



Les platinoïdes

Claire BREGÉON, Ariane DELAIDE, Martin FENELON, Maxime ORLHAC, Laura SCHRAEN

SOMMAIRE

Propriétés &
données minières

Données
industrielles &
économiques

Enjeux géopolitiques
& recyclage

LES PLATINOÏDES

Tableau périodique des éléments chimiques

← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
 ← numéro atomique
 ← symbole chimique
 ← masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable]
 © [CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|----|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 1 | H | He | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| 2 | Li | Be | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| 3 | Na | Mg | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| 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 | La-71 | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| 7 | Fr | Ra | Ac-103 | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Ds | Rg | Cn | Nh | Fl | Mc | Lv | Ts | Og |
| | | | La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | |
| | | | Ac | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr | |

Métaux: Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métalloïdes
 Non métaux: Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés
 primordial, désintégration d'autres éléments, synthétique

- Ru** Ruthénium (Z=44)
- Os** Osmium (Z=76)
- Rh** Rhodium (Z=45)
- Ir** Iridium (Z=77)
- Pd** Palladium (Z=46)
- Pt** Platine (Z=78)



PROPRIÉTÉS PHYSICOCHEMIQUES

| | 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)



Propriétés communes

- Point de fusion élevé
- Bonne résistance mécanique aux variations de températures
- Coefficients de dilatation thermique modérés à faibles
- Résistance à la corrosion et à l'oxydation
- Bonne conductivité
- Propriétés catalytiques exceptionnelles

PROPRIÉTÉS PHYSICOCHEMIQUES

| | 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)



≠

Différences

- Densité
 - Platinoïdes légers : Ru, Rh, Pd (entre 12 et 12.5) ; "légers" mais tout de même un peu plus denses que le plomb
 - Platinoïdes lourds : Os, Ir, Pt (entre 21.45 et 22.6) ; métaux les plus denses qui existent
- Dureté
 - Platine et palladium assez tendres
 - Osmium très dur

FORMATION ET RÉSERVES DES PLATINOÏDES

Abondance moyenne dans la croute terrestre

| 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 |

Les treize éléments les plus rares sur les 83 éléments significativement présents dans l'écorce terrestre.

Principaux minéraux du groupe des platines
(Association Minéralogique internationale)

Principaux minéraux des Eléments du Groupe du Platine reconnus 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 |
| Éléments 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, sulfoarséniures | | | | | | | | | | | |
| Laurite | (Ru,Os) ₂ S ₂ | Kingstonite | Rh ₃ S ₄ | Vysotskite | (Pd,Ni)S | Erlichmanite | Os ₂ S ₂ | Kashinite | Ir ₂ S ₃ | Cooperite | PtS |
| Ruarsite | (Ru,Os)AsS | Hollingworthite | (Rh,Pt,Pd)AsS | | | Osarsite | OsAsS | Irarsite | IrAsS | Platarsite | PtAsS |
| | | Bowieite | Rh ₂ S ₃ | | | | | | | Daomanite | CuPtAsS ₂ |
| Séléniures | | | | | | | | | | | |
| | | | | Verbeekite | PdSe ₂ | | | | | Sudovikovite | PtSe ₂ |
| | | | | Palladseite | Pd ₁₇ Se ₁₅ | | | | | | |
| | | | | Oosterboschite | (Pd,Cu) ₇ Se ₅ | | | | | | |
| Tellurures, telluroantimoniures, tellurobismuthures | | | | | | | | | | | |
| | | | | Kotulskite | PdTe | | | Shuangfengite | IrTe ₂ | Monchéite | (Pt,Pd)(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 | | | | | | | | | | | |
| Ruthenarsenite | (Ru,Ni)As | Cherepanovite | RhAs | Stillwaterite | Pd ₉ As ₃ | Omeite | OsAs ₂ | Iridarsenite | IrAs ₂ | Sperryite | PtAs ₂ |
| Anduoite | RuAs ₂ | Zaccariniite | RhNiAs | Isomertieite | Pd ₁₁ As ₂ Sb ₂ | | | | | | |
| Antimoniures, antimonobismuthures | | | | | | | | | | | |
| | | | | Sudburyite | (Pd,Ni)Sb | | | | | Genkinite | (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

Source des données : J.F. Labbé-BRGM, 2014 d'après www.ima-mineralogy.org



FORMATION ET RÉSERVES DES PLATINOÏDES

| Palladium | Platine | Rhodium | Autres | Total |
|-----------|---------|---------|--------|---------|
| 211,3 t | 192,7 t | 23,8 t | 50 t | 477,8 t |

Production minière en 2021

Principaux Gisements en Platinoïdes



| | | |
|---------------------------|-------|--------|
| Bushveld (Afrique du Sud) | 286 t | 63 % |
| Norilsk-Talnakh (Russie) | 107 t | 23,7 % |
| StillWater (Etats-Unis) | 28 t | 6,2 % |
| Sudbury (Canada) | | |
| Great Dyke (Zymbabwe) | 30 t | 6,6 % |



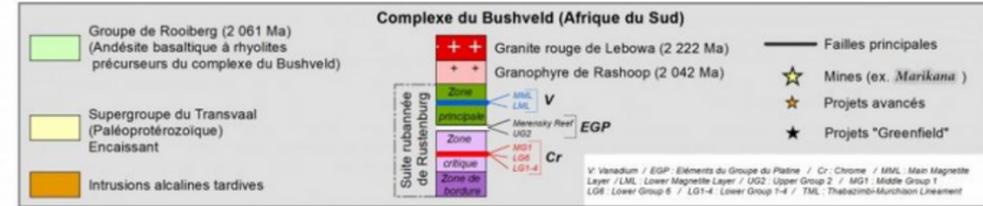
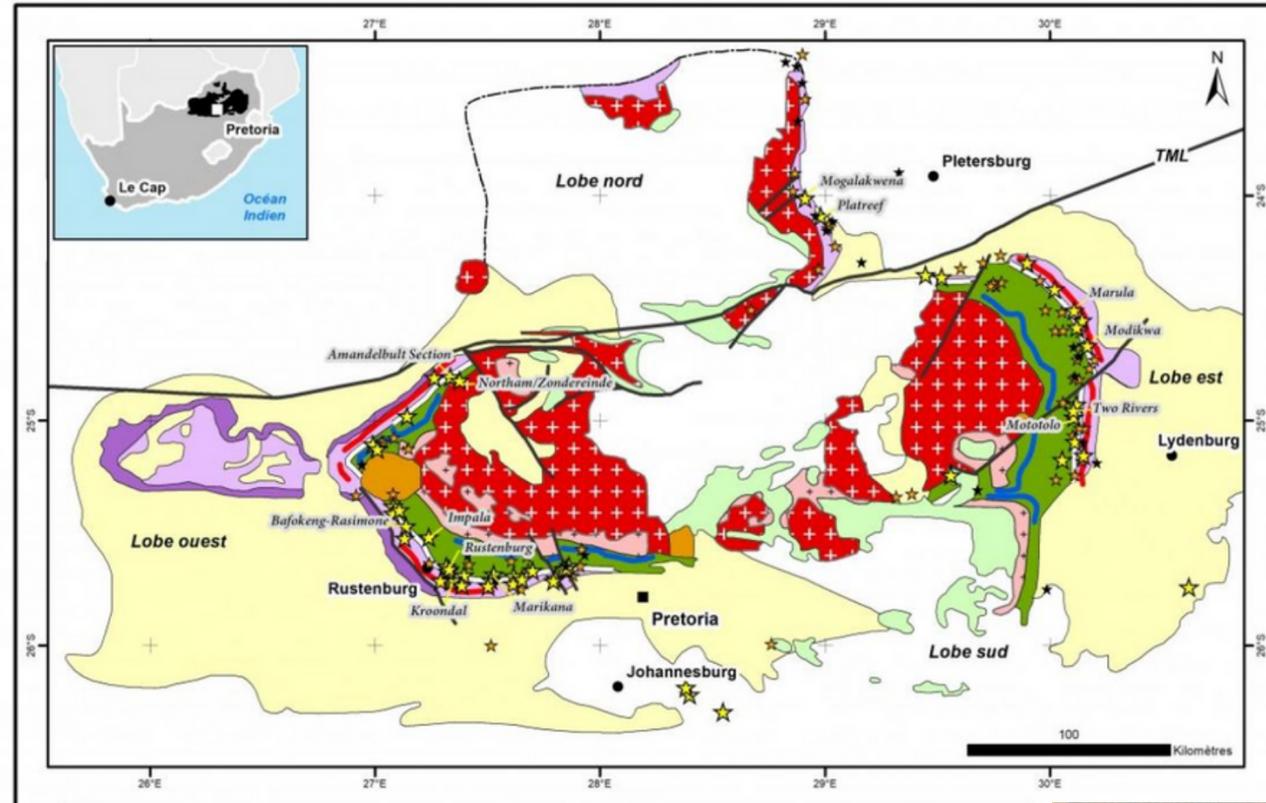
LONMIN



Teneur en platinoïdes : De 3 à 15 g/t en fonction de la provenance et du type du minerai.

FORMATION ET RÉSERVES DES PLATINOÏDES

Les gisements de Bushveld en Afrique du Sud



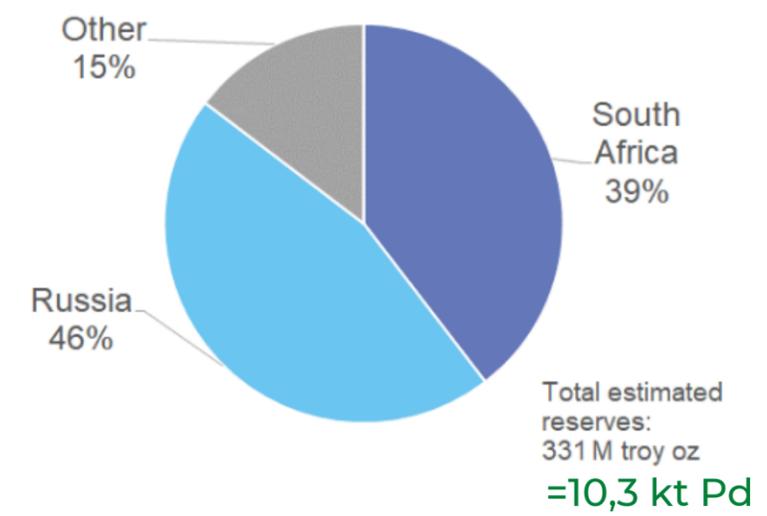
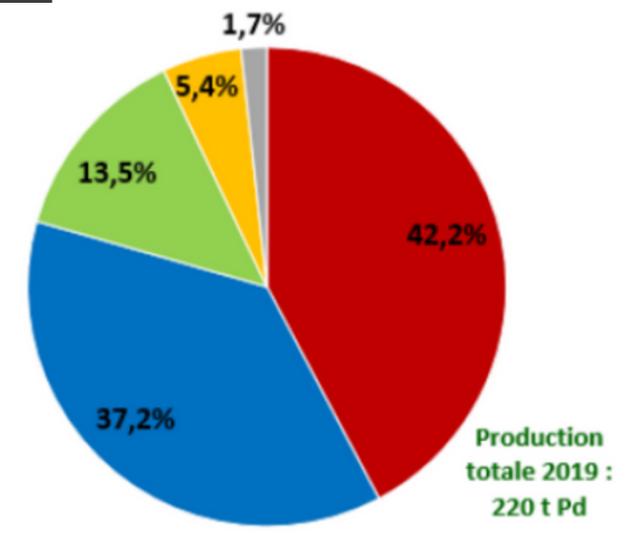
450km*150 km
 25 sites d'exploitation minières

Contient : { 70 à 95 % des réserves mondiales de platine.
 80 % des réserves de chrome.
 40 à 50 % des réserves de vanadium.



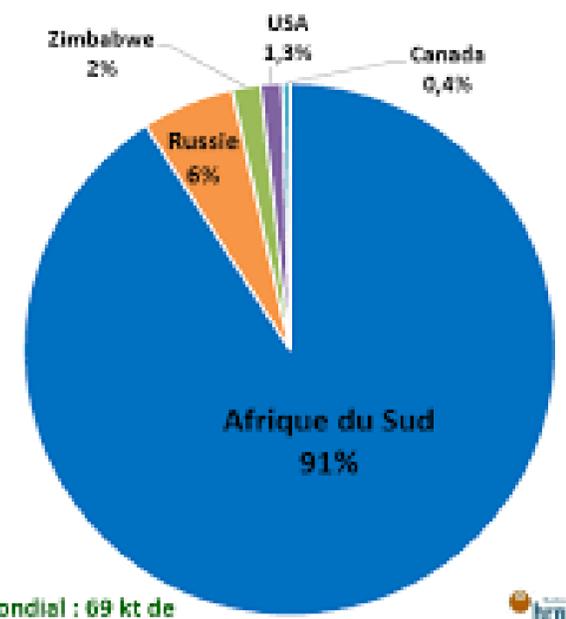
Pd

L'Afrique du Sud partage le monopole de la production de palladium avec la Russie.



Production minière de palladium (2019, BRGM)

Réserves minières de palladium estimées (2021, platinuminvestment.com)



Total mondial : 69 kt de platinoïdes, dont 1,5 kt Ir

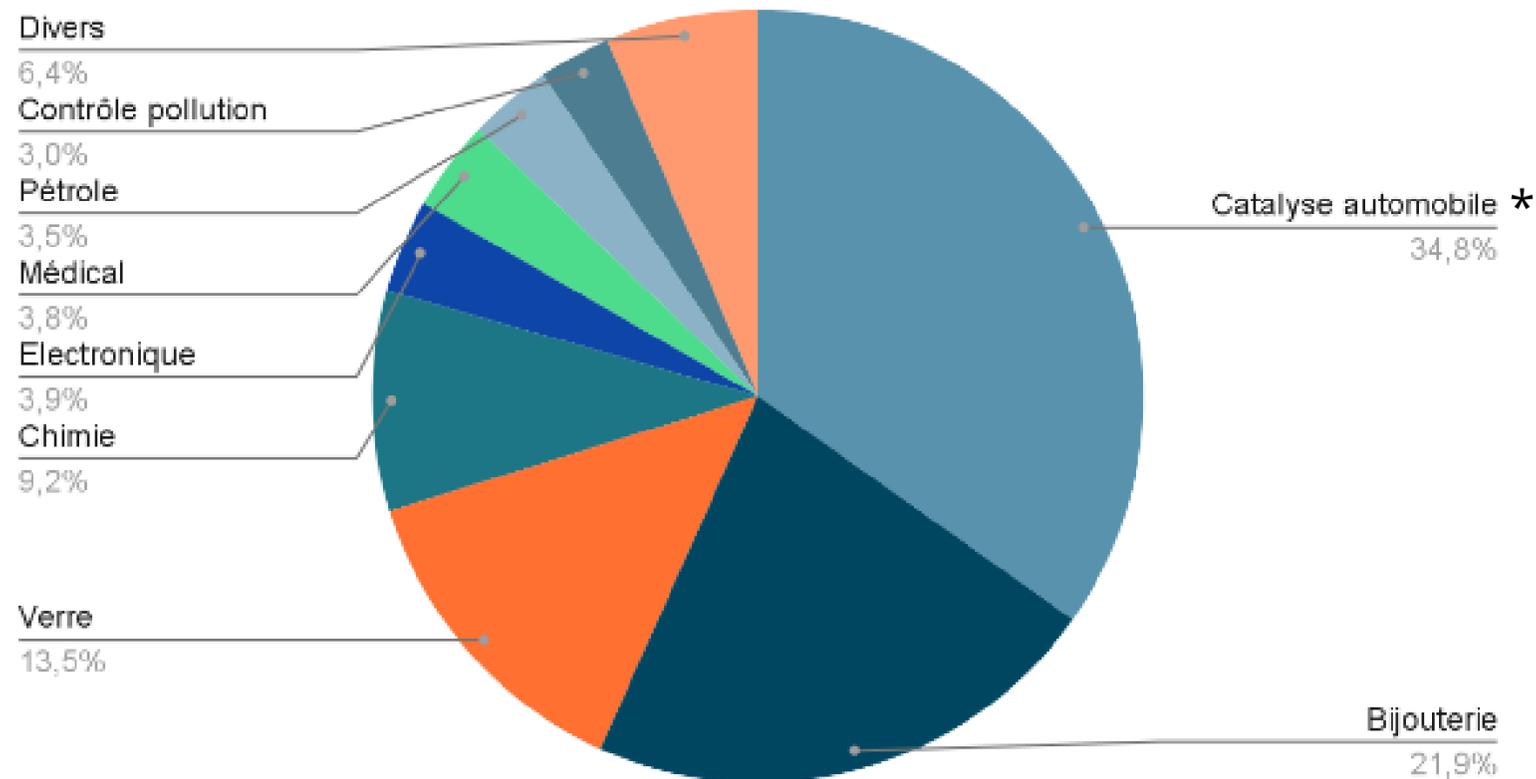
Estimation des réserves en platinoïdes en 2019 (BRGM)



LES UTILISATIONS

Les platinoïdes sont utilisés principalement dans l'industrie automobile pour de la catalyse

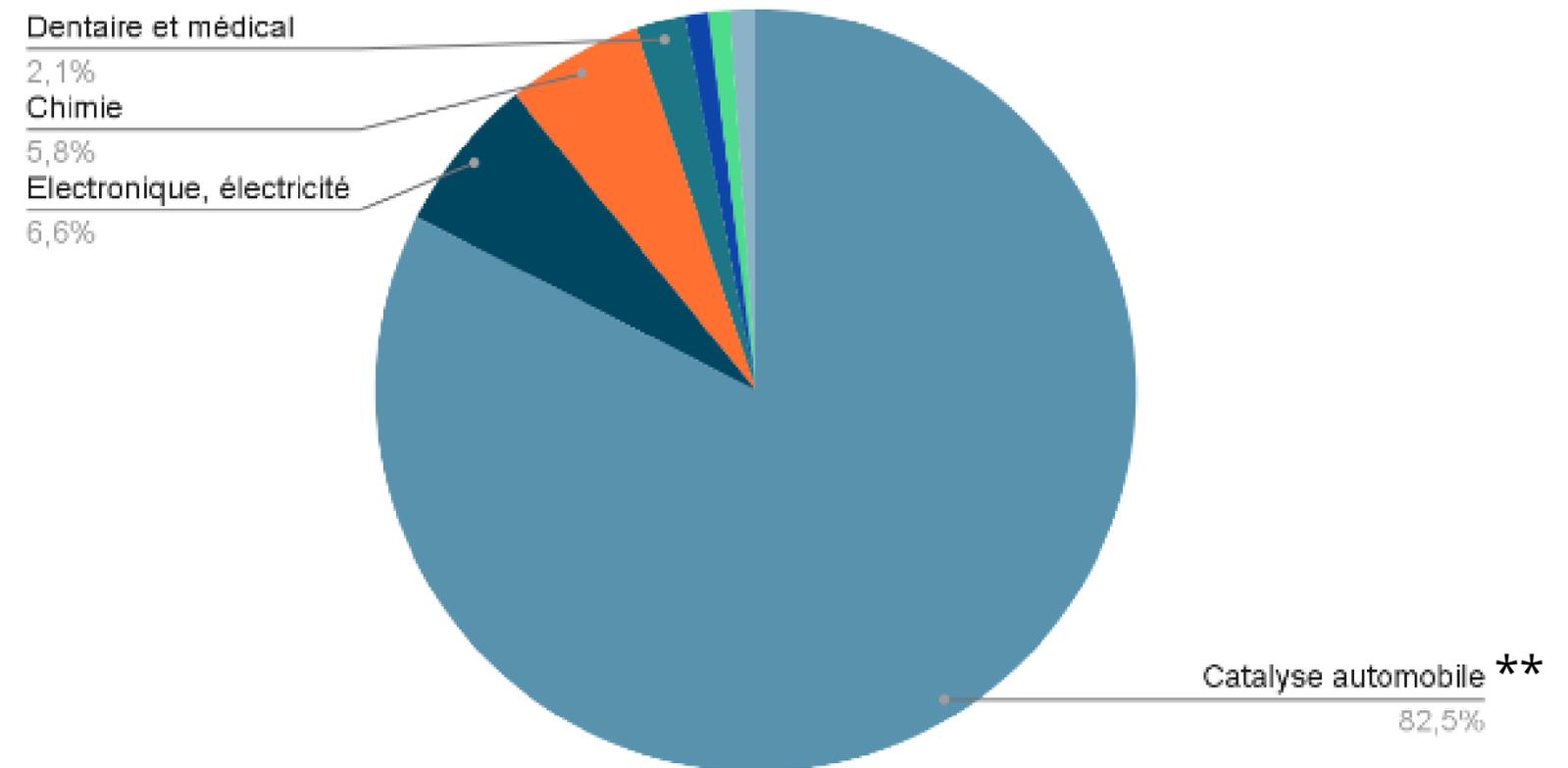
Utilisation du platine en 2021



Source : Johnson Matthey

*Catalyse plate pour le diesel

Utilisation du Palladium en 2021

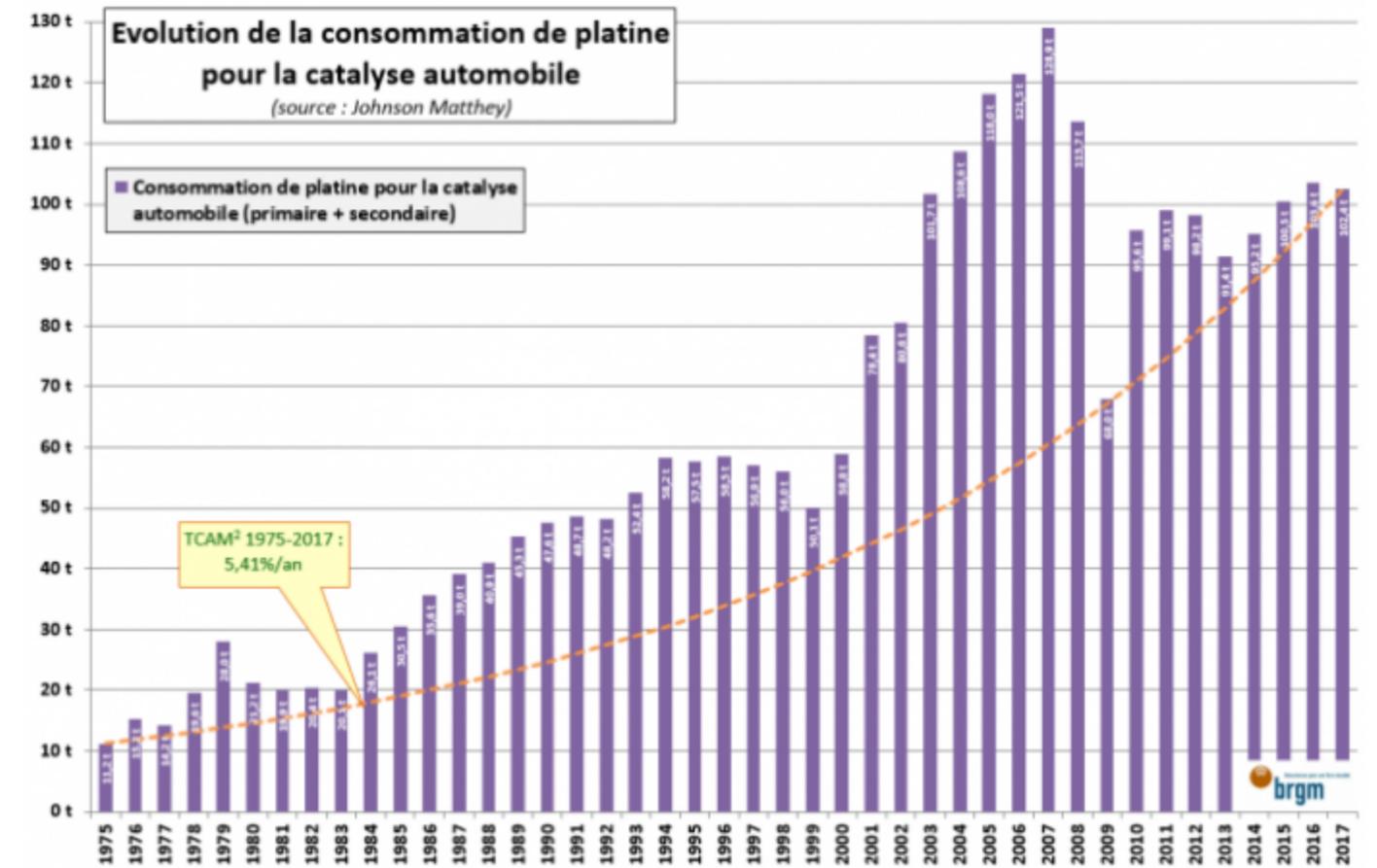
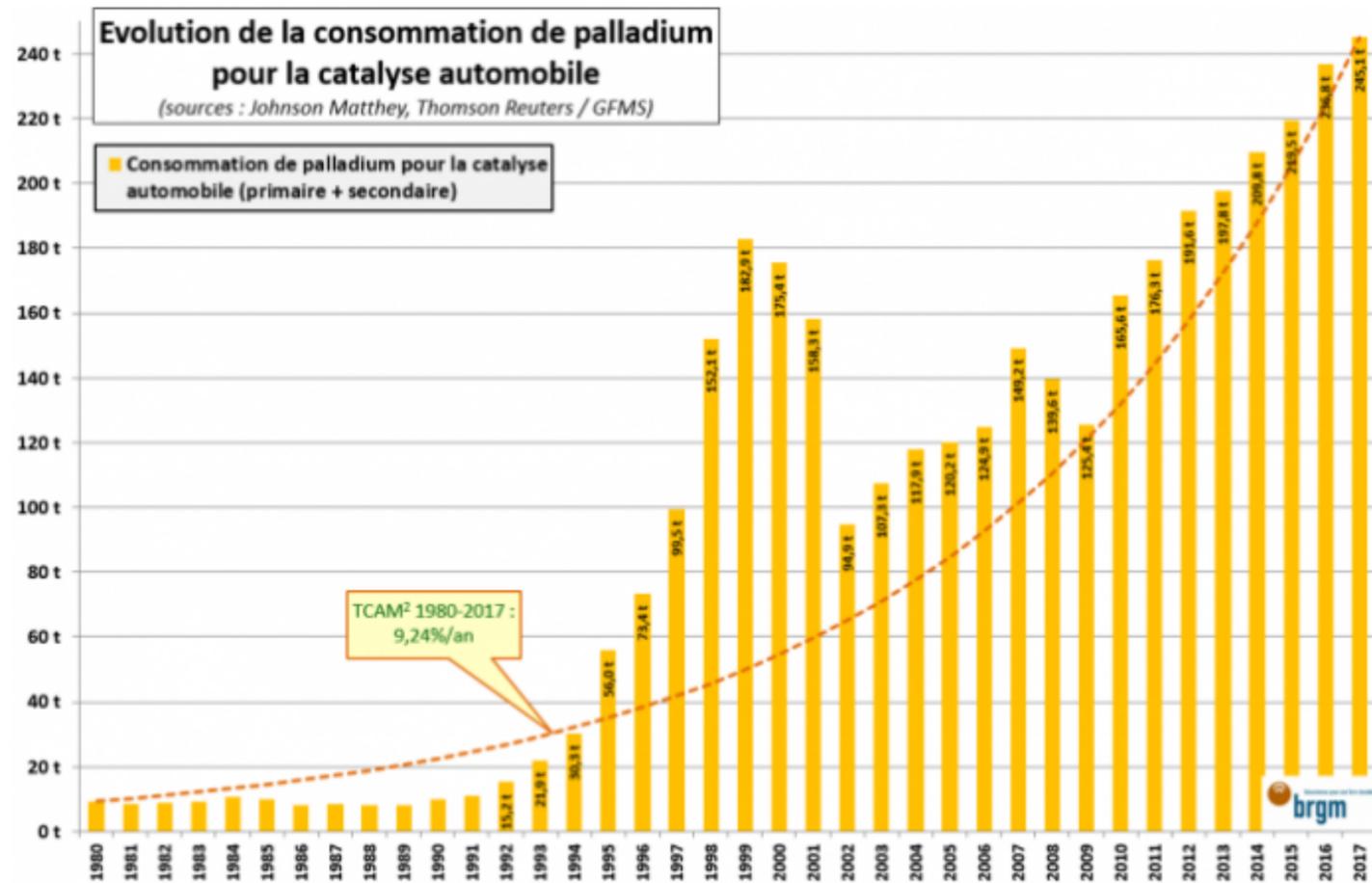


Source : Johnson Matthey

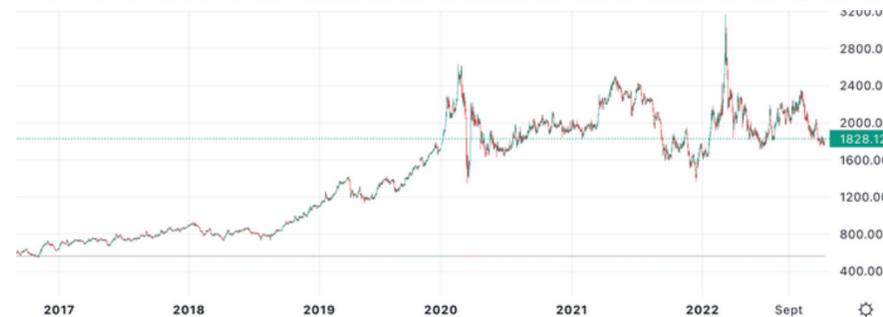
**Catalyse essence

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION

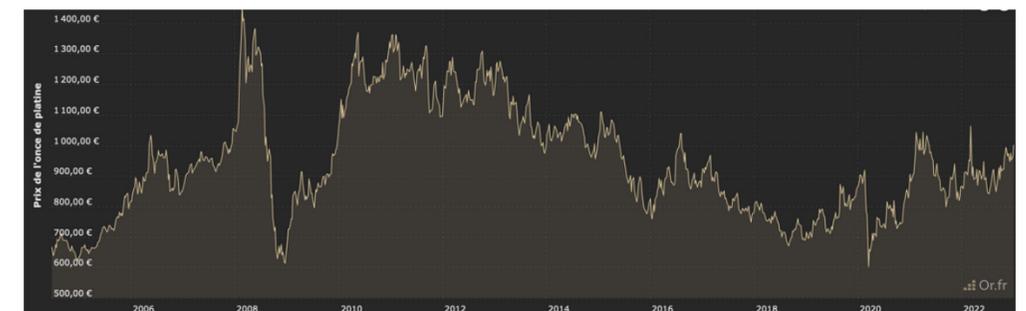
La demande en platinoïdes n'a fait que s'accroître dans le secteur automobile depuis les années 2000



Évolution du prix du palladium
LES PLATINOÏDES

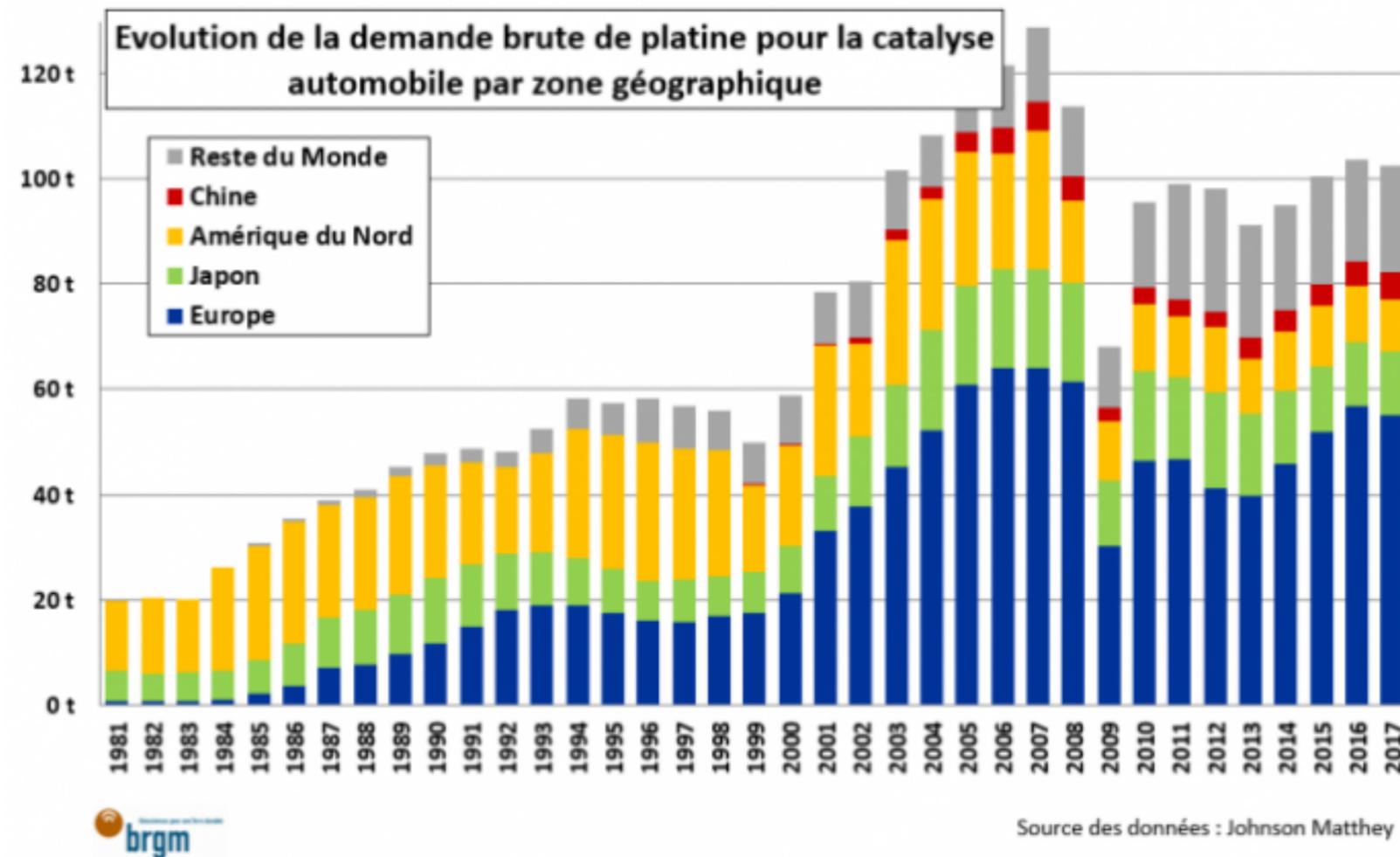


Évolution du prix du platine

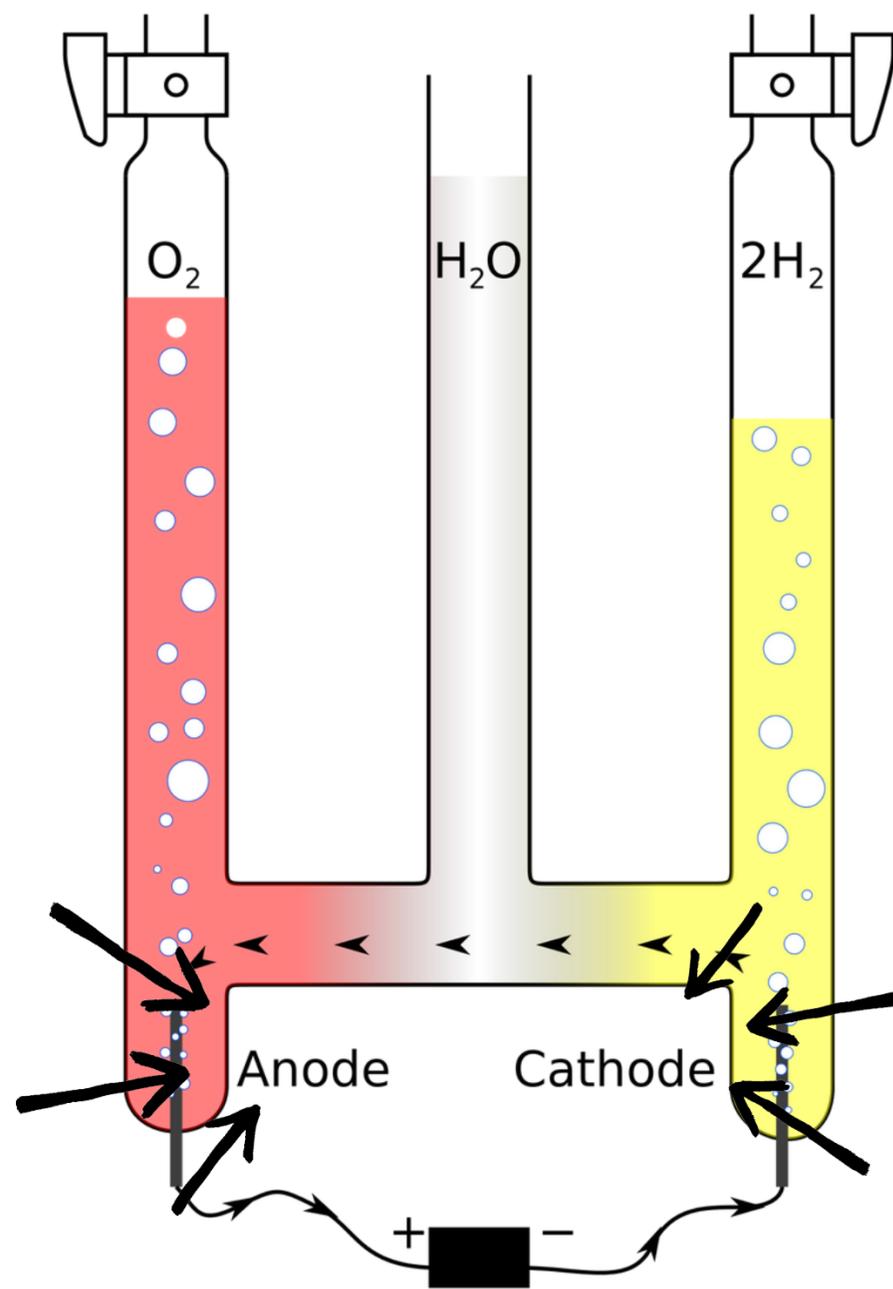


ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION

Et l'Europe est la principale zone géographique consommatrice de platine



Source : Wikipédia



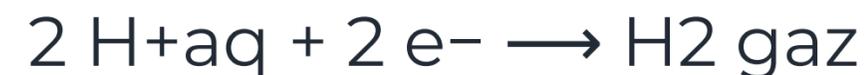
PLATINE & TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Production d'hydrogène par électrolyse qui est un procédé électrochimique par lequel on va venir créer une réaction grâce à un courant électrique.

- Anode:



- Cathode:



Réaction globale:

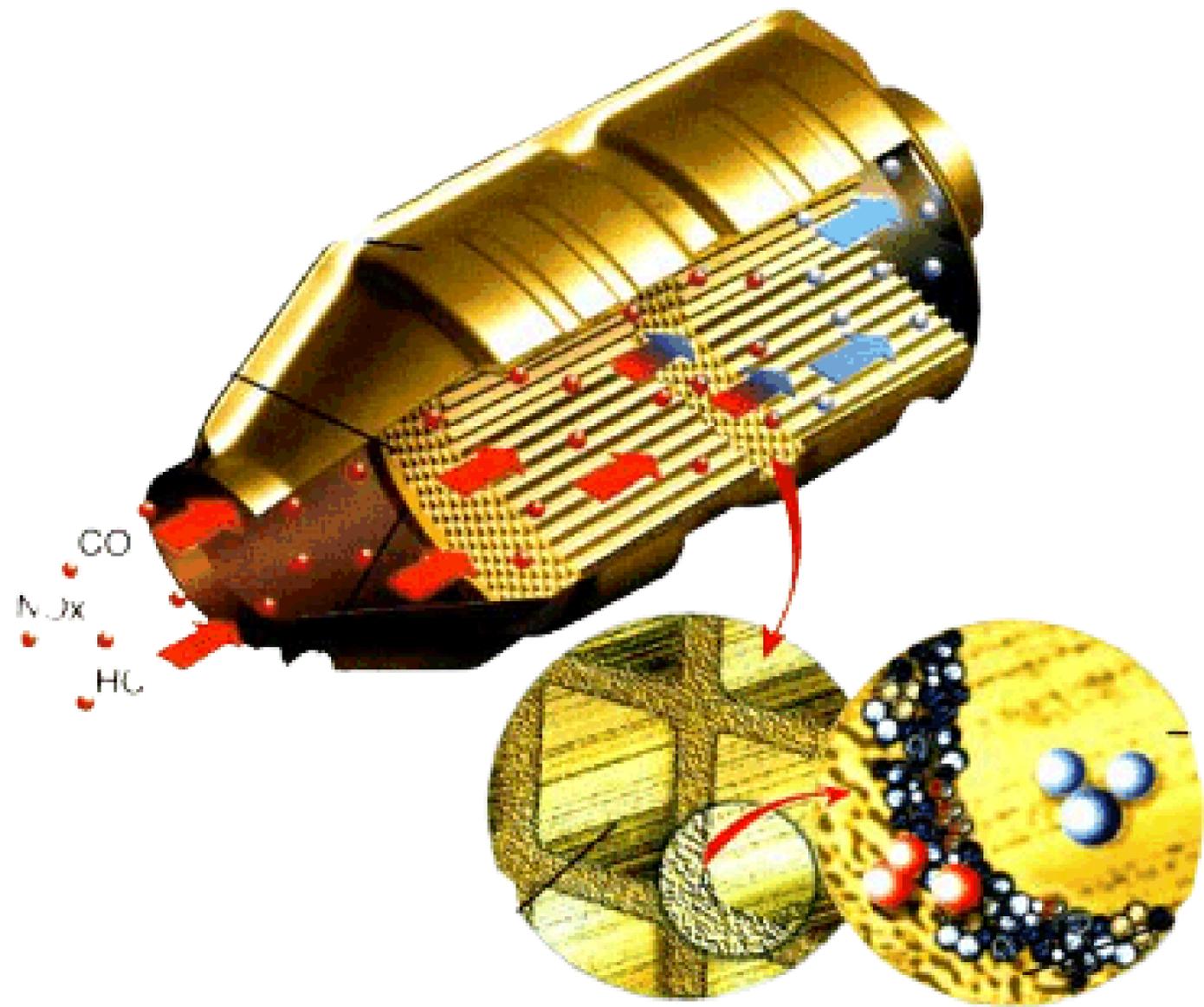


Le platine est le composant principal des deux électrodes (anode et cathode)

PALLADIUM & TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Réactions simultanées dans un pot catalytique à 3 voies :

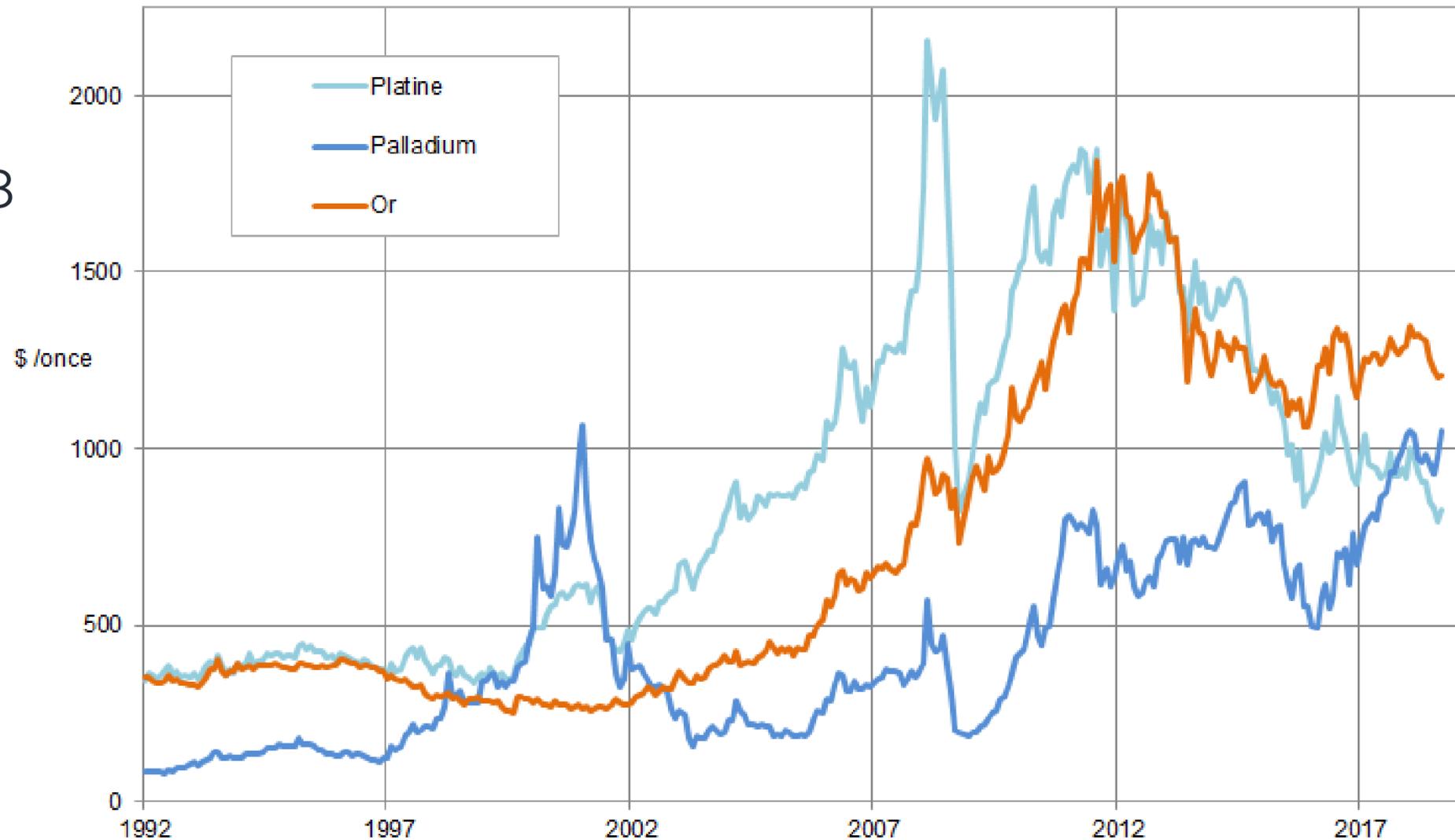
- Réaction 1: $2\text{NO} + 2\text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{CO}_2$
- Réaction 2: $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$
- Réaction 3: $4\text{C}_x\text{H}_y + (4x+y)\text{O}_2 \rightarrow 4x\text{CO}_2 + 2y\text{H}_2\text{O}$



Source : Wikipédia

DONNÉES ÉCONOMIQUES DES PLATINOÏDES

Le platine est moins cher que l'or ou le palladium



Prix du platine le 8 décembre 2022

1 kilogramme
30 688,53 €

Source : or.fr

Prix du palladium le 8 décembre 2022

1 kilogramme
58 900,17 €

Source : or.fr

Source : BullionVault via LBMA, LPPM

ENJEUX GÉOPOLITIQUES ACTUELS

Un contexte géopolitique défavorable

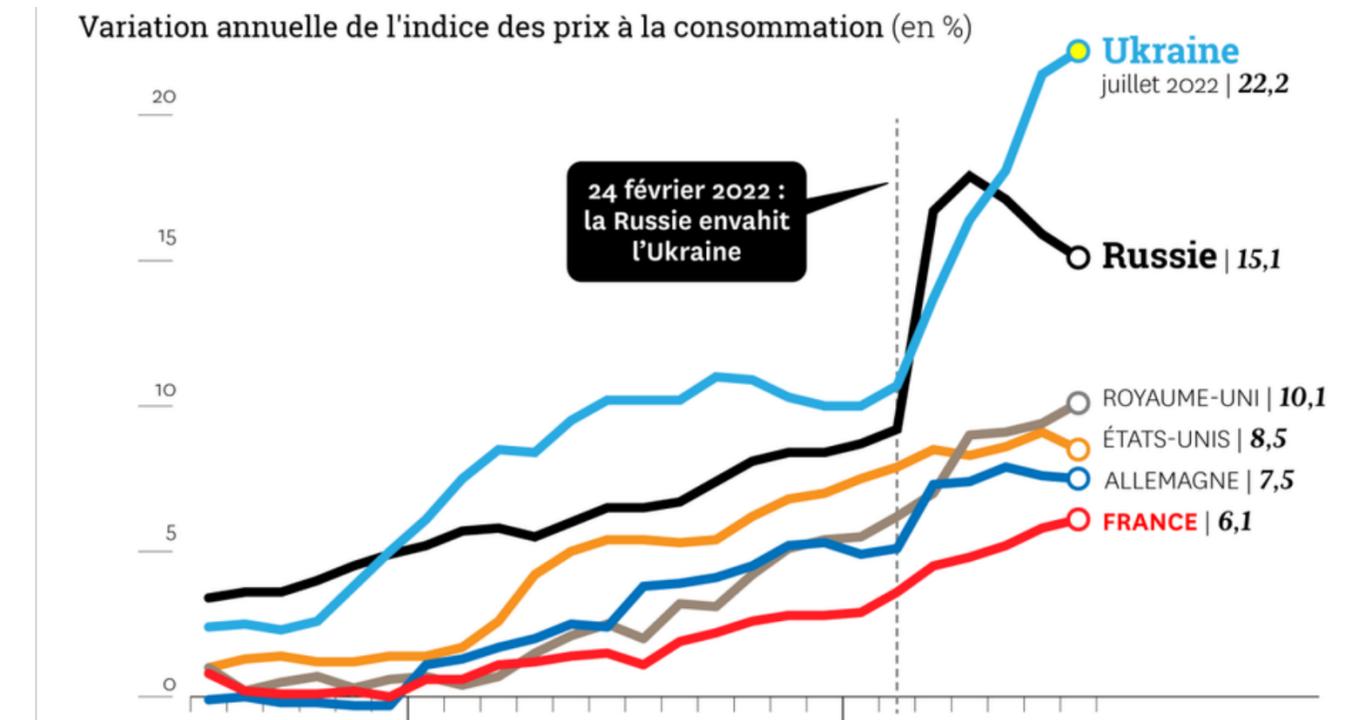
1 Spirale inflationniste

2 Problèmes d'approvisionnement

3 Contexte de guerre

37%
du Palladium mondial
exporté de Russie
en 2021

LES PLATINOÏDES



Sources : Courrier International

ENJEUX GÉOPOLITIQUES FUTURS

De fortes dépendances

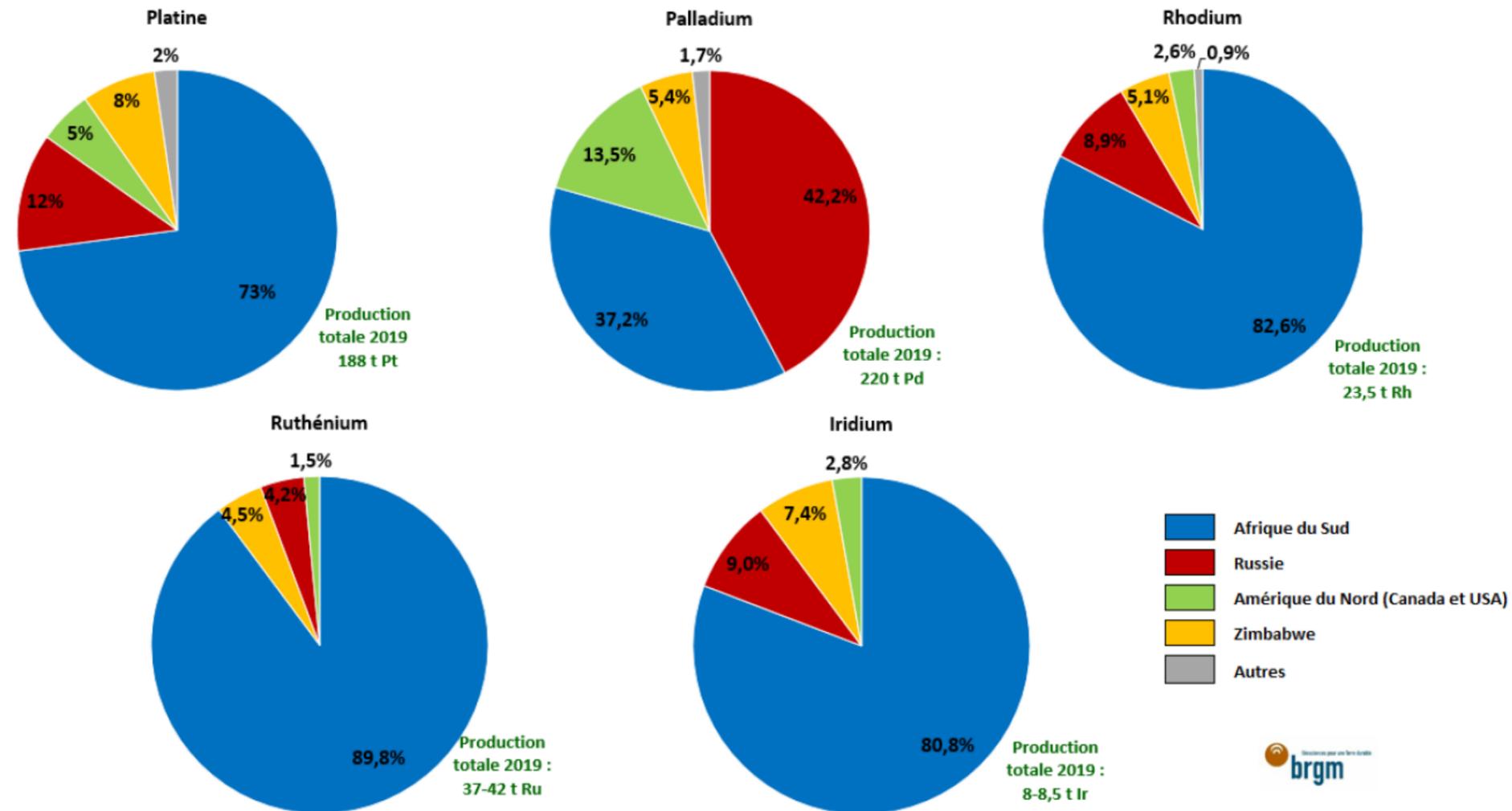
- D'un côté, croissance de la demande en métaux stratégiques (les platinoïdes font parti de la liste des substances critiques pour l'UE)
- De l'autre, des disponibilités étroites et une concentration presque monopolistique en Afrique du Sud

>70%

du platine mondial produit en Afrique du Sud

Répartition de la production minière mondiale de platinoïdes par pays en 2019

(Source : Johnson Matthey, 2020 pour platine, palladium et rhodium ; SFA (Oxford) & Heraeus, 2020 pour ruthénium et iridium)



Sources : BRGM

DES THÉÂTRES DE BATAILLES

10 ans après, presque rien n'a changé

Massacre de Marikana, véritable symbole

- Luites sociales & environnementales encore d'actualité, des grèves massives

34

mineurs grévistes abattus
en Afrique du Sud

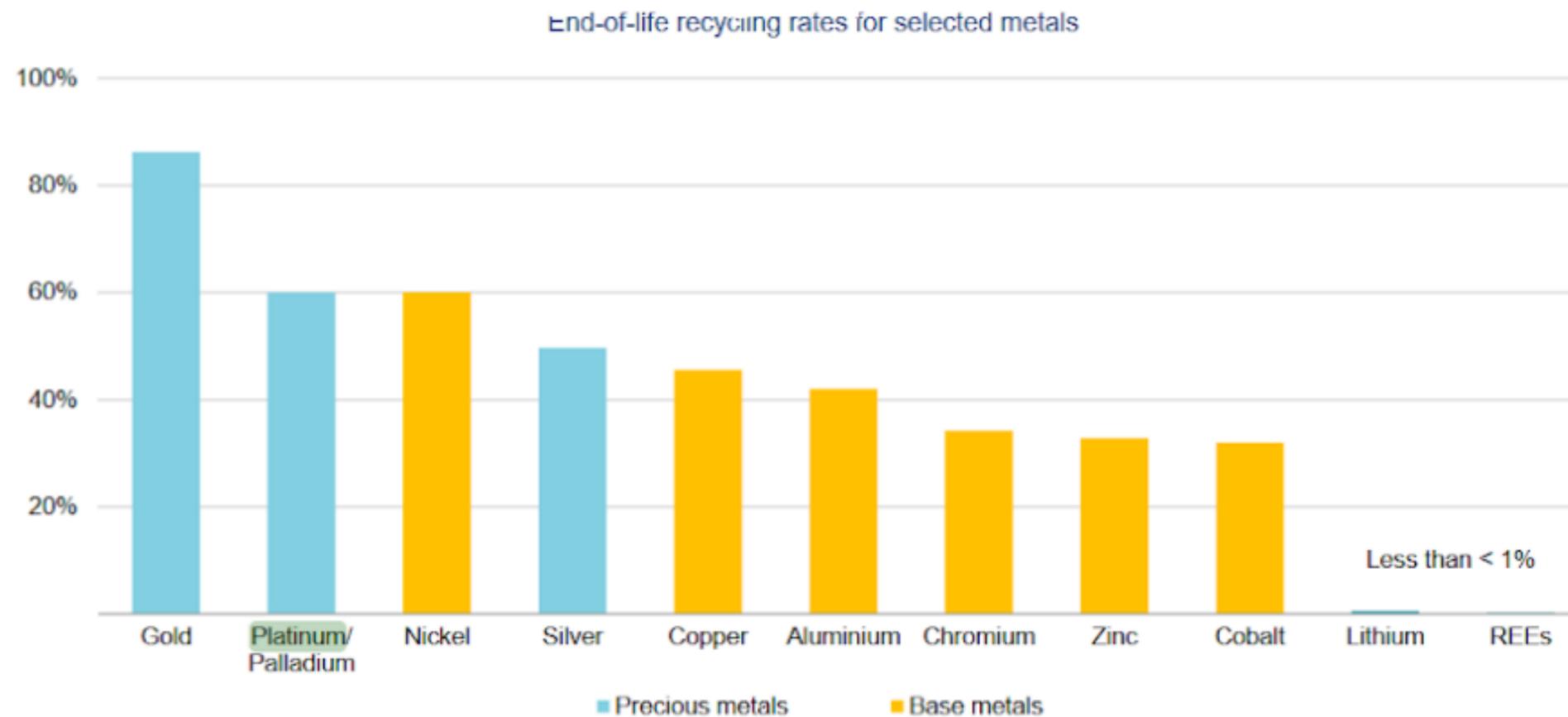
août 2012



Source : *The Guardian*

RECYCLAGE DES PLATINOÏDES

Today's recycling rates vary by metal depending on the ease of collection, price levels and market maturity



IEA. All rights reserved.

Sources: Henckens (2021); UNEP (2011) for aluminium; Sverdrup and Ragnarsdottir (2016) for platinum and palladium; OECD (2019) for nickel and cobalt.

PRINCIPALES MÉTHODES DE RECYCLAGE



Pyroméallurgie :
fusion à haute température,
obtention d'un produit affiné



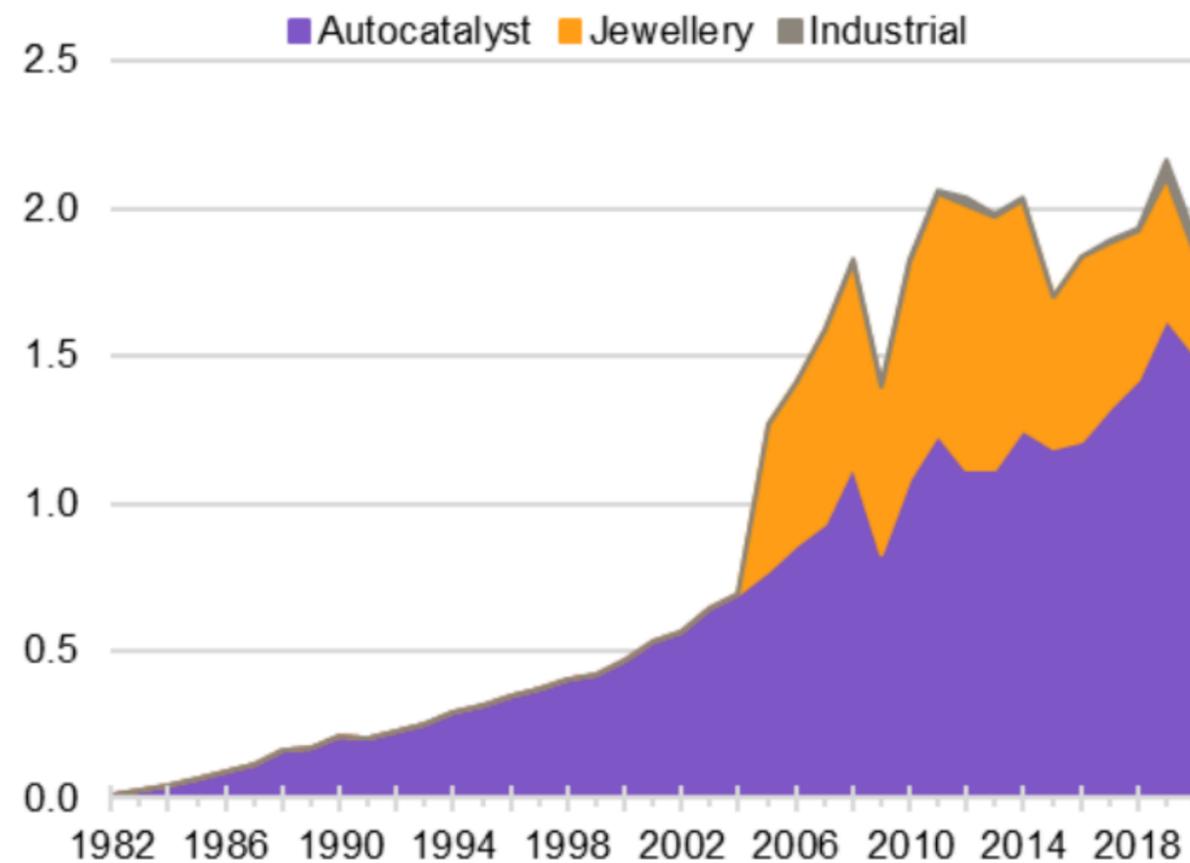
Hydroméallurgie :
dissolution des composants,
récupération par électrolyse,
purification par réduction



Régénération :
élimination des poisons fixés
sur la surface du catalyseur
(catalyseurs de reformage)

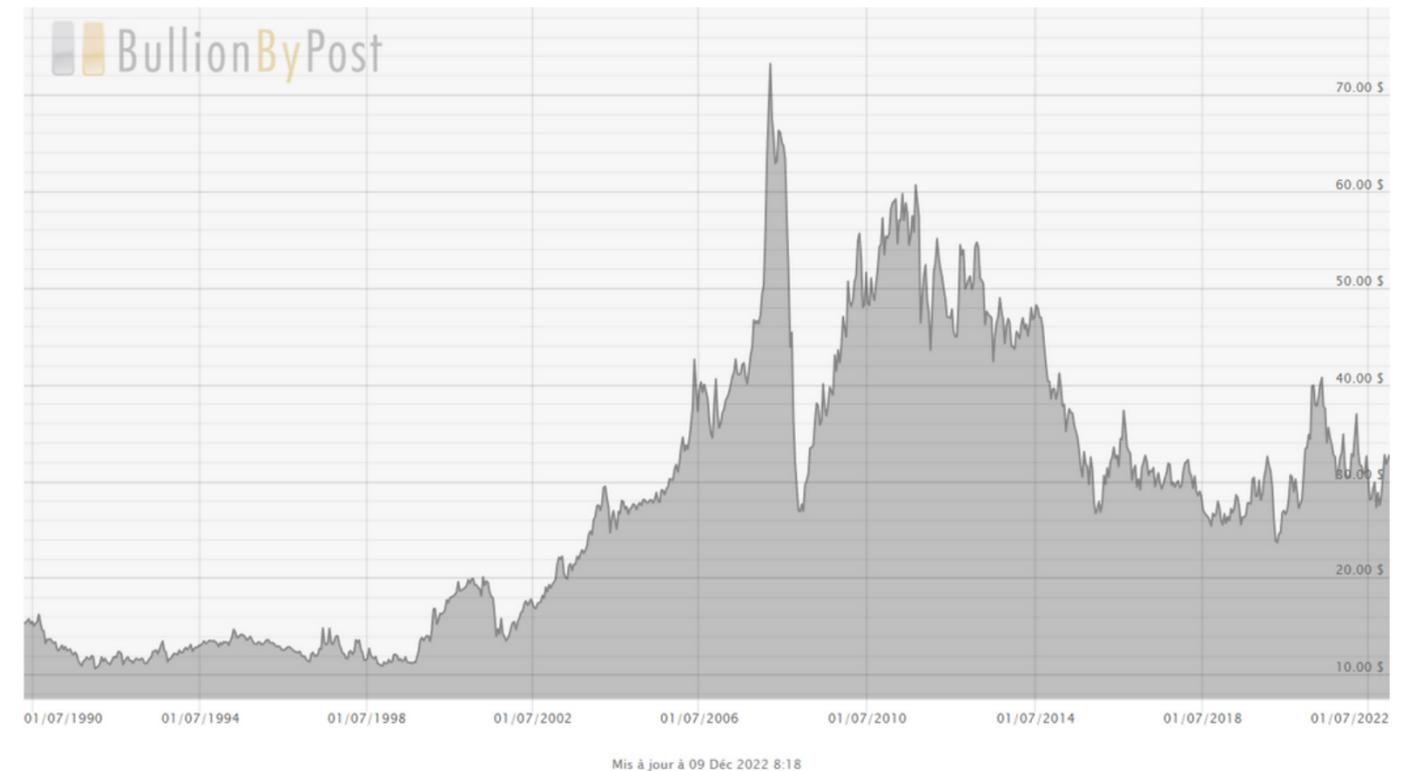
HISTORIQUE DU RECYCLAGE DU PLATINE

Platinum recycling supply by source (million troy ounces)



Source: Source: Johnson Matthey (to 2012) SFA (2013-2018), Metals Focus (from 2019), WPIC Research

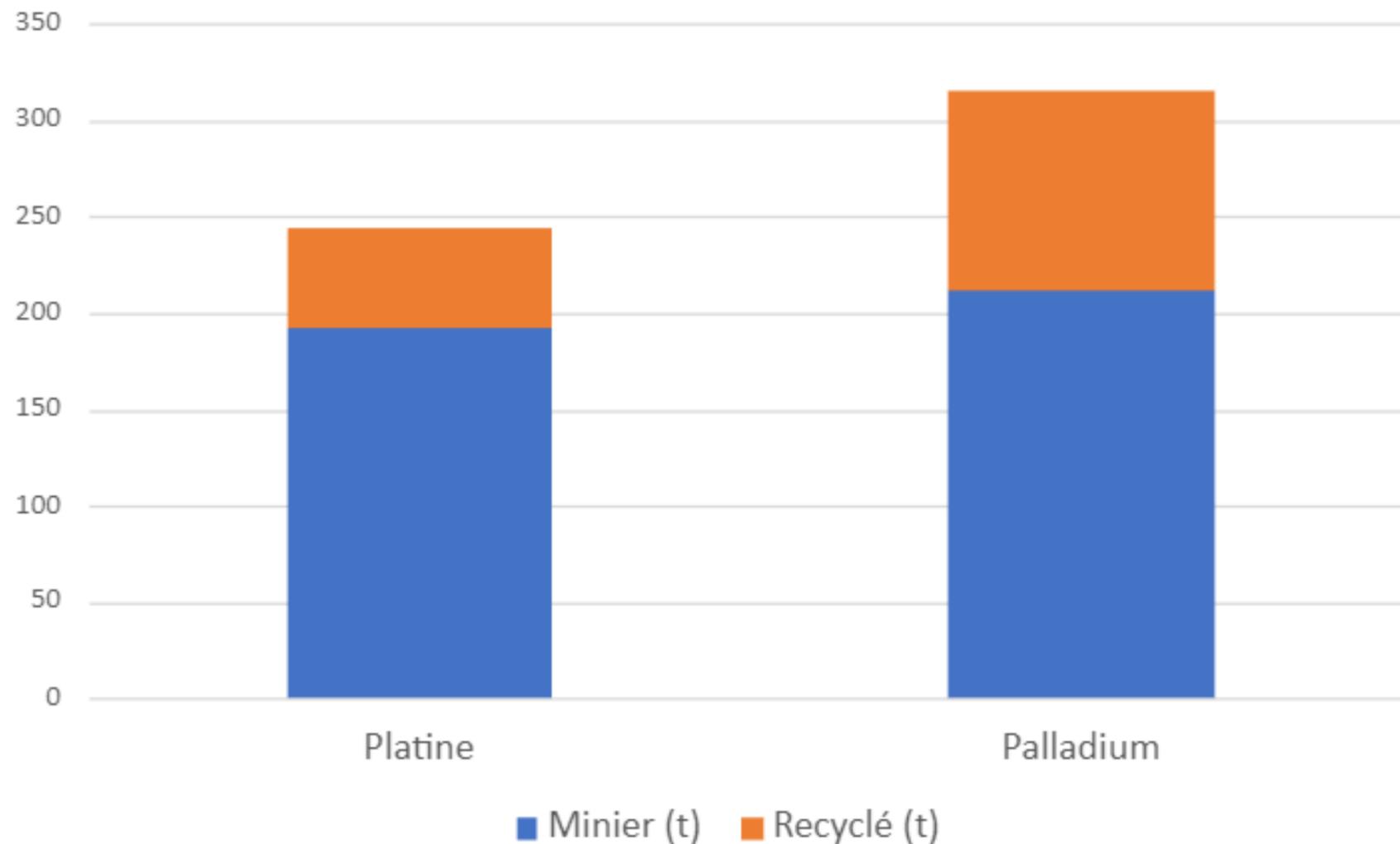
Platinum price, from 1990 to 2022



L'immense majorité du platine recyclé provient de la catalyse automobile et de la joaillerie, alors que ces secteurs ne représentent que 55% de la demande.

RECYCLAGE

Origine des ressources en Platine et Palladium,
en 2021



Source : L'élémentarium - Platinoïdes

74%

du platine recyclé
provient de la catalyse
automobile

74%

du palladium recyclé
provient de la catalyse
automobile

23%

du platine recyclé
provient de la bijouterie

14%

du palladium recyclé
provient d'applications
électriques et
électroniques

SOURCES

Nathalie Mayer. (2022). Comment produit-on de l'hydrogène ? Futura Sciences. [En ligne]. <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/chimie-produit-on-hydrogene-6280/>

Discover the Greentech. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. [En ligne]. <https://www.hydrogene.discoverthegreentech.com/production-hydrogene/electrolyse/>

Les techniques de l'ingénieur. Pot catalytique et fonctionnement. [En ligne]. <https://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42565210-re147.pdf>

Benjamin Louvet. (2021). Diesel, hydrogène... "le platine pourrait enfin revenir en grâce en 2021". Capital. [En ligne]. <https://www.capital.fr/entreprises-marches/diesel-hydrogene-le-platine-pourrait-enfin-revenir-en-grace-en-2021-1391561>

Cours Or. (2020). Qu'elle a été l'évolution du cours du platine sur une période de 10 et 20 ans. [En ligne]. <https://coursor.fr/evolution-cours-platine-10-20-ans>

L'élémentarium. Platinoïdes. [En ligne]. <https://lelementarium.fr/product/platinoïdes/>

BRGM. (2014). Panorama 2012 du marché des platinoïdes [En ligne] <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63169-FR.pdf>

SOURCES

La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique. Guillaume Pitron, 2018

Marikana massacre: the untold story of the strike leader who died for workers' rights, The Guardian, 2012

Dix ans après le massacre de Marikana, justice nulle part, Le Point, 2022

Johnson Matthey & SFA (Oxford) & Heraeus

Platine et guerre économique, Conflits, <https://www.revueconflits.com/guerre-economique-etude-de-cas-platine-zimbabwe-mugabe-apoli-bertrand-kameni/>

Le palladium grimpe sur fond de tensions géopolitiques, <https://investir.lesechos.fr/marches-indices/or-matieres-premieres/le-palladium-grimpe-sur-fond-de-tensions-geopolitiques-1863737>