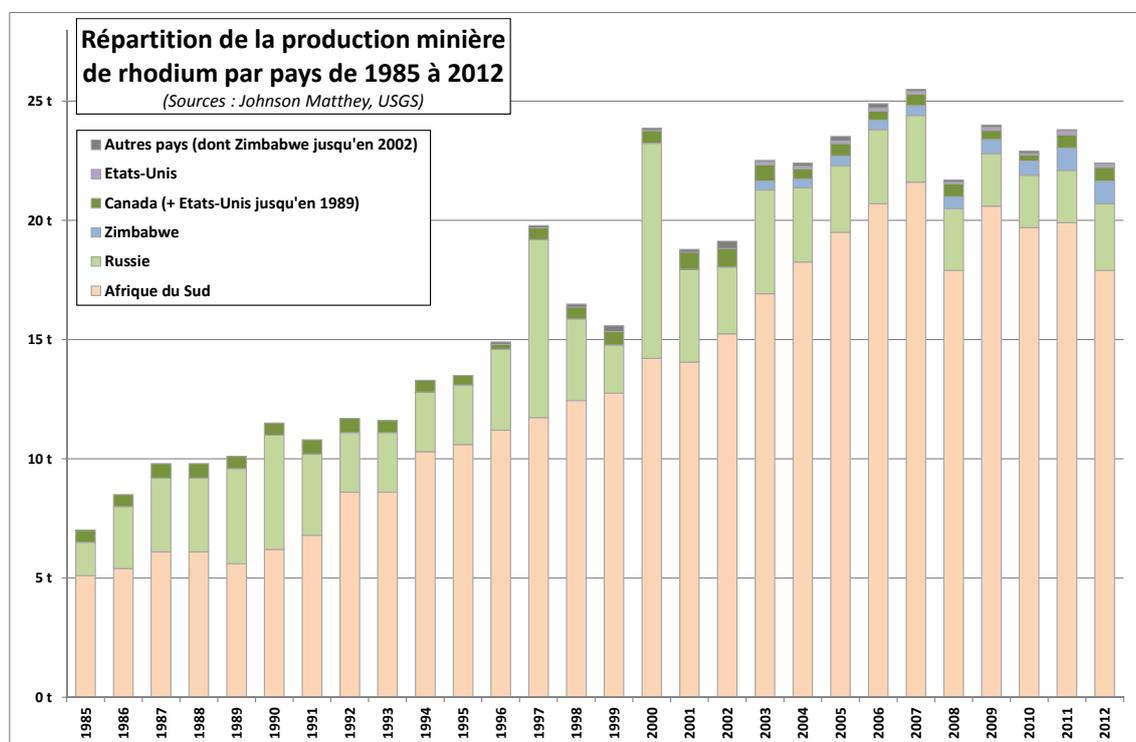


Figure 63 - Évolution de la production primaire de rhodium par pays de 1975 à 2012

4.4. PROCÉDÉS DE PRODUCTION

4.4.1. Extraction minière

La plupart des exploitations minières de platinoïdes se font en souterrain. Les deux niveaux les plus richement minéralisés du Bushveld, le Merensky Reef et l'UG2 Reef, étaient exploités à l'origine à faible profondeur, mais comme ces niveaux plongent à environ 10° vers le centre du complexe, la poursuite de leur exploitation nécessite un approfondissement toujours plus grand.

Comme ces reefs sont peu épais (puissance métrique), les exploitations sont difficilement mécanisables, les conditions de travail des mineurs sont très difficiles (fig. 64), d'où les revendications sociales qui ont affecté le secteur minier du platine en Afrique du Sud ces dernières années et en particulier en 2012. Les coûts d'exploitation sont de plus en plus élevés, ce qui rend ces exploitations de moins en moins rentables aux prix actuels des platinoïdes.



Figure 64 - Perforateurs au travail à Marikana (Lonmin). Photo Alamy, The Guardian du 2 octobre 2008 (www.theguardian.com/business/2008/oct/02/lonmin.xstrata)

Dans le Bushveld, le Platreef, dont le minerai a des teneurs plus faibles en platinoïdes et dont l'exploitation à grande échelle est plus récente, a encore des exploitations importantes à ciel ouvert, comme celles de Mogalakwena (connues antérieurement sous le nom de « PP Rust »), exploitées par Anglo American Platinum (« Amplats »). Malgré des teneurs plus faibles, les coûts d'exploitation sont bien moindres qu'en

souterrain, et à mi-2013, c'était la seule unité de production d'Amplats (le plus gros producteur mondial de platine) qui restait bénéficiaire, compte tenu des prix courants des platinoïdes.

Les projets prometteurs du Platreef (les projets Akanani de Lonmin, Aurora de Sylvania Platinum, « Platreef » d'Ivanhoe Mines, Waterberg de Platinum Group Metals et Jogmec), même s'ils sont prévus en grande partie souterrain, devraient pouvoir être largement mécanisés, en raison de puissances largement supérieures à celles des Merensky et UG2 reefs.



Figure 65 - Mines à ciel ouvert de Mogalakwena (Platreef, Bushveld, Afrique du Sud).
Capture d'écran de Google Earth.

4.4.2. Minéralurgie, concentration des minerais

Le chapitre 4.2.2 et le suivant sont largement repris de la « Métallurgie des Platinoïdes » (Blazy et Jdid, 2008).

Placers

Les graviers des placers sont traités par gravimétrie, soit par de simples sluices ou jigs dans les installations les plus artisanales, soit par des hydrocyclones, spirales, centrifugeurs ou tables à secousses dans les installations plus industrielles. Les concentrés lourds peuvent ensuite être traités par magnétisme basse intensité (extraction de la magnétite) puis haute intensité (extraction de la chromite et autres minéraux plus faiblement magnétiques).

Gisements primaires

Dans les gisements primaires, même peu sulfurés, les EGP sont souvent associés aux sulfures, dont ils peuvent être libérés dans la zone d'oxydation.

Pour les minerais non oxydés, les sulfures sont d'abord concentrés par flottation, après libération des sulfures par un broyage à 150-300 µm environ. On peut faire varier les paramètres de flottation pour séparer les concentrés de cuivre des concentrés de nickel. On peut flotter sélectivement la chalcopirite (concentré de cuivre), puis traiter les résidus par magnétisme pour concentrer la pentlandite (concentré de nickel) et la pyrrhotite. Les PGE peuvent être associés à ces trois sulfures. Diverses variantes sont utilisées selon les caractéristiques des minerais. La récupération des platinoïdes par les opérations de flottation sont de l'ordre de 80 à 85 %.

Pour les minerais mixtes oxydés/sulfurés, la pulpe minérale obtenue par broyage en milieu humide est d'abord traitée par hydrocyclones et gravité pour extraire les particules métalliques libres, et les résidus sont traités par flottation comme précédemment.

4.4.3. Métallurgie

Les concentrés minéraux sulfurés de cuivre et/ou nickel contenant des EGP peuvent être fondus en four électrique avec obtention d'une matte (mélange de métaux et de soufre) qui rassemble le nickel, le cuivre, le cobalt, du fer et les métaux précieux, en phases encore plus ou moins sulfurées.

Les mattes sont ensuite traitées en convertisseurs pour obtenir du nickel brut et du cuivre brut (« blister ») fondu ensuite en anode pour être raffiné par électrolyse.

Les boues anodiques issues de l'électroraffinage contiennent divers éléments valorisables (Se, Te, Au, EGP). Une attaque sulfurique à haute température suivie d'une lixiviation aqueuse dissout Se, Te, Cu, As, Sb, laissant une scorie contenant les métaux précieux, fondus en un « métal doré ».

Les résidus de raffinage du nickel par le procédé carbonyl, qui peuvent contenir des EGP, peuvent être fondus avec de l'oxyde de plomb et du carbonate de sodium pour concentrer les platinoïdes.

Les concentrés miniers à EGP dominants peuvent être d'abord fondus pour séparer les silicates sous forme de scories, et obtenir un alliage impur de métaux de base et d'EGP. Ces produits, ou les concentrés obtenus par le traitement des résidus obtenus après raffinage du cuivre et du nickel obtenus par pyrométallurgie évoqué ci-dessus, sont ensuite traités par voie humide (hydrométallurgie).

La dissolution est effectuée en milieu acide oxydant.

Plusieurs procédés hydrométallurgiques peuvent être utilisés.

- **Dissolution par l'eau régale**

Cette méthode est appliquée préférentiellement aux produits à forte teneur, comme les résidus de fusion au plomb qui titrent de 20 % à 70 % d'EGP. Le platine est mis en solution sous forme d'acide chloroplatinique H_2PtCl_6 . Cette méthode dégage cependant de l'oxychlorure d'azote, $NOCl$, un gaz fortement toxique.

- **Dissolution par des halogènes dissous dans l'acide chlorhydrique**

Une solution de chlore dans l'acide chlorhydrique dissout rapidement le platine sous forme d'acide chloroplatinique, entre 80° et 90°. On peut aussi utiliser une solution de brome dans l'acide chlorhydrique, en particulier pour récupérer le palladium. Le brome est ensuite oxydé du complexe bromuré par le chlore, puis récupéré et recyclé.

- **Dissolution par autoclavage. Procédé Platsol**

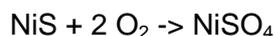
Le procédé Platsol permet de traiter directement par hydrométallurgie des concentrés sulfurés à cuivre-nickel-EGP impurs contenant aussi du chrome et du magnésium, comme les concentrés de l'UG2 Reef du Bushveld.

Le concentré est attaqué en autoclave par une solution saline à 5 à 20 g/l NaCl à 220 °C sous pression d'oxygène de l'ordre de 7 bars.

La chalcopirite est oxydée selon la réaction



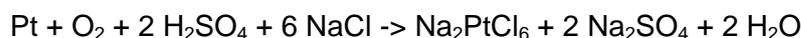
Le sulfure de nickel est oxydé selon la réaction



L'or est complexé selon la réaction



Le platine est complexé selon la réaction



L'or et les platinoïdes sont récupérés par précipitation avec NaHS.

Le cuivre est récupéré par électrolyse directe. Le bain résiduel est traité par solvant pour séparer Ni et Co.

Les taux de récupération, selon les concentrés, sont de 83 à 99 % pour Au, 50 à 98 % pour Pt, 80 à 97 % pour Pd, 77 à 95 % pour Rh, et 99 % pour Cu et Ni (Blazy et Jdid, 2008).

4.4.4. Séparation des différents platinoïdes

Les méthodes, citées en 4.1.3, de lixiviation directe ou de lixiviation après pyrométallurgie sont peu sélectives et fournissent une solution de platinoïdes qu'il faut ensuite séparer puis raffiner.

Les différents platinoïdes ayant des comportements chimiques assez voisins (ce qui explique leur association généralisée dans leurs occurrences naturelles), les procédés de séparation puis de raffinage sont délicats et demandent des savoir-faire spécialisés.

La figure 66 présente un schéma simplifié de séparation et raffinage traduit et adapté d'après le schéma publié par le consultant allemand Halwachs (www.halwachs.de).

La première étape consiste souvent en l'extraction de l'argent et de l'or qui se retrouvent dans la solution contenant les platinoïdes. L'argent est précipité sous forme de chlorure d'argent en milieu chlorhydrique, et l'or est réduit par divers réducteurs (fer ferreux, SO₂, nitrites, formiates, éthanol) en dosages suffisamment ajustés pour ne pas réduire les EGP.

Pt, Pd, Ir et Rh peuvent être séparés par cristallisation fractionnée des hexachloro-complexes par le chlorure d'ammonium en solution chlorhydrique. On adapte les concentrations en chlorure d'ammonium, en chlore, et les températures, pour précipiter sélectivement et successivement (NH₄)₂PtCl₆, (NH₄)₂IrCl₆, (NH₄)₂PdCl₆ et (NH₄)₃RhCl₆. Divers traitements complémentaires permettent d'affiner la séparation.

Le ruthénium et l'osmium peuvent être séparés par distillation des oxydes, les tétr oxydes RuO₄ et OsO₄ étant volatils³⁶. L'oxyde de ruthénium est obtenu à partir d'une solution aqueuse de K₃RuCl₆ en milieu sulfurique avec un oxydant puissant tel que le permanganate ou le chlorate de potassium. RuO₄ en est distillé, avec précaution pour éviter son explosion, puis absorbé par HCl dilué pour redonner un complexe soluble. L'oxyde d'osmium est obtenu aussi par des agents oxydants en solution aqueuse, puis absorbé après distillation dans une solution de KOH, par exemple, pour donner K₂OsO₄.

Les EGP peuvent aussi être extraits par solvants et résines. Trois procédés principaux sont cités par Blazy et Jdid (2008) : le procédé OPNIM, le procédé Inco et le procédé MRR (Matthey Rustenburg Refiners).

Dans le procédé MRR, les métaux non séparés sont dissous dans une solution de chlore dans l'acide chlorhydrique. L'argent se précipite en chlorure insoluble. L'or est extrait par solvant organique, avec le fer, le tellure et d'autres impuretés. Le palladium est ensuite extrait par la B-hydroxyoxime. On extrait ensuite les oxydes RuO₄ et OsO₄ par distillation (cf. plus haut). On extrait ensuite le platine par la tri-n-octylamine dans

³⁶ OsO₄ fond à 42 °C et bout à 130 °C. RuO₄ fond à 24 °C et se décompose au-dessus de 40 °C, et de manière explosive au-dessus de 100 °C. Mais, ces deux tétr oxydes se subliment aussi progressivement à la température ambiante.

une solution très concentrée d'acide chlorhydrique. On dilue ensuite la solution pour extraire l'iridium. Le rhodium est ensuite récupéré par résines.

Certains EGP peuvent aussi être précipités sous forme métallique par des réducteurs : la sciure de bois précipite le platine par réduction directe de ses sels.

Schéma simplifié des étapes de séparation et de raffinage des EGP

(adapté d'après Halwachs, www.halwachs.de)

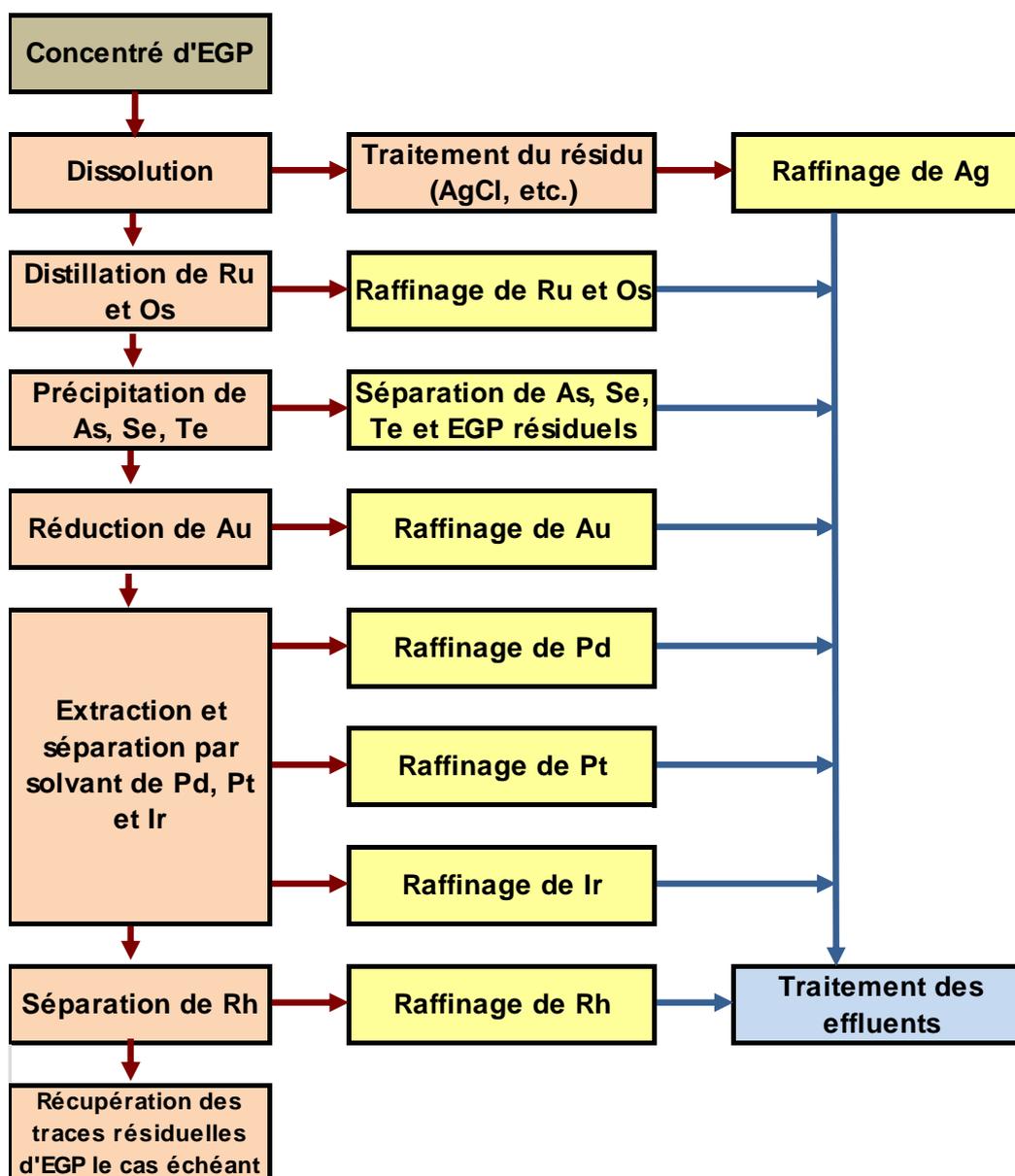


Figure 66 - Exemple de flowsheet de séparation et raffinage d'EGP (adapté d'après Halwachs, www.halwachs.de).

Purification des métaux séparés

Les métaux du groupe du platine, une fois séparés, subissent encore des procédés de purification par dissolutions et précipitations fractionnées et des extractions par solvants et résines.

4.5. RECYCLAGE

Les prix des platinoïdes sont tels que les acteurs économiques cherchent à maximiser la récupération de ces métaux à partir des équipements dans lesquels ils ont été utilisés lorsque ces équipements sont hors d'usage (en « fin de vie »). Les platinoïdes sont effectivement largement recyclés en fin de vie, avec une bonne efficacité, sauf dans certaines applications ou les quantités intégrées dans les produits sont infimes (silicones, par exemple, mais aussi platine et ruthénium dans les disques durs d'ordinateurs).

4.5.1. Le recyclage au niveau mondial

Johnson Matthey publie des statistiques annuelles de production secondaire de platine, palladium et rhodium. Ces statistiques concernent les métaux obtenus par recyclage en boucle longue, c'est-à-dire le recyclage des produits finis en fin de vie, après usage (« vieux scraps »), ce qui concerne essentiellement les pots catalytiques automobiles, la joaillerie et le secteur électrique / électronique.

Ces statistiques ne prennent pas en considération le recyclage en boucle courte, comme les chutes de fabrication (« scraps neufs »), remises immédiatement dans le circuit. Elles ne prennent pas non plus en considération le recyclage en boucle fermée dans certains secteurs d'utilisation, comme la catalyse industrielle, où les catalyseurs ne sont pas « consommés » (mis à part les fractions minimales qui « disparaissent » par usure), mais les catalyseurs périodiquement régénérés : les métaux des catalyseurs sont récupérés pour produire les mêmes catalyseurs rénovés. Dans les statistiques, ces masses ne sont donc comptées ni comme consommées (demande), ni comme recyclées (offre) et sont neutres dans les bilans.

La figure 64 représente de manière schématique le circuit du recyclage d'EGP en fin de vie, appliqué aux catalyseurs automobiles.

Le recyclage en fin de vie contribue depuis quelques années pour environ un quart à l'approvisionnement du marché en platine (taux d'approvisionnement par recyclage de 26,5 % en 2012), en palladium (25,4 % en 2012) et en rhodium (26,6 % en 2012) (tab. 29).

Schéma du "cycle de vie" des EGP, dans l'exemple des catalyseurs automobiles

(traduit et adapté d'après Umicore & Öko-Institut e.V., 2006)

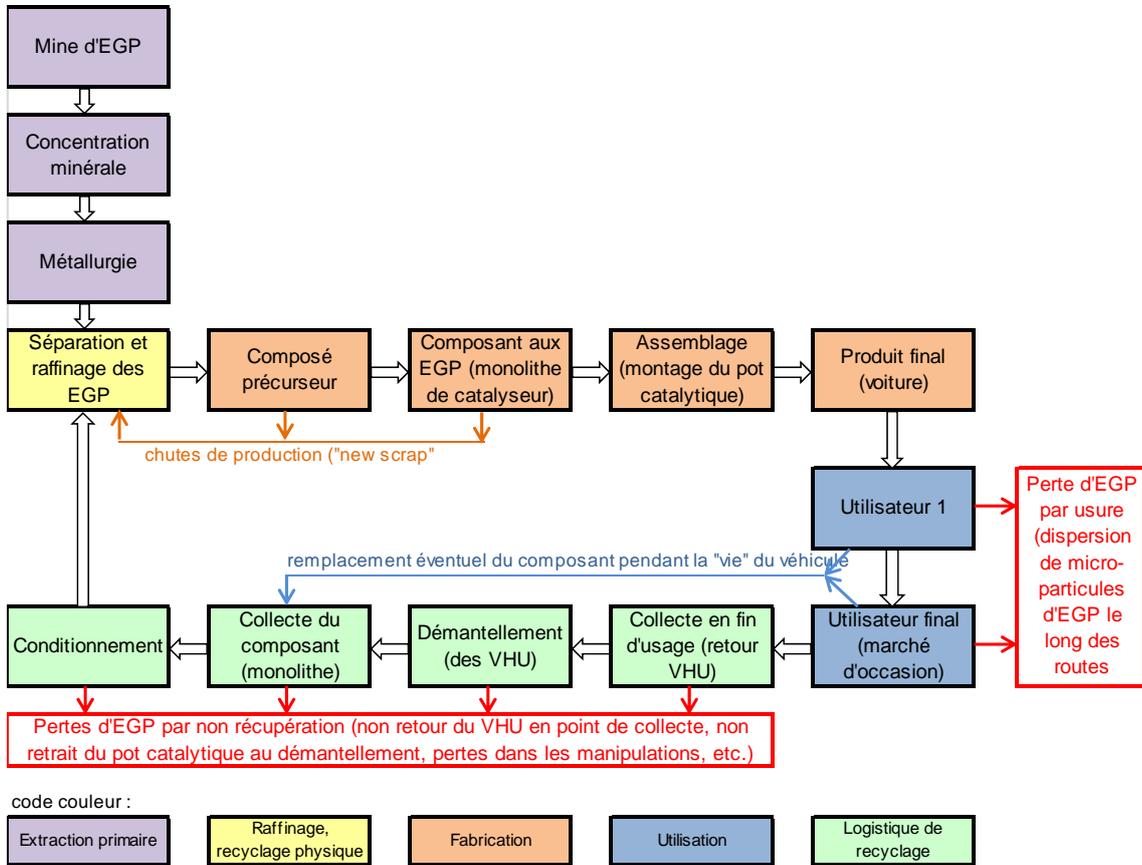


Figure 67 - « Cycle de vie » des EGP dans l'exemple des catalyseurs automobiles (adapté d'après Umicore & Öko-Institut, 2006).

	Pt			Pd			Rh			Source
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	
Production primaire	188.2 t	201.7 t	175.4 t	197.7 t	204.7 t	196.6 t	22.9 t	23.8 t	22.4 t	Johnson Matthey 2013
Déstockage russe				31.1 t	24.1 t	7.8 t				
Recyclage en fin de vie	56.9 t	64.1 t	63.1 t	57.5 t	72.9 t	69.7 t	7.5 t	8.6 t	8.1 t	
Approvisionnement total (offre)	245.1 t	265.8 t	238.5 t	286.3 t	301.7 t	274.1 t	30.4 t	32.4 t	30.5 t	
Consommation totale (demande)	245.9 t	251.8 t	250.2 t	302.8 t	266.2 t	307.8 t	27.6 t	28.2 t	30.0 t	
Déficit/surplus du marché (mouvements des stocks)	-0.8 t	14.0 t	-11.7 t	-16.5 t	35.5 t	-33.7 t	2.8 t	4.2 t	0.5 t	
Taux de contribution du recyclage en fin de vie dans l'offre	23.2%	24.1%	26.5%	20.1%	24.2%	25.4%	24.7%	26.5%	26.6%	(calcul à partir des lignes de tableau ci-dessus)
Taux de contribution du recyclage en fin de vie global dans la demande globale	23.1%	25.5%	25.2%	19.0%	27.4%	22.6%	27.2%	30.5%	27.0%	
Taux de contribution du recyclage des pots catalytiques dans la demande pour la catalyse automobile	35.3%	38.9%	34.9%	23.5%	27.5%	25.1%	33.1%	38.7%	33.1%	Johnson Matthey 2013

Tableau 29 - Contribution de la production secondaire (recyclage) dans l'offre et la demande en platine, palladium et rhodium (source des données : Johnson Matthey, 2013).

Ces contributions étaient d'un pourcentage minime dans les années 1980 (< 5 % pour Pt, < 2 % pour Pd et Rh). Elles sont passées progressivement de 5 à 10 % de 1990 à 2004 pour Pt, de 2002 à 2005 pour Pd, et de 1992 à 2000 pour Rh, puis ont fortement augmenté dans les années 2000 pour atteindre 20 à 27 % ces dernières années (tab. 29). Ces contributions sont plus élevées si l'on ne considère que le secteur de la catalyse automobile (cf. sections 3.1.1, 3.2.1 et 3.3.1), surtout pour le platine et le rhodium pour lesquelles elles atteignent désormais 33 à 39 %. Les figures 68 à 70 illustrent la progression de la contribution du recyclage (production secondaire) dans l'approvisionnement en platine, palladium et rhodium. Les figures 8, 31 et 42 du chapitre 3 détaillaient cette contribution dans le seul secteur de la catalyse automobile

Une estimation des taux de recyclages en « fin de vie », c'est-à-dire la proportion de métal effectivement récupéré par rapport à la quantité de métal contenue dans les produits en « fin de vie », a été publiée par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE / UNEP) en 2011 (Graedel *et al.*, 2011 pour le rapport ; Beck *et al.*, 2011, pour l'annexe statistique). Ces estimations, par secteur et globalisées en tenant compte de l'importance relative de chaque secteur, sont récapitulées dans le tableau 29.

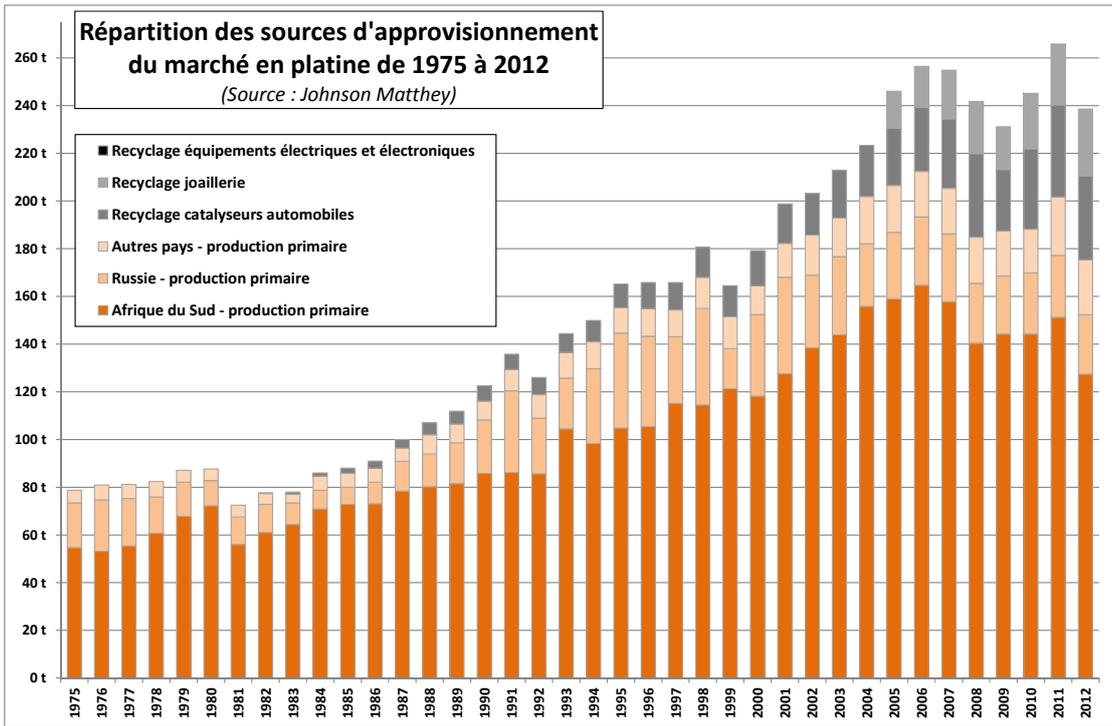


Figure 68 - Évolution de la contribution de la production secondaire de platine (recyclage en « fin de vie ») dans la production totale (source : Johnson Matthey).

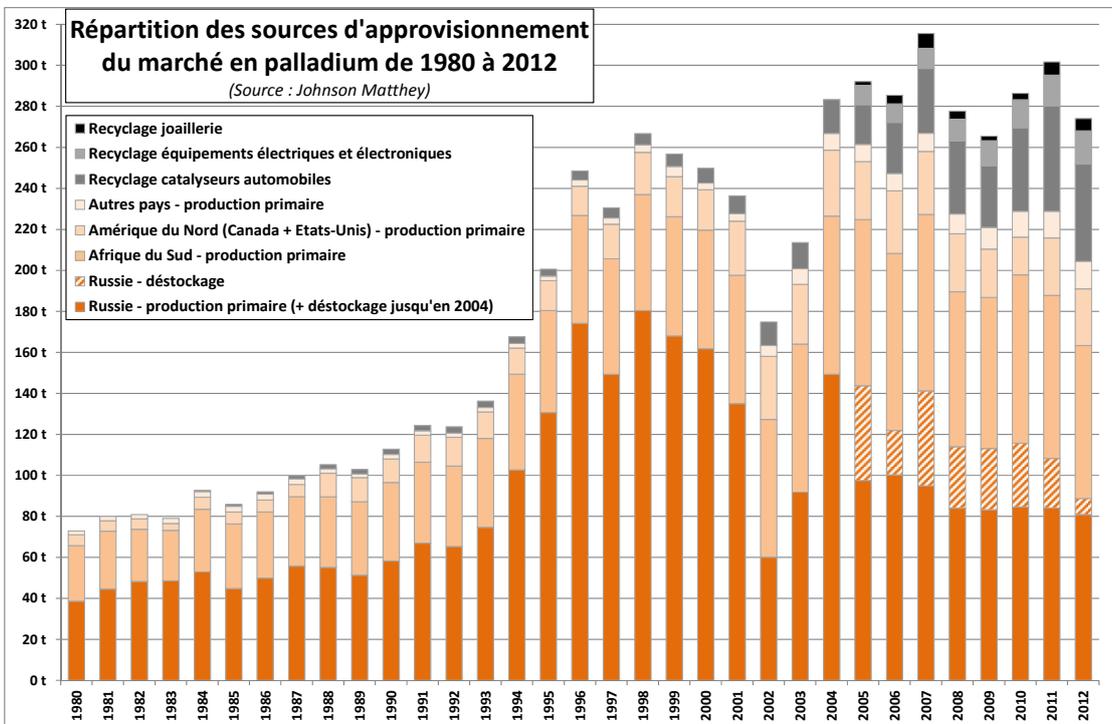


Figure 69 - Évolution de la contribution de la production secondaire de palladium (recyclage en « fin de vie ») dans la production totale (source : Johnson Matthey).

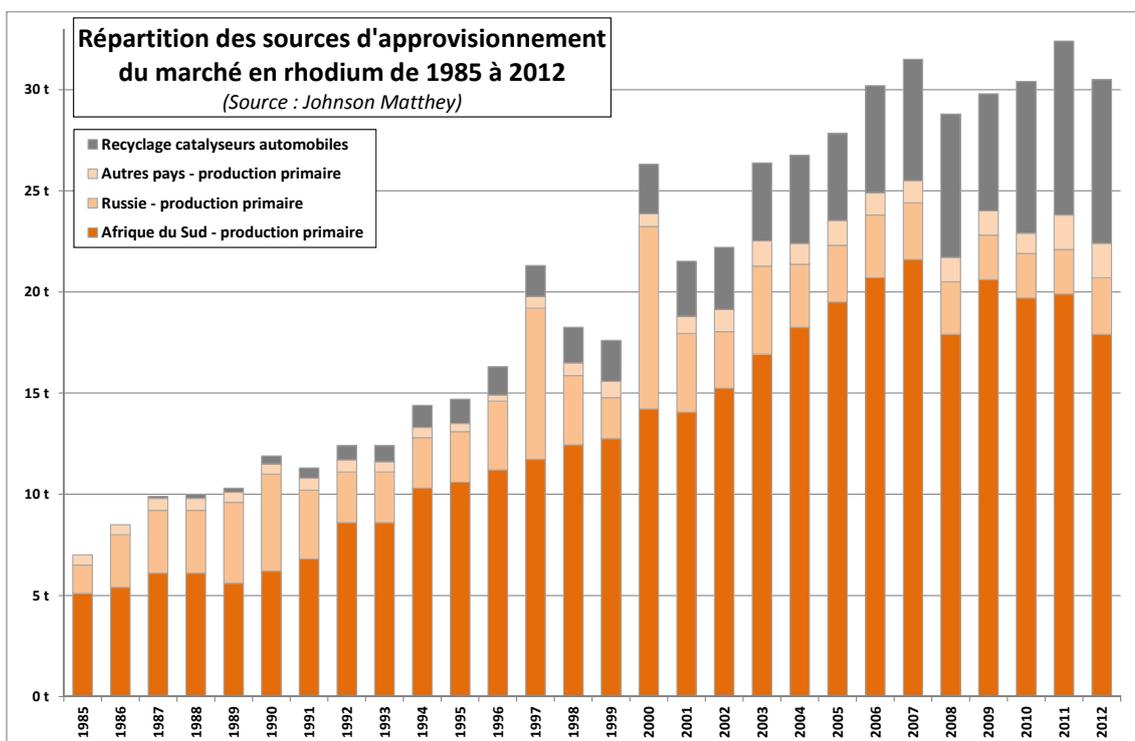


Figure 70 - Évolution de la contribution de la production secondaire de rhodium (recyclage en « fin de vie ») dans la production totale (source : Johnson Matthey).

	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir
Taux de recyclage à partir des catalyseurs automobiles	50 - 55%	50 - 55%	45 - 50%		
Taux de recyclage à partir de la joaillerie, des pièces et médailles	90 - 100%	90 - 100%	40 - 50%		
Taux de recyclage à partir des équipements électriques / électroniques en fin de vie	0 - 5%	5 - 10%	5 - 10%	0 - 5%	
Taux de recyclage à partir des applications dentaires	15 - 20 %	15 - 20 %			
Taux de recyclage à partir des applications industrielles	80 - 90%	80 - 90%	80 - 90%	40 - 50 %	40 - 50 %
Taux de recyclage à partir des applications autres (laboratoire, médical, sondes, etc.)	10 - 20%	15 - 20%	30 - 50%	0 - 5 %	5 - 10 %
Taux global de recyclage en "fin de vie"	60 - 70 %	60 - 70%	50 - 60%	5 - 15%	20 - 30%

Tableau 30 - Estimation des taux de recyclage des platinoïdes en « fin de vie » des équipements dans lesquels ils ont été utilisés (Graedel et al., UNEP, 2011).

Le taux de recyclage global en fin de vie est de l'ordre de 2/3 (60 à 70 %) pour le platine et le palladium, un peu inférieur pour le rhodium (dont les applications en joaillerie sont moins recyclées du fait qu'il est surtout utilisé en plaquage et non sous forme massive). Il est assez faible pour le ruthénium, en raison d'une part de ses teneurs très faibles dans ses usages dominants (électronique) et de son prix bien inférieur à celui des autres platinoïdes (57 US\$/oz au 3^{ème} trimestre 2013, soit vingt-cinq fois moins que le platine).

D'après le Groupe de Travail Ad-Hoc sur les matières premières critiques de la Commission Européenne (2010), le taux de recyclage des platinoïdes des catalyseurs automobiles dans l'Union Européenne est inférieur à 50 %, bien que la collecte des pots catalytiques soit obligatoire au démantèlement des véhicules hors d'usage, en raison d'une proportion significative d'exportation des véhicules âgés hors d'Europe (vers l'Afrique en particulier).

Ces statistiques appellent les remarques suivantes :

- une amélioration du taux de recyclage des platinoïdes issus des catalyseurs automobiles en fin de vie, estimé globalement à 50 à 55 %, demanderait un meilleur taux de collecte, pour amener effectivement davantage de pots hors d'usage dans les circuits de recyclage (mise en place de circuits de recyclage en Afrique, par exemple) ;
- tant que le marché du catalyseur automobile est globalement croissant, et que la consommation de platine, palladium et rhodium correspondante est globalement croissante, le recyclage des catalyseurs en fin de vie ne pourra alimenter au mieux qu'une part limitée de ce marché. En effet, si on considère une durée de vie moyenne d'une douzaine d'années pour un véhicule et son pot catalytique, les quantités de platinoïdes qu'on obtiendra par recyclage aujourd'hui ne pourront correspondre, au mieux (c'est-à-dire si on atteignait un taux de recyclage, un taux de récupération en fin de vie de 100 %) qu'à ce qui avait été consommé par ce marché 12 ans auparavant. Or, avec un taux de croissance de 3 % par an, par exemple, ce qui est consommé aujourd'hui et qui pourra être recyclé dans 12 ans ne représentera que 70 % de la demande dans 12 ans³⁷ (et ce avec un taux de récupération en fin de vie de 100 %, ce qui est peu réaliste). Avec un taux de croissance de 5 % par an³⁸, ce taux maximal d'approvisionnement par le recyclage tombera à 56 % ;
- la signification d'un taux élevé de recyclage en fin de vie de la bijouterie (90 à 100 % selon Graedel *et al.*, UNEP, 2011) n'a pas forcément un impact sur le marché à mettre en comparaison avec le taux de recyclage en fin de vie des catalyseurs automobiles (de 50 à 55 % selon Graedel *et al.*, UNEP, 2011). En effet, le devenir

³⁷ Si on consomme 100 unités de quelque chose aujourd'hui, avec une croissance de 3 % par an on consommera 142,6 dans 12 ans. Recycler dans 12 ans les 100 unités consommés aujourd'hui contribuera au mieux à 70 % du besoin de 142,6 alors.

³⁸ Les taux de croissance à moyen terme des consommations de platine et de palladium observés au cours des décennies passées pour le secteur de la catalyse automobile ont été de l'ordre de 6 % pour le platine et de 10 % pour le palladium, cf. fig. 8 et 31.

logique d'un catalyseur automobile est d'avoir une « fin de vie » au bout de 10 ou 15 ans, et il devrait donc pouvoir automatiquement alimenter le circuit du recyclage. Alors que le devenir logique d'une bague en platine n'est pas forcément d'être jetée au bout d'une douzaine d'années pour alimenter le circuit du recyclage. Sa « durée de vie » peut être très longue ;

- en ce qui concerne les prothèses dentaires, Monier *et al.* (2010) écrivaient : « les couronnes et les bridges enlevés sont rendus au patient qui peut choisir de les garder ou de les remettre à un recycleur. Les quantités véritablement collectées de produits en fin d'usage dans le secteur dentaire sont en réalité négligeables car les patients peuvent choisir de garder les prothèses enlevées et surtout de nombreuses prothèses ne sont jamais enlevées ». Et au décès, le recyclage des platinoïdes utilisés en prothèses dentaires peut se heurter aux sensibilités des familles.

En conclusion, les taux de récupération des platinoïdes de leurs usages en « fin de vie » pourraient certainement être améliorés, en particulier par une optimisation de leur collecte. Si la croissance de la consommation reste modérée, le taux de contribution de la production secondaire dans la consommation globale pourrait encore poursuivre l'augmentation qu'il a connu depuis 20 ou 30 ans (cf. fig. 63 à 65). Mais il ne dépassera vraisemblablement pas 50 %, sauf décroissance durable du marché.

4.5.2. Le potentiel de recyclage en France

Au niveau de la France, une évaluation du potentiel de recyclage de certains métaux rares, dont les platinoïdes, avait été réalisée par la société Bio-Intelligence Services pour le compte de l'ADEME en 2010 (Monier *et al.*, 2010), en tenant compte de la quantité de platinoïdes présents dans les divers produits finis qui en contiennent, et une évaluation du flux de déchets théoriques de chacun de ces produits.

Les évaluations concernant les platinoïdes sont récapitulées dans le tableau 31 ci-après.

Ce tableau appelle cependant nombre de remarques.

- Monier *et al.* considèrent que 2,3 t de platine contenu dans les catalyseurs pour les industries pétrolières et chimiques (catalyseurs sur support d'alumine, catalyseurs en poudre et toiles métalliques), seraient collectables annuellement par arrivée en fin de vie de ces catalyseurs. En réalité, la grande majorité de ces catalyseurs en fin de vie sont effectivement collectés et recyclés, pour renouveler lesdits catalyseurs. Mais, pour les industries qui les utilisent, ces catalyseurs ne sont pas une nouvelle consommation de platine. Cette ressource secondaire en platine n'est donc pas à mettre en face des chiffres de la demande : ils n'alimentent pas le marché ouvert du platine ;
- les fourchettes de valeur des données ayant conduit aux calculs sont très large, et varient selon des facteurs importants dans le temps : le rapport cite qu'Umicore évaluait la quantité de palladium dans un ordinateur à 360 mg en 2005 et 80 mg en 2010. Ainsi baser le calcul du gisement collectable sur l'un ou l'autre chiffre peut faire varier le résultat dans un facteur de 1 à 4,5 ;

- beaucoup d'évaluations ne sont pas faites sur des données françaises, mais sur des données allemandes converties au prorata des PIB des deux pays. Or le partage des parts des activités dans la consommation de platine n'est pas forcément similaire au partage du PIB : il peut y avoir davantage de raffinage de pétrole ou d'industries chimiques dans un pays que dans l'autre, et les évaluations mériteraient donc d'être affinées ;
- le rapport évalue à 1,4 t la quantité de palladium qui serait théoriquement recyclable chaque année des prothèses dentaires (dont 0,2 t en chutes de fabrication et 1,2 t à partir des prothèses « en fin de vie »). Une couronne en palladium étant en général de 1,5 à 2 g, cela équivaldrait à 600 000 à 800 000 couronnes en palladium qui devraient être retirées et collectées chaque année. Par ailleurs, les 0,2 t de chutes de fabrication peuvent être immédiatement remises dans le circuit des prothésistes et donc ne pas être considérées comme de la consommation. Un même morceau de palladium peut même être ainsi recyclé plusieurs fois au cours d'une année, et les quantités correspondantes de palladium ne doivent pas être additionnées pour calculer la ressource secondaire disponible.

Type de déchet	Etat / forme du métal	Quantité et concentration en métal	Accessibilité du métal	Estimation du gisement collectable en France	Estimation du gisement collecté en France
Platine				5.0 à 5.4 t	1.5 t
Pots catalytiques	Métal	1,2 g/VHU	Très dispersé	1.9 à 2.3 t	1.3 t
Catalyseurs sur support d'alun	Métal	0.2-0.3%	Dépôt en surface		
Catalyseurs en poudre	Métal	5%	Dépôt en surface	2.3 t	
Toiles métalliques	Alliage Pt-Rh	95%	Très bonne		
Cartes électroniques	Métal	0.0015% à 0,004% en masse*		0.8 t	0.2 t
<i>Téléphones portables</i>	<i>Métal</i>	<i>1.6 mg/unité</i>		<i>0.03 t</i>	<i>0.001 t</i>
<i>Ordinateurs</i>	<i>Métal</i>	<i>20 à 72 mg/unité*</i>		<i>0.4 t</i>	
Piles à combustible	Métal	0.2 g/kW	Dépôt en surface		
Palladium				5.5 t	1.3 t
Pots catalytiques	Métal	0.176 à 0.9 g/VHU* **	Dispersé	0.31 t	0.2 t
Cartes électroniques	Métal	0.008% à 0.02% en masse*	Très dispersé	3.8 t	1.1 t
<i>Téléphones portables</i>	<i>Métal</i>	<i>3 à 9 mg/unité*</i>	<i>Très dispersé</i>	<i>0.1 t</i>	<i>0.002 t</i>
<i>Ordinateurs</i>	<i>Métal</i>	<i>80 à 360 mg/unité*</i>	<i>Très dispersé</i>	<i>1.8 t</i>	
<i>Téléviseurs</i>	<i>Métal</i>	<i>11 mg/unité</i>	<i>Très dispersé</i>	<i>1.4 t</i>	
Prothèses dentaires	Alliages	35 à 80% en masse*	bonne	1.4 t	
Rhodium				0.42 à 0.52 t	0.3 t
Pots catalytiques	Métal	0.274 g/VHU* **	Très dispersé	0.42 à 0.52 t	0.3 t
Ruthénium				0.3 t	0.05 t
Cartes électroniques	Alliages Ru-(Pt/Pd)	9 g/t	Très dispersé	0.2 t	0.05 t
Disques durs	Alliages Ru-(Pt/Pd)	16 mg/unité	Très dispersé	0.1 t	
Iridium					
Catalyseurs	Alliages	100 à 3 000 ppm	n.d.	n.d.	n.d.

* Le tableau publié par Monier et al. fournit l'un des deux chiffres de la fourchette, mais le texte précise que d'autres sources donnent l'autre chiffre.

** Les données constructeurs sont plutôt de 2 g de Pt-Pd, avec Pt>>Pd, pour les véhicules diesels, et 2 g Pt-Pd, avec Pd>>Pt, pour les véhicules essence. La quantité moyenne serait donc d'1 g Pt et 1 g Pd par VHU pour l'ensemble si on fait l'hypothèse du nombre relativement équivalent de véhicules essence et diesel en France. Pour le Rhodium, la quantité serait plutôt de 0,1 g par véhicule.

Tableau 31 - Estimations du recyclage des platinoïdes en France, selon Monier et al., 2010.

NDLA : ces estimations ne sont que des indicateurs très imprécis et ne doivent pas être considérées comme des données fiables. Voir texte.

Le travail réalisé est donc intéressant, mais il ne doit être considéré que comme un début de réflexion sur le potentiel de recyclage en France, avec des résultats à ne pas prendre comme des vérités étayées. Il appelle un affinage important, avec une véritable analyse de flux de matière concernant la France pour ces métaux.

4.6. LIMITES SOCIO-POLITIQUES ET TECHNICO-ÉCONOMIQUES DE L'OFFRE

Au-delà des ressources et réserves physiques de platinoïdes, la croissance possible de l'offre est limitée par certains facteurs, comme les conditions de travail et de rémunération et les revendications des mineurs sud-africains (causes de grèves de longue durée qui ont affecté presque toutes les sociétés productrices de platine d'Afrique du Sud en 2012, avec les tragiques affrontements d'août 2012 à Marikana qui ont coûté la vie à 46 personnes). La croissance possible de l'offre est aussi limitée, dans certains cas, par des facteurs technico-économiques dépendants de marchés tiers : par exemple, les réalités du marché du nickel affectent la production de palladium en Russie, dont il n'est qu'un sous-produit.

4.6.1. La main d'œuvre en Afrique du Sud

Les ressources et réserves en platinoïdes du complexe du Bushveld, en Afrique du Sud, non encore exhaustivement évaluées, sont encore considérables (cf. 4.2), mais deux des trois niveaux minéralisés (reefs) porteurs, le Merensky Reef et l'UG2 Reef, ont été déjà largement exploités dans leurs parties proches de la surface. Comme ils s'approfondissent progressivement vers le cœur du complexe, les exploitations sont de plus en plus profondes, presque exclusivement en souterrain. Ces reefs sont relativement peu puissants (puissance métrique, cf. 4.1.3), ce qui limite le dimensionnement des machines et impose une main d'œuvre très importante.

Seul le Platreef est encore exploitable à ciel ouvert et son exploitation est largement plus mécanisée (mine de Mogalakwena d'Amplats, cf. tab. 20).

De plus, le gradient géothermique est significatif, ce qui rend la chaleur de plus en plus difficile à supporter avec l'approfondissement (limite du supportable citée à 1 200 m de profondeur, selon Guilloux et Méloux, 1987).

Les conditions de travail très difficiles, couplée avec l'évolution sociopolitique de ces vingt dernières années en Afrique du Sud, et à la multiplication par 3 ou 4 des prix du platine depuis dix ans, ont conduit les ouvriers mineurs à revendiquer une amélioration de leurs conditions de travail et de meilleures rémunérations.

De nombreuses grèves, légales ou illégales, organisées ou sauvages, ont largement affecté le secteur minier du platine en 2012, avec des actions violentes et des répressions qui ont conduit à la mort de 46 personnes mi-16 août 2012 à la mine de Lonmin à Marikana.

Le tableau 32 reprend le calendrier schématique des événements marquants et de leurs conséquences sur la production de platine, publié par Johnson Matthey en mai 2013.

Mois	Evènements ayant affecté la production minière de platine en Afrique du Sud en 2012
janv 2012	Les foreurs de la mine d'Impala (Implats) se mettent en grève, mettant la production en arrêt.
févr 2012	Les débrayages se poursuivent à Impala. La grève, considérée comme illégale, aura duré 6 semaines et coûté la production de 4,6 t Pt.
mars 2012	Les mineurs de Modikwa (Amplats, ARM) entament une grève (légale) de 3 semaines sur des négociations salariales.
avr 2012	La production reprend à Modikwa, après une perte estimée à 0,35 t Pt.
mai 2012	Un nouveau débrayage de 2 jours à Impala fait baisser la production de 0,2 t. Un four de Northam tombe en panne à Zondereinde.
juin 2012	Les mines d'Everest (Aquarius), Marikana (Aquarius/Amplats) et Smokey Hills (Platinum Australia) sont mises en sommeil.
juil 2012	Des actions sauvages affectent la production de Rustenburg et Kroondal (Amplats) qu'elles font baisser de 0,3 t.
août 2012	Les mineurs cessent le travail à Marikana (Lonmin). 44 personnes sont tuées dans des violences le 16 août. 3,4 t de production de platine sont perdues pendant les 6 semaines de durée du conflit.
sept 2012	Les opérations de Rustenburg d'Amplats sont suspendues pour raisons de sûreté, puis une grève (illégale) arrête la majeure partie de ces opérations.
oct 2012	Des débrayages s'étendent aux mines d'Amandelbult et d'Union d'Amplats, et affectent aussi Bokoni (JV Amplats-Atlatsa).
nov 2012	Les grèves d'Amplats cessent en milieu de mois. Amplats aura perdu 9,3 t de production de platine en raison des grèves en 2012.
déc 2012	La mine de Bokoni reprend la production après 2 mois de grève, en ayant perdu 0,6 t de production de platine.

Tableau 32 - Résumé des étapes ayant affecté la production minière de platine en Afrique du Sud en 2012 (traduit et adapté de Johnson Matthey, 2013).

Dans la plupart des cas, des compromis ont été trouvés (augmentations salariales³⁹, aménagement des temps postés) et le travail a repris progressivement à partir de fin septembre 2012. Mais la situation sociale reste sensible.

Parallèlement, l'augmentation des coûts de production, couplée à des prix du platine plus faibles en moyenne en 2013 que les années précédentes (cf. chapitre 5), ont conduit la plupart des producteurs à fonctionner à perte au premier semestre 2013, ce qui pourra se solder, sauf remontée des prix, par d'autres suspensions ou même fermetures de mines, à la suite de la mise en « care and maintenance » des mines d'Everest, Blue Ridge et Marikana-Aquarius en 2012.

³⁹ Les revendications salariales initiales des mineurs de Lonmin étaient un triplement de salaire (d'environ 4 200 rands à 12 500 rands, soit de 310 € à 925 €/mois environ). Le travail a repris sur une augmentation de 22 % assortie d'une prime ponctuelle.

Trop de fermetures finiront par faire remonter les prix, dans la perspective d'un maintien, voire d'un développement, de la demande.

En 2012, la plupart des mines sud-africaines de platine ont été déficitaires ou à peine bénéficiaires, à l'exception notable de Mogalakwena, qui a été l'opération la plus profitable d'Amplats, grâce à son exploitation à ciel ouvert, largement mécanisée et avec largement moins de personnel.

Le tableau 33 ci-après compare la productivité par employé de quelques mines sud-africaines majeures de platine (ainsi que les mines zimbabwéennes).

La mine de Mogalakwena, à ciel ouvert, a employé 2119 personnes en 2012 (employés Amplats + sous-traitants) pour produire près de 10 t de platine et 10 t de palladium, soit, à titre indicatif, 224 employés par tonne de platine produit. Comparativement, le groupe des cinq mines de Rustenburg d'Amplats a employé 22 068 personnes pour produire 16,2 t de platine et 8,2 t de palladium, soit, à titre indicatif, 1360 employés par tonne de platine produit. De même, la mine de Marikana a employé environ 24 000 personnes⁴⁰ pour produire 20,14 t de platine et 9,2 t de palladium, soit près de 1 200 employés par tonne.

Société contrôlante	Mine (ou groupe de mines)	Type d'exploit- ation	Prod. Pt 2012	Prod. Pd 2012	Nombre total d'employés (directs + ss-traitants)	Nombre d'employés par t de platine produit	Nombre d' employés par t de platine- équivalent*
Afrique du Sud							
Amplats	Amandelbult (2 mines)	Souterrain	11.51 t	5.35 t	14 016	1 217	988
	Mogalakwena	Ciel Ouvert	9.48 t	10.18 t	2 119	224	145
	Rustenburg (5 mines)	Souterrain	16.23 t	8.22 t	22 068	1 360	1 085
	Union (N & S)	Souterrain	6.63 t	2.95 t	7 680	1 159	948
Amplats / Aquarius	Kroondal	Souterrain	6.95 t	3.54 t	5 371	773	616
Royal Bafokeng	Bakofeng-Rasimone	Souterrain	5.43 t	2.24 t	6 057	1 115	924
Lonmin	Marikana	Souterrain	20.11 t	9.19 t	24 000	1 194	972
Implats	Impala	Souterrain	23.33 t	12.71 t	48 307	2 071	1 627
	Marula	Souterrain	2.15 t	2.21 t	3 708	1 725	1 139
Northam	Zondereinde	Souterrain	5.21 t	2.78 t	9 163	1 760	1 389
Zimbabwe							
Implats	Zimplats / Makwiro	Souterrain	5.82 t	4.64 t	9 203	1 581	1 131
Implats / Aquarius	Mimosa	Souterrain	3.30 t	2.56 t	1 771	537	387
Amplats	Unki	Souterrain	2.01 t	1.38 t	1 150	572	426

* Compté ici arbitrairement, à titre indicatif, comme le tonnage de platine + 50% du tinnage de palladium, puisque le prix du palladium est de l'ordre de la moitié de celui de la platine

Tableau 33 - Intensité de main d'œuvre dans certaines des principales mines de platine sud-africaines et zimbabwéennes (sources : tab. 21 et rapports annuels des sociétés).

⁴⁰ sur 28 000 personnes employées par Lonmin sur ses mines de platine en Afrique du Sud.

4.6.2. La dépendance au nickel de la production russe de palladium

La société russe Norilsk Nickel, le plus gros producteur mondial de palladium avec 43 % de la production mondiale, est avant tout un producteur de nickel, avec cuivre en co-produit, et le palladium en sous-produit.

La répartition des revenus des opérations russes de Norilsk par substance est estimée comme illustré sur la figure 71 (d'après Willis *et al.*, Oakdene Hollins, 2012).

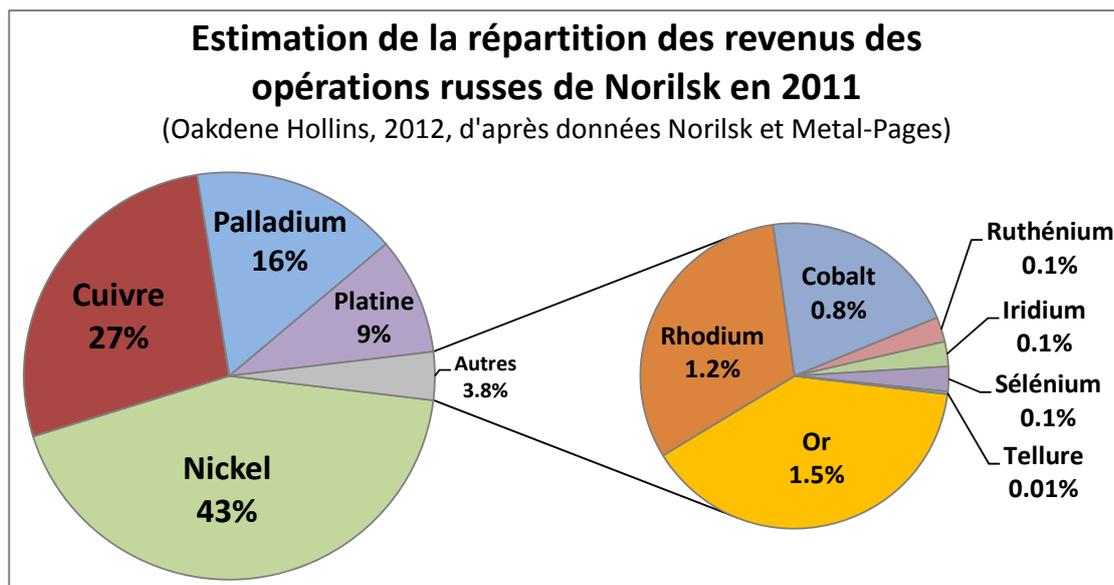


Figure 71 - Estimation de la répartition des revenus des opérations russes de Norilsk Nickel par substance en 2011.

Le palladium représenterait ainsi environ 16 % du chiffre d'affaires des opérations russes de Norilsk.

En raison de la faiblesse actuelle du prix du nickel, Norilsk sera tentée d'ajuster sa production de ce métal, avec en conséquence une possible baisse de la production des co-produits associés comme le palladium. En fait, pour tenter de maintenir sa rentabilité, Norilsk cherche à orienter ses exploitations vers les zones les plus riches en palladium, dont le prix reste attractif.

4.6.3. La situation géopolitique et la politique commerciale des principaux producteurs

L'Afrique du Sud a ses propres risques socio-politiques, mais a une politique commerciale libérale qui ne met pas de restrictions à la libre exportation de ses productions minières.

La Russie exporte encore sans problème ses productions minières et métallurgiques. Mais des évolutions de politique commerciale plus restrictives font partie des

hypothèses possibles. Par ailleurs, la Russie applique une taxe à l'exportation de 6,5 % sur les EGP.

Les États-Unis et le Canada gardent des politiques commerciales libérales. Toutefois, socialement, les mines canadiennes sont épisodiquement affectées par des grèves dures et de longue durée, qui impactent fortement la production, comme en particulier dans les mines de Vale-Inco de Sudbury en 2010, avec une très forte chute de la production de cuivre et nickel, mais aussi de palladium et de platine (cf. tab. 21).

Le Zimbabwe est peut-être le plus incertain, socio-politiquement, des producteurs majeurs de platinoïdes, mais en pratique, ses mines de platine tournent plutôt bien et ont pu être plus rentables, en 2012, que les mines sud-africaines souterraines.

Les indicateurs de gouvernance publiés par la Banque Mondiale (<http://info.worldbank.org/governance/wgi/pdf/wgidataset.xlsx>) sont moyens pour l'Afrique du Sud, médiocres pour la Russie et très faibles pour le Zimbabwe : la compilation des six indicateurs donne une note de 4,5 à l'Afrique du Sud et de 6,5 à la Russie sur une échelle de 1 à 10 allant de la meilleure gouvernance (Danemark : 1,2) à la pire (Somalie : 9,6).

4.7. STOCKAGES STRATÉGIQUES ET DÉSTOCKAGES

4.7.1. Stockages nationaux

L'USGS publie chaque année dans ses « Mineral Commodity Summaries » annuels l'état et les flux des stocks gouvernementaux étatsuniens en divers métaux, dont le platine, le palladium et l'iridium.

Dans les années 1970 et 1980, l'URSS avait stocké une partie de sa production minière de palladium et de platine, mais l'information les concernant constituait un secret d'État. Après le démantèlement de l'URSS, la Russie a commencé à mettre progressivement ces stocks sur le marché. Les stocks résiduels de platine seraient désormais négligeables. Ceux de palladium ont continué à alimenter le marché ces dix dernières années, mais approcheraient aussi de leur fin.

Il y a peu d'information sur d'éventuels stocks de platinoïdes mis en place par d'autres états. Ces métaux ne font pas partie des neuf métaux stratégiques dont le Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) maintient un stock national. Selon Risk and Policy Analysts Ltd (2012), certains spéculent sur l'existence possible de stocks en Chine, mais sans éléments concrets à l'appui. Selon cette même source, il n'y aurait pas de stocks publiés en Corée du Sud.

États-Unis

Les États-Unis avaient constitué des stocks gouvernementaux de platine, de palladium et d'iridium, qui atteignaient, en septembre 1994, 13,7 t de platine, 39,3 t de palladium et 920 kg d'iridium (tab. 34).

À partir de juillet 1999⁴¹, les États-Unis ont progressivement remis la majeure partie de ces stocks sur le marché.

Pour le platine, l'essentiel des ventes ont eu lieu entre 1999 et 2002, à un rythme de 2 à 4 t/an. Pour le palladium, elles ont eu lieu entre 1999 et 2005, avec des pics de vente à 8 à 9,7 t/an en 2000, 2001 et 2002. Pour l'iridium, en 1999 puis de 2003 à 2007, avec 100 à 220 kg vendus par an.

Les ventes ont cessé à partir de fin 2007. Les stocks gouvernementaux résiduels fin 2012 publiés par l'USGS (Loferski, janv. 2013) étaient de 261 kg Pt, 18 kg Ir, et 0 kg Pd, identiques à ceux de fin 2007.

	stock au 30/09/1995	stock au 30/09/2012	Principales années de déstockage
Platine	13 700 kg	261 kg	1999 à 2002
Palladium	39 300 kg	0 kg	1999 à 2005
Iridium	920 kg	18 kg	1999 puis 2003 à 2007

Tableau 34 - Stocks gouvernementaux étatsuniens de platinoïdes, en 1994 et 2012
(Reese, USGS, 1996, et Loferski, USGS, 2013).

Russie

L'URSS avait constitué un important stock stratégique de palladium, dont elle était le premier producteur mondial, mais aussi de platine, dans les années 1970-1980. Le niveau de production de palladium en Russie n'est en effet pas seulement dicté par la demande, mais par la production (et la demande) en nickel, dont le palladium est un sous-produit.

Après la dissolution de l'URSS en 1991, la Russie a commencé à mettre ces stocks sur le marché au fur et à mesure de ses besoins en devises. Cette période a correspondu aussi avec une forte hausse de la demande, en particulier en palladium (cf. fig. 49). Les quantités ainsi mises sur le marché chaque année étaient consolidées avec celles issues de la production minière jusqu'en 2004. Ce n'est qu'à partir de 2005, et l'autorisation pour les sociétés minières de publier leur production, que les quantités de palladium issues du déstockage ont pu être individualisées, et sont publiées annuellement par Johnson Matthey (tab. 35).

Les niveaux des stocks russes de platine et de palladium restent secrets. D'après Risk and Policy Analysts Ltd (2012) citant Williamson (2003), en 2003, les stocks de platine étaient pratiquement épuisés et les stocks de palladium étaient estimés entre 310 et 370 t Pd. Ils estimaient également les stocks de palladium résiduels russes à moins d'une centaine de tonnes en 2012.

⁴¹ Les États-Unis ont aussi, à partir de cette même date, déstocké d'autres métaux, comme le tungstène, par exemple.

Année	Quantité vendue
2005	46.2 t
2006	21.7 t
2007	46.3 t
2008	29.9 t
2009	29.9 t
2010	31.1 t
2011	24.1 t
2012	7.8 t
Total 2005-2012	237.0 t

Tableau 35 - Récapitulatif des ventes de palladium issues du déstockage par la Russie depuis 2005 (source : Johnson Matthey).

4.7.2. Stockages par les industriels

Les constructeurs automobiles, qui sont parmi les principaux consommateurs de platine et de palladium, en avaient constitué des stocks stratégiques de platine et de palladium. Ces stocks ne sont pas publiés, mais, selon Mining Journal (juillet 2012), les stocks de platine détenus par les seuls constructeurs européens (BMW, Volkswagen, Daimler Benz, Renault, etc.) s'élevaient, mi-2012, à une douzaine de tonnes, soit environ quatre mois de leur consommation.

C'est probablement l'une des raisons, avec la relative faiblesse du marché automobile européen, qui a maintenu des prix des platinoïdes à des niveaux relativement modérés malgré la baisse de l'approvisionnement primaire liée aux perturbations sociales en Afrique du Sud et à la baisse des compléments d'approvisionnement en palladium par le déstockage russe.

4.7.3. Stockage par les ETF

Les ETF sur le platine et le palladium lancés sur les marchés des placements financiers à partir de 2007 et sur le rhodium à partir de 2011 sont appuyés sur des masses physiques des métaux correspondants (cf. 3.1.3 pour les ETF platine, 3.2.6 pour les ETF palladium et 3.3.5 pour les ETF rhodium).

Les quantités de métaux stockés par ces ETF à fin 2012 étaient évaluées par Johnson Matthey (2013) à :

- 52 t de platine ;
- 63,4 t de palladium ;
- 1,5 t de rhodium.

4.8. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION

L'année 2012 a vu la production minière de platine chuter de 13 % par rapport à 2011, celle de palladium de 4 % et celle de rhodium de 6 %.

Ces réductions ont été largement dues à la baisse de production sud-africaine, conséquence de la série de grèves et d'actions sociales ayant affecté la plupart des opérations minières (cf. 4.6.1).

Il est estimé qu'en 2012, plus de 23 t de production de platine ont été perdues au total en Afrique du Sud en raison des grèves, des interruptions pour raison de sécurité et des fermetures de mines (Johnson Matthey, 2013).

La situation sociale des mines sud-africaines s'était apaisée fin 2012, mais reste sensible. Ainsi une nouvelle grève de 2 semaines a eu lieu dans les mines de platine d'Amplats, en Afrique du Sud, fin septembre - début octobre 2013, à l'instigation du syndicat AMCU.

Parallèlement, de nombreuses mines souterraines sud-africaines, qui assurent plus de 90 % de la production en platine de ce pays, ont été déficitaires en 2012, en raison de prix insuffisants face à des coûts d'exploitation croissants, au point que certaines mines ont été suspendues et d'autres pourraient envisager de le faire. Parallèlement, de nouveaux projets pourraient être retardés. Une hausse durable des prix que pourrait provoquer une reprise de la demande devrait permettre, à terme, de redémarrer des opérations suspendues et de redynamiser le développement des nouveaux projets (cf. tab. 22).

De son côté, Norilsk Nickel aurait annoncé un accroissement de sa production de platinoïdes de 42 % d'ici 2025 (Willis *et al.*, 2012). Mais cette annonce se place dans un contexte d'affaiblissement de la production russe, de 100,2 t en 2006 à 80,9 t en 2012 (cf. fig. 62).

Parmi les nouveaux projets, il n'en existe aucun ailleurs dans le monde susceptible de rivaliser, en importance, avec ceux du Bushveld d'Afrique du Sud ou de Norilsk-Talnakh en Russie, et qui serait donc capable de prendre un relais rapide en cas de défaillance de l'un ou l'autre de ces gisements géants. Parmi les nouveaux projets prometteurs et réalistes (pour autant que les prix en encouragent le développement), les projets de Duluth aux États-Unis, les nouveaux projets canadiens, australiens ou finlandais, ne prévoient au mieux des capacités de production de quelques tonnes de platine et/ou de palladium par an (cf. tab. 22).

Globalement, la possibilité d'accroître raisonnablement la production de platine existe, en particulier grâce au Bushveld, à condition que les prix s'affermissent. Compter sur un approvisionnement à la fois abondant et bon marché en platine semble relativement illusoire.

5. Prix des platinoïdes

5.1. ÉVOLUTION RÉCENTE DES PRIX

Le platine et le palladium (à 99,95 %) font l'objet de cotations journalières sur diverses places financières et par divers opérateurs. L'une des cotations de référence est celle du London Platinum and Palladium Market (www.lppm.com), qui établit des « fixings » deux fois par jours, en US\$ par once Troy (Tr.oz) (rappel : 1 Tr.oz = 31,10348 g). Ces prix sont repris sur le site de Kitco (www.kitco.com) avec ceux de l'or et de l'argent.

Le CME-Group (ex NYMEX, www.cme-group.com) de New-York cote aussi le rhodium.

Le métallurgiste, raffineur, chimiste et fabricant de produits intermédiaires britannique Johnson Matthey publie de son côté un « prix de base » quotidien du platine, du palladium, du rhodium, de l'iridium et du ruthénium (www.platinum.matthey.com).

Le chimiste allemand BASF, qui avait racheté l'ancien raffineur et fabricant de catalyseurs étatsunien Engelhard en 2006, publie des prix quotidiens pour les six métaux du groupe du platine (<http://apps.catalysts.basf.com/apps/eibprices/mp/>).

Le site de Metal Bulletin (www.metalbulletin.com) publie quotidiennement les prix de Johnson Matthey, d'Engelhard (BASF) et sa propre fourchette de prix pour Pt, Pd, Rh et Ru à min. 99,9 % sous le qualificatif « European Free Market, in warehouse » (marché libre européen, en entrepôt), et pour Ir à min. 99,9 % sous le qualificatif de « Metal Bulletin Free Market, in warehouse ».

L'hebdomadaire Mining Journal (www.mining-journal.com) publie les prix du platine et du palladium du LPPM, les prix de Pt, Pd, Rh, Ir, Ru de Johnson Matthey, et un prix spot de l'osmium égal à celui de BASF/Engelhard.

Metal Pages (www.metal-pages.com) publie aussi deux fois par semaine une fourchette de prix d'échanges du platine, du palladium, du rhodium et de l'iridium.

Les écarts de prix entre les différentes sources sont relativement négligeables à l'échelle de la présente étude.

Le tableau 36 fournit les moyennes annuelles récentes des prix quotidiens (prix de base Johnson Matthey) pour Pt, Pd, Rh, Ir et Ru.

La figure 72 illustre l'évolution des cotations londoniennes des prix du platine et du palladium (moyenne des fixings du matin et de l'après-midi), comparée à celle de l'or, en US\$/oz, depuis 1990.

	Pt	Pd	Rh	Ir	Ru
2002	543	340	838	294	66
2003	695	203	530	93	35
2004	849	232	985	186	65
2005	899	203	2 056	169	75
2006	1 146	323	4 557	350	192
2007	1 307	357	6 191	447	580
2008	1 585	355	6 564	450	323
2009	1 212	266	1 595	425	95
2010	1 616	530	2 453	642	197
2011	1 725	736	2 022	1 036	166
2012	1 554	646	1 276	1 070	112
2013 (1/01-30/11)	1 501	728	1 078	862	77

Tableau 36 - Prix moyens annuels du platine, du palladium, du rhodium, de l'iridium et du ruthénium, en US\$/oz (prix de base Johnson Matthey).

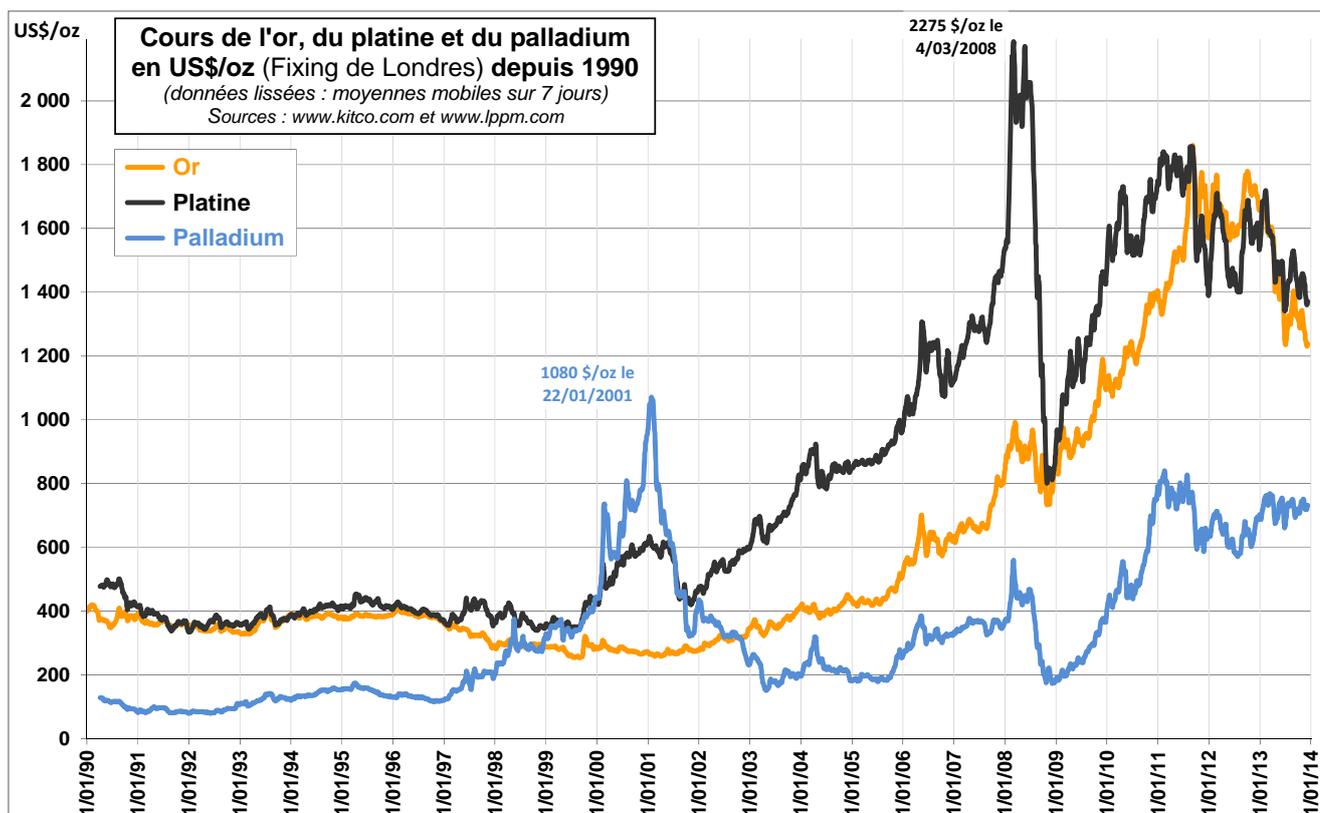


Figure 72 - Évolution des cours du platine et du palladium au fixing de Londres, comparés à ceux de l'or, depuis 1990 (source : www.kitco.com).

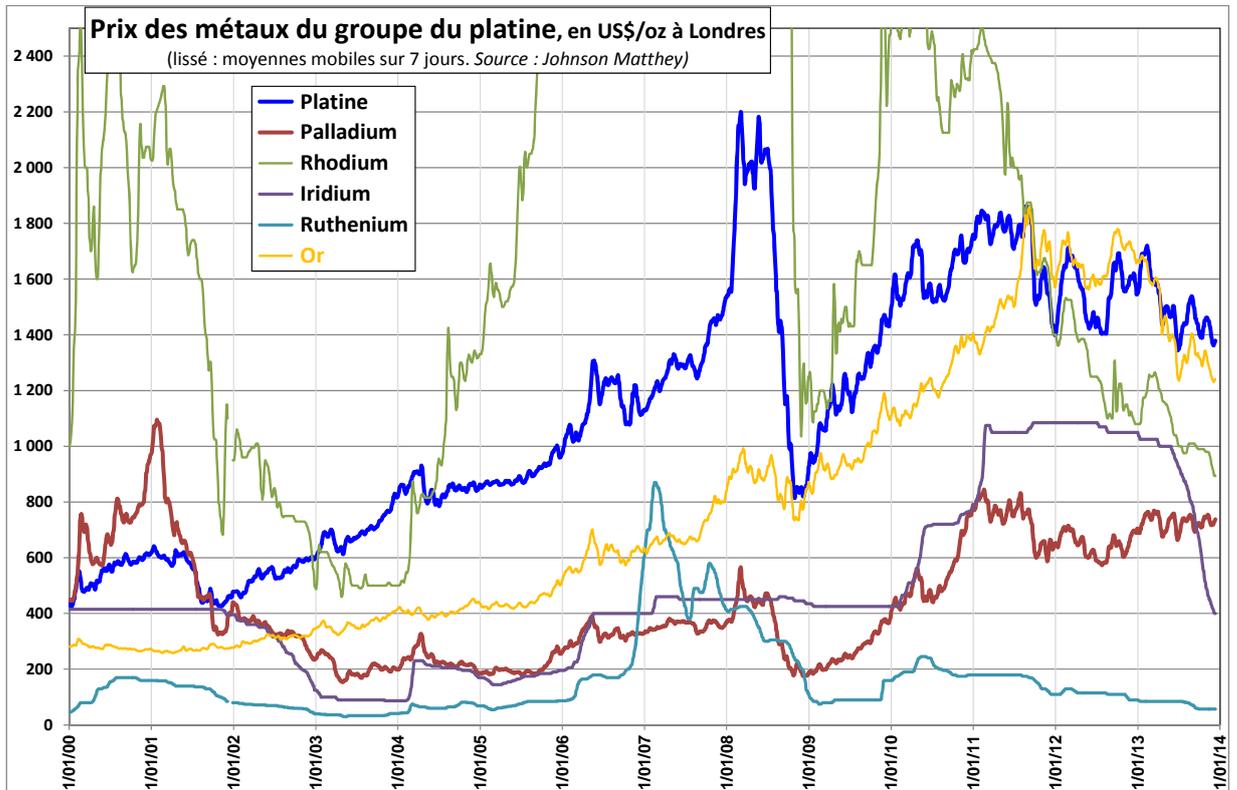
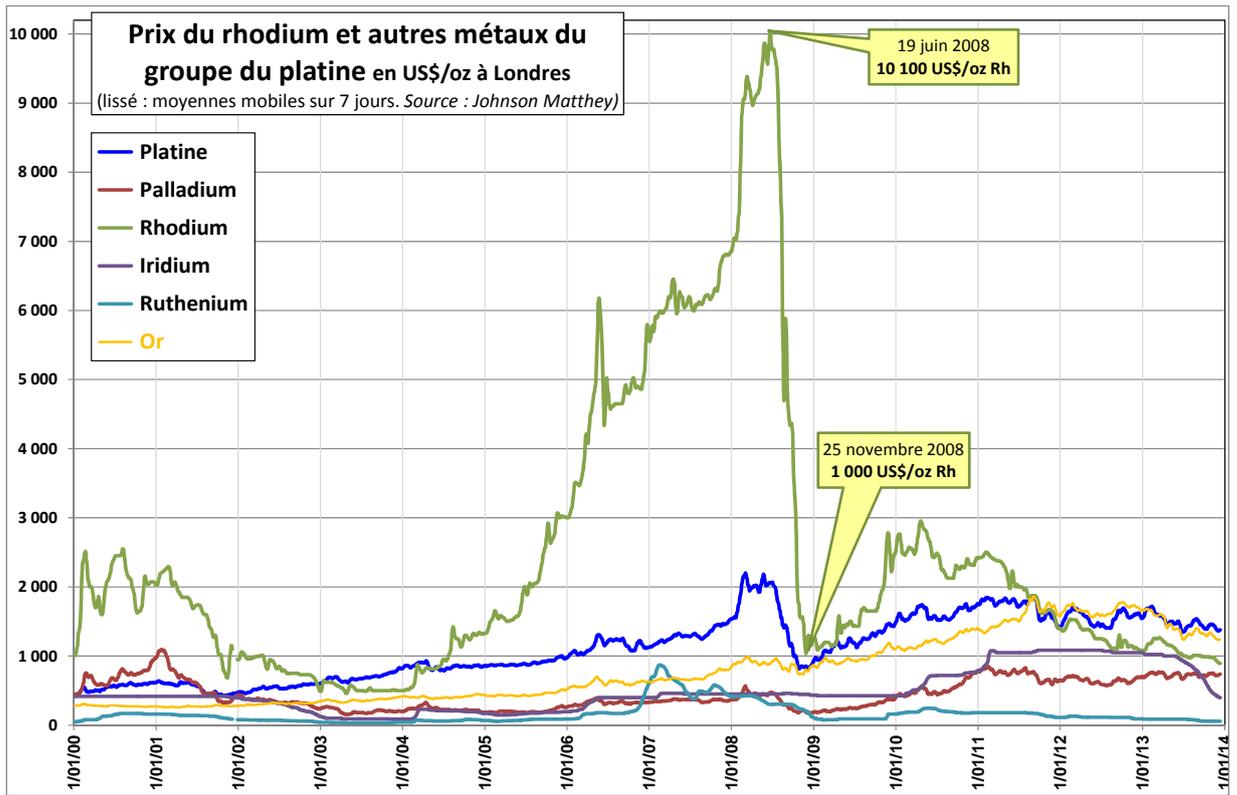


Figure 73 - Évolution des prix des platinoïdes (source : www.platinum.matthey.com).
 Échelle des ordonnées compressée en haut pour une meilleure lecture du prix du rhodium,
 échelle dilatée en bas pour une meilleure lecture des autres prix

La figure 73 illustre l'évolution des prix de base du platine, du palladium, du rhodium, de l'iridium et du ruthénium de Johnson Matthey depuis 2000, avec deux échelles différentes en ordonnées, pour permettre la lecture du prix du rhodium (diagramme supérieur) et une meilleure lecture des autres prix (diagramme inférieur).

Platine

Les prix du platine connaissent depuis 2000 une forte volatilité, alors qu'ils avaient été relativement stables autour de 400 US\$/oz au cours des années 1990. Le doublement de la demande de platine pour la catalyse automobile entre 2000 et 2007 (passée de 58,8 t en 2000 à 113,7 t en 2008, cf. fig. 8) a tiré le prix à la hausse, avec un pic à 2 275 US\$/oz atteint ponctuellement en mars 2008. Le prix a ensuite très brutalement chuté au deuxième semestre 2008, avec l'éclatement de la crise financière mondiale (crise des subprimes, faillite de Lehman Brothers), jusqu'à 760 US\$/oz fin octobre 2008. Cette chute de prix a été généralisée à toutes les matières premières minérales, pétrole compris, à l'exception notable de l'or, qui jouait alors son rôle de valeur-refuge.

Le prix du platine est ensuite remonté progressivement, avec encore nombre d'autres matières premières minérales, entre début 2009 et septembre 2011, dépassant 1 800 US\$/oz entre mi-août et mi-septembre 2011. Depuis lors, il s'est affaibli, en lien avec l'atonie du marché automobile européen, où la motorisation diesel, la plus consommatrice de platine, est largement développée. Il a largement oscillé dans la fourchette 1 400 - 1 700 US\$/oz, mais il a diminué de 1 725 US\$/oz en moyenne en 2011 à 1 554 en 2012 et 1 501 sur les 11 premiers mois de 2013. La demande a pourtant globalement crû pour la catalyse entre 2010 et 2012, alors que la production avait baissé, mais les constructeurs automobiles avaient constitué des stocks antérieurement et ont déstocké en 2012, maintenant des prix modérés malgré le déficit du marché (cf.4.7.2). L'industrie verrière avait aussi bien diminué sa demande entre 2011 et 2012, privilégiant l'utilisation de ses stocks (cf. fig. 4).

L'émergence des ETF-platine depuis 2007 a ajouté une composante spéculative au prix du platine.

Palladium

Le prix du palladium a connu une forte volatilité depuis 15 ans. Il était à moins de 200 US\$/oz jusqu'à fin 1997, et même moins de 100 US\$/oz en 1991-1992⁴². Il a ensuite monté progressivement en 1998-1999 puis très fortement en 2000 pour atteindre un pic à 1080 US\$/oz en janvier 2001. Son prix a même dépassé celui du platine entre début 2000 et mi-2001. La hausse avait été initiée par la forte croissance de l'utilisation du palladium dans les catalyseurs automobiles dans les quelques années qui ont précédé (1995-1999, cf. fig. 31), couplée à une baisse de la production russe (cf. fig. 62).

⁴² Le prix moyen du palladium sur les deux années 1991-1992 a été de 88 US\$/oz, celui du platine de 368 \$/oz, soit un rapport de 1 à 4,2.

Lorsque le prix a largement dépassé celui du platine, les constructeurs ont réagi d'une part en améliorant la technologie et en diminuant la quantité de palladium nécessaire pour chaque catalyseur, et en basculant une partie de leur demande vers le platine, avec lequel il est largement interchangeable au moins pour les motorisations essence. Ce basculement avait inversé les tendances, faisant remonter la demande en platine à partir de 2001⁴³, alors qu'elle s'était affaiblie au profit du palladium dans les années précédentes, et faisant remonter le prix du platine et rechuter le prix du palladium.

Depuis 2004, le prix du palladium a suivi une courbe relativement semblable à celle du platine, à un niveau inférieur. Les prix ont globalement augmenté, avec une chute violente mi 2008 avec la crise Lehman Brothers, une remontée progressive à partir de 2009, et une oscillation entre 600 et 750 US\$/oz depuis fin 2011. En moyenne, son prix a baissé en 2012, passant de 735 US\$/oz en 2011 à 646 US\$/oz en 2012, puis est remonté à 728 US\$/oz sur les onze premiers mois de 2013.

La poursuite de la hausse du marché automobile chinois (même si son taux de croissance est moins vif que précédemment), la reprise industrielle aux États-Unis, et la probable fin du déstockage russe, devraient continuer à tendre le marché et conduire à une nouvelle hausse du prix.

Rhodium

Le prix du rhodium a été encore plus largement volatil que ceux du platine et du palladium depuis l'an 2000 (fig. 73). Le prix de ce métal était plus du triple de celui du platine en 2000-2001 (moyenne de 2 063 US\$/oz Rh entre février 2000 et mai 2001, vs 573 US\$/oz Pt). Il a chuté ensuite sous le prix du platine en 2003 pour remonter fortement entre 2004 et 2008, pour atteindre un pic record de 10 100 US\$/oz le 19 juin 2008. Ce prix a été le record historique absolu tous métaux naturels confondus. À ce moment-là, il atteignait près de 5 fois le prix du platine (lequel était de 2 092 US\$/oz), pourtant lui-même proche de son record. Le prix du rhodium s'est ensuite écroulé brutalement au deuxième semestre 2008, à 1 000 US\$/oz seulement le 25 novembre 2010, soit un prix divisé par 10 en 5 mois⁴⁴.

Le prix du rhodium est ensuite remonté en 2009, avec les prix de la quasi-totalité des métaux, pour s'établir au-dessus de 2 500 US\$/oz au premier semestre 2010. Il est progressivement redescendu vers 959 US\$/oz en moyenne sur novembre 2013.

Iridium

Le prix de l'iridium ne fait pas l'objet d'une cotation boursière publique quotidienne. Johnson Matthey en publie quotidiennement un « prix de base », nettement plus lisse que les prix débattus en salle de marché (cf. fig. 73). Ce prix a suivi une tendance

⁴³ La remontée de la demande en platine pour la catalyse automobile au début des années 2000 est aussi liée à la croissance de la part du diesel sur le marché automobile européen à cette période.

⁴⁴ Cette vitesse de chute constitue probablement un autre record pour ce métal.

globale similaire à celle du palladium. Il est resté vers 400 US\$/oz en 2000-2001 puis entre 2006 et 2009, avec un accès de faiblesse entre ces deux périodes, où il a pu descendre jusqu'à 87 US\$/oz fin 2003-début 2004. Il est bien monté en 2010 pour s'établir entre 1 000 et 1 100 US\$/oz en 2011 et 2012, puis a rechuté à partir de juin 2013 jusqu'à 400 US\$/oz fin novembre 2013.

Ruthénium

Le « prix de base » du ruthénium publié quotidiennement par Johnson Matthey est illustré en figure 70. Le ruthénium est presque toujours resté le moins cher des platinoïdes, mis à part un pic en 2007-2008 où il a temporairement dépassé le prix du palladium et de l'iridium, dépassant même brièvement le prix de l'or en atteignant 870 US\$/oz mi-février 2007. Ce prix est redescendu à 57 US\$/oz en novembre 2013, soit une perte de 93 % de sa valeur depuis son pic de février 2007.

Le ruthénium comme l'iridium sont une « production fatale » collatérale aux productions de platine et de palladium. Ces productions-là ne sont pas commandées par la demande en ruthénium et en iridium, mais sont « imposées » par le niveau de production de platine et de palladium. Leurs prix sont donc difficilement maîtrisables par un pilotage de l'offre en fonction de la demande. Les baisses des demandes en 2012 (cf. 3.4 et 3.5) expliquent en partie la poursuite de la baisse des prix du ruthénium et de l'iridium.

Osmium

Johnson Matthey ne publie pas de prix de l'osmium. Le prix publié par BASF et le Mining Journal stagne à 400 US\$/oz.

5.2. ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION FUTURE DES PRIX

La figure 74 illustre l'évolution comparée des offres totales (production primaire + production secondaire + déstockage russe en ce qui concerne le palladium) et des demandes totales (consommation totale) du platine, du palladium et du rhodium, d'après les données publiées par Johnson Matthey.

Les marchés du platine et du palladium étaient excédentaires en 2011, pour devenir déficitaires en 2012, avec comme facteurs principaux, au niveau de l'offre, une baisse de la production minière sud-africaine consécutive aux mouvements sociaux, et une nette diminution de la vente des stocks russes de palladium, probablement due à un relatif épuisement de ces stocks.

Le marché physique du platine est passé d'un excédent de 14 t en 2011 à un déficit de près de 11,7 t de platine en 2012, le plus important déficit physique depuis 2002. Le marché du palladium est passé d'un excédent de 35,4 t en 2011 à un déficit de 33,7 t en 2012 (cf. tableau de la fig. 74).

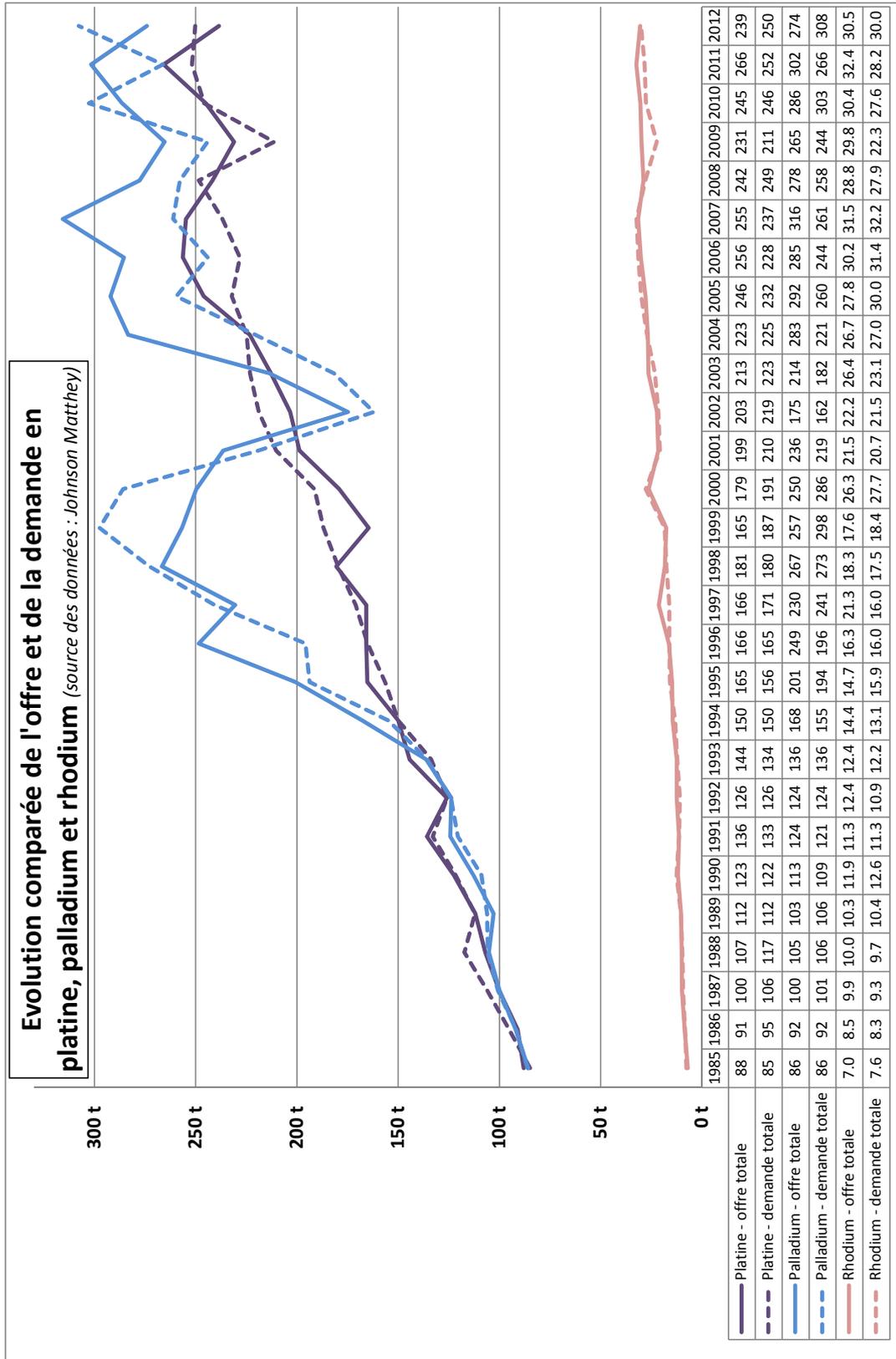


Figure 74 - Évolution récente de l'offre (production primaire + production secondaire + déstockage russe de palladium) et de la demande (consommation totale) du platine, du palladium et du rhodium depuis 1985.

Malgré cela, les prix du platine et du palladium (ainsi que ceux du rhodium) ont baissé en 2012 par rapport à 2011.

Dans la pratique, tout le métal produit une année n'est pas forcément consommé la même année. Ainsi une partie du surplus de 2011 a alimenté la consommation de 2012, en raison d'une part du temps de transit normal du métal entre sa production initiale et sa consommation finale, et d'autre part de la résorption en période de déficit des stocks tampons qui s'étaient fatalement constitués en période d'excédents.

De plus la plupart des données statistiques sont en réalité entachées de fourchettes d'incertitudes significatives. Au niveau de l'offre, la plupart des producteurs publient leur production, qui est normalement mesurée puisqu'elle fait l'objet de ventes, et devrait donc être relativement fiable. Mais certains producteurs ne la publient pas, ou pas en détail (production chinoise, production alluvionnaire russe, production canadienne de Glencore-Xstrata, par exemple, ou même production globale canadienne, puisque, si la NRCAN⁴⁵ publie la production de l'Ontario, elle ne publie pas celle du Québec ni celle du Manitoba, qualifiées de « confidentielles »). Une incertitude sur les chiffres de l'offre primaire de $\pm 10\%$ ne semble pas surestimée. Du côté de l'offre secondaire, si Johnson Matthey publie des données sur le recyclage des catalyseurs automobiles, de la bijouterie et des déchets d'appareils électriques et électroniques, les sources des données ne sont pas forcément précises et exhaustives. Ces données ont une part significative d'estimation, puisque certains grands recycleurs, même européens, ne publient pas les chiffres de leur production secondaire. De plus, Johnson Matthey omet le recyclage des usages dentaires (palladium surtout) et des catalyseurs industriels (même si l'essentiel est recyclé en boucle fermée, transparente à l'équilibre général du marché, une partie alimente peut-être le marché plus global). Au niveau de la demande, de la consommation, si les utilisateurs achètent du platine, du palladium et du rhodium, ils peuvent en tracer les quantités. Mais ils ne publient pas tous les chiffres précis de leurs achats et consommations, et une partie des statistiques ne sont que des estimations ou des extrapolations. Du côté de la consommation aussi, une incertitude sur les chiffres publiés de $\pm 10\%$ au moins ne semble pas surestimée.

Or les déficits et excédents relatifs de platine et de palladium qui ressortent des statistiques disponibles ont été de moins de $\pm 9\%$ pour le platine et moins de $\pm 12\%$ pour le palladium. Avec des imprécisions sur les chiffres de l'offre et de la demande d'au moins $\pm 10\%$ chacune, on voit que le sens et l'amplitude des excédents ou déficits annuels ne sont pas des certitudes.

Dans son analyse publiée en mai 2013, Johnson Matthey anticipait que les déficits allaient se poursuivre en 2013.

Côté offre, Johnson Matthey s'attendait, après le creux de 2012, à une faible reprise de la production minière de platine, mais limitée en raison des difficultés des producteurs miniers. Ces difficultés sont en particulier financières, en raison de la hausse de leur

⁴⁵ NRCAN = Natural resources of Canada, www.nrcan.gc.ca

coûts (main d'œuvre, énergie), non compensée par une hausse suffisante des prix de vente : de nombreuses mines tournent à perte ou à marge bénéficiaire très faible, certaines mines moyennes ont même fermé en 2012, et d'autres pourraient suivre en 2013. De plus, une reprise de mouvements de grève dans les mines sud-africaines n'est pas à exclure, risque alimenté aussi par la rivalité entre les principaux syndicats sud-africains (la National Union of Mineworkers et l'Association of Mineworkers and Construction Union). Pour le palladium, l'offre pourrait diminuer, en raison d'un déclin des ventes de stocks russes non compensé par une hausse de la production minière, qui devrait rester relativement stable.

Côté demande (cf. 3.7.2), celle en palladium devrait rester ferme avec la poursuite de la croissance du marché automobile chinois et le renforcement de ses normes antipollution, ainsi que la reprise du marché américain. Celle en platine ne devrait guère augmenter, mais pourrait être affectée à terme en négatif si la voiture électrique sur batterie (non consommatrice de platine) prenait une part significative du marché, et en positif si la voiture électrique à pile à combustible se développait de manière significative.

Côté prix, il est vraisemblable que le prix du platine, qui a encore fléchi en moyenne sur les huit premiers mois de 2013 par rapport à 2012 (tab. 36), est à un relatif plancher : des baisses supplémentaires durables conduiraient davantage de mines sud-africaines à fermer, réduisant l'offre et tendant le marché.

Les analystes de la London Bullion Marketing Association prévoyaient, en mai 2013, des prix compris entre 1 480 et 1 845 US\$/oz pour la fin de l'année (SNL-Metals Economic Group, 2013), donc une fourchette assez large.

Le prix du palladium, qui est déjà reparti à la hausse⁴⁶ en 2013 après sa baisse de 2012, pourrait poursuivre cette tendance si la hausse prévue de la demande, liée en partie à la croissance de la demande automobile chinoise, se confirme.

Les difficultés de prévisibilité des marchés peuvent être soulignées en comparant les déclarations d'Aquarius Platinum (le 5^{ème} producteur mondial de platine et de rhodium, qui fournit environ 4 % du marché) dans son rapport annuel 2012 publié en juillet 2012 : « Il est estimé qu'il y aura un excédent de production de platine d'environ 500 000 oz (~15,6 t) en 2012, avec l'inconnue permanente de la demande par les ETF⁴⁷ », au document « Platinum 2013 » publié par Johnson Matthey en mai 2013 : « le marché du platine a été déficitaire de 375 000 oz (~11,7 t) en 2012 ». Ce passage d'une prévision, à mi-année, d'excédent significatif à une réalité de déficit significatif est en grande partie due à la baisse de production consécutive aux mouvements sociaux qui ont éclaté à partir d'août 2012 dans les mines sud-africaines, et aux aléas intrinsèques de ce type de marché.

⁴⁶ En moyenne, mais avec de fortes oscillations, cf. fig. 69 et 70.

⁴⁷ La demande de platine par les ETF a finalement de 6,5 t en 2012 (cf. fig. 17).

6. La filière industrielle

6.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS MINIERES DE PLATINOÏDES

Les principales sociétés minières productrices de platinoïdes sont listées dans le tableau 21 (cf. 4.2.2) et la figure 59 (cf. 4.3.1).

L'Afrique du Sud et la Russie assurant à elles deux 79 à 92 % de la production minière de platinoïdes, les principaux producteurs sont les sociétés qui opèrent dans ces pays.

6.1.1. Sociétés opérant principalement en Afrique du Sud et au Zimbabwe

Cinq sociétés se partagent la majeure partie de la production sud-africaine, Amplats, Implats, Lonmin, Aquarius et Northam. Plusieurs autres sociétés exploitent une ou deux mines moyennes ou modestes ou détiennent des participations minoritaires dans les grosses exploitations. Les autorités sud-africaines demandent aux sociétés historiques ou multinationales d'ouvrir leur capital à des sociétés contrôlées par la communauté Noire et constituées à cet effet, à travers le « Black Economic Empowerment » (BEE). Il s'est donc créé de nombreuses sociétés BEE qui ont pris des participations, souvent de 7,5 à 18 %, dans diverses opérations, et la tendance se poursuit avec des négociations pour de telles participations dans les opérations encore contrôlées à 100 % par les sociétés classiques. Ces sociétés ont souvent une forte participation des communautés locales. Parmi les sociétés BEE, plusieurs sont relativement passives, mais quelques-unes ont connu un bon développement, comme Royal Bakofeng Platinum, qui contrôle l'une des mines importantes du Bushveld, celle de Bakofeng-Rasimone, qui produit plus de 8 t de platinoïdes par an, ou encore Atlatsa Resources, qui contrôle la mine de Bokoni (3 t/an EGP).

Les sociétés impliquées dans l'exploitation du platine apparaissent dans les tableaux 21 et 22, seules les plus importantes d'entre elles sont reprises ci-dessous.

Anglo American Platinum Ltd, abrégée en « **Amplats** » (www.angloplatinum.com) est une société sud-africaine basée à Johannesburg et cotée à la bourse de Johannesburg (JSE:AMS). Elle est détenue à 80 % par la société minière major diversifiée Anglo American (www.angloamerican.com), basée à Londres. Amplats est le plus gros producteur minier mondial de platine (32,5 % de la production mondiale en 2012) et de rhodium (33,9 %), et le deuxième plus gros producteur mondial de palladium (17,6 %) (cf. fig. 59).

Elle extrait, traite, raffine et commercialise l'ensemble des métaux du groupe du platine, Pt, Pd, Rh, Ru, Ir et Os, ainsi que, en sous-produits, du nickel, du cuivre, du cobalt et de l'or qui contribuent de manière significative à ses revenus.

Amplats exploite plusieurs mines de platine dans les Merensky, UG2 et Platreef du complexe du Bushveld en Afrique du Sud. Elle exploite les cinq mines souterraines de Khomanani, Bathopele, Siphumelele, Thembelani and Khuseleka, regroupées dans la

« Rustenburg Section », les deux mines souterraines de Tumela et Dishaba, regroupées dans l'« Amandelbult Section », la mine de Twickenham, et la mine à ciel ouvert de Mogalakwena, en Afrique du Sud, ainsi que de la nouvelle mine d'Unki, au Zimbabwe, qui a commencé à produire en 2011. Amplats détient aussi une participation majoritaire (85 %) dans les deux mines de Union, en Afrique du Sud. Amplats détient aussi 50 % des mines de Modikwa, Mototolo, Kroondal et Marikana⁴⁸, et des parts minoritaires dans les mines de Bakofeng-Rasimone (et son projet d'extension Styldrift), de Bokoni, et de Pandora. Amplats détient aussi à 100 % une opération de retraitement de tailings (« Western Limb retreatment Plant »), près de Rustenburg (cf. tab. 21).

Ses productions sont concentrées, fondues et raffinées dans ses installations métallurgiques de Rustenburg (trois fonderies, une raffinerie de métaux de base et une raffinerie de métaux précieux).

Impala Platinum Holdings Ltd, abrégée en « **Implats** » (www.implats.co.za), est une société sud-africaine basée à Johannesburg et cotée à la bourse de Johannesburg (JSE:IMP) et secondairement à celle de Londres. Implats est le deuxième plus gros producteur minier mondial de platine (19,2 % de la production mondiale en 2012) et de rhodium (19,4 %), et le troisième plus gros producteur mondial de palladium (10,6 %) (cf. fig. 59).

Implats exploite plusieurs mines de platine dans le complexe du Bushveld en Afrique du Sud et dans le Grand Dyke du Zimbabwe. Elle détient 100 % de la mine d'Impala, 73 % de la mine de Marula et 45 % de la mine de Two Rivers, en Afrique du Sud, 86,9 % de la mine de Zimplats / Makwiro et 50 % de celle de Mimosa au Zimbabwe.

Ses productions sont fondues et raffinées dans son installation métallurgique d'Impala, qui traite aussi des concentrés et mattes venant d'autres sociétés. La raffinerie d'Impala produit du platine, du palladium, du rhodium et du nickel. La production des autres métaux (autres EGP, or, cuivre ?) n'est pas détaillée dans les rapports annuels de la société et sont regroupés dans « autres », qui ont représenté 12 % de ses recettes en 2012.

Lonmin Plc (www.lonmin.com) est une société britannique dont le siège social est à Londres et le siège opérationnel à Johannesburg, et cotée aux bourses de Londres (LSE) et de Johannesburg (JSE). Lonmin est le 4^{ème} producteur minier mondial de platine et de rhodium et le quatrième de palladium (cf. fig. 59).

Elle extrait, traite, raffine et commercialise des métaux du groupe du platine (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru), mais aussi Ni, Cu, et Au. Elle extrait aussi du chrome (1,2 Mt en 2012, sous forme de concentré de chromite).

⁴⁸ Il y a deux exploitations distinctes à Marikana et portant ce nom, la principale, détenue à 82 % par Lonmin et 18 % par Incwala et qui produit plus de 30 t/an d'EGP (cf. tab. 20), et l'autre bien plus petite, détenue par une JV 50-50 Amplats et Aquarius, à laquelle il est fait référence ici, qui produisait encore 2,6 t d'EGP en 2011 et a été mise en « care and maintenance » en juin 2012.

Lonmin détient, en Afrique du Sud, 82 % de la mine de Marikana⁴⁹, 82 % de la petite mine de Limpopo, dont la production est suspendue depuis 2010, et 34,85 % de la mine de Pandora à travers sa filiale à 82 % Eastern Platinum⁵⁰ (Afrique du Sud). Elle détient aussi 74 % du projet d'Akanani, dans le Northern Limb du Bushveld (Platreef), en phase de préfaisabilité. Ses productions sont fondues et raffinées à Marikana. Lonmin participe à des joint-ventures avec Vale d'une part et avec Walbridge Mining Company d'autre part sur des projets d'exploration à Sudbury (Canada).

Aquarius Platinum Ltd (<http://aquariusplatinum.com>) est une société enregistrée aux Bermudes et listée à la bourse australienne (ASX:AQP.AX), à la bourse de Londres (LES:AQP.L) et à celle de Johannesburg (JSE:AQP.ZA).

Mis à part la modeste mine de platine d'Everest, en Afrique du Sud, qu'elle détient à 100 %, Aquarius est présent surtout dans des partenariats 50-50 sur plusieurs mines sud-africaines (Kroondal et Marikana avec Amplats, Blue Ridge avec Imbani, Platinum Mile avec Mvelaphanda) et sur la mine de Mimosa, au Zimbabwe, avec Implats. Elle détient aussi 50 % de l'opération de retraitement des tailings de chromite de Kroondal (Chromite Tailings Retreatment Project, CTRP) avec Sylvania et Ivanplats. En raison de la faiblesse des prix du platine et des hausses de coûts en 2012, plusieurs de ces exploitations ont été suspendues et mises en « care and maintenance » au cours de l'année 2012 (Everest, CTRP, Marikana) ou même en 2011 (Blue Ridge). L'essentiel de la production attribuable d'Aquarius provient désormais de Kroondal et de Mimosa.

Ses productions attribuables en ont fait en 2012 le 5^{ème} producteur minier mondial de platine et de rhodium et le 6^{ème} de palladium (cf. fig. 59).

Aquarius détient ou participe aussi à plusieurs projets en phase d'exploration ou de développement en Afrique du Sud (cf. tab. 22).

Northam Platinum Ltd (www.northam.co.za) est une société sud-africaine basée à Johannesburg et cotée à la bourse de Johannesburg (JSE:NHM). Elle exploite la mine de platine de Zondereinde, qu'elle détient à 100 %, et vient de démarrer en 2013, en préproduction, la nouvelle mine de Booyendal, qui devrait arriver à une production d'environ 5 t d'EGP en 2015. Northam détient aussi 7,5 % de la mine de Pandora et 50 % du projet Dwaalkop.

Northam opère une fonderie à Zondereinde et vend un concentré de métaux contenant Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Au, Ni et Cu. Le raffinage des métaux précieux est confié à Heraeus (cf. 6.2.1).

African Rainbow Minerals (www.arm.co.za) est une société de participations minières diversifiées sud-africaine basée à Sandton (Johannesburg) et cotée à la bourse de

⁴⁹ Cf. note n° 48.

⁵⁰ Il y a deux sociétés Eastern Platinum, l'une sud-africaine et filiale à 82 % de Lonmin, dont les activités et résultats sont consolidés dans les rapports annuels et les comptes de Lonmin, et l'autre canadienne, cotée à la bourse de Toronto, qui exploite la mine de platine de Crocodile River, en Afrique du Sud.

Johannesburg (JSE:ARI). Elle détient des parts dans des exploitations de platine, de minerai de fer, de charbon, de manganèse, de cuivre et de nickel. Sa branche platine détient 41,5 % de la mine de Modikwa et 55 % du projet de Two Rivers, dans le Bushveld, ainsi que 50 % de la mine de nickel de Nkomati (en partenariat avec Norilsk Nickel qui détient aussi 50 %), qui produit aussi un peu de palladium et de platine en sous-produits. ARM détient aussi la majorité du nouveau projet platine de Kalplats, dans le Bushveld (faisabilité achevée, construction envisagée).

Royal Bakofeng Platinum (www.bakofengplatinum.co.za) est une société sud-africaine basée à Fourways, dans la banlieue nord de Johannesburg, et détenue par les Noirs. Elle est listée à la bourse de Johannesburg (JSE:RBP). Elle exploite la mine de platine Bakofeng-Rasimone (« BRPM », Bakofeng Rasimone Platinum Mine) dont elle détient 67 % (les 33 % restant étant détenus par Amplats) et qui produit plus de 5 t/an d'EGP. Elle développe aussi le projet de Styltdrift, en extension Nord de BRPM. Royal Bakofeng vend sa production sous forme de concentrés de flottation avant fusion et raffinage. Royal Bakofeng est l'une des plus importantes sociétés minières sud-africaines de platine issues du BEE.



Figure 75 - Galerie de la mine souterraine de Bakofeng-Rasimone au niveau de l'UG2 reef.
(© www.bakofengplatinum.co.za).

Glencore-Xstrata (www.glencorexstrata.com) est une société major basée à Zug (Suisse), désormais listée sur les bourses de Londres (LES:GLEN) et Hong-Kong (HKEx). Elle est présente sur tous les continents dans la production et le courtage de matières premières, aussi bien minérales (métaux et minéraux, charbon, pétrole) qu'agricoles (céréales, oléagineux, coton, sucre). Dans le secteur des métaux et

minéraux, Glencore-Xstrata produit du cuivre, du nickel, du zinc, de l'alumine et de l'aluminium, du minerai de fer, du ferrochrome et des platinoïdes, ainsi que quelques sous-produits (Au, Ag, Pb, Se, Te). Son implication va de la mine au recyclage à la fonderie, à la raffinerie, au stockage et à la commercialisation.

Glencore-Xstrata contrôle à 73,99 % une mine de platine en Afrique du Sud (Elandsfontein, ou Eland Platinum) qui a produit 0,96 t EGP en 2012. Elle contrôle à 100 % et 70 % respectivement deux extensions de cette même mine (Zilkaatsnek et Schietfontein). Elle détient par ailleurs 37 % de la mine de Mototolo, toujours en Afrique du Sud, qui a produit 6,74 t EGP en 2012. Compte tenu de ses accords de partenariat, Glencore-Xstrata affiche une production attribuable de 4,3 t EGP en 2012⁵¹.

Au Canada, Glencore-Xstrata détient à 100 % et exploite les mines de nickel-cuivre de Fraser et Nickel Rim South dans le district de Sudbury (Ontario) et la mine de nickel-cuivre de Raglan, au Québec, ainsi qu'une fonderie de nickel à Sudbury. Elle opère aussi la fonderie de cuivre de Horne, à Rouyn-Noranda (Québec), qui traite des concentrés mais aussi des scraps, et la raffinerie de cuivre CCR (Canadian Copper Refinery) à Montréal (Québec).

L'éventuelle production minière d'EGP en sous-produits des mines de nickel-cuivre n'est pas publiée. Seule la production de platinoïdes de la raffinerie de CCR est publiée par Xstrata Copper Canada (1,14 t Pt+Pd et 0,7 t Rh en 2012), mais une partie provient de concentrés tiers et une autre du recyclage.

Sylvania Platinum Ltd (www.sylvaniaplatinum.com), basée aux Bermudes et listée à l'AIM de la bourse de Londres, est surtout active dans les retraitements de tailings.

Eastern Platinum Ltd (« Eastplats »)⁵² (www.eastplats.com), basée à Toronto et cotée aux bourses de Toronto, de Londres (AIM) et de Johannesburg, exploite la mine de Crocodile River dans le Western Limb du Bushveld. Elle détient le projet de Kennedys' Vale et des participations importantes dans les projets de Maresburg et Spitzkop, dans l'Eastern Limb.

Platinum Australia (www.platinumaus.com.au), basée à Perth (Australie-Occidentale) et cotée à la bourse australienne (ASX:PLA), exploite la mine de Smokey Hills, en Afrique du Sud, dont elle détient 69,8 %, et contribue au projet de Kalplats.

Platinum Group Metals Ltd (www.platinumgroupmetals.net), basée à Vancouver (Colombie-Britannique, Canada) et cotée aux bourses de New-York (AMEX: PLG) et de Toronto (TSX: PTM), explore et évalue, en partenariat avec le Jogmec japonais (www.jogmec.go.jp/english/) le nouveau gisement de Waterberg, qu'elle a découvert en 2011 et qui se situe bien au nord de la limite précédemment connue du Northern Limb. Platinum Group Metal a annoncé début septembre 2013 une mise à jour des ressources totales à Waterberg, désormais évaluées à 167 Mt @ 3,26 g/t (Pt+Pd+Au).

⁵¹ Soit 100 % de la production d'Elandsfontein et 50 % de celle de Mototolo.

⁵² Cf. note n° 50.

Platinum Group Metal développe aussi le projet de mine de platine « Western Bushveld JV », détenu à 74 % en partenariat avec Wesiswe Platinum (<http://wesiswe.co.za>, 26 %), qui inclut le projet anciennement dénommé Elandsfontein⁵³. Ce projet est en phase de construction et devrait entrer en production en 2015, avec une capacité prévue de 4,8 t EGP.

Atlatsa Resources Corp. (www.atlatsaresources.co.za) est une société sud-africaine cotée aux bourses de Toronto (TSX-V:ATL), Johannesburg (JSE) et New-York (NYSE-AMEX: ATL). Elle est détenue à 62 % par la société BEE Atlatsa Holdings. Elle détient 51 % de la mine de platine de Bokoni, exploitée en partenariat avec Amplats, et 51 % des projets de Ga-Phasha, Boikgantsho et Kwanda.

Il existe d'autres sociétés impliquées dans l'exploitation ou le développement minier de platine en Afrique du Sud, dont la major Norilsk Nickel (cf. 6.1.2), et plusieurs autres sociétés de moindre taille (cf. tab. 21 et 22).

6.1.2. Sociétés opérant principalement en Russie

MMC Norilsk Nickel (www.nornik.ru/en/), société russe dont le siège est à Moscou, est le plus gros producteur mondial de nickel (300 kt Ni en 2012) et de palladium (84,9 t Pd en 2012). C'est aussi le 3^{ème} producteur mondial de platine (21,2 t Pt en 2012) et de rhodium, et un important producteur de cuivre, cobalt, iridium et ruthénium. Elle produit accessoirement de l'or, de l'argent, du sélénium et du tellure.

Norilsk prospecte, explore, extrait, traite, raffine et commercialise ses productions (métaux de base, métaux précieux, etc.).

Norilsk détient des actifs en Russie, en Australie, au Botswana, en Finlande et en Afrique du Sud.

Les unités de production russes sont regroupées en deux divisions intégrées, la « Polar Division », qui exploite les mines de nickel-cuivre-platinoïdes des gisements de Norilsk et Talnakh, dans la péninsule de Taïmyr (Kraï de Krasnoïarsk), avec les unités de traitement métallurgiques sur place, et la « Kola Division », qui exploite les mines de nickel-cuivre, moins riches en platinoïdes, de la Péninsule de Kola, dans la région de Mourmansk

Norilsk exploite aussi du nickel en Australie-Occidentale (mine active de nickel sulfuré de Lake Johnston, et mines suspendues de nickel latéritique de Cawse et de nickel sulfuré de Black Swan et de Waterloo). L'éventuelle production de palladium associée n'est pas précisée.

Norilsk détient 85 % de la Tati Nickel Mining Company, qui exploite la mine de nickel sulfuré de Phoenix, qui a produit 2,6 t Pd et 0,4 t Pt en sous-produits en 2012. Il détient

⁵³ Elandsfontein est aussi le nom donné à une mine voisine en exploitation, contrôlée à 73,99 % par Glencore-Xstrata.

aussi 85 % du projet de nickel sulfuré à platinoïdes de Selkirk qui se propose d'exploiter à ciel ouvert les minéralisations disséminées autour de l'ancienne mine souterraine de Selkirk exploitée de 1989 à 2002.



Figure 76 - La structure circulaire du massif ultrabasique zoné de Kondyor (Khabarovsk, Russie) et l'exploitation de platine alluvionnaire en aval.
(image ASTER NASA : <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=8773>).

Enfin, Norilsk détient 50 % d'intérêt dans la mine de nickel sulfuré de Nkomati, en Afrique du Sud, en JV avec African Rainbow Minerals. Cette mine a produit 2 t Pd et 0,75 t Pt en 2012, en sous-produit du nickel. C'est l'un des deux seuls producteurs de platinoïdes en Afrique du Sud en dehors du Bushveld.

Norilsk détient aussi la fonderie-raffinerie de Harjavalta, en Finlande, qui traite divers les concentrés et semi-produits du groupe, dont par exemple les concentrés de nickel de Nkomati. Harjavalta a produit 45,5 kt Ni en 2012, 1 kt Cu, mais aussi 650 kg Pd et 280 kg Pt.

Compte tenu de la faiblesse du prix du nickel et de la relative faiblesse du prix du platine, Norilsk Nickel a annoncé mi-2013 chercher à céder ses actifs africains et australiens⁵⁴.

⁵⁴ En septembre 2013, ces cessions ne sont pas encore réalisées mais le partenaire de Norilsk dans la mine de nickel de Nkomati, en Afrique du Sud, African Rainbow Minerals, s'est déclaré éventuellement intéressé par un rachat des parts de Norilsk.

Russian Platinum (www.russian-platinum.ru) est une société russe qui a son siège à Moscou. Elle exploite, par sa filiale Artel Starateley Amur, la mine de platine en placer de Kondyor (Konder), dans le Kraï de Khabarovsk, dans l'extrême orient russe (3,77 t Pt en 2012). Elle développe par ailleurs le projet minier de cuivre, nickel et platinoïdes de Chernogorskoye, une quinzaine de kilomètres au sud de Norilsk (Kraï de Krasnoïarsk), dont elle prévoit démarrer la production en 2015.

6.1.3. Sociétés opérant principalement en Amérique du Nord

Stillwater Mining Company (www.stillwatermining.com) est une société minière étatsunienne basée à Billings, dans le Montana, et cotée à la bourse de New-York (NYSE:SWC). Elle exploite les mines de palladium, platine, nickel et cuivre de Stillwater (depuis 1987) et d'East Boulder (depuis 2002), distantes d'une vingtaine de kilomètres, dans le sud du Montana. Les minerais sont concentrés sur chaque mine par flottation, puis fondus en matte à Stillwater, d'où sont extraits et raffinés le cuivre et le nickel, et où est produite une matte à platinoïdes vendue pour raffinage. Elle explore les projets de Blitz et Graham Creek au voisinage de ces deux mines, ainsi que le projet de Marathon, en Ontario (Canada).

North American Palladium (www.napalladium.com) est une société minière canadienne basée à Toronto et cotée aux bourses de Toronto (TSX:PAL) et de New-York. Elle exploite la mine de palladium du Lac des Iles (Ontario) depuis 1993, d'abord à ciel ouvert, puis en souterrain depuis 2006. Elle a produit 5 t de palladium en 2012 et prévoit augmenter sa capacité à plus de 7 t/an Pd. Ses sous-produits sont le platine (0,35 t Pt en 2012), l'or (0,35 t Au en 2012), le cuivre (1 176 t en 2012) et le nickel (611 t).

Vale (www.vale.com) est une société minière major diversifiée brésilienne, qui s'est impliquée dans le nickel, et les platinoïdes associés, lorsqu'elle a absorbé la société canadienne Inco en 2006.

En 2012, elle exploitait, à travers sa filiale canadienne Vale Canada Ltd, les huit mines de cuivre-nickel de Coleman, Copper Cliff N., Creighton, Stobie (/Frood), Garson, Ellen, Totten et Gertrude, dans le district de Sudbury en Ontario (« Vale Ontario Operations »), avec cobalt, platinoïdes et or en sous-produits. Vale exploite aussi les mines de nickel-cuivre de Thompson et Birchtree, dans le Manitoba et de Voisey's Bay dans le Labrador, mais pour lesquelles elle déclare du cobalt en sous-produit, mais ne déclare pas de platinoïdes.

Vale opère des fonderies de nickel et de blister de cuivre à Copper Cliff (Sudbury, Ontario) et Thompson (qui traite aussi les concentrés de Voisey's Bay), une raffinerie à Port Colborne (Ontario), qui produit du cobalt et un concentré d'EGP raffiné ensuite dans sa raffinerie d'Acton, en Angleterre. Vale opère aussi une raffinerie de nickel à Clydach, au Pays de Galles.

Vale publie une production de platine et de palladium globale pour ses opérations de Sudbury (Vale Ontario Division), qui était de 4,17 t Pt et 7,81 t Pd en 2012.

KGHM International (www.quadrafnx.com) est une filiale canadienne à 100 % de la société polonaise KGHM Polska Miedz (cf. 6.1.4), issue du rachat de la société canadienne Quadra-FNX, finalisé début 2012. Elle exploite entre autres les mines de cuivre-nickel de Morrison (Levack), McCreedy-West et Podolski, dans le district de Sudbury (Ontario, Canada), avec cobalt, platinoïdes et or en sous-produits.

Les concentrés de cuivre sont livrés à Vale et ceux de nickel à Glencore-Xstrata.

La production minière de KGHM International a été de 0,93 t Pd et 0,54 t Pt en 2012, en baisse de 19 % et de 29 % respectivement par rapport à 2011. KGHM-I prévoit de fermer la mine de Podolski en 2013 pour cause d'épuisement.

6.1.4. Sociétés opérant en Europe

First Quantum Minerals Ltd (www.first-quantum.com) est une société canadienne basée à Toronto (Ontario, Canada) et cotée aux bourses de Toronto (TSX:FM) et de Londres (LSE:FQM). C'est un producteur minier significatif de cuivre (307 kt en 2012) et de nickel (37 kt en 2012), qui produit désormais des platinoïdes à partir de sa mine de nickel-cuivre de Kevitsa, en Finlande, ouverte en 2012. Sur l'année 2012, la production de Kevitsa a été de 0,43 t Pt et 0,38 t Pd. C'est le plus gros producteur de platinoïdes dans l'Union Européenne.

KGHM Polska Miedz (www.kghm.pl) est une société minière polonaise, listée à la bourse de Varsovie, qui exploite entre autres les mines de cuivre et argent du Kupferschiefer polonais (mines de Lubin, Rudna, Polkowice-Sierszowice et leurs projets satellites), avec Mo, Ni, Co, Pt, Pd, Re et Se en sous-produits. Les concentrés sont traités, avec des scraps, dans les trois fonderies-raffineries de Legnica, Glogow-I et Glogow-II.

La production de platinoïdes est relativement modeste : en 2011, 47 kg de palladium et 31 kg de platine ont été produits, à comparer avec une production de cuivre raffiné de 571 kt.

KGHM produit aussi des platinoïdes au Canada à travers sa filiale à 100 % KGHM International (cf. 6.1.3).

La société suédoise **Boliden** (www.boliden.com) exploite les mines polymétalliques à cuivre d'Aitik, Garpenberg, Boliden (Suède), Los Frailes (Espagne) et la mine de plomb-zinc de Tara (Irlande), la fonderie et raffinerie de Rönnskar (Suède), la fonderie de Harjavalta et la raffinerie voisine de Pori (Finlande), et les fonderies de zinc d'Odda (Norvège) et Kokkola (Finlande) et de plomb de Bergaöe (Suède). Elle extrait un concentré de platine et de palladium, ainsi que d'autres sous-produits, à partir des boues anodiques de raffinage de cuivre à Rönnskar et à Pori, mais ne publie pas sa production.

La société canadienne **Lundin Mining** (www.lundinmining.com, TSX:LUN) exploite la mine de cuivre-nickel d'Aguablanca, en Espagne. Elle exporte directement son concentré, et ne publie pas d'informations sur son éventuel contenu en platinoïdes.

La société serbe **RTP Bor** (<http://rtb.rs>) qui exploite les gisements polymétalliques de Bor (Serbie) produit un peu de palladium et de platine mais ne publie pas ses chiffres de production. Le BGS en estime sa production de palladium à 25 t en 2011.

6.1.5. Producteurs chinois

Le groupe chinois **Jinchuan Group Co Ltd** (www.jnmc.com) est le plus gros producteur chinois de nickel, de cobalt et de platinoïdes et le 3^{ème} plus gros producteur chinois de cuivre. Il est impliqué dans l'extraction minière, la métallurgie, le raffinage, la fabrication de produits chimiques et de semi-produits. Il exploite entre autres la mine de cuivre-nickel-cobalt sulfuré de Jinchuan (Gansu) et détient des participations dans diverses autres opérations.

Jinchuan produit du cuivre (400 kt/an), du nickel (150 kt/an) et du cobalt, avec de l'or, de l'argent, du platine, du palladium et du sélénium en sous-produits. Jinchuan ne publie pas sa production mais seulement sa capacité, donnée à 3,5 t/an EGP, incluant Pt, Pd, Rh, Ru, Ir et Os. En aval, elle produit et commercialise aussi divers composés de platinoïdes : acétate et chlorure de palladium, chloroplatinate de potassium, etc.

Jinchuan détient aussi des intérêts à l'étranger. Elle détient 45 % de la société sud-africaine Wesiswe (<http://wesiswe.com>), qui contrôle le projet de mine de platine de Bakubung et détient des participations minoritaires dans les projets de Western Bushveld et War Springs. Jinchuan détient aussi la mine de nickel-cuivre de Munal, en Zambie, avec palladium et platine en sous-produits, héritée de la société australienne Albidon après son absorption en mai 2013. Cette mine a été arrêtée en novembre 2011.

Les groupes chinois **Yunnan Geology and Mineral Resources Co Ltd** et **Yunnan Copper Industry** (détenu à 49 % par Chinalco) produisent aussi du platine et du palladium à partir d'exploitations au Yunnan, mais ne publient pas les quantités produites.

6.2. LES PRINCIPAUX RAFFINEURS, TRANSFORMATEURS, FABRICANTS DE PRODUITS INTERMÉDIAIRES, RECYCLEURS ET NEGOCIANTS DE PLATINOÏDES

Les quelques plus gros producteurs miniers de platinoïdes (Amplats, Implats, Lonmin, Norilsk) séparent et raffinent eux-mêmes tout ou partie de leur production. Les autres livrent en général des concentrés ou des mattes de platinoïdes à des métallurgistes-raffineurs spécialisés. Ces dernières sociétés sont souvent présentes aussi dans le recyclage ainsi que la fabrication de composés, semi-produits, catalyseurs, et lingots de métaux purifiés (Johnson Matthey, Heraeus, BASF, Umicore). Une classification de ces sociétés par continents ou pays n'est pas forcément pertinente dans la mesure où nombre d'entre elles sont multinationales avec des branches dans de nombreux pays.

La liste de sociétés passées en revue ci-après ne prétend aucunement être exhaustive. Un inventaire exhaustif de toutes les sociétés impliquées dans les platinoïdes dépasserait les moyens et le temps consacrés à la présente étude.

6.2.1. Les principaux fondeurs-raffineurs

Sociétés basées au Royaume-Uni

Johnson Matthey Plc (www.matthey.com), est une société chimique et métallurgique britannique basée à Londres et spécialisée en particulier dans les platinoïdes, les composés de platinoïdes et les catalyseurs. Historiquement, c'est l'un des premiers métallurgistes à avoir séparé et commercialisé les platinoïdes (1838, cf. 2.2).

Ses principales activités sont :

- la fabrication de catalyseurs automobiles, de catalyseurs pour les gros moteurs diesel, et pour les systèmes de limitation de pollution ;
- la fourniture de catalyseurs et composants pour les piles à combustible ;
- la fourniture de catalyseurs et de technologies pour les procédés chimiques ;
- la production de produits chimiques fins, de catalyseurs chimiques et d'ingrédients pharmaceutiques ;
- le raffinage, la fabrication et le négoce de métaux précieux.

Johnson Matthey a des filiales dans de nombreux pays, en Europe (Belgique, France, Allemagne, Pays-Bas, Suisse, Suède, Macédoine), en Amérique (États-Unis, Canada, Mexique, Argentine, Bermudes), Asie (Chine, Inde, Japon, Corée du Sud, Malaisie), Australie et Afrique du Sud.

Par ailleurs, Johnson Matthey suit en détail le marché des platinoïdes, en publie quotidiennement les prix et en publie au moins annuellement des statistiques de production primaire, de production secondaire et de consommation et des analyses de marché (www.platinum.matthey.com) qui servent de référence pour de nombreux analystes tiers⁵⁵. Elle publie aussi en ligne une revue mensuelle, « Platinum Today », récapitulant les publications scientifiques concernant les derniers développements des platinoïdes avec un résumé et les liens vers les articles originaux.

Sociétés basées en Allemagne

Heraeus Precious Metals GmbH & Co (www.heraeus-precious-metals.com) est une société allemande basée à Hanau (Hesse, Allemagne) spécialisée dans les métaux précieux et leurs technologies. C'est une branche du groupe Heraeus (www.heraeus.com), présent aussi dans les appareillages et sondes médicales, les polymères conducteurs, le photovoltaïque, les pigments, etc. Elle a été fondée en 1856. Heraeus Precious Metals traite, raffine et recycle les platinoïdes, l'or et l'argent ainsi que d'autres métaux de spécialité. Elle couvre toutes les étapes de production métallurgique, du raffinage et du recyclage des métaux précieux. Elle fabrique des

⁵⁵ Johnson Matthey ne publie cependant pas de statistiques sur le raffinage et donc sur sa propre production et sa propre part de marché dans son domaine.

catalyseurs pour les industries chimiques, l'automobile, les moteurs diesel industriels etc., et des produits chimiques et ingrédients pharmaceutiques. Heraeus produit aussi des lingots et barres de platine et de palladium à 99,95 % (ainsi que d'or et d'argent) pour les investissements et la thésaurisation. Elle fournit des services de gestion et de conseil sur le cycle de ces métaux.

Heraeus a des unités de traitement et recyclage des métaux précieux en Allemagne, Suisse, États-Unis, Afrique du Sud, Chine et Inde.

BASF Catalysts (www.catalysts.basf.com) est la division catalyseurs, basée à Iselin (New Jersey, États-Unis), du groupe chimique allemande **BASF** (www.basf.com), issue de l'acquisition, en 2006, par BASF, de l'ancienne société étatsunienne **Engelhard** qui était spécialisée dans le raffinage et la production de platinoïdes et dans l'industrie des catalyseurs.

BASF est le plus gros groupe chimique mondial. Il est basé à Ludwigshafen (Rhénanie-Palatinat, Allemagne). Il est très diversifié dans toutes les branches de la chimie. Le groupe comprend plus de 160 filiales et possède près de 380 sites de production sur tous les continents.

BASF Catalysts se présente comme le leader mondial de la catalyse automobile et de la catalyse chimique, et numéro 3 pour la catalyse dans l'industrie pétrolière. 55 % de son chiffre d'affaires de 5,6 milliards d'Euros concerne la catalyse automobile, et 26 % la catalyse industrielle (industries chimiques, raffineries, industries pharmaceutiques). Elle intervient aussi dans la fourniture de métaux précieux, leur recyclage, et dans la fabrication de composants de batteries (cathodes, électrolytes).

BASF Catalysts a des implantations dans de nombreux pays (États-Unis, Brésil, Allemagne, Angleterre, Espagne, Pays-Bas, Italie, Suisse, Russie, Chine, Japon, Inde, Corée-du Sud, Taiwan, Thaïlande).

BASF Catalysts recycle les catalyseurs automobiles (www.converter-recycling.basf.com), avec des unités de recyclage en Angleterre (Cinderford), en Italie, aux États-Unis et en Chine.

En tant que producteur chimique, BASF est aussi utilisateur de catalyseurs pour ses procédés.

Evonik Industries AG (<http://corporate.evonik.de>) est une importante société chimique allemande basée à Essen (Rhénanie-du-Nord-Westphalie), qui intègre désormais son ancienne filiale **Degussa** qui était connue pour sa production de métaux précieux raffinés et en particulier de barres et lingots de platine et de palladium. Elle ne présente plus ces produits au catalogue.

Heimerle + Meule GmbH (www.heimerle-meule.com) est un recycleur affineur fondeur de métaux précieux (or, argent, platinoïdes) basé à Pforzheim (Bade-Wurtemberg), qui produit des métaux apprêtés pour la bijouterie, le dentaire, ainsi que des barres pour l'investissement (or, platine, palladium). Il vend aussi du rhodium, du ruthénium et de l'iridium sous forme de poudre ou d'éponge.

Cette société a absorbé en 2013 Cookson CLAL, l'ancien comptoir Lyon Alemand (cf. 6.3.3).

Sociétés basées en Belgique

Umicore (www.umicore.com et aussi www.umicore.fr) est une société belge dont le siège est à Bruxelles, cotée à l'Euronext. Umicore se présente comme le leader mondial du recyclage des métaux précieux et l'un des principaux fabricants de catalyseurs automobiles.

Umicore dispose d'implantations et de filiales dans 28 pays (Europe, Amériques, Asie-Pacifique, Afrique du Sud), dont cinq filiales en France (Umicore France SAS, Umicore Building Products France SAS, Umicore Climeta SAS, Umicore IR Glass SAS, et Umicore Autocat France SAS). Elle opère au total 74 usines dans le monde.

Sa branche **Umicore Precious Metals Refining** (www.preciousmetals.umicore.com) raffine et recycle des métaux précieux, métaux de base et métaux rares à partir d'un très large éventail de matériaux : déchets d'équipements électriques et électroniques, catalyseurs automobiles usagés, catalyseurs industrielles, des produits ou résidus de fonderies et de raffineries métallurgiques (mattes, boues anodiques, etc.), dans sa raffinerie de Hoboken, près d'Anvers, en Belgique.



Figure 77 - Monolithes usagés de catalyseurs automobiles, imprégnés de platinoïdes, pour recyclage (© Umicore, Rapport Annuel 2012).

Umicore Precious Metals Refining récupère, raffine et commercialise une large gamme de métaux : métaux précieux (Ag, Au, Pt, Pd, Rh, Ir, Ru), métaux de spécialité (In, Se, Te, Sb, Bi) et métaux de base (Cu, Pb, Ni).

Umicore fabrique aussi de nombreux autres produits et matériaux. Sa filiale autrichienne **Ögussa**, par exemple, fabrique des appareils de laboratoire en platine (creusets, etc.).

Umicore a eu un chiffre d'affaires de 12,5 milliards d'Euros en 2012, dont 9,6 milliards pour sa branche recyclage (source : rapport annuel 2012 d'Umicore).

Umicore Precious Metals ne publie pas sa production de platinoïdes, mais seulement sa capacité annuelle de production, qui est de 25 t/an de platine, 25 t/an de palladium et 5 t/an de rhodium.

Sociétés basées en Suisse

Metalor Technologies International SA (www.metalor.com) est une société suisse basée à Neuchâtel, avec des implantations dans 14 autres pays, dont une filiale en France, Metalor Technologies (France) SAS, à Courville-sur-Eure (28) et à Oullins (69). Elle est spécialisée dans la métallurgie et le raffinage des métaux précieux d'origine primaire ou secondaire : or, argent et platinoïdes. Elle produit des lingots et barres de métaux précieux pour les usages en joaillerie, dentisterie, électronique, et pour le placage.

Valcambi (www.valcambi.com) est une société suisse basée à Balerna (Tessin). C'est l'un des raffineurs majeurs de métaux précieux (Au, Ag, Pt, Pd) issus de sources primaires (dorés et concentrés miniers) et secondaires, avec une capacité annuelle de raffinage de 2000 t de métaux précieux (dont une capacité de production de 3,2 t d'or en barres ou pièces par jour). Elle fabrique aussi des pièces en alliages de métaux précieux par exemple pour l'horlogerie de luxe.

Sociétés basées au Japon

Tanaka Kikinzoku Group (www.tanaka.co.jp) est un groupe japonais qui produit une vaste gamme de produits industriels spécialisés. C'est le premier fabricant, raffineur et négociant en métaux précieux japonais. Il produit et commercialise des lingots de platine et de palladium (ainsi que d'or et d'argent), et de l'éponge de rhodium, iridium, ruthénium et osmium. Il produit aussi des alliages de platine et de palladium pour la joaillerie. C'est aussi l'un des plus importants recycleurs mondiaux d'EGP.

Asahi Holdings (www.asahiholdings.com) est un groupe japonais basé à Tokyo et Kobé qui recycle, raffine et commercialise des métaux précieux (Au, Ag, Pt, Pd) et rares (indium). Il fabrique aussi des alliages de métaux précieux et des composés pour plaquage. Il a des implantations en Chine, à Taïwan, en Corée du Sud et en Malaisie. Il est aussi présent dans le traitement et la détoxification de déchets, et les analyses.

Mitsui Global Precious Metals (www.mitprecious.com) est la branche métaux précieux du vaste conglomérat japonais Mitsui & Co (www.mitsui.com), et dont la filiale Mitsui & Co Precious Metals Inc., basée à New-York, négocie des métaux précieux.

Mitsubishi Corp. (www.mitsubishicorp.com) est un vaste conglomérat industriel et commercial japonais dont la division Mitsubishi Mineral Resources Trading est l'un des plus gros traders mondiaux de platinoïdes.

Itochu (www.itochu.co.jp) est un vaste conglomérat industriel et commercial japonais dont la division Metals and Minerals Company est l'un des plus gros traders mondiaux de platinoïdes.

Sociétés basées au Canada

Kitco Metals Inc. (<http://corp.kitco.com>) est une société canadienne basée à Montréal (Québec). Kitco est surtout un négociant de métaux précieux (achat, vente sous diverses formes) et un fournisseur de services d'affinage et de matériel. Elle dispose aussi de bureaux à New-York et Hong-Kong. C'est cette société qui met en ligne le site « Kitco » (www.kitco.com) qui vend en ligne des métaux précieux (Au, Ag, Pt, Pd, Rh) et publie gratuitement leurs cours en temps réel, des analyses de marché et des actualités sur ces métaux. Ce site est l'une des références mondiales pour le suivi des marchés des métaux précieux.

Sociétés basées aux États-Unis

Sabin Metal Corp (www.sabinmetal.com) est une société étatsunienne basée à East Hampton, New-York, spécialisée dans la récupération et le raffinage de métaux précieux (Pt, Pd, Rh, Ru, Au, Ag) et de rhénium, issus de sources secondaires (catalyseurs industriels) ou primaires (une usine de raffinage à Cobalt, Ontario, Canada). Outre les États-Unis, elle a des implantations au Canada, au Mexique, aux Pays-Bas et en Chine.

Republic Metals Corp (www.republicmetalscorp.com) est une société étatsunienne basée à Miami (Floride) qui opère une raffinerie de métaux précieux à Miami. Elle produit et raffine surtout de l'or et de l'argent, et accessoirement du platine et du palladium, à partir de sources secondaires (catalyseurs, déchets industriels ou de joaillerie) ou primaires.

Handy & Harman Ltd (www.handyharman.com) est un groupe industriel étatsunien diversifié, basé à White Plains (New-York), dont la branche métaux précieux (www.scraptofastcash.com) récupère des métaux précieux à partir de divers déchets (DEEE, déchets de joaillerie, etc.).

American Elements (www.americanelements.com), basée à Los Angeles (Californie), produit et commercialise divers métaux et composés de très haute pureté pour des applications de haute technologie et de recherche. Il dispose d'usines aux États-Unis, au Mexique et en Chine. Son catalogue contient plus de deux cents références de ruthénium, rhodium, palladium et platine et plus d'une centaine de références d'osmium et d'iridium (métaux de différentes formes et puretés, composés minéraux et composés organométalliques).

6.2.2. Les autres fabricants ou recycleurs de catalyseurs

Certaines sociétés citées en 6.2.2 (Johnson Matthey, Heraeus, BASF, Umicore) sont impliquées dans la fabrication de catalyseurs, au-delà de leur production et de

commercialisation de métaux précieux par raffinage ou recyclage. D'autres sociétés, moins impliquées dans la production et la commercialisation des métaux eux-mêmes, produisent des catalyseurs, pour l'automobile ou pour les industries chimiques et pétrolières.

Cataler Corp. (www.cataler.co.jp), basé à Shizuoka (Japon), est un important fabricant de monolithes de catalyseurs pour automobiles, motos et moteurs de marine, avec des implantations en Chine, Thaïlande, Indonésie, États-Unis, Allemagne et Afrique du Sud.

LyondellBasell (www.lyondellbasell.com) est une importante société chimique américaine cotée à la bourse de New-York (NYSE:LYO) avec un siège à Houston (Texas) et un à Rotterdam (Pays-Bas). Elle a 58 sites de production dans 18 pays. Elle fabrique des catalyseurs pour les industries chimiques, et en utilise dans ses usines chimiques. Elle opère en particulier une usine chimique en France, à Fos-sur-Mer (13), et opérait une raffinerie à Berre-l'Étang (13), arrêtée début 2012.

Albemarle Corporation (<http://albemarle.com>) est une société chimique américaine basée à Baton Rouge (Louisiane) et cotée à la bourse de New-York (NYSE:ALB). Elle est présente dans seize pays. Elle fabrique entre autres des catalyseurs pour l'industrie pétrolière.

Clariant International Ltd (www.clariant.com) est une société chimique diversifiée basée à Muttenz (Basel Land, Suisse), cotée à la bourse suisse (SIX), qui compte en particulier une branche « catalyse et énergie » (www.catalysis-energy.clariant.com). Elle produit surtout des catalyseurs pour les industries chimiques et pétrolières, mais aussi pour l'automobile, ainsi que des matériaux pour les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie.

EEC (European Exhaust & Catalyst) Ltd (www.eurocats.co.uk) est une société britannique basée à Denmead (Hampshire, Angleterre), qui fabrique des catalyseurs automobiles ainsi que des filtres à particules et des sondes lambda. Elle a une unité de production à Stone (Staffordshire) et une unité de recyclage à Waterlooville (Hampshire). Elle dispose d'une filiale de distribution en France, **EEC France SARL** (www.catalyseurs.fr), basée à Mazères (09).

Multimetco Inc. (www.multimetco.com), basée à Anniston (Alabama, États-Unis) recycle des catalyseurs automobiles et industriels.

Gemini Industries Inc. (www.gemini-catalysts.com), basée à Santa Ana (Californie, États-Unis) recycle des catalyseurs automobiles et industriels et en récupère le platine, le palladium, l'iridium et le rhénium.

Nanjing Depurate Catalyst Co Ltd (<http://nanjing-depurate.en.ywsp.com/>), basée à Nanjing (Jiangsu, Chine), fabrique divers types de catalyseurs dont des monolithes au platine, palladium et rhodium pour l'automobile.

6.2.3. Les négociants, sociétés d'investissement et sociétés financières impliquées dans le commerce des platinoïdes

Nombre des grandes banques internationales interviennent dans l'achat ou vente de platine et de palladium en barres, lingots et pièces, ou des ETF sur les EGP.

Au-delà des banques, il existe des sociétés spécialisées dans le négoce des métaux précieux en barres, lingots, pièces ou autre formes, parmi lesquelles on pourra citer les étatsuniens A-Mark Precious Metals (www.amark.com), International Precious Metals (www.preciousmetals.com), Amerigold (www.amerigold.com), Crystal Bay Trading (www.pm-connect.com), Surepure Chemetals (www.surepure.com) et le britannique Baird & Co. (www.goldline.co.uk).

6.2.4. Les fondeurs, transformateurs, fabricants de produits intermédiaires, recycleurs et négociants en France

Outre les multinationales citées plus haut dont certaines ont des implantations en France, quelques sociétés françaises sont impliquées dans le recyclage des platinoïdes et la fabrication de catalyseurs.

Eurecat SA (07 La Voulte-sur-Rhône, www.eurecat.fr), régénère ou recycle divers types de catalyseurs industriels, dont des catalyseurs au platine ou au palladium.

Axens (92 Rueil-Malmaison, <http://france.axens.net/fr/>) est un fournisseur de catalyseurs, d'adsorbants, de technologies, d'assistance technique et de conseil pour les industries du raffinage, de la pétrochimie, du gaz et des carburants alternatifs. En France, il a une unité de production à Salindres (30). Il a une implantation internationale, avec trois sites de production aux États-Unis et un au Canada, et des bureaux à Moscou, Tokyo, Pékin, New Delhi, Bahreïn, Kuala Lumpur, Houston et Princeton. Axens fournit entre autres des catalyseurs au platine.

Axens est, avec les constructeurs automobiles, l'un des consommateurs majeurs de platine et de palladium en France, en tant que fournisseur de catalyseurs au platine pour les industries chimique et pétrolière. Axens est peu sensible aux prix puisqu'ils sont répercutés à ses clients, mais la disponibilité physique de ces métaux lui est cruciale.

Cookson CLAL (Paris, www.cookson-clal.com) est un recycleur-fondeur de métaux précieux (or, argent et platinoïdes). Il récupère en particulier des métaux provenant des rebuts de joaillerie et de prothèses dentaires. Il fabrique et commercialise des métaux apprêtés destinés au marché de la joaillerie, des composants électriques et électroniques, de la chimie, des alliages dentaires. Les platinoïdes représentent une part mineure de son activité, dominée par l'or.

C'est l'ancien Comptoir Lyon-Alemand, puis Comptoir Lyon Alemand Louyot et Cie (CLAL), qui avait intégré le groupe britannique Cookson en 2000 puis le groupe allemand Heimerle + Meule en juin 2013 (cf. 6.2.1).

Praxair MRC SAS (31 Toulouse, www.praxair.fr) est la filiale française de la société étatsunienne Praxair Inc. (Connecticut, www.praxair.com), géant mondial des gaz industriels. En plus de son activité sur les gaz, Praxair MRC confectionne des cibles de pulvérisation (« sputtering targets ») de platine pur et d'alliage de nickel à 15 % de platine (ainsi que d'autres métaux) destinées aux industries des semi-conducteurs, pour la fabrication de puces électroniques par technique de dépôt en couche mince sous vide). Elle est le leader européen du secteur.

Fransor Industries (92 Colombes, www.fransor-industrie.fr) prépare, dans son atelier de Colombes, des alliages dentaires (tab. 37) et divers alliages industriels, dont des alliages avec métaux précieux pour l'électronique.

		Au	Ag	Pt	Pd	Rh	Autres
Ors jaunes riches	Inlaycast	76.0%	14.0%	1.5%	2.5%		6.0%
	Seulor C	56.3%	28.0%		6.0%		9.7%
	Crownor C	68.6%	12.3%	2.6%	3.8%		12.7%
	Inlor	94.0%		5.0%			1.0%
	Platinor C	66.0%	16.6%	1.5%	4.5%		11.4%
Alliages céramique	Ceraminor	53.3%			35.0%		10.0%
	Cwj	86.5%		11.25%		1.25%	
Ors blancs	Iridor	62.0%		20.0%	18.0%		
	Palgor C	25.0%	51.3%	0.5%	15.0%		8.2%
	Castor C	10.0%	63.0%		20.0%		7.0%

Tableau 37 - Exemples de compositions d'alliages dentaires contenant des platinoïdes au catalogue de Fransor Industries (source : www.fransor-industries.fr).

Morphosis (76 Le Havre, www.morphosis.fr) recycle des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) pour en extraire les métaux contenus, dont des métaux précieux (Au, Ag, Pt, Pd, Rh), ainsi que certaines matières plastiques. Elle a une usine au Havre d'une capacité de traitement de 25 kt/an, et deux usines de 5 kt/an à Madrid et à Milan.

Multirex Auto (02 Fère-en-Tardenois, www.multirex.com) collecte des pièces automobiles d'occasion, dont des pots d'échappement, pour exportation et recyclage.

6.3. LES UTILISATEURS FRANÇAIS FINAUX

Au niveau des utilisations finales, le platine, le palladium et le rhodium sont importants pour les industries stratégiques françaises.

En raison de leurs propriétés catalytiques, ils sont indispensables aux constructeurs automobiles (Renault, PSA, Renault Trucks) pour la catalyse obligatoire et de plus en plus stricte des gaz d'échappement. Ils sont indispensables aux industries pétrolières (raffinage) et pétrochimiques (Total, et implantations en France de sociétés pétrolières étrangères). Ils sont aussi indispensables pour diverses branches des industries chimiques et pharmaceutiques.

En raison de leur résistance à l'altération, de leur esthétique et de leur rareté, ils sont utilisés par nombre d'acteurs des secteurs de la bijouterie-joaillerie, ainsi que dans le secteur de la prothèse dentaire, bien que dans ces secteurs ils soient substituables.

Le platine et le rhodium sont utilisés par certains verriers et producteurs de fibre de verre. Le platine, le palladium et le ruthénium sont utilisés par divers producteurs de matériel électronique.

Quelques-uns des acteurs français utilisateurs finaux de platinoïdes sont passés en revue ci-dessous. Mais la liste qui suit est seulement indicative, elle ne prétend pas être exhaustive et pourrait être complétée par la suite.

6.3.1. Constructeurs et équipementiers automobiles

Les constructeurs automobiles **PSA Peugeot Citroën** (www.psa-peugeot-citroen.com) **Renault** (92100 Boulogne-Billancourt, www.renault.fr) et le constructeur de véhicules industriels **Renault Trucks** (69 Saint-Priest, www.renault-trucks.fr), filiale du groupe suédois Volvo, ainsi que les usines en France de constructeurs automobiles de marques étrangères (Toyota...), ou leurs équipementiers impliqués dans les échappements sont les principaux consommateurs de platine, palladium et rhodium en France.

En général, les constructeurs automobiles achètent directement les monolithes contenant les platinoïdes, à des compositions spécifiques établies par ces constructeurs suivant leurs propres laboratoires de recherches, à des affineurs, chimistes et imprégnateurs spécialisés (Johnson Matthey, Solvay, BASF-Catalysts, Umicore). Les constructeurs automobiles peuvent ensuite soit assembler eux-mêmes leurs pots d'échappement, soit en déléguer l'assemblage à des équipementiers comme Faurecia en leur livrant les monolithes.

Faurecia (92 Nanterre, www.faurecia.com) est une importante société française d'ingénierie et de production d'équipements automobiles, filiale à 57,43 % de PSA, implantée désormais dans 34 pays sur tous les continents, spécialisée dans plusieurs secteurs dont les échappements et les contrôles d'émissions (premier rang mondiale) mais aussi les sièges, des équipements d'intérieur (planches de bord...) et extérieurs (pare-choc...). Elle produit des systèmes d'échappements entre autres dans son usine de Beaulieu à Mandeure (25).

Compte tenu des réglementations en vigueur, tous les véhicules thermiques commercialisés en Europe (et dans la plupart des pays du monde) doivent désormais être équipés de pots catalytiques aux platinoïdes, en quantités et en proportions qui varient selon les types de moteur, selon les normes d'émissions exigées, et selon les prix relatifs du platine, du palladium et du rhodium (cf. 3.1.1).

Les constructeurs français consomment chacun plusieurs centaines de kg de Pt et Pd et plusieurs dizaines de kg de rhodium par an.

6.3.2. Industrie pétrolière

Le groupe pétrolier français **Total** (<http://total.com/fr>) utilise des platinoïdes comme catalyseur dans son secteur raffinage (reformage catalytique, désulfuration). Il dispose de cinq raffineries en France, à Gonfreville et Granpuits (76), Donges (44), Châteauneuf-les-Martigues (13) et Feyzin (69). Total se fournit en platinoïdes et catalyseurs directement auprès des affineurs ou fabricants de produits intermédiaires spécialisés (cf. 6.2.2).

Esso SAF (92 Courbevoie, www.esso.fr), filiale française du groupe pétrolier américain ExxonMobil, dispose de deux raffineries de pétrole en France, à Gravenchon (76), et Fos-sur-Mer (13), utilisatrices de catalyseurs aux platinoïdes.

La **SARA** (Société Anonyme de la Raffinerie des Antilles, Le Lamentin, Martinique, www.sara.mq), détenue à 50 % par Total, opère une raffinerie au Lamentin, en Martinique, y inclus une unité de reformage catalytique.

Les raffineurs pétroliers comme Total et Esso-SAF peuvent avoir un stock immobilisé important de platinoïdes (de l'ordre de plusieurs tonnes) sous forme de catalyseurs dans leurs installations de raffinage et de reformage, mais leur consommation est assez faible, d'une part parce que le processus de catalyse ne « consomme » pas les platinoïdes, et ceux-ci sont largement recyclés lorsque les catalyseurs sont trop usés, pour produire des catalyseurs neufs, avec de très bons taux de récupération : seule une petite fraction des platinoïdes est perdue à l'usage.

6.3.3. Industries chimiques.

Rhodia (www.rhodia.com/fr), désormais filiale du groupe belge **Solvay**, basé à Bruxelles (www.solvay.com) utilise des catalyseurs aux platinoïdes pour ses productions de polyamide, acide nitrique, etc.

Bluestar Silicones France SAS (69 Lyon, www.bluestarsilicones.com/silicones/lang/fr/bluestarsilicones/europe) est issue de Rhodia Silicones, désormais filiale française de la société chinoise China National Bluestar Corporation qui l'a acquise en 2007. Elle produit divers élastomères de silicones contenant des hexachloroplatinates comme catalyseurs de vulcanisation à froid, dans ses usines de Saint-Fons (69) et Roussillon (38).

De Dietrich Process Systems (67 Niederbronn, www.dedietrich.com), est un des leaders mondiaux de la conception et de la fabrication d'équipements et d'accessoires en acier émaillé pour les industries chimiques et pharmaceutiques, utilise un peu de platine pour la fabrication d'un émail très particulier.

6.3.4. Piles à combustible

Air Liquide (www.airliquide.com), l'un des leaders mondiaux des gaz industriels, a aussi une activité sur l'hydrogène-énergie et la pile à combustible, sur son site de

Sassenage (38), en particulier à travers sa filiale **Axane** qui développe des piles à combustibles à catalyse au platine⁵⁶.

6.3.5. Secteurs pharmaceutique et médical

Sanofi (Paris, www.sanofi.com), l'un des géants mondiaux des produits pharmaceutiques et vétérinaires, utilise pour certaines productions des catalyseurs de platine, palladium ou rhodium déposés sur charbon élaborés par les fabricants spécialisés (cf. 6.2).

BioMérieux (www.biomerieux.com), fabrique entre autres des réactifs de diagnostics médicaux, dont certains contiennent de l'acétate de rhodium.

Integra Neurosciences Implants (06 Sophia Antipolis, du groupe étatsunien Integra, <http://intergralife.com>), qui fabrique du matériel médico-chirurgical, fabrique entre autres des électrodes en platine pour les enregistrements électroencéphalographiques.

6.3.6. Industries électrique et électronique

ST-Microelectronics (www.st.com) est une multinationale des semi-conducteurs, puces et composants électroniques, de droit hollandais et basée en Suisse (Plan-la-Ouate, Genève). Elle utilise, entre autres dans ses usines françaises, du platine pour certains composants (condensateurs), élaborés par dépôt sous vide à partir de sputtering targets.

Pyrocontrôle (69 Vaulx-en-Velin, www.pyro-contrôle.com), du groupe **Chauvin-Arnoux** (75 Paris, www.chauvin-arnoux.com), fabrique des instruments de mesure et de contrôle de température industriels, dont des sondes à base de platine.

6.3.7. Bijouterie-joaillerie

Les bijoutiers, joaillers et horlogers de luxe français utilisent du platine, dans une bien moindre mesure du palladium, et un peu de rhodium en alliages ou en placages, pour leurs créations et productions, mais en importance bien moindre que l'or. Les quantités consommées n'ont pas été renseignées.

6.3.8. Prothésistes dentaires

Les prothésistes dentaires ont utilisé du palladium ou des alliages d'or avec un peu de platine, de palladium ou même de rhodium (cf. tab. 37) pour la confection de couronnes et de bridges. Mais en France, ces métaux sont de plus en plus remplacés par des céramiques (dents frontales) ou des alliages au chrome-cobalt, moins chers (dents arrières). Les quantités consommées n'ont pas été renseignées.

⁵⁶ Le site www.airliquide-hydrogen-energy.com, accédé le 11/06/2013, faisait la promotion de générateurs à pile à combustible à hydrogène de 500 W (CommPac500®) à quelques kW fabriqués par Axane (cf 3.1.8). Mais ce lien n'est plus opérationnel en décembre 2013, ni celui d'Axane (anciennement www.axane.fr).

6.3.9. Défense et aérospatiale

L'Onera (www.onera.fr), le centre français de la recherche aéronautique, spatiale et de défense a étudié, développé et breveté des superalliages monocristallins au ruthénium pour des pales de turbines à haute pression pour les moteurs aéronautiques.

Les motoristes **Snecma** (91 Courcouronnes, www.snecma.com), filiale du **Groupe Safran** (www.safran-group.com), qui conçoit et fabrique des moteurs pour l'aéronautique civile et militaire ainsi que des moteurs spatiaux (Ariane), et **Turbomeca** (64 Bordes, www.turbomeca.com), une autre filiale du Groupe Safran, spécialisée dans les turbines pour hélicoptères, ont utilisé des superalliages au ruthénium pour certaines de leurs turbines, et en particulier certains des alliages développés par l'Onera.

Les consommations actuelles de ruthénium par le secteur français de l'aéronautique civil et militaire resteraient à documenter. Il en est de même pour leur éventuelle consommation en platine, qui peut être utilisé sous forme de composé intermétallique avec Al et éventuellement Ni en couche mince de protection sur ces superalliages (cf.3.1.9), ou pour certaines pièces moteur telles que des buses d'injection.

Les autres industries françaises de la défense (Groupe Safran plus généralement, Groupe Thalès, EADS, Dassault Aviation, MBDA, etc.) utilisent probablement indirectement du palladium dans des composants électroniques de haute fiabilité (cf. 3.2.2), ou du platine dans des revêtements de protection pour hautes températures (cf. 3.1.9), mais les quantités sont peu documentées.

7. Commerce extérieur et consommation de la France

7.1. COMMERCE EXTÉRIEUR

Les tableaux suivants présentent les données françaises d'importations et d'exportations, en valeur (k€) et en volume (kg ou t), de composés et ouvrages identifiés comme contenant des éléments du groupe du platine sur les années 2009, 2010 (partielles), 2011 et 2012. La nomenclature NC8 des Douanes françaises inclut six catégories de produits bruts ou intermédiaires contenant du platine, deux pour le palladium, deux pour le rhodium, et deux pour l'iridium, l'osmium et le ruthénium sans distinction de ces trois métaux (Le Kiosque - Portail des statistiques du Commerce extérieur, <http://lekiosque.finances.gouv.fr>).

Attention, les données fournies par Le Kiosque n'incluent pas les platinoïdes entrant dans le matériel militaire.

Nomenclatures incluant le platine (tab. 38 et 39)

- 71101100 - platine sous formes brutes ou en poudre ;
- 71101910 - barres, fils et profilés, de section pleine ; planches ; feuilles et bandes, épaisseur > 0,15 mm, en platine ;
- 71101980 - platine sous formes mi-ouvrées (autres que sous formes incluses dans 71107910) ;
- 71110000 - plaqué ou doublé de platine sur métaux communs, sur argent ou sur or, sous formes brutes ou mi-ouvrées ;
- 71129200 - déchets et débris de platine, même de plaqué ou doublé de platine et autres déchets et débris contenant du platine ou des composés de platine du type de ceux utilisés principalement pour la récupération des métaux précieux (sauf cendres contenant de platine ou des composés de platine, déchets et débris de platine incorporés et coulés en lingots bruts, gueuses ...) ;
- 71151000 - catalyseurs sous forme de toiles ou de treillis en platine.

Nomenclatures incluant le palladium (tab. 40)

- 71102100 - palladium sous formes brutes ou en poudre ;
- 71102900 - palladium sous formes mi-ouvrées.

Nomenclatures incluant le rhodium (tab. 41)

- 71103100 - rhodium sous formes brutes ou en poudre ;
- 71103900 - rhodium sous formes mi-ouvrées.

Nomenclatures incluant l'iridium, l'osmium ou le ruthénium (tab. 42)

- 71104100 - iridium, osmium et ruthénium, sous formes brutes ou en poudre ;
- 71104900 - iridium, osmium et ruthénium, sous formes mi-ouvrées.

L'examen de ces nomenclatures et des données douanières fournies par « Le Kiosque » appelle un certain nombre de réserves :

- Les trois premières nomenclatures sur le platine (71101100, 71101910, 71101980) ainsi que les deux nomenclatures sur le palladium, le rhodium et le groupe iridium-osmium-ruthénium fournissent des données en « valeur » (en k€), en « masse » (en t), et en « quantité » (en grammes). Bien que les grammes soient une unité de masse (avec 1 tonne = 1 000 000 grammes), les valeurs fournies en tonnes et en grammes ne correspondent souvent pas, bien au-delà des approximations d'arrondis⁵⁷. Nous avons choisi de retenir, dans les tableaux ci-après, les quantités fournies en grammes et converties, par souci de lisibilité, en kilogrammes. En revanche, en ce qui concerne les trois dernières nomenclatures sur le platine, les masses sont uniquement données en tonnes, mais ce sont des masses brutes de produits qui peuvent ne contenir qu'une faible proportion de platine (objets plaqués en platine ; catalyseurs imprégnés de platine). Elles ne sont donc pas utilisables pour évaluer les masses de platine échangées. Les sommes en masse des six nomenclatures sont mentionnées en bas du tableau 37 à titre indicatif mais ne sont pas interprétables.
- Il n'y a pas de nomenclatures de catalyseurs précisant s'ils contiennent du palladium. Ainsi, les importations éventuelles de pots catalytiques automobiles pour moteurs à essence à palladium dominant, ou des monolithes correspondants, ne sont pas identifiées comme telles dans les données douanières. Il n'y a pas non plus de nomenclatures de déchets et scraps identifiés comme contenant du palladium. D'éventuelles exportations de scraps et déchets de tels pots ou monolithes pour recyclage ne sont donc pas prises en compte. Il en est de même pour le rhodium.
- Par extension, on peut supposer que les « catalyseurs sous forme de toiles ou de treillis en platine » identifiés par la nomenclature 71151000 ne correspondent qu'à des catalyseurs industriels, mais n'incluent pas les catalyseurs automobiles. Et, toujours par extension des données sur le palladium, il n'est pas certain que la nomenclature 71129200 (déchets et débris de platine, déchets et débris contenant du platine, etc.) sur le platine inclue d'éventuelles exportations de scraps et déchets de pots ou monolithes au platine pour recyclage.
- Toutes les automobiles importées en France ou exportées de France sont équipées de pots catalytiques et contiennent donc du platine et/ou du palladium et éventuellement un peu de rhodium. Les quantités correspondantes de ces métaux ne sont pas incluses dans les bilans des tableaux 36 à 39. Les quantités correspondantes ne sont pourtant pas négligeables, puisque, pour des importations ou des exportations de l'ordre du million de véhicules par an, à 2 ou 3 g de Pt et/ou Pd par véhicule, les quantités en jeu sont de l'ordre de 2 à 3 t par an, très significatives par rapport aux tonnages

⁵⁷ Les services en charge de la production de ces données reconnaissent eux-mêmes qu'elles sont susceptibles de contenir des erreurs d'enregistrement significatives.

mentionnés dans les nomenclatures où le platine ou le palladium sont identifiés comme tels. Une véritable analyse des flux de platinoïdes demanderait donc une étude bien plus détaillée que la présente étude.

- Il semble y avoir des erreurs importantes : par exemple, les données douanières de la nomenclature 71103900 (rhodium, semi-ouvré) mentionnent que, en 2011, la France aurait exporté vers l'Italie 108 kg de rhodium pour 40 k€ (soit 0,37 € le gramme), et 28 g vers l'Autriche pour 13 k€ (soit 464 € le gramme). Or sur l'année 2011, le cours moyen du rhodium était de 2 022 US\$/oz, soit 46,64 €/gramme aux taux de change moyen de 2011. Le rhodium aurait donc été exporté vers l'Autriche pour 10 fois le prix du métal contenu, et vers l'Italie pour 100 fois moins que le prix du métal contenu. Il y a soit des erreurs d'entrée de valeurs dans la base de données, soit ce qui a été exporté vers l'Italie n'était pas du rhodium dominant mais quelque chose contenant un peu de rhodium (ou encore il pourrait s'agir de déclarations non conformes à la réalité). Ces incohérences expliquent que la nomenclature 71103900 soit déficitaire en valeur et excédentaire en masse pour la France pour l'année 2011.
- Des incohérences similaires, même si elles sont moins flagrantes, existent vraisemblablement dans les autres nomenclatures et pour les autres métaux. Cela conduit à interpréter les données du commerce extérieur avec une grande circonspection, en particulier sur les masses, et donc sur les bilans massiques de matières.

Aux réserves ci-dessus près, on constate que la plupart des postes sont déficitaires pour le commerce extérieur français, aux exceptions notables suivantes :

- le platine brut en 2012 (+775 kg et +25,9 M€ d'excédent, contrebalancés par des déficits en platine semi-ouvré, avec un bilan global brut + semi-ouvré en déficit de -2,687 t et -59,6 M€ sur 2012, cf. tab. 38) ;
- les déchets et débris de platine ou contenant du platine, en 2009, 2010, 2011 et 2012 (+54,3 M€ d'excédent⁵⁸ en 2012, en régression par rapport à +73,6 M/€ en 2011, cf. tab. 39) ;
- le rhodium brut en 2012 (excédent de +25,3 kg et +341 k€), ainsi que le rhodium consolidé brut plus semi-ouvré (excédent de 14,8 kg et +191 k€).

Concernant le platine global (les 6 nomenclatures où il est identifié) le déficit commercial français est de -34,45 M€ en 2012, après un léger excédent en 2011 (+1,36 M€), un léger déficit en 2010 (-0,33 M€) et un déficit plus significatif en 2009 (-16 M€).

La situation commerciale française est systématiquement déficitaire pour le palladium (déficit de -5,51 t et -15,8 M€ en 2012, vs -25,1 t et -25,9 M€ en 2011) et pour l'ensemble iridium + osmium + ruthénium (déficit de -129 kg et -0,70 M€ en 2012, vs -31 kg et 0,54 M€ en 2011).

⁵⁸ Le tonnage pour cette nomenclature n'est pas pertinent pour évaluer la quantité de platine concerné, puisque ce métal peut être très minoritaire dans le produit considéré.

	2009		2010		2011		2012	
	Valeur (k€)	Masse						
71101100 - Platine, brut ou en poudre								
Exportations FAB								
Royaume-Uni	5 479 k€	193.8 kg	6 290 k€	156.6 kg	6 986 k€	179.3 kg	10 368 k€	267.9 kg
Italie	725 k€	28.2 kg	1 784 k€	76.1 kg	4 773 k€	474.9 kg	3 109 k€	213.6 kg
Suisse	608 k€	21.4 kg	760 k€	18.4 kg	2 537 k€	1 027.0 kg	1 899 k€	51.5 kg
Espagne	1 k€	0.0 kg	4 k€	0.0 kg	1 327 k€	32.6 kg	3 540 k€	91.9 kg
Etats-Unis	7 k€	0.1 kg	6 440 k€	181.1 kg	1 026 k€	29.4 kg	11 790 k€	467.0 kg
Allemagne	80 k€	2.3 kg	2 293 k€	170.4 kg	458 k€	9.9 kg	0	0
Belgique	0	0	0	0	1 647	50.4 kg	24 k€	0.6 kg
Autres pays	66 k€	2.5 kg	136 k€	12.2 kg	1 650 k€	59.0 kg	539 k€	13.7 kg
TOTAL	6 966 k€	248.5 kg	17 707 k€	614.8 kg	18 757 k€	1 862.5 kg	31 269 k€	1 106.3 kg
Importations CAF								
Allemagne	1 610 k€	55.4 kg	2 482 k€	86.1 kg	13 089 k€	452.5 kg	1 166 k€	71.5 kg
Italie	4 312 k€	167.6 kg	4 237 k€	130.0 kg	4 562 k€	440.4 kg	1 287 k€	172.2 kg
Royaume-Uni	8 582 k€	306.6 kg	1 943 k€	49.4 kg	1 827 k€	47.0 kg	1 775 k€	47.8 kg
Etats-Unis	500 k€	50.9 kg	3 363 k€	133.3 kg	478 k€	37.2 kg	458 k€	21.4 kg
Suisse	80 k€	3.5 kg	815 k€	28.0 kg	172 k€	4.1 kg	0	0
Afrique du Sud	0	0	804 k€	6.2 kg	0	0	0	0
Turquie	0	0	5 779 k€	168.1 kg	0	0	0	0
Malte	0	0	0	0	0	0	202 k€	5.5 kg
Belgique	0	0	0	0	1 k€	1.5 kg	369 k€	11.4 kg
Autres pays	83 k€	3.2 kg	180 k€	18.4 kg	33 k€	4.0 kg	107 k€	1.5 kg
TOTAL	15 167 k€	587.0 kg	19 603 k€	619.5 kg	20 162 k€	986.5 kg	5 364 k€	331.3 kg
Déficit / Excédent	-8 201 k€	-338.6 kg	-1 896 k€	-4.7 kg	-1 405 k€	876.0 kg	25 905 k€	775.0 kg
71101910 - Barres, fils, profilés, planches, feuilles et bandes, ép. > 0,15 mm, en platine								
Exportations FAB								
Allemagne	7 117 k€	235.2 kg	17 890 k€	474.9 kg	14 991 k€	349.0 kg	12 292 k€	249.0 kg
Pays-Bas	1 362 k€	41.0 kg	2 553 k€	55.7 kg	2 216 k€	48.2 kg	1 552 k€	33.5 kg
Belgique	753 k€	23.1 kg	1 035 k€	24.3 kg	787 k€	17.7 kg	564 k€	12.3 kg
Espagne	5 177 k€	188.7 kg	1 062 k€	39.2 kg	695 k€	21.0 kg	1 457 k€	38.3 kg
Suède	368 k€	11.2 kg	618 k€	13.0 kg	528 k€	11.4 kg	553 k€	12.0 kg
Suisse	98 k€	3.4 kg	46 k€	3.5 kg	510 k€	13.1 kg	65 k€	1.8 kg
Danemark	280 k€	11.1 kg	25 k€	0.0 kg	35 k€	0.0 kg	0	0
Etats-Unis	13 k€	0.0 kg	9 682 k€	70.0 kg	0	0	0	0
Autres pays	492 k€	10.6 kg	507 k€	14.4 kg	504 k€	6.8 kg	421 k€	8.5 kg
TOTAL	15 660 k€	524.3 kg	33 418 k€	695.0 kg	20 266 k€	467.1 kg	16 904 k€	355.4 kg
Importations CAF								
Royaume-Uni	14 118 k€	479.0 kg	27 771 k€	692.0 kg	17 321 k€	416.8 kg	17 855 k€	484.3 kg
Etats-Unis	4 472 k€	385.3 kg	4 752 k€	330.3 kg	10 584 k€	733.0 kg	59 k€	6.0 kg
Espagne	3 568 k€	145.0 kg	5 959 k€	158.6 kg	8 927 k€	231.6 kg	10 889 k€	256.6 kg
Suisse	1 674 k€	69.3 kg	5 719 k€	190.1 kg	7 456 k€	151.1 kg	5 439 k€	79.3 kg
Italie	527 k€	17.8 kg	1 079 k€	28.2 kg	3 109 k€	79.9 kg	6 071 k€	161.6 kg
Allemagne	3 096 k€	474.5 kg	4 747 k€	467.4 kg	2 851 k€	180.2 kg	4 420 k€	109.8 kg
Belgique	7 949 k€	274.1 kg	15 k€	0.4 kg	5 k€	0.3 kg	0	0
Autres pays	374 k€	19.3 kg	464 k€	106.0 kg	512 k€	11.4 kg	523 k€	21.9 kg
TOTAL	35 778 k€	1 864.3 kg	50 506 k€	1 973.2 kg	50 765 k€	1 804.2 kg	45 256 k€	1 119.5 kg
Déficit	-20 118 k€	-1 339.9 kg	-17 088 k€	-1 278.1 kg	-30 499 k€	-1 337.1 kg	-28 352 k€	-764.1 kg
71101980 - Platine mi-ouvré (autres que sous formes incluses dans 71107910)								
Exportations FAB								
Etats-Unis					6 613 k€	279.6 kg	7 613 k€	304.6 kg
Italie					965 k€	24.6 kg	17 k€	0.1 kg
Allemagne					502 k€	8.9 kg	3 324 k€	110.9 kg
Suisse					584 k€	15.2 kg	624 k€	19.1 kg
Belgique					16 k€	0.3 kg	330 k€	10.2 kg
Autres pays					265 k€	8.1 kg	235 k€	11.0 kg
TOTAL					8 945 k€	336.7 kg	12 143 k€	456.0 kg
Importations CAF								
Allemagne					13 419 k€	312.5 kg	43 129 k€	1 299.2 kg
Etats-Unis					12 667 k€	912.7 kg	23 066 k€	1 682.4 kg
Royaume-Uni					2 067 k€	61.7 kg	778 k€	38.3 kg
Autres pays					929 k€	111.2 kg	2 332 k€	134.4 kg
TOTAL					29 082 k€	1 398.1 kg	69 305 k€	3 154.3 kg
Déficit					-20 137 k€	-1 061.3 kg	-57 162 k€	-2 698.3 kg
Sous-total platine brut ou mi-ouvré (quantité détaillées au gramme près, somme des 3 nomenclatures ci-dessus)								
Exportations FAB	22 626 k€	772.8 kg	51 125 k€	1 309.9 kg	47 968 k€	2 666.4 kg	60 316 k€	1 917.7 kg
Importations CAF	50 945 k€	2 451.3 kg	70 109 k€	2 592.7 kg	100 009 k€	4 188.8 kg	119 925 k€	4 605.1 kg
Déficit	-28 319 k€	-1 678.5 kg	-18 984 k€	-1 282.8 kg	-52 041 k€	-1 522.4 kg	-59 609 k€	-2 687.4 kg

Tableau 38 - Statistiques françaises d'import-export de platine brut ou mi-ouvré.
Données CAF-FAB hors matériel militaire (données 71101980 2009 et 2010 manquantes).

Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>

	2009		2010		2011		2012	
	Valeur (k€)	Masse	Valeur (k€)	Masse	Valeur (k€)	Masse	Valeur (k€)	Masse
71110000 - Plaqué ou doublé de platine sur métaux communs, sur argent ou sur or, sous formes brutes ou mi-ouvrées								
Exportations FAB								
Allemagne	0	0	2 k€	0 t	103 k€	2 t	0	0
Algérie	0	0	0	0	23 k€	0 t	0	0
Maroc	0	0	0	0	7 k€	0 t	0	0
Belgique	0	0	4 k€	0 t	0	0	0	0
Canada	1 k€	0 t	20 k€	0 t	0	0	0	0
Tunisie	22 k€	0 t	0	0	0	0	0	0
Turquie	16 k€	0 t	0	0	0	0	0	0
Etats-Unis	0	0	0	0	0	0	468 k€	0 t
Autres pays	2 k€	0 t	11 k€	0 t	6 k€	0 t	14 k€	0 t
TOTAL	41 k€	0 t	37 k€	0 t	139 k€	2 t	482 k€	0 t
Importations CAF								
Allemagne	62 k€	1 t	75 k€	2 t	34 k€	0 t	64 k€	0 t
Suisse	2 k€	0 t	54 k€	0 t	8 k€	0 t	3 k€	0 t
Belgique	39 k€	0 t	0	0	2 k€	0 t	0	0
Etats-Unis	0	0	11 k€	0 t	7 k€	0 t	50 k€	0 t
Retour France	0	0	5 k€	0 t	2 k€	0 t	0	0
Chine	0	0	12 k€	0 t	1 k€	0 t	4 k€	0 t
Italie	63 k€	2 t	17 k€	0 t	1 k€	0 t	20 k€	0 t
Lituanie	0	0	28 k€	0 t	0	0	0	0
Autres pays	0	0	9 k€	0 t	4 k€	0 t	1 k€	0 t
TOTAL	166 k€	3 t	211 k€	2 t	59 k€	0 t	142 k€	0 t
Déficit / Excédent	-125 k€	-3 t	-174 k€	-2 t	80 k€	2 t	340 k€	0 t
71129200 - Déchets et débris de platine, de plaqués ou doublés de platine et autres déchets et débris contenant du platine								
Exportations FAB								
Belgique	4 113 k€	123 t	1 334 k€	19 t	50 157 k€	91 t	6 985 k€	67 t
Etats-Unis	9 622 k€	86 t	8 306 k€	6 t	13 354 k€	1 t	37 193 k€	190 t
Allemagne	8 811 k€	339 t	4 855 k€	103 t	12 298 k€	168 t	2 887 k€	46 t
Royaume-Uni	16 490 k€	21 t	13 065 k€	0 t	10 949 k€	2 t	0	0
Norvège	3 902 k€	0 t	6 777 k€	0 t	5 196 k€	0 t	5 420 k€	0 t
Suisse	865 k€	0 t	2 352 k€	0 t	3 695 k€	0 t	773 k€	0 t
Italie	2 951 k€	2 t	2 145 k€	0 t	1 556 k€	3 t	0	0
Lituanie	0	0	0	0	0	0	4 048 k€	42 t
Autres pays	410 k€	39 t	1 048 k€	51 t	180 k€	5 t	612 k€	7 t
TOTAL	47 164 k€	610 t	39 882 k€	179 t	97 385 k€	270 t	57 918 k€	352 t
Importations CAF								
Italie	2 019 k€	88 t	1 k€	0 t	10 579 k€	184 t	1 214 k€	60 t
Etats-Unis	2 777 k€	41 t	27 k€	0 t	7 597 k€	0 t	114 k€	0 t
Allemagne	1 577 k€	20 t	1 151 k€	50 t	1 199 k€	52 t	826 k€	13 t
Afrique du Sud	1 947 k€	33 t	1 k€	13 t	575 k€	29 t	0	0
Maroc	0	0	126 k€	4 t	194 k€	6 t	157	5
Algérie	2 682 k€	0 t	1 579 k€	0 t	0	0	441 k€	0 t
Belgique	6 300 k€	74 t	0	0	0	0	0	0
Pays-Bas	1 501 k€	26 t	0	0	0	0	0	0
Suisse	1 287 k€	49 t	222 k€	1 t	0	0	0	0
Tunisie	27 k€	1 t	79 k€	2 t	0	0	0	0
Espagne	0	0	0	0	0	0	742 k€	32 t
Autres pays	643 k€	28 t	55 k€	0 t	625 k€	25 t	156 k€	4 t
TOTAL	20 760 k€	360 t	3 241 k€	70 t	20 769 k€	296 t	3 650 k€	114 t
Excédent	26 404 k€	250 t	36 641 k€	109 t	76 616 k€	-26 t	54 268 k€	238 t
71151000 - Catalyseurs sous forme de toiles ou de treillis en platine								
Exportations FAB								
Allemagne	3 312 k€	0 t	1 415 k€	0 t	1 560 k€	36 t	2 117 k€	54 t
Algérie	304 k€	0 t	3 461 k€	0 t	441 k€	0 t	1 035 k€	0 t
Autres pays	1 k€	0 t	4 k€	0 t	0	0	0	0
TOTAL	3 617 k€	0 t	4 880 k€	0 t	2 001 k€	36 t	3 152 k€	54 t
Importations CAF								
Royaume-Uni	9 223 k€	0 t	11 177 k€	0 t	10 533 k€	70 t	16 509 k€	20 t
Norvège	5 388 k€	0 t	6 810 k€	0 t	9 468 k€	44 t	9 069 k€	0 t
Allemagne	2 689 k€	0 t	3 810 k€	45 t	4 472 k€	56 t	6 487 k€	126 t
Autres pays	290 k€	10 t	894 k€	9 t	825 k€	6 t	441 k€	21 t
TOTAL	17 590 k€	10 t	22 691 k€	54 t	25 298 k€	176 t	32 506 k€	167 t
Déficit / Excédent	-16 947 k€	18 t	-22 636 k€	-54 t	-24 673 k€	-151 t	-32 350 k€	-163 t
Total des nomenclatures incluant le platine (6 nomenclatures, quantités converties en tonnes)								
Exportations FAB	73 448 k€	611 t	95 924 k€	180 t	147 493 k€	311 t	121 868 k€	408 t
Importations CAF	89 461 k€	375 t	96 252 k€	129 t	146 135 k€	476 t	156 223 k€	286 t
Déficit / Excédent	-16 013 k€	235 t	-328 k€	52 t	1 358 k€	-166 t	-34 355 k€	122 t

Tableau 39 - Statistiques françaises d'import-export de plaqués, déchets et débris et de catalyseurs contenant du platine. Données CAF-FAB hors matériel militaire.

Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>

	2009		2010		2011		2012	
	Valeur (k€)	Masse (kg)	Valeur (k€)	Masse (kg)	Valeur (k€)	Masse (kg)	Valeur (k€)	Masse (kg)
71102100 - Palladium, brut ou en poudre								
Exportations FAB								
Italie	1 019 k€	165.6 kg	3 860 k€	239.2 kg	3 025 k€	180.6 kg	3 322 k€	203.4 kg
Allemagne	572 k€	439.9 kg	586 k€	55.7 kg	1 927 k€	98.2 kg	1 934 k€	1 293.2 kg
Royaume-Uni	1 034 k€	180.8 kg	730 k€	53.5 kg	1 369 k€	68.0 kg	2 112 k€	402.6 kg
Suisse	201 k€	28.3 kg	916 k€	72.6 kg	1 321 k€	90.6 kg	2 848 k€	184.1 kg
Espagne	540 k€	56.9 kg	1 696 k€	78.2 kg	733 k€	42.3 kg	1 589 k€	99.8 kg
Belgique	997 k€	172.6 kg	7 k€	0.5 kg	0 k€	0.0 kg	0 k€	0.0 kg
Autres pays	67 k€	1.8 kg	269 k€	112.2 kg	57 k€	3.5 kg	7 k€	0.4 kg
TOTAL	4 430 k€	1 045.9 kg	8 064 k€	612.0 kg	8 432 k€	483.2 kg	11 812 k€	2 183.5 kg
Importations CAF								
Suisse	639 k€	45.2 kg	5 425 k€	237.6 kg	7 205 k€	271.3 kg	5 478 k€	4 913.6 kg
Italie	2 502 k€	3 910.2 kg	3 654 k€	710.9 kg	5 733 k€	2 847.6 kg	5 983 k€	376.1 kg
Etats-Unis	1 233 k€	250.7 kg	1 985 k€	349.6 kg	2 188 k€	206.5 kg	2 477 k€	297.8 kg
Allemagne	413 k€	93.6 kg	1 565 k€	263.6 kg	1 433 k€	169.8 kg	419 k€	113.6 kg
Royaume-Uni	405 k€	73.8 kg	547 k€	42.9 kg	1 204 k€	74.3 kg	906 k€	59.9 kg
Japon	0 k€	0.0 kg	0 k€	0.0 kg	1 169 k€	178.9 kg	1 297 k€	492.5 kg
Autres pays	76 k€	17.7 kg	364 k€	55.1 kg	385 k€	20 845.9 kg	6 k€	0.4 kg
TOTAL	5 268 k€	4 391.2 kg	13 540 k€	1 659.8 kg	19 317 k€	24 594.3 kg	16 566 k€	6 253.9 kg
Déficit	-838 k€	-3 345.4 kg	-5 476 k€	-1 047.8 kg	-10 885 k€	-24 111.1 kg	-4 754 k€	-4 070.4 kg
71102900 - Palladium, mi-ouvré								
Exportations FAB								
Allemagne	7 k€	3.4 kg	1 811 k€	67.5 kg	1 504 k€	111.6 kg	2 392 k€	74.5 kg
Suisse	575 k€	96.6 kg	600 k€	42.9 kg	1 428 k€	87.4 kg	964 k€	60.0 kg
Espagne	0 k€	0.0 kg	401 k€	28.1 kg	486 k€	29.8 kg	255 k€	17.2 kg
Italie	99 k€	18.7 kg	158 k€	13.6 kg	232 k€	301.8 kg	703 k€	42.5 kg
Etats-Unis	58 k€	5.8 kg	15 k€	0.7 kg	21 k€	0.8 kg	0 k€	0.0 kg
Hong-Kong	102 k€	35.0 kg	187 k€	35.0 kg	0 k€	0.0 kg	0 k€	0.0 kg
Vietnam	107 k€	36.6 kg	163 k€	27.1 kg	0 k€	0.0 kg	0 k€	0.0 kg
Royaume-Uni	0 k€	0.0 kg	0 k€	0.0 kg	7 k€	0.2 kg	288 k€	18.9 kg
Autres pays	19 k€	2.0 kg	85 k€	7.5 kg	89 k€	10.9 kg	220 k€	11.6 kg
TOTAL	967 k€	198.0 kg	3 420 k€	222.5 kg	3 767 k€	542.6 kg	4 822 k€	224.6 kg
Importations CAF								
Suisse	2 616 k€	181.7 kg	9 089 k€	451.9 kg	11 159 k€	850.7 kg	10 108 k€	433.5 kg
Allemagne	3 075 k€	347.1 kg	4 207 k€	340.3 kg	5 401 k€	503.4 kg	3 871 k€	983.5 kg
Etats-Unis	1 124 k€	130.6 kg	1 525 k€	209.0 kg	1 443 k€	126.5 kg	1 179 k€	104.6 kg
Royaume-Uni	698 k€	92.8 kg	170 k€	15.0 kg	98 k€	7.4 kg	0 k€	0.0 kg
Italie	0 k€	0.0 kg	0 k€	0.0 kg	422 k€	24.1 kg	583 k€	48.4 kg
Autres pays	318 k€	34.0 kg	370 k€	31.9 kg	262 k€	15.9 kg	143 k€	95.4 kg
TOTAL	7 831 k€	786.2 kg	15 361 k€	1 048.1 kg	18 785 k€	1 527.9 kg	15 884 k€	1 665.4 kg
Déficit	-6 864 k€	-588.1 kg	-11 941 k€	-825.6 kg	-15 018 k€	-985.3 kg	-11 062 k€	-1 440.8 kg
Palladium total								
Exportations FAB	5 397 k€	1 243.9 kg	11 484 k€	834.4 kg	12 199 k€	1 025.8 kg	16 634 k€	2 408.0 kg
Importations CAF	13 099 k€	5 177.4 kg	28 901 k€	2 707.9 kg	38 102 k€	26 122.2 kg	32 450 k€	7 919.3 kg
Déficit	-7 702 k€	-3 933.5 kg	-17 417 k€	-1 873.5 kg	-25 903 k€	-25 096.4 kg	-15 816 k€	-5 511.3 kg

Tableau 40 - Statistiques françaises d'import-export de palladium.
Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>

	2011			2012		
	Valeur (k€)	Masse (kg)	val.unit.	Valeur (k€)	Masse (kg)	val.unit.
71103100 - Rhodium, brut ou en poudre						
Exportations FAB						
Italie	1 342 k€	55.49 kg	24.2 €/g	857 k€	36.14 kg	23.7 €/g
Etats-Unis	0	0		577 k€	30.00 kg	19.2 €/g
Belgique	0	0		6 k€	0.19 kg	31.3 €/g
Allemagne	5 k€	0.09 kg	53.2 €/g	55 k€	3.33 kg	16.5 €/g
Royaume-Uni	91 k€	1.89 kg	48.1 €/g	23 k€	0.61 kg	37.8 €/g
Autres pays	38 k€	0.96 kg	39.5 €/g	28 k€	3.78 kg	7.4 €/g
TOTAL	1 476 k€	58.44 kg		1 546 k€	74.05 kg	
Importations CAF						
Italie	4 356 k€	174.29 kg	25.0 €/g	1 134 k€	45.12 kg	25.1 €/g
Etats-Unis	1 k€	0.01 kg	90.9 €/g	33 k€	1.40 kg	23.6 €/g
Autres pays	67 k€	1.35 kg	49.8 €/g	38 k€	2.25 kg	16.9 €/g
TOTAL	4 424 k€	175.65 kg		1 205 k€	48.77 kg	
Déficit / Excédent	-2 948 k€	-117.21 kg		341 k€	25.28 kg	
71103900 - Rhodium, mi-ouvré						
Exportations FAB						
Allemagne	0	0		51 k€	1.79 kg	
Finlande	38 k€	1.54 kg	24.7 €/g	38 k€	2.80 kg	13.6 €/g
Maroc	21 k€	0.40 kg	52.2 €/g	16 k€	0.43 kg	37.0 €/g
Suisse	31 k€	0.62 kg	49.8 €/g	13 k€	0.31 kg	41.9 €/g
Autriche	13 k€	0.028 kg	464.3 €/g	9 k€	0.03 kg	321.4 €/g
Pays-Bas	0	0		6 k€	0.11 kg	54.5 €/g
Italie	40 k€	108.08 kg	0.37 €/g	0	0	
Royaume-Uni	12 k€	0.21 kg	57.7 €/g	0	0	
Autres pays	0	0		1 k€	0.001 kg	1 000 €/g
TOTAL	155 k€	110.88 kg		134 k€	5.47 kg	
Importations CAF						
Royaume-Uni	120 k€	1.95 kg	61.5 €/g	183 k€	3.99 kg	45.8 €/g
Etats-Unis	0	0		50 k€	1.17 kg	42.8 €/g
Italie	44 k€	0.76 kg	58.1 €/g	37 k€	5.76 kg	6.4 €/g
Allemagne	101 k€	1.72 kg	58.9 €/g	10 k€	0.65 kg	15.4 €/g
Autres pays	11 k€	9.39 kg	1.2 €/g	4 k€	4.41 kg	0.9 €/g
TOTAL	276 k€	13.82 kg		284 k€	15.98 kg	
Déficit / Excédent	-121 k€	97.07 kg		-150 k€	-10.51 kg	
Rhodium total						
Exportations FAB	1 631 k€	169.32 kg	9.6 €/g	1 680 k€	79.52 kg	21.1 €/g
Importations CAF	4 700 k€	189.47 kg	24.8 €/g	1 489 k€	64.75 kg	23.0 €/g
Déficit / Excédent	-3 069 k€	-20.14 kg		191 k€	14.77 kg	

Tableau 41 - Statistiques françaises d'import-export de rhodium.
Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>

	2011		2012	
	Valeur (k€)	Masse (kg)	Valeur (k€)	Masse (kg)
71104100 - Iridium, osmium et ruthénium, bruts ou en poudre				
Exportations FAB				
Suisse	229 k€	7.2 kg	196 k€	8.0 kg
Royaume-Uni	0	0	351 k€	10.2 kg
Autres pays	6 k€	1.2 kg	8 k€	1.6 kg
TOTAL	235 k€	8.4 kg	555 k€	19.8 kg
Importations CAF				
Royaume-Uni	270 k€	62.5 kg	394 k€	72.0 kg
Allemagne	2 k€	0.9 kg	131 k€	60.4 kg
Italie	0	0	32 k€	10.7 kg
Etats-Unis	10 k€	0.8 kg	10 k€	2.4 kg
Autres pays	9 k€	1.3 kg	0	0
TOTAL	291 k€	65.5 kg	567 k€	145.5 kg
Déficit	-56 k€	-57.0 kg	-12 k€	-125.8 kg
71104900 - Iridium, osmium et ruthénium, mi-ouvrés				
Exportations FAB				
Suisse	0	0	38 k€	2.0 kg
Allemagne	64 k€	3.2 kg	12 k€	35.0 kg
Etats-Unis	0	0	2 k€	0.0 kg
Irlande	35 k€	6.5 kg	0	0
Royaume-Uni	55 k€	12.1 kg	0	0
Russie	6 k€	30.0 kg	0	0
Autres pays	3 k€	0.0 kg	1 k€	13.0 kg
TOTAL	163 k€	51.9 kg	53 k€	50.0 kg
Importations CAF				
Royaume-Uni	393 k€	11.7 kg	589 k€	16.2 kg
Etats-Unis	58 k€	5.9 kg	88 k€	28.3 kg
Allemagne	189 k€	4.8 kg	53 k€	8.1 kg
Autres pays	6 k€	3.1 kg	10 k€	0.8 kg
TOTAL	646 k€	25.5 kg	740 k€	53.4 kg
Déficit	-483 k€	26.4 kg	-687 k€	-3.4 kg
Iridium, osmium et ruthénium totaux				
Exportations FAB	398 k€	60.3 kg	608 k€	69.8 kg
Importations CAF	937 k€	90.9 kg	1 307 k€	198.9 kg
Déficit	-539 k€	-30.6 kg	-699 k€	-129.2 kg

Tableau 42 - Statistiques françaises d'import-export d'iridium, osmium et ruthénium.
Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>

7.2. CONSOMMATION FRANÇAISE DE PLATINOÏDES

Sachant que la France ne produit pas de platinoïdes, les importations nettes issues des statistiques du commerce extérieur (cf. 7.1) peuvent être un certain indicateur, à prendre avec grande prudence, de la consommation par l'industrie française, qui pourrait être évaluée à 2,7 t de platine (1,1 % de la consommation mondiale) et 5,5 t de palladium (1,8 % de la consommation mondiale) en 2012. Les importations nettes de 5,5 t de palladium en 2012 font suite à des importations nettes de 25,1 t en 2011. Comme il n'y a guère de raisons objectives que la consommation de palladium par

l'industrie française, en particulier automobile, ait été divisée par 4 ou 5 entre 2011 et 2012, et sauf erreurs dans les données douanières, il est vraisemblable qu'une partie des importations de 2011 n'ont été consommées en 2012. De même, le solde positif de la balance du rhodium en 2012 (+14,8 kg) ne signifie pas que la France a été productrice nette de rhodium.

Une enquête a été menée entre juin et octobre 2013 auprès des industriels potentiellement utilisateurs de platinoïdes en France. Seule une partie d'entre eux a fourni des indications, non publiques, sur leur consommation de platine, de palladium et de rhodium. Le cumul des réponses obtenues donne des consommations annuelles de :

- 3,40 t de platine (dont 65 % pour le secteur de la catalyse automobile) ;
- 3,78 t de palladium (dont 74 % pour le secteur de la catalyse automobile) ;
- 89,5 kg de rhodium (dont 84 % pour le secteur de la catalyse automobile).

Les ordres de grandeur, de quelques tonnes pour le platine et le palladium, et de quelques dizaines de kilogrammes pour le rhodium, sont compatibles avec ceux du commerce extérieur, mais il est difficile de faire un rapprochement précis, d'une part parce que l'enquête et les réponses à l'enquête ne sont pas exhaustives, d'autre part en raison du jeu des stockages et déstockages différés d'une année sur l'autre.

En fait, il n'existe pas de statistiques fiables qui permettraient d'évaluer précisément la consommation de platinoïdes par la France.

8. Criticité

Les criticités des platinoïdes sont évaluées comme suit (figure 78).

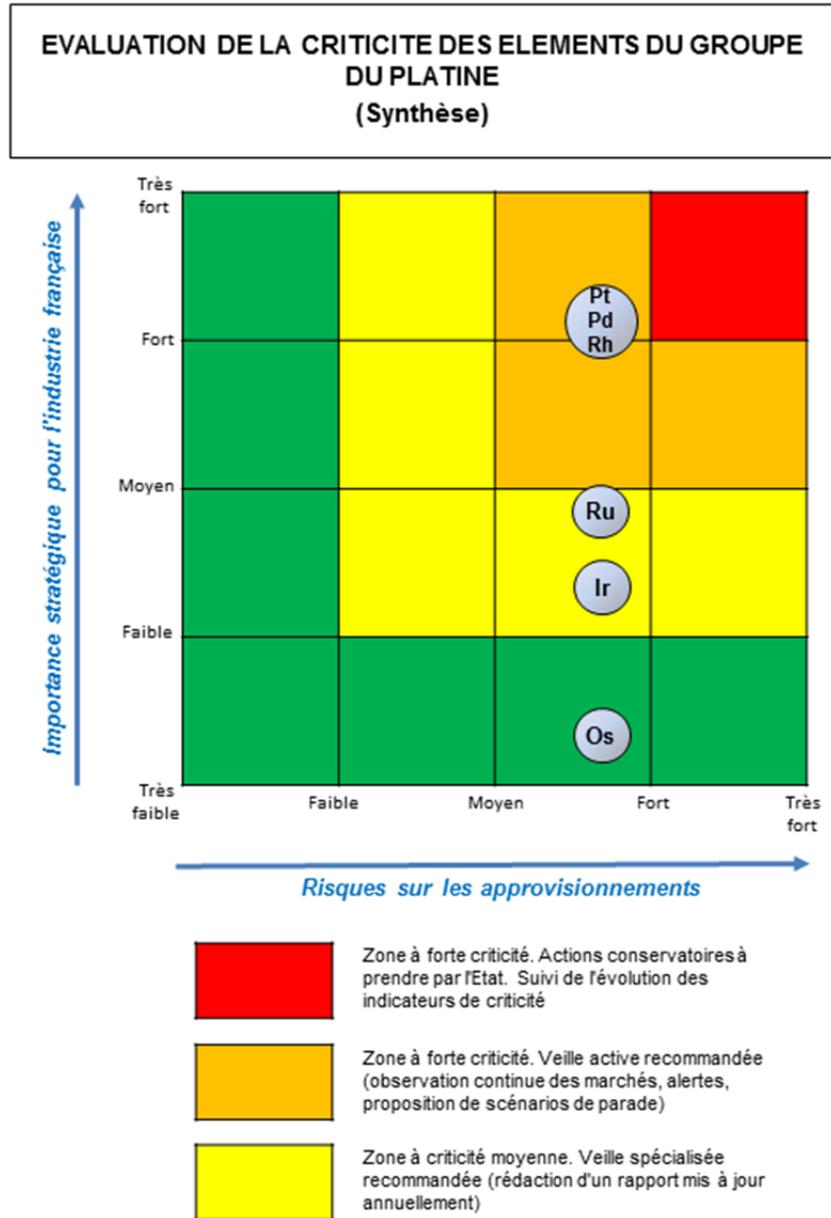


Figure 78 - Synthèse de la criticité des platinoïdes.

Bibliographie

Ad-hoc Working Group (European Commission, 2010) - Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010, 53 p., 5 ann. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf.

Alonso E., Field F.R., Kirchain R.E. (2012) - Platinum availability for future automotive technologies. Environment Science & Technology, American Chemical Society, pp.12986 à 12993. <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es301110e>.

Angerer G., Erdmann L. et al. (Fraunhofer ISI, 2009) - Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung / Institut für Zukunfts studien und Technologiebewertung, 83 p.

Augé T. (1998) - Processus de concentration des éléments du groupe du platine dans les latérites de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM R40012, 66 p., 20 fig., 8 tab.

Augé T., Maurizot P. (2003) - Le platine en Nouvelle-Calédonie : l'histoire d'une découverte. *Géologues* n° 138, 6 p.

Augé T. (2011) - La criticité des éléments du groupe du platine dans un contexte de production très concentré. *Géologues* n° 170, 6 p.

BGR / Polinares Consortium (2012) - Fact sheet: Platinum Group Metals. Polinares working paper n. 35, March 2012, 15 p.

Blair B.R. (2000) - The role of near-Earth asteroids in long-term platinum supply EB535 Metals Economics, Colorado School of Mines, 15 p. www.nss.org/settlement/asteroids/RoleOfNearEarthAsteroidsInLongTermPlatinumSupply.pdf.

Blazy P., Jdid E.A. (2008) - Métallurgie des platinoïdes. Minerais et Procédés, *in* Techniques de l'Ingénieur M-2390, 12 p, 2 fig., 6 tab.

Bouladon J. (1968) - Le platine et son groupe. Éléments de gîtologie prévisionnelle. Note BRGM n° 68SGL157GIT. 16 p.

British Geological Survey (2012) - Risk list 2012, 9 p. www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=2643.

Brook M.A. (2006) - Platinum in silicone breast implants. Biomaterials 27, 2006, p. 3274-3286, 3 fig.

Brown T.J. et al. (BGS, 2011) - European Mineral Statistics 2007-2011, 2011, 362 p. www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1389.

Brown T.J. et al. (BGS, 2013) - World Mineral Production 2007-2011, 85 p. www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=2701.

Buchert M., Schüler D., Bleher D. (UNEP, 2009) - Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Öko-Institut, Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), 112 p. www.unep.fr/shared/publications/pdf/DITx1202xPA-Critical%20Metals%20and%20their%20Recycling%20Potential.pdf.

Burg J.P., Bodinier J.L. et al. (2009) - Translithospheric mantle diapirism: geological evidence and numerical modelling of the Kondyor zoned ultramafic complex (Russian Far-East). *Journal of Petrology*, Vol. 50, No. 2, p. 289-321, 15 fig., 5 tab.

Carter D. Ryan M., Wing J. (Fuel Cell Today, 2012) - Fuel Cell Industry Review 2012. 54 p. www.fuelcelltoday.com/media/1713685/fct_review_2012.pdf.

Cawthorn R.G. (1999) - The platinum and palladium resources of the Bushveld complex. *South African Journal of Sciences* 95, Nov.Dec. 1999, p. 481-489, 4 fig., 6 tab.

CNUCED (2012) - Informations sur le palladium. www.unctad.info/fr/Infocomm/Metaux-Mineraux/Palladium/.

CNUCED (2012) - Informations sur le platine. www.unctad.info/fr/Infocomm/Metaux-Mineraux/Platine/.

Coombes J., Cowley A. (Mining Journal, 2013) - Focus Platinum – Plummeting production, *in Mining Journal*, May 24, 2013.

Deschamps Y. (2003) - Les enjeux des éléments du groupe du platine dans la filière catalyse. BRGM. 4 p.

Durden T (2013) - Visualizing platinum and palladium place in the world. www.zerohedge.com/news/2013-01-24/visualizing-platinum-palladiums-place-world.

Eckstrand O.R., Hulbert L.J. (2007) - Magmatic nickel-copper-platinum group element deposits. in Goodfellow ed., *Mineral deposits of Canada*, p. 205-222.

Fontana J. (2006) - Phoscorite-carbonatite pipe complexes. A promising new platinum-group elements target in Brazil. *Platinum Metals review*, 2006, 50, (3), p.134-142.

Forrest S. (2013) - Platinum-Group Metals: Future Fundamentals. SFA-Oxford presentation to the Japan Sustainable Mining, Investment and Technology Business Forum, May 2013. www.j-sumit.org/common/pdf/program/16/a/16A1440StephenForrestPGM16052013.pdf.

GFMS, Umicore, Öko-Institut (2006) - Material Flow of Platinum Group Metals – Executive Summary. 8 p. www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability/show_materialsFlowOfPGMs.pdf.

Graedel T.E. et al. (UNEP, 2010) - Metal stocks in society, scientific synthesis. Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), 44 p., 7 fig., 8 app. www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metalstocksinsociety.pdf

Graedel T.E. et al. (UNEP, 2011) - Recycling rates of metals, a status report. Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), 48 p., 4 fig., 2 app. www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/MetalsRecyclingRates110412-1.pdf

Griffith W.P. (2004) - Bicentenary of four platinum group metals. Part II: Osmium and Iridium – Events surrounding their discoveries. *Platinum Metals Review*, 2004, 48 (4), p.182-189.

Guilloux L., Méloux J. (1987) - Le platine. Données économiques. Description et approche typologique des principaux gisements. Guides de recherche. Rapport BRGM 87DAM013DEX, mars 1987. 192 p., 57 fig., 23 tab., 1 ann.

Gunn G., Benham A. (British Geological Survey, 2009) - Mineral profile: Platinum, 31 p., 2009. www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1401.

Hagelüken C. (2005) - Precious metals process catalysts. Material flows and recycling. Supplement to Chemistry Today Vol. 24 nr 2, 4 p.

Hagelüken C. (2006) - 25 prominent and promising applications using platinum group metals. IPA Fact sheet. www.ipa-news.com/en/files/25_applications_of_pgms.pdf.

Hagelüken C., Buchert M., Ryan P. (2006) - Materials flow of platinum group metals in Germany. Proceedings of the 13th international conference on life cycle engineering, 2006, p. 477-482. www.ipa-news.com/en/files/25_applications_of_pgms.pdf.

Han Y., Ma W., Dong Z., Li S., Gong S. (2008) - Effect of ruthenium on microstructure and stress rupture properties of a single crystal Ni-based superalloy. *Superalloys 2008*, pp.619-628, 11 fig., 3 tab.

Haynes W.M., Lide D.R. (2011) - CRC Handbook of Chemistry and Physics, 92nd edition 2011-2012, CRC Press, London.

INSG (2013) - Nickel-based superalloys. INSG briefing papers No.20, April 2013. 9 p.

Jébrak M., Marcoux E. (2008) - Géologie des ressources minérales, 2008, 667 p.

Johnson Matthey Plc (2013) - Platinum 2013. 57 p. www.platinum.matthey.com/media/1614079/platinum_2013.pdf.

Johnson Matthey Plc (2013) - Platinum 2013 slide presentation. www.platinum.matthey.com/media/1615109/platinum_2013_slide_presentation.pdf.

Kolesnikova M. (2013) - Platinum posts biggest shortage since 2002 as output contracts. Bloomberg 13/05/2013. www.bloomberg.com/news/2013-05-13/platinum-posts-biggest-shortage-since-2002-as-output-contracts.html.

Kolver L. (2012) - 4 000 000 oz platinum supply deficit expected. Mining Weekly, 23 nov. 2012.

Loferski P.J. (USGS, 2013) - 2012 Minerals Yearbook: Platinum-Group Metals, 13 p., <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/myb1-2012-plati.pdf>.

Loferski P.J. (USGS, 2013) - Mineral Commodity Summaries: Platinum-Group Metals, 2011, 2 p. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2013-plati.pdf>.

Loferski P.J. (USGS, 2013) - Mineral Industry surveys: Platinum-Group Metals, August 2013, 5 p. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mis-201308-plati.pdf>.

Lorand J.P., Alard O., Luguet A. (2010) - Platinum-Group element micronuggets and refertilization process in Lherz orogenic periodotite (northeastern Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science Letters* 289 (2010), p. 298-310, 7 fig., 3 tab.

Lorand J.P. (2010) - Inventaire et origine du cortège de microminéraux de métaux précieux (platine, palladium, ruthénium, osmium, iridium, or) dans les lherzolites des pyrénées ariégeoises, France. *Le Règne Minéral* n° 95, sept.-oct. 2010, p. 17-21.

Mann A. (2012) - Tech billionaires plan audacious mission to mine asteroids. www.wired.com/wiredscience/2012/04/planetary-resources-asteroid-mining/.

Maurizot P. (1993) - Inventaire des ressources minières de la métropole et des départements et territoires d'outre-mer. Prospection des éléments du groupe du platine dans le massif du Sud (Nouvelle-Calédonie). Campagne 1993. BRGM, rapport R 37788. 107 p., 18 fig., 15 tab., 5 ann.

Meinert L. (USGS, 2012) - Overview of critical materials. The view from the USA. Usgs presentation to the US-EU workshop on informed policy-making through improved mineral raw materials data, September 11-13th, 2012.

Metals Economic Group (2012) - Production costs: strong PGM prices outpace operating costs increases. Metals Economic Group Strategic Report Jan/Feb 2012, p. 24-28.

Miezitis Y. (2013) - Platinum Group Elements, Australia's identified mineral resources 2012. Geoscience Australia. www.ga.gov.au/products-services/publications/aimr/platinum-group-elements.html.

Monier V., Escalon V., Cassowitz L., Massaril F. (ADEME, 2010) - Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares, 1^{ère} partie, 2010, 222 p., p. 201-208. www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=9F0C900EBCD788AC0D4A0C8D9D056D751297848946008.pdf

Ohnenstetter M. (1992) - Platinum Group elements enrichment in the upper mantle peridotites of the Monte Maggiore ophiolitic massif (Corsica, France): Mineralogical evidence of ore-fluid metasomatism. *Mineralogy and Petrology* (1992) 46, p. 85-107. 3 fig., 6 tab., 2 pl.

Peterson J.A. (USGS, 1994) - Platinum-Group Elements in sedimentary environments in the conterminous United States. USGS Bulletin No. 2049-A, 44 p., 2 fig., 1 tab.

Pichard A. et al. (INERIS, 2005) - Platine, sels et complexes. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. 40 p. www.ineris.fr/substances/fr/substance/getDocument/2827

Piestrzynski A., Pieczonka J., Gluszek A. (2002) - Redbed-type gold mineralisation, Kupferschiefer, south-west Poland. *Mineralium Deposita* (2002) 37, p.512-528, 12 fig., 5 tab.

Raw Material Group (2011) - Raw Material Data (base de données).

Risk and Policy Analysts Ltd (2012) - Stockpiling of non-energy raw materials. Final report for the Directorate-General Enterprise and Industry of the European Commission, March 2012. 327 p. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/stockpiling-report_en.pdf.

Ryan B. (Mining Journal, 2013) - Insight: Platinum analysis, *in Mining Journal*, May 31, 2013.

Sanière A., Vinot S., avec la participation de **Christmann P.** (2010) - Li, Ni, Pt, Pd : des métaux « critiques » ? IFP Énergies Nouvelles, Panorama 2010. 9 p., 12 fig. www.ifpenergiesnouvelles.fr/content/download/69132/1492226/version/2/file/Panorama_2010_09-VF_Metaux-critiques.pdf

Sarcia J.A., Bouladon J. (1969) - Ressources mondiales de substances d'intérêt stratégique. Le platine et le palladium. Rapport BRGM confidentiel. 58 p., 13 fig.

SNL Metals Economic Group (2013) - The outlook for platinum. SNL Metals Economic Group Strategic Report May/June 2013, p. 41-49.

Stillwater Mining Company (2012) - Palladium fundamentals, 5 p. www.corporatereport.com/stillwater/Palladium_Fundamentals_9-26-2012.pdf.

Tin S., Zhang L. et al. (2008) - Linking the properties, processing and chemistry of advanced single crystal Ni-based superalloys. *Superalloys* 2008, p. 81-90, 10 fig., 2 tab.

Titanium Information Group (2012) - Data sheet No.13, Titanium alloys for sour service, 3 p. www.titaniuminfogroup.co.uk/userfiles/files/PDFs/data-sheet-13.pdf.

Titanium Information Group (2012) - Data sheet No.19, Titanium alloys, 2 p. www.titaniuminfogroup.co.uk/userfiles/files/PDFs/data-sheet-19.pdf.

Toussaint J.M. (2010) - Du platine découvert dans les Vosges. Vosges-Matin, L'Est Républicain, La Liberté de l'Est, 10 mai 2010.

U.S. Geological Survey (2011) - Platinum-Group Metals statistics, in Kelly, T.D., Hilliard H.E., George M.W and Loferski P.J. comps, Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140, <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/ds140-plati.xlsx>

U.S. Geological Survey (2011) - Mineral Resources Data System (MRDS), disponible en ligne : <http://tin.er.usgs.gov/mrds/>.

Weber L., Zsak G., Reichl C., Schatz M. (BMWFJ, 2012) - World Mining Data. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Austria.

Wilburn D.R. (USGS, 2012) - Global exploration and production capacity for platinum-group metals from 1995 through 2015. USGS Scientific Investigation Report 2012-5164, 26 p., 6 fig., 4 tab.

Wilburn D.R., Bleiwas D.I. (USGS, 2014) - Platinum-group metals – World supply and demand. USGS Open-File Report 2004-1224, 130 p., 18 fig., 2 tab.

Williams G.A., Turekian K.K. (2002) - Atmospheric supply of osmium to the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 66, No. 21, p. 3789-3791, 1 tab.

Willis P., Chapman A., Fryer A. (2012) - Study of by-products of copper, lead, zinc and nickel. Oakdene Hollins for ILZSG, INSG and ICSG. 216 p., 115 fig., 101 tab.

Yager T.R., Soto-Viruet Y., Barry J.J. (USGS, 2012) - Recent strikes in South Africa's platinum-group metal mines. Effects upon world platinum-group metal supplies. USGS Open-File report 2012-1273, 17 p., 7 tab.

Yeh A.C., Kawagishi K. et al. (2008) - Development of Si-bearing, 4th generation Ni-based single crystal superalloys. *Superalloys 2008*, p. 619-628, 11 fig., 3 tab.

Sites généraux sur les platinoïdes et certains usages

International Platinum Group Metals Association : www.ipa-news.com/en/

Société Chimique de France : www.societechimiquedefrance.fr

Fuel Cells 2000 : www.fuelcells.org

Goldsheetlinks - Platinum Resources : www.goldsheetlinks.com/plpt.htm

The PGM database : www.pgmdatabase.com/jmpgm/index.jsp

Platinum Investing News : <http://platinuminvestingnews.com>

The Minerals, Metals and Materials Society : www.tms.org

Association for Emission Control by Catalysts : www.aecc.be

Minor Metal Trade Association : www.mmta.co.uk

Sites et rapports annuels des sociétés minières et industriels concernées

Liens cités le long du texte du chapitre 6.



Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34