

Enjeux de l’approvisionnement en platinoïdes pour la filière française de l’hydrogène

Résumé

La filière hydrogène se positionne aujourd’hui comme une filière industrielle d’avenir et stratégique pour la France. A ce titre, elle se doit d’intégrer dans sa stratégie tous les enjeux qui pourraient contraindre ou freiner son développement. Contrairement à la filière batteries et des problématiques liées au cobalt et au lithium, les enjeux autour de la criticité des métaux et de leur chaîne d’approvisionnement pour les technologies de l’hydrogène restent aujourd’hui peu abordés et doivent faire l’objet d’analyses plus poussées, objectif de cette note.

Les briques technologiques clés de la filière que sont les électrolyseurs et les piles à combustible utilisent des catalyseurs pour convertir l’énergie (l’électricité en hydrogène et inversement). Selon les procédés utilisés (alcalins, PEM, AEM, ...), ces métaux ont des niveaux de criticité très différents. Parmi eux, le platine et l’iridium, utilisés notamment dans la technologie PEM, sont considérés comme les plus critiques au regard des critères géologiques, économiques et géopolitiques.

Cette note a pour objet de quantifier le besoin en platine et iridium pour différents scénarios de déploiement de l’hydrogène, à l’horizon 2030. Les scénarios Ambition et Ambition + ont été retenus pour les hypothèses de déploiement d’**électrolyse** et de la **mobilité (véhicules à pile à combustible)**.

Ces chiffres ont été retenus par rapport à ceux présentés dans l’étude Trajectoire 2030 – Volet 2 car beaucoup plus dimensionnant pour étudier la criticité, notamment pour la mobilité routière. **Les quantités de platine et d’iridium** contenues dans les équipements mettant en œuvre les technologies les requérant ainsi que **leur potentiel de réduction à 2030 font l’objet de scénarios pessimistes et optimistes**. Au total, 4 scénarios selon 2 technologies ont été quantifiées, présentées dans le tableau ci-dessous.

Scénario à 2030	Usage	Quantité de platine Pt requise (tonnes)	Quantité d’iridium Ir requise (tonnes)
Ambition Pessimiste	Electrolyse	1,3	2,6
	Mobilité	2,4	/
Ambition + Pessimiste	Electrolyse	2,0	4,0
	Mobilité	3,8	/
Ambition Optimiste	Electrolyse	0,5	1,0
	Mobilité	1,6	/
Ambition + Optimiste	Electrolyse	0,8	1,6
	Mobilité	2,5	/

Les platinoïdes (ensemble des métaux du même type, recouvrant notamment le platine et l’iridium) sont parmi les métaux les plus rares de la croûte terrestre et très localisés géographiquement. Ils sont essentiellement extraits dans 2 pays, Afrique du Sud et au Zimbabwe, et par un faible nombre d’acteurs, ce qui leur confère une criticité géologique et géopolitique forte. Le marché du platine est d’environ 180 tonnes par an et celui de l’iridium, beaucoup plus petit, d’environ 7 tonnes par an. Le platine, dont la demande est essentiellement tirée par la mobilité routière, ne devrait pas constituer un frein pour le déploiement de la mobilité à court et moyen terme. En revanche, l’iridium est considéré comme étant très critique, compte tenu de la taille du marché, de la forte demande mondiale à venir et de la compétition sur les usages. Enfin, l’iridium étant un sous-produit de l’extraction de platinoïdes (platine,

palladium), la capacité d'augmentation de la production reste très limitée et conditionnée au marché des autres platinoïdes. De manière générale, l'augmentation de la production primaire de platinoïdes, issue de la mine, restera modérée à court et moyen terme, compte tenu des freins géologiques, économiques, sociétaux et environnementaux.

Le platine est essentiellement utilisé dans l'automobile (pots catalytiques) et dans la joaillerie. Le taux de recyclage du platine en fin de vie se situe entre 60 et 70% pour un rendement de récupération dans le procédé de 96%. Pour l'iridium, principalement utilisé dans l'électronique, la chimie et l'automobile, seulement 20 à 30% est aujourd'hui recyclé en fin de vie. Cette part pourrait augmenter rapidement avec une demande plus importante tirée par le marché de l'électrolyse. La valorisation de ressources secondaires grâce au recyclage est le premier levier d'indépendance vis-à-vis de ces pays et doit être à ce titre être développée.

Pour conclure, les enjeux autour de l'approvisionnement en platinoïdes pour la filière hydrogène doivent être analysés plus en détails et intégrés dans les différents mécanismes nationaux et européens, à l'instar de l'OFREMI en France et du Critical Raw Materials Act proposé récemment par la Commission Européenne.

Introduction

La transition énergétique et le développement des technologies qui y participent vont nécessiter une diversité de métaux ainsi qu'un accroissement des quantités produites à l'échelle mondiale. Cette problématique s'est notamment illustrée par les enjeux de la mobilité électrique et de la filière batterie et sur la chaîne d'approvisionnement en métaux critiques (lithium, cobalt, ...). La filière hydrogène, en tant que filière industrielle en développement, doit d'ores et déjà adresser ces enjeux et les intégrer à ses stratégies de déploiement. En effet, les technologies de l'hydrogène reposent sur un certain nombre de métaux et de matériaux indispensables à leur bon fonctionnement et pour répondre aux performances souhaitées.

Cette note présente les aspects généraux des métaux critiques pour les technologies de la filière hydrogène, en dégage les principaux enjeux et quelques recommandations d'actions. L'enjeu des métaux critiques étant plus large, nous nous sommes seulement intéressés aux enjeux des platinoïdes. Deux voies nous permettront d'analyser la criticité de ces métaux pour la filière. D'une part de manière quantitative en présentant les technologies utilisatrices, les potentiels de réduction et de substitution de ces métaux, et une première estimation des quantités nécessaires pour la France. D'autre part, une analyse succincte des marchés actuels et des facteurs géopolitiques permettent d'évaluer qualitativement les risques sur les approvisionnements futurs.

La criticité d'un métal est généralement évaluée selon deux axes : les risques sur les approvisionnements et l'importance stratégique pour l'industrie française. Du point de vue géologique, les platinoïdes sont un groupement de six éléments : Ruthénium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium, Platine. Ce sont des **métaux rares, car parmi les moins abondants dans la croûte terrestre**. Par exemple, la concentration moyenne dans la croûte terrestre d'iridium est d'environ 0.001 parties par million (ppm) et celle du platine est de 0.005 ppm. En comparaison, le fer, métal abondant, se trouve à une concentration de 50 ppm dans la croûte terrestre, soit près de 10 000 fois plus.¹ D'après les fiches de criticité du BRGM sur le platine, les métaux comme le platine ou le palladium sont considérés comme critiques sur les deux axes présentés précédemment². En revanche, l'iridium n'est considéré critique que vis-à-vis de son approvisionnement³. Or, les ambitions de développement de la filière hydrogène pourraient accroître la criticité de l'iridium du point de vue de l'importance stratégique pour la filière.

1. Métaux critiques de la filière H₂

a. Electrolyse

i. Technologies d'électrolyse et métaux

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique peu efficace et très lente qui requiert des catalyseurs pour l'accélérer. Le choix de ces catalyseurs est très différent selon les technologies d'électrolyse. Il existe actuellement 2 technologies disponibles à échelle industrielle pour l'électrolyse de l'eau : l'alcaline (ALK) et à membrane échangeuse de protons (PEM). Deux autres procédés à des échelles moins matures sont également en phase de développement : l'électrolyse à membrane échangeuse d'anions (AEM) et l'électrolyse à oxyde solide (SOEC) ou dite à haute température (EHT). Chacun de ces procédés fonctionnant dans des milieux acide ou basique et à des températures différentes, le choix des métaux pour la catalyse est orienté par leur efficacité catalytique et leur stabilité chimique (durée de vie). Au-delà des critères techniques, le choix des catalyseurs est ensuite guidé par le prix de ceux-ci. Dans cette note, nous nous intéresserons seulement aux métaux utilisés dans les électrodes qui sont le cœur de la réaction d'électrolyse, nous n'étudierons pas les besoins en métaux pour les composants auxiliaires (ex : plaques bipolaires, ...).

Pour la technologie alcaline, la réaction se fait en milieu basique, les électrodes sont plongées dans une solution d'hydroxyde de potassium (K⁺, OH⁻). L'anode est généralement en **nickel ou en acier doux** tandis que la cathode est un alliage de nickel ou d'oxydes métalliques. Le nickel est notamment choisi pour ses propriétés de résistance à la corrosion (nécessité moindre en milieu basique par rapport à la PEM), une faible toxicité ainsi qu'un coût abordable du fait de son abondance.

¹https://fr.wikipedia.org/wiki/Abondance_des_métaux_rares_dans_la_croûte_terrestre

²<https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2020-12/fichecriticiteplatine-publique150409.pdf>

³https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2022-06/FicheCriticiteIridium-publique201015_v2.pdf

L'électrolyse SOEC fonctionne à des températures comprises entre 700 à 1000°C. A cette température, l'électrolyte est constitué d'oxydes solides, notamment de céramiques. La SOEC utilise des électrodes poreuses afin d'optimiser la réaction à la technologie. La cathode est un matériau composite composé d'un squelette en céramique et d'une matrice métallique constituée d'un mélange de zircone stabilisé à l'oxyde d'yttrium (YSZ) et de nickel. L'anode est généralement un composite de YSZ et de pérovskites (manganites, ferrites, cobaltites de lanthane qui peuvent être substitués par du strontium pour augmenter l'activité électro-catalytique)⁴. Parmi ces éléments, on retrouve notamment des terres rares légères (lanthane) qui font également l'objet d'enjeu en termes de criticité, pas étudiés ici.

La technologie PEM repose sur l'échange de protons (H⁺) de l'anode à la cathode et confère au milieu son caractère acide, dû à la présence de H⁺, et des problèmes de corrosion des métaux pour la catalyse. Les platinoïdes, qui sont des métaux dits "nobles" car inertes chimiquement permettent de catalyser la réaction sans subir ces problématiques de corrosion. Ainsi, le platine (Pt) est utilisé à la cathode car il s'agit du meilleur catalyseur pour la réduction de l'eau. En revanche, pour la réaction d'oxydation de l'eau, c'est l'oxyde d'iridium (IrO₂) qui est le catalyseur le plus performant électrochimiquement. Le prix élevé de ces métaux implique une utilisation en très faibles quantités et de manière à optimiser leur utilisation.

Enfin la technologie AEM est une hybridation de l'électrolyse PEM et alcaline, elle fonctionne grâce à une membrane échangeuse d'anions (OH⁻) et donc en milieu basique. Comme pour l'électrolyse alcaline, elle ne nécessite donc pas de catalyseurs à base de métaux nobles. Cette technologie pourrait à terme représenter une alternative pertinente aux autres procédés d'électrolyse, pour peu que ses performances soient équivalentes à terme. Les plaques bipolaires en acier inoxydable sont également plus intéressantes économiquement pour cette technologie par rapport au titane de la PEM.

ii. Focus sur la technologie PEM et les platinoïdes

Comme nous avons pu le voir dans la partie précédente, l'électrolyse PEM est la seule qui nécessite pour son fonctionnement des métaux rares et coûteux, à savoir le platine et l'iridium. Les quantités de platine et d'iridium dépendent de la puissance des systèmes et de l'efficacité de la catalyse permettant de définir un « chargement » en platine/iridium pour l'électrolyseur, généralement en g/kW. L'IRENA évalue la charge en platine à environ 0.5 g/kW, en 2020. Les progrès technologiques pourraient permettre de réduire cette charge à 0.05 g/kW d'ici 2030. Dans le cas de l'iridium, elle évalue la charge autour de 1 g/kW en 2020⁵. D'autres sources considèrent que la charge actuelle serait plutôt autour de 2 g/kW. En considérant les avancées technologiques des industriels, cette charge pourrait être réduite jusqu'à 0.2 g/kW sur les anodes des électrolyseurs PEM⁶. Les valeurs exactes pour ces chargements sont cependant très confidentielles chez les industriels et pourraient se situer déjà bien en dessous des valeurs actuelles de l'IRENA et proches des objectifs de 2030.

D'après l'Hydrogen Council⁷, les électrolyseurs PEM représentent 40% de la production d'hydrogène d'ici 2050.

b. Pile à combustible

La technologie de pile à combustible la plus mature technologiquement et industriellement est la pile à combustible PEM, qui consiste à réaliser la réaction inverse de celle de l'électrolyse mais repose tout de même sur le même principe de membrane échangeuse de protons (PEM) en milieu acide. Par conséquent, elle utilise elle aussi des platinoïdes comme catalyseurs, presque exclusivement le platine. Les applications envisagées se situent notamment dans la mobilité (terrestre, ferroviaire, maritime et fluviale, aérienne ...) mais également pour la génération d'électricité pour des systèmes stationnaires (systèmes d'énergie décentralisés, fourniture d'énergie temporaire ou systèmes de back-up). La charge en platine dans les piles à combustible va également dépendre de la taille des stacks, qui sera très variable selon l'usage et la puissance requise. En 2020, le chargement moyen en platine estimé est de

⁴ https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/031/48031693.pdf, p33

⁵ https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf?rev=4ce868aa69b54674a789f990e85a3f00, p70

⁶ https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie_v04.1.pdf, p128

⁷ https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie_v04.1.pdf, p128

⁷ "Sufficiency, Sustainability, and Circularity of Critical Materials for Clean Hydrogen", Hydrogen Council, 2022

0,3 g/kW pour des véhicules légers contre 0.7 g/kW pour des véhicules lourds.⁸ D'après cette même source, ce chargement pourrait être réduit à 0,1 g/kW en 2030 grâce aux progrès techniques.

Les paragraphes précédents montrent que le développement de la filière hydrogène a besoin de platine et d'iridium pour les piles à combustible et l'électrolyse PEM. Nous allons par la suite tenter de quantifier ces besoins, déterminer comment ils s'inscrivent dans le marché actuel et dans quelles mesures ce marché pourrait être impacté par le déploiement des technologies hydrogène et quelles conséquences cela peut avoir pour la filière française.

2. Caractéristiques des platinoïdes

a. Rareté géologique) et criticité géopolitique

Actuellement, les réserves géologiques⁹ de platinoïdes sont estimées à **69 000 tonnes** dans le monde mais sont principalement concentrées en **Afrique du Sud** (63 000 tonnes, soit 91% des réserves estimées), en Russie (6%), au Zimbabwe (2%) et en Amérique du Nord (1%)¹⁰. De plus 4 sociétés seulement (Impala Platinum, Anglo American Platinum, Sibanye Stillwater et Nor Nickel) produisent quasiment 75 % des platinoïdes dans le monde, ce qui en fait un marché peu concurrentiel et très fermé. Les réserves de platine quant à elles sont estimées à **21 000 tonnes**.

Dans l'exploitation minière, l'iridium est un sous-produit du platine, c'est-à-dire qu'il n'est pas extrait à dessein, mais il est un co-produit de l'exploitation d'autres platinoïdes, principalement du platine et du palladium, qui représentent les plus gros marchés actuellement puisqu'ils représentent environ 92% du marché en tonnage¹¹. Il n'existe donc pas de mine d'iridium, mais des mines de platine et de palladium produisant également de l'iridium. Cela rend la production de ce métal très dépendante de l'extraction du platine et du palladium et de leurs marchés respectifs. Les réserves d'iridium sont estimées à **1 500 tonnes**.

b. Marchés, usages et perspectives

i. Platine

La production primaire, issue du gisement source, est estimée à **180 tonnes par an en 2021** pour une demande de 210 tonnes, qui est satisfaite notamment grâce au recyclage.¹² La production de platine est concentrée parmi un cercle restreint de pays. Ainsi l'Afrique du Sud produit 74% du platine mondiale, 12 % en Russie, 7 % au Zimbabwe, 3%, en Amérique du Nord et 3% dans le reste du monde. Le prix moyen du platine en 2022 est de **31 800 €/kg** et il est utilisé principalement dans les secteurs suivants : la catalyse automobile (35%), la joaillerie (22%), la verrerie (13,5%), l'industrie chimique (9%), l'industrie électronique (4,1%), le médical (4%), la pétrochimie (3%), contrôle de pollution (3%) et autre (7%).

ii. Iridium

L'iridium ne se mine pas à proprement parler puisqu'il s'agit d'un sous-produit de la production de platine. Sa production est estimée entre **8 et 8,5 tonnes en 2019**, soit plus de 20 fois moins que le platine. La demande en iridium atteint 7,2 tonnes en 2022. La production d'iridium est répartie entre l'Afrique du Sud à 80,9%, la Russie à 9,0% et au Zimbabwe à 7,4%. La production est donc essentiellement issue d'Afrique du Sud, ce qui freine la possibilité de diversification en approvisionnement primaire et explique la criticité de ce métal de ce point de vue.

Le prix moyen de l'iridium en 2020 est de **162 000 €/kg**¹³. Comme tous les platinoïdes, son prix est en général assez volatile. L'iridium est principalement utilisé dans les secteurs suivants : industrie électronique (30%), **électrochimie (26%)**, industrie chimique (9%), médicale (9%), industrie automobile (6%), autre (20%)

⁸ Geoffrey Reverdiau, et al. *Will there be enough platinum for a large deployment of fuel cell electric vehicles ?*, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 79, 2021

⁹ Ces réserves géologiques sont celles estimées à date et potentiellement exploitables dans des conditions technico-économiques favorables

¹⁰ <https://www.statista.com/statistics/273624/platinum-metal-reserves-by-country/>

¹¹ <https://www.wmag-finance.fr/les-cours-des-platinoïdes-continuent-leur-hausse/>

¹² <https://matthey.com/documents/161599/509428/PGM-market-report-May-2022.pdf/542bcada-f4ac-a673-5f95-ad1bbfca5106?t=1655877358676>

¹³ <https://pmm.umicore.com/en/prices/iridium/>

Dans le monde, avec les projets annoncés, une production de 26 millions de tonnes d'hydrogène propre est attendue d'ici 2030. (Hydrogen Council & McKinsey & Compagny 2022). Il s'agit donc de comprendre comment l'approvisionnement en platinoïdes pourrait freiner le déploiement de la stratégie hydrogène française. Pour cela, une estimation des besoins en platinoïdes pour la France est réalisée dans la partie suivante.

3. Scénario de demande en platinoïdes pour la France

a. France

Les besoins en platinoïdes pour la filière hydrogène en France vont être calculés sur la base des ambitions de déploiement de la filière présentées dans [l'étude trajectoire 2030](#) (volet 1) dans les scénarios Ambition et Ambition+. Les chiffres d'Ambition indiquent 300 000 véhicules légers et 5 000 poids lourds d'ici à 2030, tandis que ceux d'Ambition + indiquent 450 000 véhicules légers et 10 000 poids lourds :

- Pour les **véhicules légers (VL/VUL)**, la valeur moyenne retenue de pile à combustible est de 45 kW, conformément à une chaîne de traction de véhicules Plug-In Hybride qui sont prédominants dans le scénario [WAP0 2021](#).
- Pour les **poids-lourds**, une valeur de 100 kW a été retenue. Les quantités de platine nécessaires pour les trains et les navires n'est pas étudiée ici car leur nombre reste marginal malgré la taille de système PàC qui serait supérieure.

Concernant les **électrolyseurs**, le scénario Ambition prévoit une puissance installée de 6.5 GW tandis qu'Ambition + prévoit 10 GW. La part de marché des électrolyseurs PEM est prise ici égale à 40% ce qui équivaut à 2,6 et 4 GW d'électrolyseurs utilisant la technologie PEM en France en 2030.

Ces scénarios sont eux-mêmes divisés en deux scénarios, l'un pessimiste où la charge des métaux dans les électrolyseurs et les piles à combustible diminue peu par rapport aux valeurs actuelles, car peu de progrès technologiques ont été faits dans le domaine. L'autre optimiste voit les chargements en métaux diminuer suite aux objectifs de R&D définie dans la bibliographie existante :

- Dans le cadre du **scénario pessimiste**, le chargement de platine dans le véhicule léger diminue à 0,15 g/kW et 0,7 g/kW pour les poids lourds. Pour les électrolyseurs les charges considérées pour le platine et l'iridium sont respectivement 0,5 g/kW et 1 g/kW
- Le **scénario optimiste** voit la valeur du chargement des véhicules légers baisser à 0,1 g/kW et 0,5 g/kW pour les poids lourds¹⁴. Dans les électrolyseurs cette charge est réduite à 0,2 g/kW pour le platine et 0,2g/kW pour l'iridium

¹⁴ Geoffrey Reverdiau et al., *Will there be enough platinum for a large deployment of fuel cell electric vehicles ?*, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 79, 2021

Les résultats de ces scénarios sont présentés dans la figure ci-dessous et les hypothèses prises sont présentées dans l'annexe 1.

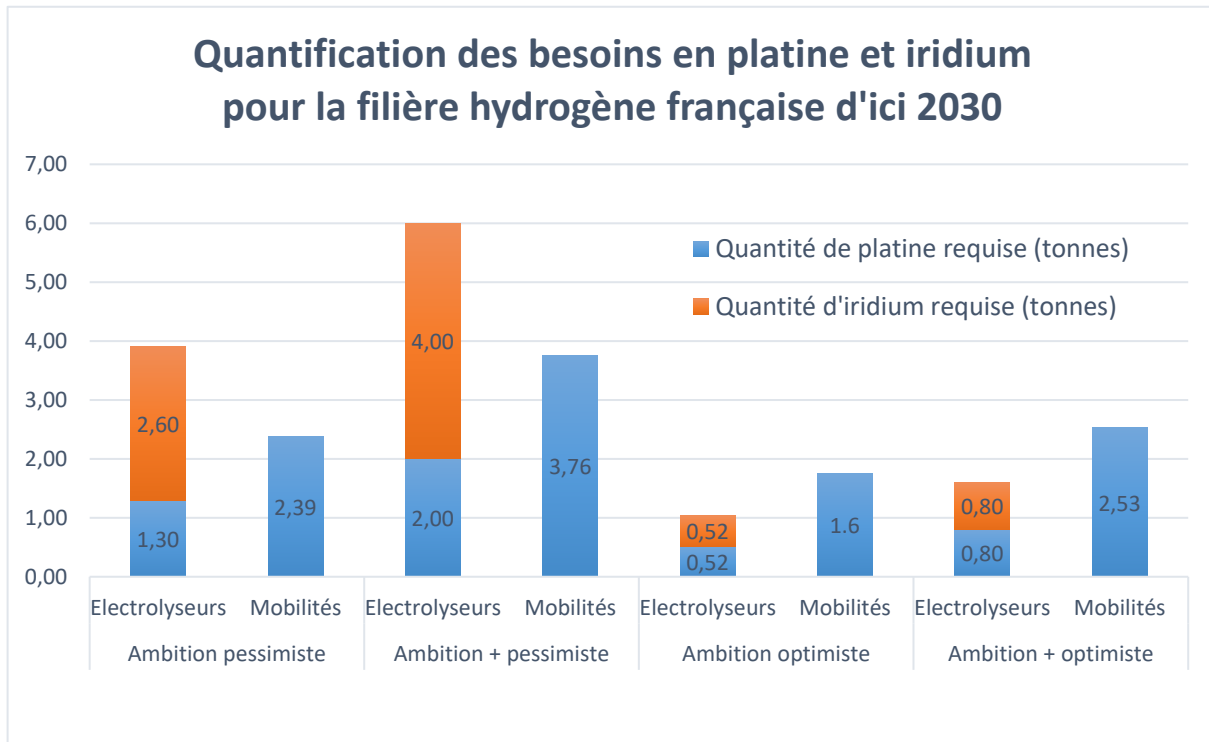


Figure 1 : Scénarios des besoins en platinoïdes (platine, iridium) pour la filière hydrogène en France à 2030.

La figure 1 montre que les besoins en platine pour la mobilité sont bien plus importants que ceux pour les électrolyseurs PEM, ils concentrent près de 67% du platine total nécessaire à la filière hydrogène française à 2030. L'annexe 2 montre également le détail entre les besoins pour les camions et ceux pour les VL/VUL. Les scénarios de déploiement de la mobilité pris ici sont considérés comme optimistes et majorants en ce qui concerne les quantités de platine nécessaires. Enfin, on constate également que les potentiels de réduction des chargements en platinoïdes (scénarios optimistes vs. scénarios pessimistes) ont un impact fort sur la quantité nécessaire à terme, particulièrement sur l'iridium qui dispose d'une marge de réduction importante.

b. Europe

Enfin, il semble important de rappeler qu'au niveau européen, les objectifs de déploiement d'électrolyseurs sont encore plus ambitieux. La Commission Européenne envisage la production au sein de l'Union d'environ 9,6 Mt d'hydrogène dans son plan RePowerEU, contre 5,6Mt prévues dans le paquet Fit for 55. Ces objectifs impliquent l'installation d'environ 120 GW d'électrolyse en Europe d'ici 2030 et la mise en place d'une capacité de production annuelle d'électrolyseur de 17,5 GW/an en 2025 et 25 GW/an en 2030. Dans les hypothèses les plus optimistes (0,2 g/kW d'iridium ; 40% du marché par la PEM) cela représenterait un besoin de près de 2 tonnes d'iridium par an.

c. Comparaison offre et demande à 2030 : évaluation de la criticité d'approvisionnement pour la France

i. Platine : un marché tiré par la mobilité routière

Le tableau en annexe 2 montre la répartition du platine au sein de la mobilité pour nos scénarios explicités dans le paragraphe précédent. On constate que la demande en platine est principalement tirée par le nombre de véhicules légers qui représentent 93% de la demande en platine pour la mobilité. Les 7% restants sont alloués pour les poids-lourds. Les avions, bateaux et trains restent marginaux du fait de leur faible nombre.

Sachant que **la production actuelle de platine est de 180 tonnes par an**, les quantités nécessaires pour le marché hydrogène français demanderaient entre **2 et 6 tonnes de platine d'ici 2030**. Sur une période de 7 ans (d'ici 2030), cela reviendrait à **moins de 1% de la production mondiale annuelle** en platine, pour la filière hydrogène française.

Cette demande reste donc relativement faible et peu impactante sur le marché mondial. Ainsi, à court et moyen terme, **la disponibilité en platine ne devrait donc pas constituer un frein au déploiement des véhicules hydrogène, du point de vue des quantités disponibles sur le marché.**

Néanmoins, il est également important de rappeler que la production de platine et d'iridium est localisée autour d'un nombre restreint de pays et d'acteurs. Par conséquent, la production de ces métaux est très sensible au contexte politique et géopolitique de ces pays. En 2014 par exemple, une grève massive a eu lieu dans l'un des sites du groupe Impala Platinum pendant 5 mois, ce qui a impacté la production et le marché mondial. De plus, ces mines sont sujettes à de nombreux risques d'approvisionnement en électricité du fait du manque d'entretien des réseaux électriques d'Afrique du Sud, ce qui pourrait impacter de nouveau la production et les marchés. Plus récemment, l'invasion de l'Ukraine par la Russie qui est un des plus gros producteurs de palladium mondial nous a rappelé l'importance de prendre en compte les risques inhérents à ces approvisionnements en métaux.

ii. Iridium : un marché déjà critique pour l'électrolyse

Contrairement au platine, **la même analyse pour l'iridium est plus alarmante.** En effet, les besoins en iridium pour la France sont de **0,5 à 4 tonnes d'ici 2030**, soit environ **70 à 570 kg par an** sur une période de 7 ans. Par rapport à un marché mondial annuel de 8 tonnes par an, cela représente entre **1 et 7% de la production mondiale** annuelle actuelle, seulement pour la France.

A l'échelle européenne et mondiale, les ambitions de déploiement de l'électrolyse PEM sont fortes et l'approvisionnement en iridium pour sécuriser la production de ces électrolyseurs pourrait à terme devenir un facteur important de compétition mondiale. L'AIE estime dans son rapport [Global Hydrogen Review de 2022](#) que la capacité installée d'électrolyse à 2030 dans le monde pourrait être de 134 GW, représentant entre **10 et 50 tonnes d'iridium.**

Le marché de l'iridium est beaucoup plus petit et donc beaucoup moins flexible que ne pourrait l'être celui du platine, d'autant plus que les perspectives d'augmentation de la production minière sont relativement restreintes du fait des faibles réserves et de la dépendance aux autres marchés des platinoïdes. De plus le développement de la 5G et de la filière hydrogène dans les autres pays vont faire augmenter significativement la demande en iridium et les prix. A titre d'exemple, le prix de l'iridium est de plus de 150 000 €/kg en 2022 contre 57 000 €/kg en 2019, soit une augmentation d'environ 260%. L'approvisionnement en iridium ainsi que l'augmentation de son prix pourrait donc constituer **un véritable frein au déploiement d'électrolyseur PEM en France.**

iii. Enjeux autour de l'exploitation minière

Compte tenu des caractéristiques du marché actuel et des prévisions sur la demande exposées dans les paragraphes précédents, on peut s'interroger sur la possibilité d'augmenter la production issue de l'extraction minière. A ce titre, il est important de rappeler que l'intervalle de temps pour ouvrir une nouvelle mine est relativement long (10 à 15 ans) par rapport à l'échelle de temps considérée des déploiements et projets annoncés de la filière hydrogène. A l'heure actuelle, les projets envisagés consistent généralement en des agrandissements de sites existants ou d'anciens sites dont l'exploitation a cessé. Ces projets sont également soumis à des enjeux d'acceptabilité sociale et environnementaux beaucoup plus importants. Par exemple, et même si ce chiffre mérite d'être plus clairement explicité, le platine (et l'iridium également) est l'un des métaux les plus émetteurs de CO₂ par tonne de métal extraite : 20 600 tCO₂/t contre 3 tCO₂/t pour le cobalt ¹⁵.

iv. Leviers de souveraineté

La criticité de l'approvisionnement en platinoïdes doit encourager la filière à développer ses propres filières d'approvisionnement secondaires. Afin de pallier les éventuels manques en métaux précieux en raison de la forte demande à venir, il est nécessaire de prévoir en parallèle une filière de recyclage de ces métaux. En tenant compte du recyclage, les besoins en platine seront bien moindres pour nos scénarios et surtout à long terme (2050 et plus).

Actuellement, le taux de recyclage du platine, c'est-à-dire la quantité de platine récupérée à partir des technologies en fin de vie qui en contiennent, est compris entre 60 et 70%. Le processus de recyclage quant à lui est bien maîtrisé puisqu'il permet de récolter 96% du platine initial. Au total, le platine issu du recyclage (de source secondaire donc) représente près de 25% de l'approvisionnement du platine

¹⁵ <https://www.strategie.gouv.fr/publications/evaluer-lexternalite-carbone-metaux>

mondial¹⁶. Ces 25% proviennent essentiellement du recyclage des pots catalytiques de l'automobile (67%) et de la joaillerie (31%).

L'iridium est moins bien recyclé que le platine en fin de vie, son taux de recyclage étant compris entre 20 à 30% en fin de vie, les concentrations dans les usages actuels étant généralement faibles et la demande restant stable depuis 2015. Cependant, la croissance des marchés de l'électronique (production de LED, OLED, 5G, ...) et le déploiement de l'électrolyse PEM devraient tirer la demande vers le haut ainsi que les prix. A mesure que ces derniers augmentent, le taux de recyclage deviendra plus intéressant et, comme pour les autres platinoïdes, est susceptible d'augmenter offrant de nouvelles filières d'approvisionnement secondaire et de nouveaux leviers de souveraineté.

Le recyclage est le premier levier permettant de réduire sa dépendance à un approvisionnement primaire issu de la mine, et de s'affranchir des risques politiques et géopolitiques inhérents à l'extraction minière dans ces pays. Il devient donc indispensable de mettre en place les chaînes de récupération, de recyclage et de revalorisation des technologies contenant ces platinoïdes, comme par exemple, les pots catalytiques pour le platine et les bougies d'allumage pour l'iridium. A terme, les filières de recyclage des technologies de l'hydrogène (électrolyseurs PEM et piles à combustible) devront elles aussi être implémentées.

4. Conclusion et recommandations

Pour les platinoïdes considérés ici, l'analyse montre une criticité faible dans le cas du platine mais une criticité forte en ce qui concerne l'iridium à moyen terme (peu d'offre actuelle, augmentation de la production à court et moyen terme modérée voire faible, demande potentielle très forte, etc...). Cette forte criticité reste néanmoins basée sur des hypothèses de déploiement de l'électrolyse ambitieuses et optimistes dont de nombreux verrous restent à lever. Néanmoins, si les filières hydrogène française et européenne se donnent les moyens pour atteindre leurs ambitions, elles devront pleinement intégrer l'approvisionnement en platinoïdes dans leurs stratégies de développement.

Le travail de quantification mené ici devra être poursuivi et étoffé afin d'enrichir l'état des connaissances sur le sujet et d'améliorer la pertinence des analyses, notamment sur les risques à des horizons plus lointains, par exemple 2050. Ce travail pourra notamment être mené grâce à la mise en place de l'OFREMI. Les attentes et les contributions de France Hydrogène vis-à-vis de l'OFREMI font l'objet d'une note d'information dédiée.

Recommandations de la filière

Au niveau national, **les efforts de réduction des charges en platinoïdes des équipements**, et éventuellement de substitution¹⁷, constituent **le premier levier d'indépendance** et doivent être renforcés notamment grâce à la R&D&I des industriels avec l'appui de la recherche.

- ⇒ Le PEPR H₂ doit à ce titre être prolongé et devra intégrer ces problématiques en concertation avec les industriels et en coordination avec les autres PEPR sur les métaux critiques.

Diversifier les sources d'approvisionnement en platinoïdes constitue le **second levier d'indépendance**. Par exemple, les pots catalytiques riches en platinoïdes (platine et palladium essentiellement) et les bougies d'allumage (iridium) des véhicules thermiques pourraient représenter des gisements importants, qui nécessiteront de mettre en place les filières de collecte, de recyclage et de valorisation à échelle industrielle.

- ⇒ Un travail sur **l'identification et la faisabilité d'exploitation des gisements secondaires** potentiels doit être mené avec l'industrie automobile, par exemple en mobilisant un consortium d'industriels via l'AAP « Métaux critiques » ou « Briques technologiques et démonstrateurs hydrogène ». Ces dernières devront également à terme inclure le recyclage des piles à combustible et des stacks d'électrolyse

En parallèle, il est primordial d'encourager **le développement des technologies et des installations industrielles de transformation des métaux** manquantes chez les industriels français (dépôt

¹⁶ <https://matthey.com/documents/161599/509428/PGM-market-report-May-2022.pdf/542bcada-f4ac-a673-5f95-ad1bbfca5106?t=1655877358676>

¹⁷ *la substitution partielle ou totale entrainera potentiellement des baisses de rendement et d'efficacité des équipements pour lesquels un arbitrage souveraineté-performance serait nécessaire

catalytique sur carbone, synthèse de nanoparticules de platine et d'iridium, etc.), faute de quoi les métaux recyclés en France seront renvoyés dans d'autres pays hors d'Europe (ex : UK) pour être transformés, captant ainsi la valeur ajoutée, puis revendus aux industriels français. La pertinence pour les industriels français de nouer des partenariats stratégiques avec les industriels développant ces technologies doit être étudiée, à l'instar du partenariat entre Plug Power et Johnson Matthey.

- ⇒ Accompagner les industriels sur le développement de ces briques technologiques spécifiques à l'échelle industrielle, par exemple en mobilisant un consortium d'acteurs dans la relève de l'AAP "Briques technologiques et démonstrateurs hydrogène" ou « Métaux critiques » pour 2023/2024

Annexe 1 : Hypothèses utilisées pour les scénarios.

Chargements en platinoïdes dans l'électrolyseur PEM (g/kW)			
Technologie	Electrolyseurs PEM		
Horizon	2020	2030	
Scénario	SoA*	Pessimiste	Optimiste
Platine	1	0,5	0,2
Iridium	2	1	0,2

Chargements en platine dans la pile à combustible (g/kW)			
Technologie	Pile à combustible PEM		
Horizon	2020	2030	
Scénario	SoA*	Pessimiste	Optimiste
Platine (VL/VUL)	0,3	0,15	0,1
Platine (Poids-lourds)	0,72	0,72	0,5

Puissance de la pile à combustible par véhicule (kW)	Minimum	Médian	Maximum
VL/VUL	30	45	128
Poids-lourds	60	80	100

*State of the Art : Etat de l'Art

Annexe 2 : Résultats détaillés des scénarios pour la mobilité routière

