

CONFRONTATIONS
EUROPE

**ÉTUDE DE LA SÉCURISATION DES
MÉTAUX CRITIQUES ET DE LA
RÉSILIENCE DES CHAÎNES
INDUSTRIELLES EUROPÉENNES**



ParisTech

L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
DE CHIMIE DE PARIS

DOSSIER SPÉCIAL

ÉTUDE DE LA SÉCURISATION DES MÉTAUX CRITIQUES ET DE LA RÉSILIENCE DES CHAÎNES INDUSTRIELLES EUROPÉENNES

Sous la direction de Mohamed Es-bai et Christophe Béguinet

Un travail réalisé avec par les membres du groupe d'étude de l'École Nationale supérieure de chimie de Paris : **Nicolas Bernard, Charlotte Carlier, Robin Mauget, Nassima Ibrahim, Marc Duris, Hahn Nguyen Tran et Lila Attarian.**

Avec le soutien de **Christophe Thomas.**

SOMMAIRE

I - INTRODUCTION.....	P.4
II - LES AIMANTS.....	P.5
III - LES BATTERIES	P.8
IV - ANALYSE DES SOLUTIONS POSSIBLES POUR LA SÉCURISATION DES MÉTAUX CRITIQUES.....	P.11
V - CONCLUSION	P.18
VI - BIBLIOGRAPHIE	P.19

Remerciements

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble des personnes qui nous ont accompagnés, conseillés et soutenus dans la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons tout d'abord remercier Christophe Thomas, professeur à Chimie ParisTech – PSL, pour ses précieux conseils, son encadrement attentif et son accompagnement tout au long de ce projet. Ses remarques et son regard critique nous ont permis de mieux structurer notre démarche et d'enrichir notre analyse.

Nous tenons également à remercier Mohamed Es-Sbai et Christophe Béguinet, de Confrontations Europe, pour nous avoir aiguillés dans nos recherches et permis de découvrir le domaine des matériaux critiques. Nous leur sommes particulièrement reconnaissants pour leur disponibilité, la qualité de leurs échanges et leur volonté de nous orienter vers des interlocuteurs et des ressources pertinents. Leur accompagnement nous a aidés à mieux comprendre les enjeux industriels, économiques et stratégiques associés à ces matériaux.

Nous adressons nos sincères remerciements à Christophe Poinssot, Directeur général délégué et Directeur scientifique, pour sa conférence à Chimie Paris Tech ainsi que pour la qualité de nos échanges.

Un grand merci également à Mariane Ighilahriz pour nous avoir fourni des sources clés ayant nourri nos recherches et contribué à approfondir notre compréhension du sujet.

Nous remercions aussi Cyrine Slim, Grégory Lefèvre, Domitille Giaumeet Odile Majérus, enseignants à Chimie ParisTech – PSL, pour le regard nouveau qu'ils ont apporté à notre projet.

Enfin, nous remercions Alexandre Damiens, du département R&D d'Orano, pour les informations précieuses qu'il nous a transmises concernant les métaux critiques dans le domaine des aimants permanents.

I - Introduction

Dans son objectif de neutralité carbone 2050, l'Union Européenne (UE) se doit de s'intéresser à des solutions de décarbonation énergétique afin de, malgré tout, maintenir une activité économique et industrielle compétitive et durable. Pour cela, l'un des secteurs les plus prometteurs afin de réduire la dépendance aux énergies fossiles est le domaine des métaux critiques dont l'utilisation s'avère de plus en plus stratégique dans de nombreuses branches de l'innovation scientifique.

Ainsi, la transition énergétique et numérique mondiale repose sur une consommation massive de métaux critiques (Lithium, Cobalt, Nickel, Terres Rares [1]) au centre de tensions économiques mondiales. En effet, la demande devient de plus en plus élevée et devrait être multipliée par 4 d'ici 2040 d'après l'AIE bien que ces matériaux s'épuisent peu à peu. L'objectif de ce travail a donc été de cerner les difficultés induites par les métaux critiques au niveau international pour proposer des solutions applicables aux chaînes industrielles.

Sur le plan international, trois domaines majeurs ont été considérés comme massivement impactés par cette demande grandissante en matériaux critiques.

Dans un premier temps, au niveau géopolitique, l'avènement des métaux critiques représente un risque primaire d'approvisionnement. Cela crée alors des vulnérabilités ou des dominations naturelles pour certains pays dont l'accès à ces métaux est limité ou au contraire fortement favorisé. De cette manière, une dépendance géopolitique de l'UE à certains pays producteurs ou raffineurs se met en place, ce qui réduit fortement son indépendance ainsi que sa souveraineté. En résultent des situations de domination de la part de certains pays sur la majorité des chaînes de valeur ce qui, naturellement, crée des situations inégalitaires menaçant la viabilité de certains systèmes politiques à long terme.

De ces dépendances géopolitiques découlent alors des situations de monopoles naturels de quelques pays acteurs sur le marché des matériaux critiques ce qui induit une forte déstabilisation de ce marché. De cette manière, d'un aléa de production quelconque peuvent résulter une paralysie majeure de l'industrie européenne ainsi qu'une forte augmentation des prix de ce marché imposant une inflation rapide.

Enfin, en parallèle des risques géopolitiques et économiques inhérents au marché des métaux critiques, l'extraction minière de ces matériaux s'avère très coûteuse en ressources. De cette forte demande, principalement énergétique et en matières premières (comme en eau), résultent d'importantes situations de pollution locale dues à des pratiques qualifiables de "dures" et dont l'impact environnemental est avéré. Ainsi, dans un objectif de transition

énergétique quasiment totale, de nouvelles formes de pollution voient le jour ce qui ralentit fortement la transition écologique actuellement nécessaire.

Notre étude s'est ainsi focalisée sur deux éléments principaux au centre de l'utilisation des métaux critiques et dont les enjeux stratégiques concernent l'intégralité des domaines à risques précédents : les batteries et les aimants permanents.

Ces études plus ciblées nous ont ainsi par la suite permis de conclure que la criticité de ces matériaux ne provient pas seulement de leur rareté géologique, mais surtout de leur grande utilisation dans l'industrie et l'absence de substituts viables à court terme. Notre étude souligne donc que la maîtrise de ces ressources tout au long de leur cycle de vie, principalement au niveau du recyclage en France, est une condition nécessaire pour une souveraineté industrielle durable.

Finalement, ces recherches ont permis de comprendre les points donnant le caractère "critique" à ces matériaux et ont mené à la problématique générale :

"Comment l'industrie peut-elle sécuriser son accès aux métaux critiques, piliers de la transition énergétique, tout en s'affranchissant des dépendances géopolitiques majeures et en garantissant une éthique environnementale exemplaire ?"

II - Les aimants

Pour les aimants permanents, l'utilisation de métaux critiques s'avère nécessaire afin de conférer à l'objet final des propriétés magnétiques suffisantes pour une utilisation industrielle. En effet, l'utilisation de matériaux critiques dans ce domaine permet une augmentation de l'efficacité du produit final couplée à une minimisation de sa taille, une amélioration de son rendement énergétique ainsi qu'une baisse de la demande en électricité pour son fonctionnement.

Dans les principaux domaines d'application des aimants permanents, les métaux phares permettant les meilleures performances actuellement sont : le néodyme (Nd), le praséodyme (Pr) et le dysprosium (Dy). Grâce à cet avantage technique, les aimants permanents représentent des composants particulièrement prisés de l'industrie technologique et jouent ainsi un rôle stratégique et critique dans les domaines des moteurs synchrones, des générateurs, des composants électroniques et du militaire (drones) et de l'aérospatial.

La répartition de leur utilisation dans ces domaines est illustrée en figure 1 :

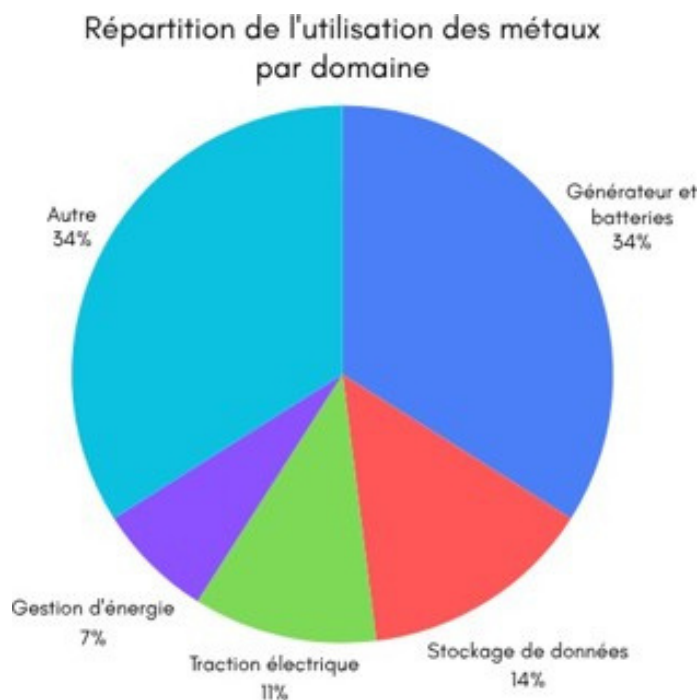


Figure 1 - Répartition des domaines d'utilisation des aimants permanents

Au niveau technique, les aimants permanents se doivent de posséder des propriétés magnétiques particulières afin de maximiser le rapport puissance/poids du produit final. Il est alors difficile dans ces conditions de mener des travaux de substitution des métaux critiques par d'autres éléments plus accessibles. Ainsi, les pays les plus avancés dans le domaine de ces matériaux possèdent un fort avantage technologique leur octroyant une avance technique au niveau international voire une domination de ce marché.

Dans le domaine des aimants, la demande européenne en métaux tels que le néodyme, le praséodyme ou encore le dysprosium envers les pays exportateurs et raffineurs crée une réelle dépendance géopolitique qui réduit fortement la souveraineté technologique et économique de l'Europe. Se dessinent alors des inégalités d'accès pour certains pays soumis à des territoires "dominants" sur ce domaine : les métaux critiques sont détenus par très peu de pays et de manière exclusive.

A l'heure actuelle, la Chine se retrouve à la tête de ce monopole, en dominant plus de 50% du marché des matières premières et des composants tels que les alliages ou les poudres magnétiques. Parallèlement, la Chine se présente également comme l'un des seuls pays capables de raffiner efficacement les métaux pour leur utilisation finale, ce qui impose nécessairement son implication dans tous les projets en lien avec ces matériaux. (Figures 2 et 3)

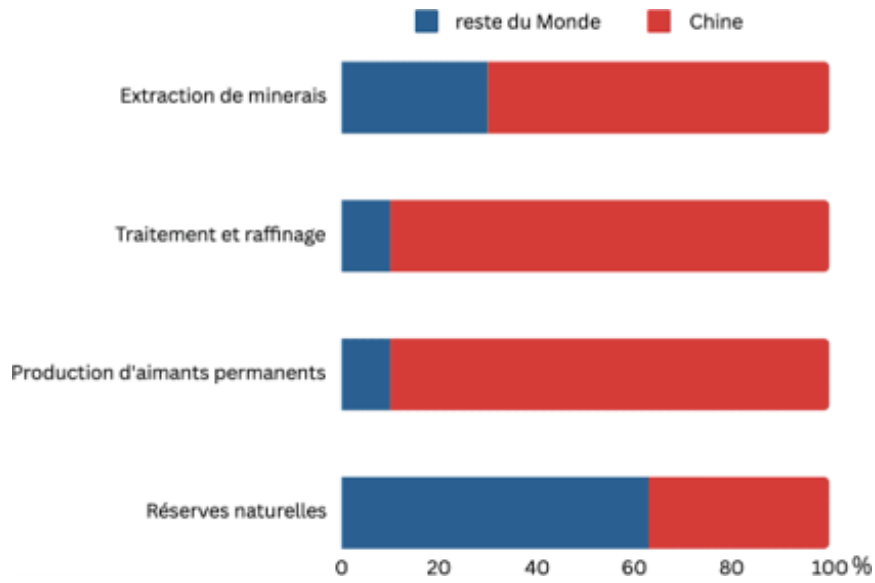


Figure 2 - Domination de la Chine dans le cycle de vie des aimants permanents[2]

Global production of critical raw materials (CRM) according to EU definition

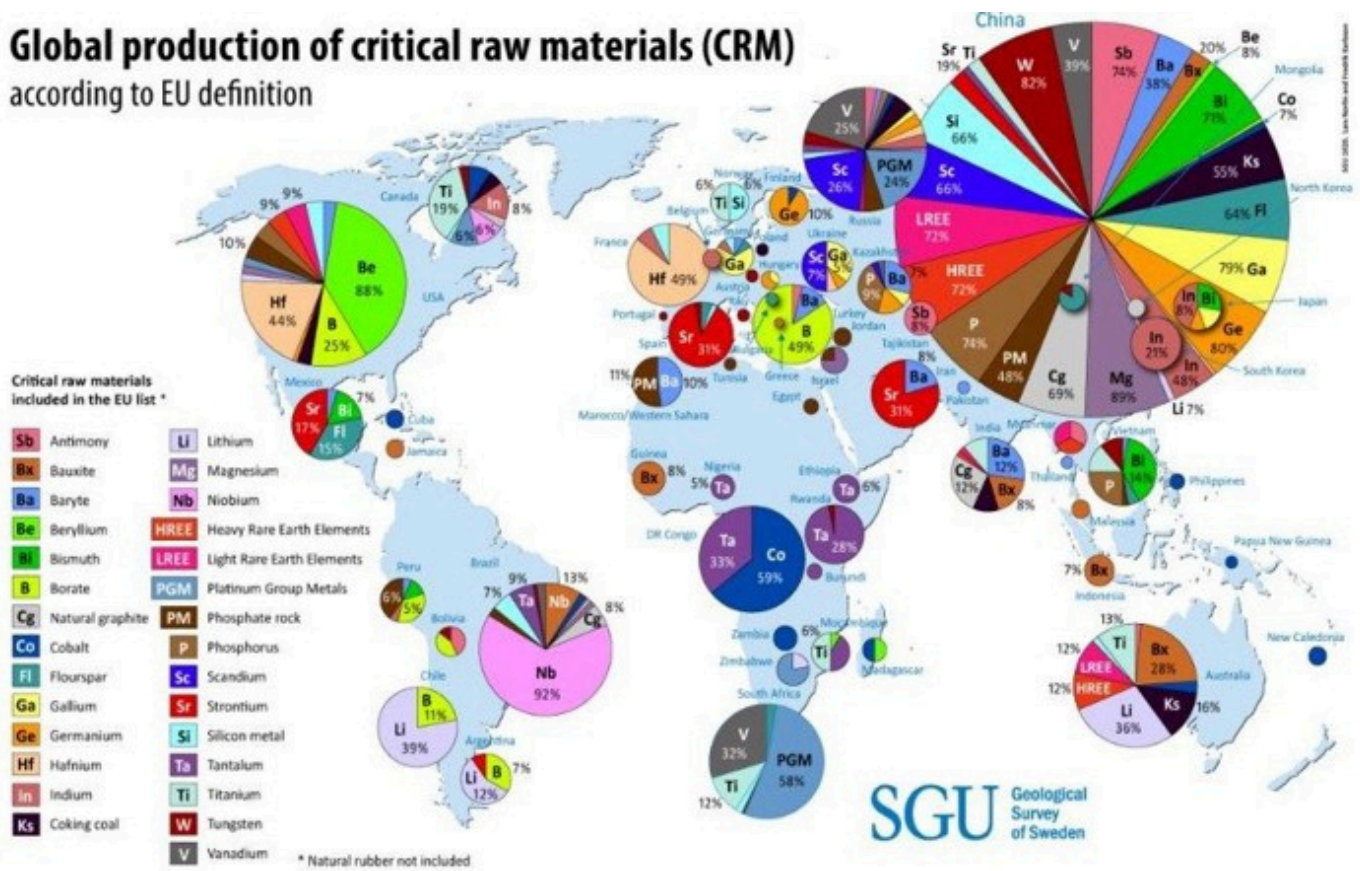


Figure 3 : Production des différents métaux critiques par pays [1]

Mais la dépendance à la Chine ne se limite pas seulement à son aspect industriel. En effet, cet aspect ne représente réellement qu'une façade derrière laquelle se cache une dimension de la domination chinoise bien plus profonde concernant le domaine des métaux critiques. Ainsi, de manière moins quantifiable, il est possible de notifier que la domination de la Chine passe notamment par ses équipements à la pointe de la technologie moderne, le savoir-faire de ses ingénieurs et agents de production ou encore sa politique d'industrialisation mise en place dans le contexte de la guerre froide. De ce fait, l'ancrage de cette domination globalisée s'avère bien plus profond qu'il n'y paraît ce qui, dans une perspective d'avenir, pourrait permettre à la Chine d'atteindre le rang de 1er pays mondial face aux Etats Unis qui ne possèdent pas cet avantage stratégique.

Ainsi, l'Europe se retrouve face à la nécessité de se plier à plusieurs contraintes naturellement imposées par le monopole chinois, ce qui la fait s'exposer à des risques de restrictions à l'export, de tensions commerciales, d'instrumentalisation des ressources, de volatilité des prix des matières premières et de limitations technologiques.

III - Les batteries

Une dynamique européenne fragmentée mais réelle

Pour les batteries, plusieurs métaux critiques sont nécessaires pour la fabrication des électrodes afin d'assurer une bonne efficacité, une bonne durabilité ainsi qu'une durée de recharge suffisamment faible du produit final. Dans ce domaine, les matériaux concernés doivent présenter certaines propriétés électrochimiques alors fortement limitantes pour la substituabilité des composants actuellement fabriqués avec des métaux critiques.

Ainsi, afin d'assurer au mieux la conduction électrique des électrodes, les matériaux au centre de l'innovation actuelle sont : le lithium (Li), le cobalt (Co), le nickel (Ni) ou encore le manganèse (Mn). Dans leur utilisation habituelle, les batteries permettent un stockage (stationnaire ou embarqué) d'énergie sous forme électrique à l'aide de composés chimiques. Elles constituent donc un enjeu stratégique pour les secteurs du transport (véhicules électriques), des énergies (énergies renouvelables) et des biens de grandes consommations (objets connectés).

Cependant, si la demande mondiale de batteries risque d'être multipliée par 10 d'ici 2030 par rapport à 2020 selon l'Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, c'est notamment pour répondre aux besoins croissants de l'électromobilité.

Selon l’AIE, la demande mondiale en batteries pour VE a été multipliée par plus de 5 entre 2018 et 2022. L’évolution de la demande en batteries pour le stockage stationnaire et l’électromobilité est illustrée en figure 4 :

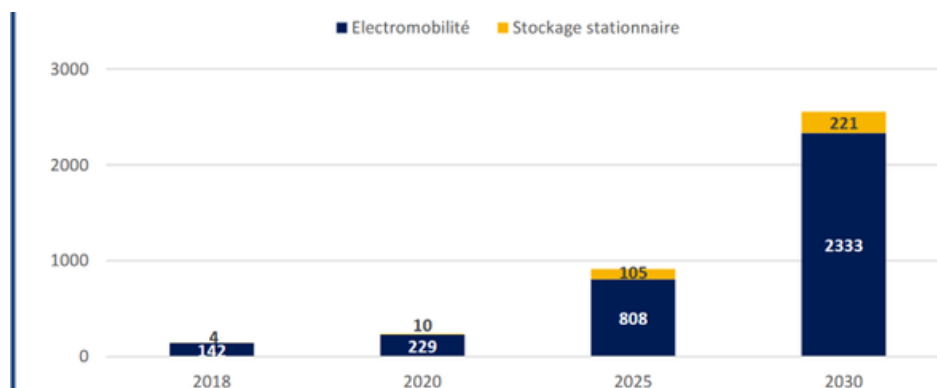


Figure 4 - Évolution de la demande mondiale en batterie pour l’électromobilité et le stockage stationnaire, exprimée en GWh

Dans le contexte industriel actuel, les principaux métaux composant les batteries sont peu nombreux en raison de leurs propriétés physico-chimiques spécifiques. Si l’anode est généralement composée de graphite, la composition de la cathode diffère en fonction de la technologie ce qui confère aux différents types de batteries des caractéristiques diverses répertoriées dans le Tableau 1 :

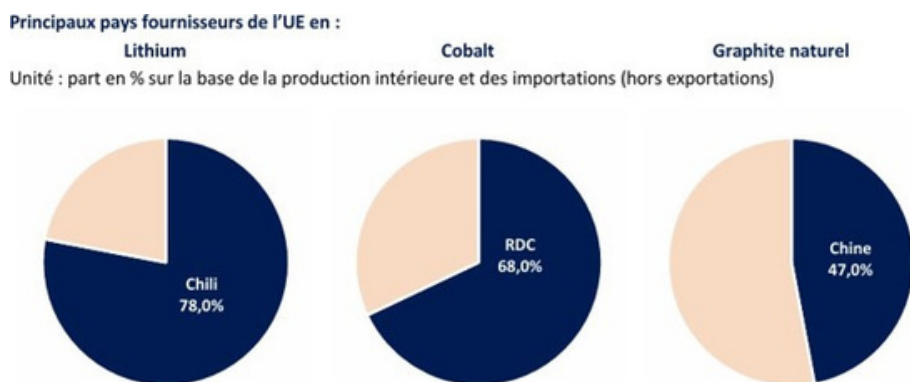
Matériaux	Avantages	Inconvénients
Nickel-Manganèse-Cobalt (NMC)	Haute densité énergétique	Utilisation de métaux critiques
Nickel-Cobalt-Aluminium (NMA)	Haute densité énergétique Utilisé dans les VE haut de gamme	Utilisation de métaux critiques Sécurité plus difficile à assurer
Lithium-Fer-Phosphate (LFP)	Moins de métaux critiques Peu couteuse Forte stabilité	Moins performante
Lithium-Oxyde de Cobalt (LCO)	Haute densité énergétique Compacte	Forte utilisation de cobalt

Tableau 1 - Technologies dominantes pour les batteries

Ainsi, les batteries NMC sont largement privilégiées dans l'automobile. La technologie NCA présente une part de marché moindre mais peut aussi être utilisée pour les véhicules électriques tandis que la LFP est plutôt utilisée pour les transports en communs, notamment en Chine, et le stockage stationnaire. Dans les appareils électroniques comme les téléphones et les ordinateurs, on retrouve davantage de batteries LCO ou Lithium-Métal-Polymère.

La fabrication de ces batteries nécessite plusieurs étapes (l'extraction des matières premières, les traitements, la fabrication des matériaux de batteries, l'assemblage des batteries, l'intégration des batteries et le recyclage) qui constituent une chaîne de valeur complexe est très dispersée. Tout comme les aimants permanents, les batteries présentent une forte vulnérabilité géopolitique due à la forte dépendance à la Chine qui maîtrise toute la chaîne de valeur grâce à domination du raffinage (82 % du raffinage des minerais de batteries des véhicules électriques) et de la production, des exportations importantes de batteries qui s'élèvent à 58 %, des stratégies de contrôle des ressources (comme au Chili), des politiques industrielles ("Made in China 2025"), des avantages commerciaux et économiques historiquement très ancrés (héritage de la "route de la soie") et des importations massives : 86,5% du lithium mondial est importé par la Chine. [3,4]

La dépendance à la Chine est forte et se fait ressentir dans de nombreux pays, où la demande en batteries est importante et notamment dans les pays européens qui ont un rôle moindre dans les étapes en aval de la chaîne de valeur. Ainsi, ces pays sont de plus en plus dépendants de la Chine d'où ils importent notamment 47 % de leur graphite naturel, nécessaire à la création d'anodes. (Figure 5)



Source : Commission européenne, « Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité », 2020 (annexe 1, page 21)

Figure 5 - Origine géographique des importations européennes de lithium, cobalt et de graphite naturel [4]

Cependant, d'autres pays tiers s'imposent comme extracteurs de ressources. L'Australie recouvre environ 48% de la production mondiale de lithium. Le Triangle du lithium entre le Chili, l'Argentine et la Bolivie assure 60% des ressources. Finalement, la République Démocratique du Congo assure 74% de la production mondiale de cobalt. Ainsi, l'extraction des matières premières se concentre dans certains pays ce qui place l'Europe dans une situation de dépendance vis-à-vis de ces pays qui se reflète dans la part faible de batteries produites par l'UE en 2023 de 14% avec une concentration dans certains pays (Allemagne, Suède, Hongrie, Pologne). [3]

IV - Sécurisation des métaux critiques

Afin de faire face aux différents risques liés aux métaux critiques au sein de l'Union Européenne, certaines mesures ont la nécessité de se mettre progressivement en place afin de limiter l'impact de cette criticité sur le continent européen. Il s'agit de se défaire progressivement des pays dominants en devenant le plus autosuffisant possible et en maintenant le cap concernant la transition écologique nécessaire afin de créer une souveraineté et une indépendance européenne dans les secteurs concernés. L'Europe annonce comme objectifs principaux :

- De fournir au moins 10% de la consommation annuelle
- D'assurer au moins 40% des transformations de ces métaux et le recyclage domestique
- De couvrir au moins 25% de la consommation européenne
- Pas plus de 65% de la consommation annuelle d'une ressource catégorisée comme "stratégique" à un stade de transformation donné ne doit provenir d'un seul pays tiers.

Mais ces objectifs européens doivent d'être en adéquation avec les nécessités en cours :

- Réduire au maximum les potentiels risques liés à la situation économique et géopolitique actuelle en matière de métaux critiques
- Trouver des moyens d'atteindre l'un des 2 grands objectifs de la transition écologique européenne avant 2050 si l'avancée est suffisante pour le recyclage des métaux critiques
- Assurer une sécurisation des ressources pour faciliter une transition durable
- Respecter les enjeux éthiques, à savoir la question de la juste rémunération des populations locales qui pourrait avoir un impact sur les coûts.

L'enjeu est donc d'analyser les chaînes de valeur des matériaux en détail afin d'optimiser chaque étape de leur cycle de vie. Il est également pertinent d'étudier un large échantillon

pour explorer des pistes et des scénarios qui pourraient permettre d'optimiser leur utilisation en prenant en compte les dimensions économiques, sociales et écologiques.

Face à ces problématiques majeures, l'Europe se retrouve alors contrainte de mener des politiques de soutien, de relance et de limitation industrielle afin de sortir de cette dépendance et renforcer son autonomie tout en maintenant une économie stable dans l'objectif de la neutralité carbone 2050 :

- Développer l'intelligence des chaînes de valeurs minérales et scénarios
- Développer l'économie circulaire (recyclage, gestion des déchets ind.)
- Développer une industrie minière européenne responsable (standards ESG)
- Développer une diplomatie des ressources minérales
- Lancement du Critical Raw Materials Act 2024 [1]

De son côté, la France se doit également de mener des politiques ciblées sur les matériaux critiques afin de maintenir une certaine indépendance et souveraineté au sein de l'Union Européenne dans un cadre industriel comme scientifique :

- Ouverture d'un observatoire des ressources minérales par le BRGM (OFREMI)
- Lancement d'un nouvel inventaire des ressources minérales (IRM) sur le sol français d'ici 2030 [1]

En termes de recyclage, l'UE fixe dans son optique de neutralité carbone d'ici 2050 un objectif de 15% de recyclage des métaux critiques sur le sol européen. Actuellement, les procédés de recyclage ne permettent pas d'atteindre des rendements suffisants et restent trop polluants pour considérer le recyclage efficace à long terme.

Pour les aimants, afin d'optimiser ces procédés, le recyclage est placé au cœur de la recherche scientifique actuelle dont l'attention se focalise en particulier sur trois étapes clés : le démontage et la séparation des aimants, l'enrichissement des métaux récupérés ainsi que la refonte et le traitement des matériaux récupérés.

A l'heure actuelle, ces recherches ont permis de définir de nouvelles perspectives de recyclage telles que par hydrométallurgie, pyrométallurgie, HPMS (Hydrogen Processing of Magnet Scrap) ou encore SEEE (extraction sélective, évaporation, électrolyse) mais toutes nécessitent des conditions relativement dures ou dangereuses pour l'environnement et le technicien chargé du procédé. Toutefois, même en optimisant au maximum les procédés de recyclage, certains problèmes inhérents aux métaux critiques composant les aimants risquent de perdurer :

- Le démontage des aimants permanents reste difficile et demandant en ressources
- La durée de vie des aimants restera très limitée post-recyclage,
- Les procédés industriels restent très onéreux et difficilement accessibles pour tous
- Le recyclage ne peut pas permettre de répondre totalement à la demande grandissante en métaux critiques : la demande risque d'augmenter d'un facteur 5 d'ici 2030 d'après les prévisions du BRGM. (le recyclage des aimants en fin de vie représente actuellement moins de 1% des métaux critiques [5])

Pour les batteries, le recyclage consiste à utiliser des batteries qui ne correspondent plus aux attentes de l'industrie automobile dans du stockage stationnaire ou encore à récupérer certains métaux pour alimenter à nouveau la chaîne de valeur. En effet, les batteries usagées constituent ce qu'on appelle des « mines urbaines » et peuvent être utilisées pour produire de nouvelles batteries. Le recyclage des métaux contenues dans les batteries usagées et des rebuts des usines de fabrication se fait aujourd'hui grâce à la pyrométallurgie, qui est la méthode historique et la plus répandue et à l'hydrométallurgie qui permet d'obtenir le lithium, le nickel et le cobalt issues des batteries avec une haute pureté. La recherche scientifique continue à développer des méthodes pour optimiser les procédés existants ou pour développer de nouveaux procédés qui permettraient de réaliser par exemple la récupération du graphite qui est encore difficile alors que la criticité de ce matériau est de plus en plus importante. Le recyclage direct constitue une perspective de recyclage intéressante car moins destructrice puisqu'elle cherche à conserver les matériaux en vue de leur réutilisation mais reste difficile à mettre en place. Ces méthodes en développement doivent, pour être viables économiquement, utiliser des produits qui restent peu chers par rapport à ceux utilisés actuellement.

Cependant, le recyclage de batteries reste une étape à faible valeur ajoutée dans la chaîne de valeur des batteries et présente certaines limites :

- Le taux de recyclage est limité et contrasté (Tableau 2)
- Le manque de flux entrant de batteries de véhicules électriques en fin de vie dans les usines de recyclage. Le premier essor date des années 2010 alors que la durée de vie moyenne de des batteries est de 3 à 15 ans en fonction de si elle est utilisée dans les appareils portables ou dans les voitures électriques ce qui contraint les usines de recyclage de batterie à rester proches des usines de fabrication pour pouvoir revaloriser les rebuts et rester rentables.
- Le recyclage est insuffisant pour répondre à la demande croissante. En 2035, l'OFREMI prévoit des besoins en métaux pour fabriquer les batteries nécessaires pour tous les véhicules électriques vendus en France en incluant les pertes, pourraient

atteindre 22 kt de lithium élémentaire, 85 kt de nickel, 11 kt de cobalt. Cependant, la matière obtenue grâce au recyclage ne peut pas couvrir entièrement ces besoins, elle n'atteindrait pour le lithium que 13% de la matière nécessaire. (Figure 6)

- Les processus de recyclage sont très coûteux.
- La production de batteries reste limitée sur le sol européen ce qui freine le développement du recyclage en boucle courte.[6]

Matériaux	Taux de recyclage
Lithium	Moins de 1%
Graphite	6%
Cobalt	32%
Nickel	42%

Tableau 2 - Taux de recyclage en fin de vie à l'échelle mondiale pour les principaux matériaux présents dans les batteries en 2021 [6]

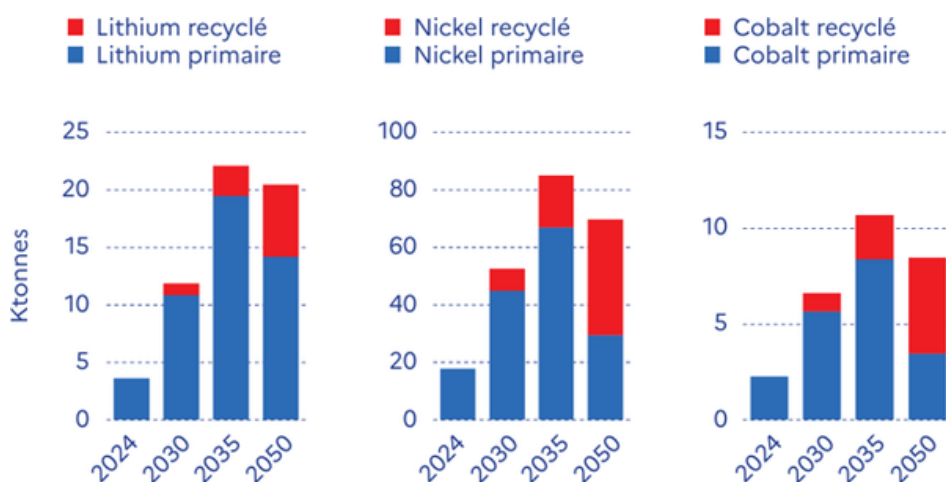


Figure 6 - Demande en métaux critiques issus des mines et des usines de raffinage (primaires) ainsi que du recyclage pour la fabrication des batteries des véhicules électriques vendus par an en France [7]

Les métaux critiques sont extraits en faible pourcentage du sous-sol : 2% en 2022. Or, l'Europe dispose de ressources importantes et variées. En effet, les différents pays possèdent des ressources qui pourraient être complémentaires et permettre de réduire les dépendances. Ainsi, pour pallier l'insuffisance des ressources apportées par le recyclage, l'ouverture de nouvelles mines plus responsables pourrait être envisagée en cherchant à limiter l'impact environnemental, en impliquant les différentes parties prenantes dans les décisions et en envisageant un système de distribution équitable des bénéfices économiques. Cependant l'ouverture de ces mines se heurte à la difficulté d'ajuster l'offre et la demande. Les lourds investissements sont freinés par la volatilité des prix. Les réserves peinent à être mises sur le marché du fait des gisements moins concentrés, du time-to-market très grand et des oppositions sociales. [1]

Face à cette potentielle solution, certains enjeux environnementaux, économiques et sociaux limitent pourtant sa mise en œuvre. Il est donc nécessaire, afin de considérer pleinement cette solution, de mener certains travaux préalables à différentes échelles dans le but de l'optimiser au maximum. Cette optimisation se concentre principalement sur certains domaines tels que :

- L'électrification des installations de minage et l'optimisation des technologies de broyage : permettrait de limiter au maximum les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la consommation d'énergies fossiles en tant que carburant.
- La mise en place de stations de traitement des eaux et de solutions de recyclage des eaux usées : permettraient la baisse de la quantité d'eau utilisée et de l'impact environnemental résultant de sa surexploitation
- L'utilisation et la valorisation des "déchets" issus de l'extraction des métaux pour diminuer la quantité de déchets et optimiser les ressources.
- La communication sur les conditions de travail soumises à des préjugés est primordiale, notamment au sujet de l'automatisation de la main d'œuvre, la réduction des travaux en profondeur et l'implication forte auprès des populations locales. [1]

Au niveau du traitement des minerais extraits, une optimisation s'avère plus délicate pour des raisons industrielles : changer de traitements signifierait modifier l'ensemble des infrastructures de traitement ce qui n'est pas faisable dans le temps imparti avec des contraintes budgétaires. Par ailleurs, il serait tout de même possible d'agir sur la relocalisation des activités afin d'éviter les multiples transports des matières premières ainsi que sur la toxicité des solvants utilisés lors des traitements effectués.

Au niveau français, cette solution ne semble pourtant pas rentable à court et moyen termes bien qu'elle puisse paraître pouvoir pallier pratiquement entièrement la demande nationale à elle seule.

En effet, la présence de politiques sociales nécessaires au soutien de la vie citoyenne et ouvrière rend le processus d'ouverture et d'exploitation des mines bien plus complexe que dans certains pays où ces politiques n'existent simplement pas. Ainsi, sur ce plan, la France ne peut se permettre de se reposer uniquement sur la perspective d'ouverture de nouvelles mines, ce qui l'oblige à concilier cette potentielle solution avec d'autres afin de maintenir une certaine compétitivité et sa souveraineté industrielle.

Puisque l'ouverture de nouvelles mines peut être ralentie par ces différents facteurs, il est judicieux de considérer la réutilisation des matériaux, déjà extraits auparavant dans les pays ayant les ressources, pour réduire sa dépendance. Par ailleurs, la France cherche de nouveaux minerais à utiliser, notamment dans les zones stratégiques d'outre-mer, possédant des ressources non exploitées. Une autre solution envisagée est la substitution des matériaux en remplaçant par exemple les batteries Li-ion par des batteries LFP (fer-phosphate), plus accessibles. Cependant, les batteries LFP présente une densité énergétique moins importante que les batteries NMC et leur recyclage est moins rentable car elles ne contiennent pas de cobalt ou de nickel qui sont les matériaux avec les taux de recyclage les plus élevés. Par ailleurs, l'augmentation de la longévité des batteries aussi envisagée pour réduire les dépendances risque également de limiter le recyclage. En 2036, le taux de réincorporation baisserait pour passer de 13,5% à 10,5% pour le lithium selon l'OFREMI pour un allongement de 23 ans pour les VP-VUL en 2050 et de 15 ans pour les PL.

De plus, la dépendance à des ressources qui impliquent des risques géopolitiques peut être réduite en substituant certains métaux critiques par d'autres ou par des technologies alternatives :

- Les batteries sodium-ion
- Le stockage d'hydrogène
- Les batteries à flux circulants
- Les batteries tout-solide. [4]

Ces alternatives doivent être envisagées en vue de leur utilisation. Le remplacement des batteries lithium-ion par des batteries sodium-ion entraîne une baisse de densité énergétique, or l'automobile requière une importante densité d'énergie pour la fabrication de véhicules électriques. Ainsi une transition vers ce type de technologie à faible densité implique une sobriété d'usage. Mais, les batteries sodium-ion, qui ont l'avantage de nécessiter des matériaux largement accessibles, correspondent déjà aux attentes du stockage stationnaire qui pose moins de contraintes de volume et pourraient être utilisés largement pour l'éolien.

Par ailleurs, la batterie tout-solide est aussi une voie prometteuse en termes de sécurité (l'électrolyte liquide est remplacée par un solide non inflammable) ou de densité énergétique. De plus, elle ne nécessite pas de graphite. Ainsi, elle pourrait, dans les prochaines années, devenir la technologie à privilégier. Quant aux batteries à flux circulants, le remplacement des électrodes traditionnellement solides par des liquides séparés par une membrane augmente le volume nécessaire pour atteindre un stockage énergétique élevé ce qui ne fait pas de cette option une solution viable pour l'automobile mais pourrait convenir au stockage stationnaire.

À terme, le stockage d'hydrogène serait l'alternative vers laquelle il faudrait se tourner afin de privilégier une approche plus durable et qui favorise l'utilisation d'énergie renouvelable. Cependant, l'hydrogène ne peut pas être produit assez vite par électrolyse de l'eau et doit être stocké ce qui génère des réticences d'un point de vue sociétal. De plus, la production verte d'hydrogène doit encore être développée ce qui fait du stockage à hydrogène une solution encore en cours d'amélioration et qui risque de ne pas pouvoir répondre aux besoins à court terme.

Ainsi, nous avons envisagé plusieurs perspectives afin de revendiquer la souveraineté européenne :

- Propulser le recyclage par le budget et la norme : il est urgent d'allouer des financements d'amorçage aux entreprises spécialisées dans le recyclage des batteries et des aimants. Pour rendre cette filière compétitive, nous devons revoir nos exigences réglementaires : assouplir les seuils de pureté requis pour les métaux réutilisés, tant qu'ils conservent les mêmes propriétés techniques, permettra de faire chuter drastiquement les coûts de traitement et d'accélérer la rentabilité des recycleurs.
- Soutenir activement la recherche scientifique concernant la substitution et les méthodes de recyclage des métaux critiques afin de limiter au maximum la dépendance à court terme : le développement de procédés efficaces et en accord avec la transition écologique permettrait à l'Europe d'accéder aux ressources nécessaires de manière locale, ce qui, en conséquence, réduirait ses dépenses monétaires et énergétiques et améliorerait l'autosuffisance industrielle du continent.
- Garantir la compétitivité par le levier énergétique : le recyclage et la revalorisation des métaux critiques sont des activités très énergivores. Accorder des réductions ciblées sur les coûts de l'énergie aux industries qui participent directement à la résilience européenne est indispensable pour leur permettre de rivaliser avec les coûts de production des pays producteurs.

- Créer une passerelle pour le marché des aimants locaux : l'offre européenne ne pourra pas remplacer les importations chinoises du jour au lendemain. L'objectif est donc d'organiser une transition progressive : mettre directement en relation les industriels avec les entreprises de recyclage tout en soutenant le marché par des tarifs préférentiels. Cela laissera le temps aux acteurs locaux de monter en puissance tout en garantissant aux industriels un approvisionnement qui devient de plus en plus souverain au cours du temps.
- Soutenir l'ouverture de mines responsables sous réserve de communication transparente et claire auprès du grand public concernant les conditions de travail et d'exploitation de l'environnement : le développement de ces mines permettrait d'atteindre une quasi autosuffisance européenne dont les sous-sols sont relativement riches en matériaux critiques. De plus, l'exploitation interne de ressources critiques permettrait une décarbonation quasi-totale des procédés d'extraction par le biais d'une électrification généralisée des usages ainsi que de l'affranchissement des besoins de transport depuis des destinations lointaines. [1]

V - Conclusion

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que les métaux critiques occupent une place centrale dans les transformations industrielles, énergétiques et technologiques contemporaines. À travers l'analyse des chaînes de valeurs des batteries et des aimants permanents, nous avons pu mettre en évidence le caractère stratégique de matériaux tels que le lithium, le cobalt ou encore les terres rares. Leur disponibilité conditionne directement la réussite de la transition écologique européenne. Cependant, cette importance s'accompagne de vulnérabilités majeures, qu'elles soient géopolitiques, économiques ou environnementales.

Parmi ces champs, le recyclage s'impose comme une solution incontournable à moyen et long terme. En effet, dans un contexte où l'Europe dispose de peu de ressources primaires, et où la mainmise de la Chine subsiste, le développement d'une économie circulaire apparaît comme l'une des voies les plus réalistes pour réduire la dépendance aux importations. Néanmoins, notre étude souligne que les procédés actuels présentent encore des limites techniques, économiques et énergétiques qui freinent leur déploiement à grande échelle. Le recyclage ne constitue donc pas une solution unique, mais doit s'inscrire dans une stratégie globale incluant l'innovation technologique, la diversification des approvisionnements et l'amélioration de l'efficacité des usages.

En parallèle, nous avons également pu démontrer que la sécurisation des métaux critiques ne relève pas uniquement de décisions industrielles ou scientifiques, mais implique également des dimensions politiques, éthiques et sociales. Ainsi, toute stratégie de sécurisation doit intégrer ces considérations afin de garantir une transition réellement durable et éthique. Si des solutions existent, leur mise en œuvre nécessitera une coordination étroite entre les acteurs industriels, les décideurs publics et le monde de la recherche. C'est à cette condition que l'Europe pourra concilier souveraineté industrielle, performances économiques et responsabilités environnementales dans un contexte mondial de plus en plus contraint.

VI - Bibliographie

[1] : Poinssot, C. (2024). Conférence à Chimie ParisTech : enjeux géologiques et industriels des ressources minérales. BRGM. (Document PDF : « conférence ChimieParisTech C POINSSOT.pdf »)

[2] : Adimas Paris. (s.d.). Comment la Chine domine la production de terres rares.

<https://adimas.paris/comment-la-chine-domine-la-production-de-terres-rares/>

[3] : OFREMI. (2024). Policy Brief 2024-48.

https://www.ofremi.fr/sites/websites/www.ofremi.fr/files/documents/202410/Policy%20Brief%202024-48_FR.pdf

[4] : IRIS. (2021). Alliance européenne des batteries : enjeux géopolitiques et industriels.

<https://www.iris-france.org/wp>

[content/uploads/2021/02/OSFME_2020_12_06_Alliance_europeenne_batterie_Rapport.pdf](https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2021/02/OSFME_2020_12_06_Alliance_europeenne_batterie_Rapport.pdf) (p. 22)

[5] : ADEME. (2024). Recyclage des aimants permanents : une filière stratégique.

<https://infos.ademe.fr/industrie-production-durable/2024/recyclage-des-aimants-permanents-une-filiere-strategique/>

[6] : Danino-Perraud, L. (2021). Géoéconomie des chaînes de valeur : les matières premières minérales de la filière batterie. IFRI.

https://www.ifri.org/sites/default/files/migrated_files/documents/atoms/files/danino-perraud_geoéconomie_chaines_de_valeur_2021.pdf

[7] : OFREMI. (2025). Livrables Batteries 2025. Observatoire Français des Ressources Minérales pour les Filières Industrielles.

<https://www.ofremi.fr/sites/websites/www.ofremi.fr/files/documents/2025-03/Livrables%20Batteries%202025%20indd.pdf>