Les enjeux industriels et technologiques des minerais et métaux pour la transition énergétique et numérique

DECEMBRE/ 2025

Groupe de travail “ Transition énergétique ”

Groupe de travail présidé par Olivier Appert, Académie des technologies ;
Richard Lavergne, Conseil Général de l’Economie ; Denis Randet, ex délégué général de l’ANRT
Rapporteur : Alexandre Marciel
Directrice de publication : Clarisse Angelier, déléguée générale de l’ANRT

Les enjeux industriels et technologiques des minerais et métaux pour la transition énergétique et numérique

Ces travaux sont soutenus financièrement par les souscripteurs FutuRIS :

AIR LIQUIDE - AMPIRIC-AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ - ANR - BERGER-LEVRAULT - BOUYGUES - CEA - CNRS - COMITÉ ROBOTIQUE FRANCE 2030 - DECATHLON - EDF - ENGIE - FRANCE UNIVERSITÉS - GENERAL ELECTRIC - INRIA - INSTITUT MINES TELECOM - INSTITUT PASTEUR - MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE ET DE L'ESPACE - RÉGION PAYS DE LA LOIRE - RENAULT - SCHNEIDER ELECTRIC - SNCF - UDICE - VINCI

Le contenu n'engage que la responsabilité de l'ANRT en tant qu'auteur et non celle des institutions qui lui apportent leur soutien.

Sommaire

Cadre général des auditions *3*

Encadré 1 : De quoi parle-t-on ? *4*

Introduction 5

- Petit rappel : les métaux au cœur des grands âges de l'humanité **5**

- Les « games changers » à l'origine de l'explosion de la demande **5**

- Une chaîne de valeur complexe et sous domination de la Chine **7**

- Les politiques publiques pour sécuriser nos approvisionnements **9**

Encadré 2 : Epuisements ou pénuries ? *12*

I. Les consommateurs de métaux et nature de leurs besoins 13

A. Les producteurs d'énergie **13**

1. Métaux spécifiques consommés 13

2. Principaux enjeux industriels 14

B. Les distributeurs d'énergie **15**

1. Métaux spécifiques consommés 15

2. Principaux enjeux industriels 15

C. L'industrie automobile **16**

1. Métaux spécifiques consommés 16

2. Principaux enjeux industriels 16

D. L'industrie aéronautique **17**

1. Métaux spécifiques consommés 17

2. Principaux enjeux industriels 17

E. L'industrie de la Défense **18**

1. Métaux spécifiques consommés 18

2. Principaux enjeux industriels 19

F. L'industrie du numérique **20**

1. Métaux spécifiques consommés 20

2. Principaux enjeux industriels 20

II. Confrontation des besoins avec les producteurs de métaux 22

A. Les mines **22**

1. Données générales sur les mines 22

2. Enjeux pour deux industriels français majeurs 23

3. Zoom sur l'extraction du lithium 24

4. Zoom sur le raffinage des déchets miniers 25

B. Le raffinage **25**

1. Données générales sur le raffinage 25

2. Zoom sur le raffinage des terres rares 26

C. Le recyclage **27**

1. Données générales sur le recyclage 27

2. Zoom sur le recyclage des aimants 30

3. Zoom sur le recyclage des batteries 30

D. Technologies alternatives **31**

III. Synthèse des leviers et actions de sécurisation 33

Encadré 3 : Métaux à la loupe *36*

Conclusion : les messages forts 38

Annexes 40

Les atomes du tableau périodique de Mendeleïev **44**

Points de vocabulaire **44**

Cadre général des auditions

Au titre de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT), l'objectif premier de notre Groupe de Travail Transition Energétique 2025 était de recueillir « les enjeux industriels et technologiques des minerais et métaux pour la transition énergétique et numérique », mais les différentes personnalités auditionnées (au nombre de 30) ont apporté des éclairages qui ont souvent dépassé ce cadre strict.

En effet, au-delà des enjeux de recherche et de technologie (sur de nouvelles chimies, nouveaux procédés, nouveaux pilotes…), les enjeux géopolitiques, de réglementation, de marchés (…) ont été largement développés par nos intervenants.

De même, il n'a pas été question que des minerais et des métaux de la transition énergétique et numérique, mais aussi de tous ceux qui sont utilisés dans d'autres secteurs comme l'aéronautique, la Défense.

Les nombreux focus qui ont pu être faits par les intervenants - moteurs sans aimants des futurs véhicules électriques, recyclage du titane dans l'aéronautique, procédés de collage moléculaire en micro-électronique, biolixiviation des cartes électroniques, traçage isotopique des matières recyclées, procédés d'extraction directe du lithium (…) - démontrent tout l'intérêt de nos auditions : coller au plus près de la réalité d'une recherche en prise directe avec les besoins des industriels.

Les actions déjà engagées pour relever les défis de sécurisation de nos approvisionnements en métaux stratégiques ne manquent pas même si nous n'en sommes qu'aux débuts. Il ressort à travers toutes nos auditions que l'attente est forte tant du côté des industriels et des chercheurs que les décideurs politiques soient mieux informés sur ces enjeux de recherche, de technologie, de géopolitique, de marché pour pouvoir mieux arbitrer sur le plan réglementaire, financier (…) mieux préparer l'avenir, notre avenir.

Encadré 1 : De quoi parle-t-on ?

Matières rares et matières premières, métaux rares et terres rares sont des termes souvent confondus et utilisés les uns à la place des autres, notamment par les médias. On parle de plus en plus des enjeux des métaux critiques et des métaux stratégiques. Petite explication autour de ces mots que nous allons souvent retrouver dans ce rapport.

Les matières rares. Les “raw materials” du Critical Raw Materials Act (CRMA) européen que l’on traduit parfois à tort par « matières rares » sont en réalité des matières premières critiques non encore transformées. Essentielles à la transition énergétique, numérique et industrielle de l’Union Européenne, elles regroupent des métaux (ex. : lithium, nickel, cobalt, cuivre, terres rares, tungstène…) et quelques non métaux (ex. : charbon à coke, feldspath, graphite, phosphore…).

Les métaux rares. Il s’agit de métaux dont l’abondance moyenne et/ou la disponibilité (capacité à se concentrer en gisements) est faible dans la croûte terrestre (ex. : l’or est 10 000 fois moins abondant que le cuivre). On trouve facilement sur Wilkipedia la liste des éléments chimiques du tableau périodique de Mendeleïev et leur abondance dans la croûte terrestre (des moins rares aux plus rares).

Les terres rares. Le nom de terres rares prête à confusion. Les terres rares ne sont pas si rares d’un point de vue géologique. Certaines terres rares comme le cérium sont plus abondantes que le cuivre dans la croûte terrestre. Elles sont rares du fait du nombre limité de gisements exploitables, de la difficulté de les extraire et de les séparer. Les terres rares sont au nombre exact de 17 métaux différents.

Les métaux critiques. Les métaux critiques, l’Union Européenne parle plus de matière premières critiques, sont ceux pour lesquels un risque pèse sur la chaîne d’approvisionnement (risques liés à des situations de quasi-monopole, risques liés à l’instabilité politique des pays fournisseurs). Ces matières premières critiques sont répertoriées par la Commission Européenne tous les 3 ans depuis 2011, sur une liste qui en compte aujourd’hui exactement 34*.

Les métaux stratégiques. Ce sont des métaux indispensables à la politique de Défense d’un État par exemple ou aujourd’hui plus particulièrement à sa politique énergétique ou celle d’un acteur industriel majeur (ex. : en France, le titane pour Airbus). Sur les 34 matières premières jugées critiques par la Commission Européenne, 17 sont jugées stratégiques.

* Les 34 matières premières critiques : Aluminium/Bauxite/Alumine, Antimoine, Arsenic, Barytine, Béryllium, Bismuth, Bore, Charbon à coke, Cobalt, Cuivre, Feldspath, Gallium, Germanium, Graphite, Zirconium/Hafnium, Hélium, Lithium, Magnésium, Manganèse, Nickel, Niobium, Phosphore, Phosphorite, Scandium, Silicium métallique, Spath fluor, Strontium, Tantale, Titane métal, Platine (métaux du groupe), Terres rares légères, Terres rares lourdes, Tungstène, Vanadium

Le groupe du Platine comprend plusieurs métaux : Iridium, Palladium, Platine, Rhodium, Ruthénium. Les terres rares légères : Lanthane, Cérium, Praésodyme, Néodyme, Samarium. Les terres rares lourdes : Yttrium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutétium

Introduction

Petit rappel : les métaux au cœur des grands âges de l'humanité

Tout a débuté lorsque nos lointains ancêtres se sont munis de pierres ramassées dans leur environnement pour les transformer en objets du quotidien : armes, outils, bijoux… C'était, il y a plus de 3 millions d'années.

Au cours du néolithique, il y a environ 10 000 ans av. J.-C., on a probablement commencé par ramasser des pépites d'or ou de cuivre natif, pour en faire des bijoux ou des petits objets du quotidien. Exceptionnellement, on trouvait aussi des petits morceaux de fer (…) issus des météorites. Après avoir simplement ramassé dans leur environnement des éléments déjà métalliques, les hommes ont appris à valoriser ces métaux et d'autres en faisant fondre les minerais qui les contenaient. L'Histoire de l'Humanité est ainsi intimement liée à l'usage des minerais et des métaux issus du sous-sol. C'est l'usage même de ces métaux qui est le critère privilégié pour définir les grandes périodes de la Préhistoire : l'âge de la pierre, l'âge du cuivre (débute vers 3200 ans av. J.-C.), l'âge du bronze (vers 2 700 ans av. J.-C.), et l'âge du fer (vers 800 ans av. J.-C.). Cette succession d'âges correspond à des températures de fusion de métaux de plus en plus élevées et donc à la mise au point de fours de plus en plus performants.

De sept métaux à une centaine de métaux utilisés tous les jours

Dans l'Antiquité, 7 métaux sont connus et exploités : l'or, l'argent, le cuivre, le plomb, l'étain, le fer et le mercure. Au Moyen-Age, d'autres métaux sont utilisés comme le zinc en alliage avec le cuivre pour former le laiton puis le nickel, le platine… L'accélération de la découverte des autres métaux et de leurs usages s'opère à partir du XVIIIe siècle. Le XIXe siècle consacre la découverte de plus d'une centaine d'éléments différents dans le tableau périodique de Mendeleïev. Conçu en 1869 par le chimiste russe Dimitri Ivanovitch Mendeleïev, le tableau périodique recense l'ensemble des éléments chimiques connus et les classe selon leur numéro atomique et leurs propriétés chimiques (voir tableau en annexe). Le nombre de métaux différents utilisés par les hommes n'a alors jamais cessé d'augmenter : une dizaine au début du XXe siècle, une trentaine après la Seconde Guerre Mondiale et près d'une centaine aujourd'hui. Un téléphone portable à lui seul contient plus d'une soixantaine d'éléments chimiques différents ou métaux.

Les « games changers » à l'origine de l'explosion de la demande

« On va extraire autant de métaux dans les 30 prochaines années que ce que l'humanité a extrait jusqu'à présent », selon différents experts auditionnés.

A noter qu'il existe plusieurs familles de métaux (voir annexe) : les métaux ferreux, les métaux de base (ex : aluminium, cuivre…), les métaux précieux (l'or, l'argent, les platinoïdes …) et les métaux technologiques (plus d'une soixantaine dont les terres rares, le lithium, le gallium…) qui occupent une place de plus en grande dans notre consommation courante même s'ils sont produits en faibles quantités comparées aux métaux ferreux et de base. Voici quelques ordres de grandeur des productions mondiales en 2024 de certains métaux exprimés en tonnes : Fer (2,5 milliards), aluminium (70 millions), cuivre (22,5 millions), plomb (4,7 millions), lithium (500 000), terres rares (385 000), gallium (713), platine (178,8)…

Les deux transitions et leurs métaux critiques

Depuis le milieu des années 2010, plusieurs rapports internationaux, ceux de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), de la Commission Européenne ou le Rapport VARIN en France ont souligné l'importance stratégique des métaux. La transition vers les technologies bas-carbone et la croissance du numérique menacent de faire exploser la demande. Cette évolution entraîne un développement rapide du secteur de l'extraction minière.

Le numérique, souvent perçu comme un secteur immatériel, repose en réalité sur une forte consommation de métaux. Les infrastructures de communication utilisent beaucoup de cuivre dans les câbles et des petites quantités de germanium dans les fibres optiques. Nos appareils électroniques — ordinateurs, smartphones, objets connectés — contiennent de nombreux métaux en petites quantités. Un smartphone renferme à lui seul près de soixante métaux différents. Pour des métaux comme l'indium, le gallium, le germanium ou le tantale, et certaines terres rares, le secteur numérique représente déjà entre 80 et 90 % de la demande mondiale. Ces « petits métaux », bien que représentant seulement 0,1 % du poids d'un téléphone, sont indispensables à son fonctionnement. Leur intégration dans des alliages complexes rend leur recyclage difficile. Cela pose un défi majeur pour la durabilité et la gestion responsable de ces ressources.

Le premier « game changer » : les technologies vertes

	Multiplication potentielle de la demande entre 2023 et 2040	Part des technologies - bas carbone dans la demande totale en 2023	Part des technologies - bas carbone dans la demande totale en 2030	Part des technologies - bas carbone dans la demande totale en 2040
Cuivre	x 1,5	24 %	45 %	50%
Lithium	x 8,7	56 %	87 %	91 %
Nickel	x 2,1	15 %	50 %	56%
Cobalt	x 2,2	30%	59 %	59 %
Graphite	x 3,9	26 %	65 %	63 %
Terres rares	x 1,9	18 %	42 %	41%

Figure 1 : criticité des métaux, une évaluation des besoins à horizon 2040 (Source : AIE, 2024)

En 2024, l'Agence Internationale de l'Energie a estimé qu'un scénario de neutralité carbone, « Net Zéro Emissions by 2050 » engendrerait une multiplication des besoins mondiaux en cuivre par 1,5, de ceux de cobalt et de nickel par plus de 2, ceux de lithium par 8,7 (...) d'ici à 2040. Il va falloir mobiliser de grandes quantités de métaux pour produire l'énergie, la transporter et l'utiliser. Parmi les métaux essentiels à cette transition, on cite souvent le cuivre utilisé dans l'électrification de nos déplacements, notamment le réseau électrique nécessaire à la charge des batteries. Au-delà d'être simplement à l'origine de l'explosion de la demande, la part des technologies bas carbone dans la demande totale de ces métaux va, d'ici à 2040, dépasser largement la moitié, jusqu'à 63 % pour le graphite ou 91 % pour le lithium. Premier « game changer » de la consommation en métaux de demain : les technologies vertes.

Une chaîne de valeur complexe et sous domination de la Chine

Forts d'une répartition géographique inégale de la production minière et du raffinage, les marchés des métaux sont à la fois complexes et bien plus concentrés que les marchés pétroliers et gaziers avec un pays qui domine : la Chine. On notera également l'arrivée de nouveaux entrants…

Pour prendre conscience de la complexité et de la dispersion de cette chaîne de valeur, nous reprendrons un seul exemple donné par plusieurs de nos conférenciers : la chaîne de valeur des batteries lithium-ion. Avant de pouvoir servir à démarrer une voiture électrique en utilisant son énergie, une batterie lithium-ion aura déjà parcouru plus de 50 000 kms, soit plus que le tour de la terre (un plus de 40 000 kms) pour être produite, intégrée et arrivée jusqu'à nous. Les étapes de « mining » ont lieu pour l'essentiel en Australie et dans « le triangle du lithium des ABC » (Argentine-Bolivie-Chili), les étapes de processing sont réalisées en Chine et au Chili, au Japon (cathodes), en Corée du Sud (cells), aux Etats-Unis (battery pack)… On notera dès à présent que même si les pays du « triangle du lithium » représentent à eux seuls 40 % de production mondiale et plus de 60 % des réserves mondiales, Pékin domine le raffinage du lithium. La Chine raffine 62 % du lithium mondial. La Chine s'est imposée comme un géant industriel mondial, notamment grâce à son expertise dans le secteur du raffinage de la plupart des métaux stratégiques qui sont au cœur de nos technologies.

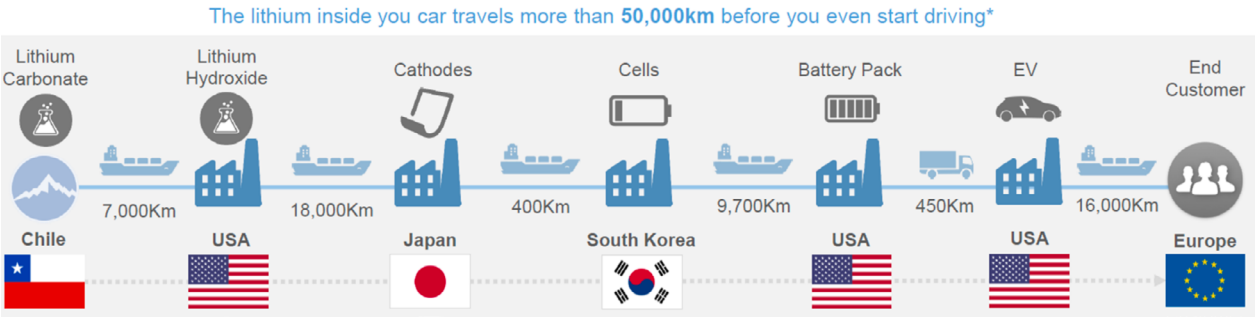

Figure 2 : La complexité de la chaîne de valeur du lithium (Source : BRGM, 2025)

Concentration de la production des métaux et domination chinoise

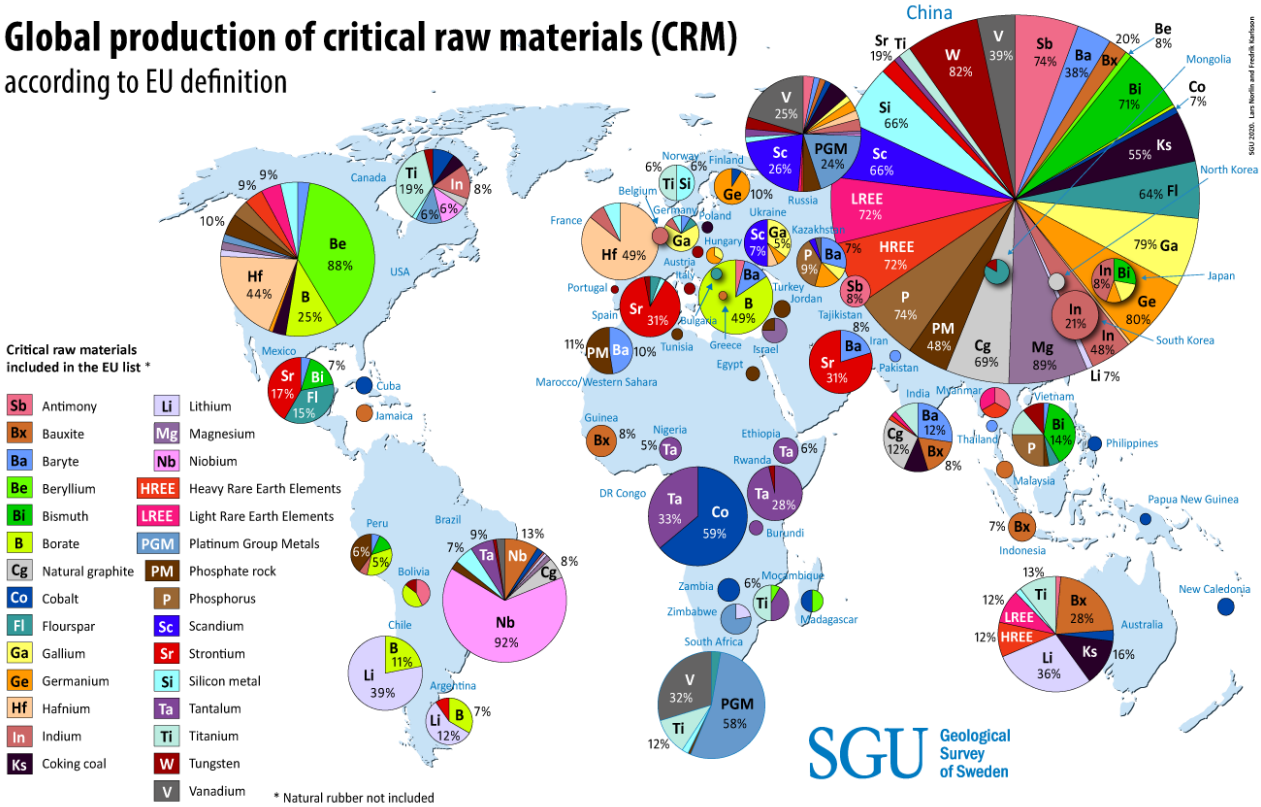

Figure 3 : La concentration de la production des métaux dans le monde (Source : SGU, 2024)

Plutôt qu'un long discours, ce « Dessous des cartes » illustre parfaitement la domination chinoise et la concentration de la production de certains métaux entre les mains seulement de quelques pays. La prise de conscience de notre dépendance aux métaux a véritablement émergé en 2010, lorsque la Chine a suspendu ses exportations de terres rares vers le Japon après un incident maritime… D'ici à 2030, 70 à 75 % de l'approvisionnement en métaux critiques viendra de trois pays dominants : la Chine, l'Indonésie et la République Démocratique du Congo (RDC). La Chine concentrera 90 % du graphite et 77 % des terres rares raffinés, accentuant la dépendance mondiale. Les restrictions chinoises à l'exportation se multiplient depuis 2023, touchant successivement des métaux raffinés comme le gallium, le germanium, le graphite, les terres rares, depuis peu l'antimoine, le tungstène, le molybdène, l'indium, le tellure et le bismuth. Désormais au nombre de plus de 3 000 dans le monde, les barrières commerciales freinent les échanges de matières premières et de technologies bas carbone. Elles accentuent la fragmentation des chaînes de valeur et la vulnérabilité des approvisionnements.

Les politiques publiques pour sécuriser nos approvisionnements

À l'échelle mondiale, la demande en métaux critiques est désormais considérée comme un enjeu de sécurité majeur par l'Agence Internationale de l'Energie pour faire face au changement climatique. En Europe comme en France, la forte dépendance à un nombre limité de pays — conséquence d'années de désindustrialisation et de pertes de compétences — oblige désormais à réinvestir dans la sécurisation des approvisionnements en ressources minérales et métalliques.

Un enjeu de sécurité pour l'Agence Internationale de l'Energie

L'Agence Internationale de l'Energie, déjà dotée d'une politique de sécurisation sur le pétrole, a pris conscience dès 2021 des enjeux de sécurisation des minerais critiques avec la production de rapports dédiés. Elle concentre ses travaux sur les métaux clés suivants de la transition énergétique : cuivre, lithium, nickel, graphite et terres rares. L'AIE souligne que la traçabilité complète des chaînes de valeur sera déterminante pour relever les défis à venir, mais que les réticences au partage d'informations et les tensions politiques freinent fortement les progrès. Selon ses projections, un déficit d'offre en cuivre et en nickel est attendu à moyen terme, en raison d'un manque de nouveaux projets miniers. Le marché du cobalt devrait rester équilibré, tandis que ceux du graphite et des terres rares — malgré des volumes suffisants — demeurent très exposés à des risques géopolitiques, car leur production est concentrée dans seulement quelques pays. L'intérêt politique pour les métaux critiques s'est nettement intensifié : l'AIE recense 251 politiques publiques entre 2020 et 2023, contre seulement 20 entre 2000 et 2020. D'après l'IFP Energies Nouvelles, ces politiques couvrent à la fois les enjeux industriels, miniers et globaux, ceux relevant de la diplomatie des matières premières. Pour accompagner l'essor nécessaire du secteur — passer d'environ 40 à 400 projets miniers dans le monde — la Banque mondiale et les agences multilatérales doivent davantage partager les risques avec les entreprises. Un assouplissement des règles financières, notamment celles issues de « Bâle III », est indispensable pour permettre des investissements stratégiques.

Les objectifs européens du Critical Raw Materials Act (CRMA)

Suite à la crise dite des terres rares (tensions entre la Chine et le Japon en 2010), la politique européenne sur les matières premières critiques n'a cessé de se renforcer pour aboutir à un règlement européen : le « Critical Raw Materials Act » préparé et négocié en moins d'un an, entre 2023 et 2024, approuvé par le Conseil de l'Union Européenne le 18 mars 2024. « Depuis 2011, l'Europe a sélectionné et passe en revue 80 matières premières tous les 3 ans avec l'analyse de deux déterminants : la concentration de l'offre et l'explosion de la demande », explique la Commission Européenne. Entre 2011 et aujourd'hui, la liste de matières premières dites critiques est passée de 25 à 34 matières. Face à ces dépendances, les pays membres de l'Union Européenne se sont entendus sur 4 objectifs chiffrés pour augmenter leur capacité de production industrielle européenne d'ici à 2030 :

1. La capacité d'extraction de l'UE devra couvrir au moins 10 % de la consommation de l'UE.
2. La capacité de transformation de l'UE devra couvrir au moins 40 % de la consommation de l'UE.
3. La capacité de recyclage de l'UE devra couvrir au moins 25 % de la consommation de l'UE.
4. Pas plus de 65 % de la consommation de chaque matière première stratégique dans l'UE ne devra provenir d'un seul pays tiers.

A noter que ces objectifs ne sont pas pour autant contraignants. La Commission Européenne a identifié récemment 47 projets stratégiques dans l'Union Européenne (dont 9 en France) et 13 projets stratégiques en dehors de l'UE, y compris dans les pays ou territoires d'outre-mer, répondant à ces objectifs. Face à la course mondiale aux métaux critiques, l'Union européenne est prise en tenaille entre la Chine qui a investi plus de 1 000 milliards $

dans les « Nouvelles routes de la soie » (dans 68 pays) et les États-Unis qui ont mobilisé plus de 500 milliards $ pour sécuriser leurs propres ressources. La compétitivité européenne repose surtout sur la taille de son marché intérieur. La préférence européenne apparaît comme un levier clé. La filière européenne des métaux critiques ne pourra réussir qu'en développant une filière aval capable de transformer ces métaux en composants stratégiques.

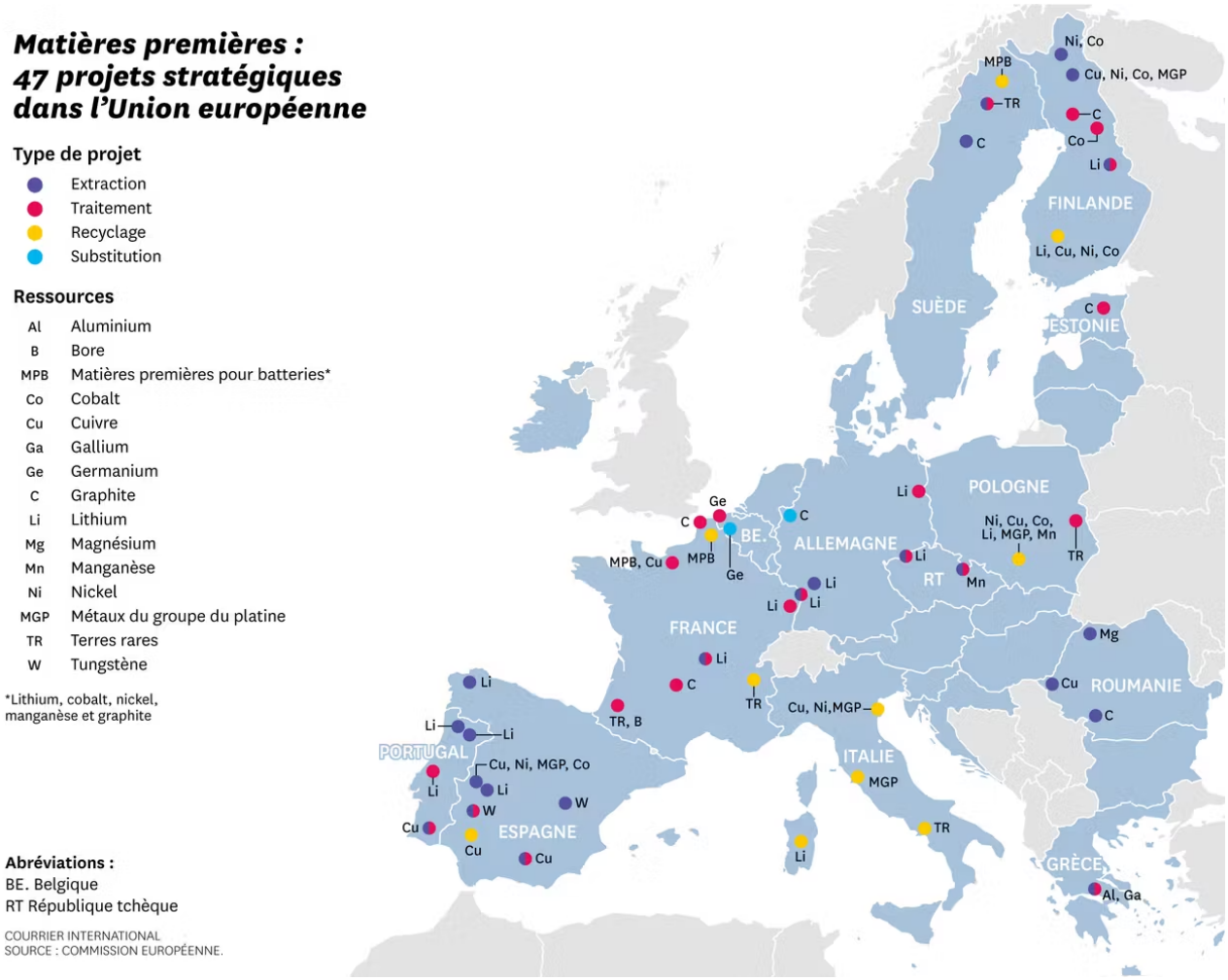

Figure 4 : Matières premières, 47 projets stratégiques dans l'Union Européenne (Source : CE, 2025)

Les outils et les projets stratégiques de la France

« La transition énergétique est plus politique que technico-économique. On ne peut pas s'en remettre simplement à l'économie et au marché. La Chine l'a bien compris en contrôlant toute la chaîne de valeur » selon Philippe VARIN, auteur du rapport sur « La sécurisation de l'approvisionnement de l'industrie française en matières premières minérales pour la transition énergétique » remis le 10 janvier 2022 au Gouvernement. Sur la base des recommandations de ce rapport, il a été mis en place et créé au niveau français :

1. une délégation interministérielle dédiée : la Délégation Interministérielle aux Approvisionnements en Minerais et Métaux Stratégiques (DIAMMS).
2. l'Observatoire Français des Ressources Minérales pour les Filières Industrielles (OFREMI), avec une expertise notamment dans la traçabilité des chaînes de valeur.
3. Un fonds d'investissement dédié aux Métaux Critiques (avec Infravia, 2 milliards d'euros à terme) afin de soutenir la transition énergétique et sécuriser les approvisionnements.
4. Deux nouveaux pôles industriels français : un sur les batteries à Dunkerque, un sur le recyclage des aimants à Lacq.
5. Une cartographie réactualisée par le BRGM des opportunités minières en France.

La France mise également sur des partenariats bilatéraux et multilatéraux pour diversifier ses approvisionnements en métaux critiques. Elle a déjà signé 14 accords internationaux (Australie, Canada, Brésil, Japon, RDC…). Ces coopérations s'appuient notamment sur le BRGM, l'Europe et l'AIE. Au total, depuis 2022, le plan d'investissement France 2030 a permis de faire émerger une quinzaine de projets d'usines sur le territoire ainsi que l'extension des capacités de production d'une dizaine de sites existants. Jusqu'à 3 800 emplois directs pourraient être générés par la concrétisation de ces projets. Ces projets devraient permettre notamment de satisfaire 70% des besoins nationaux de l'industrie de transformation de l'aluminium en 2030, 100% de nos besoins nationaux en terres rares lourdes, l'équivalent de 90% des besoins nationaux en fils de cuivre en 2028, selon la Direction Générale des Entreprises. La décarbonation est un facteur clé de compétitivité, mais pour réussir le développement d'une industrie verte, l'industrie traditionnelle reste indispensable.

Figure 5 : Les projets industriels français positionnés sur la chaîne de valeur des aimants permanents et des batteries hors giga-factories. (Source : EDF, 2025)

Encadré 2 : Epuisements ou pénuries ?

A la question, les ressources en métaux vont-elles s'épuiser ? La réponse selon nos spécialistes est « non », malgré ce qu'on peut lire ou entendre. Pouvons-nous avoir des pénuries ? La réponse est « oui », essentiellement parce que la production ne suit pas la consommation.

Pas de risque d'épuisement. Certes, la teneur (concentration des métaux dans les minerais) des gisements exploités est de plus en plus faible. Mais, plus la teneur d'exploitation est faible, plus il y a des gisements disponibles. La montée du cours du métal permet alors d'exploiter des gisements à plus faible teneur. On parle de loi de Lasky. Ainsi, malgré une consommation et une production croissantes, nos réserves de minerai sont toujours plus abondantes. Un exemple : si les réserves de cuivre dans le monde en 1995 étaient estimées à 310 millions de tonnes, elles sont aujourd'hui estimées à un milliard de tonnes. Mais il y a des conséquences : produire à partir de minerais à plus faibles teneurs consomme plus d'énergie et produit plus de déchets.

Plutôt un risque de pénurie. « Plus qu'une problématique de réservoir (stock géologique), il s'agit d'une problématique de robinet (flux économique) pour pouvoir produire ces métaux dans les temps face à l'urgence climatique » selon l'expert Emmanuel Hache. C'est l'incapacité du secteur minier à répondre rapidement à la demande en métaux qui est pointé du doigt, conduisant à de fortes tensions entre l'offre et la demande. Sur la seule question du temps minier, le développement d'une mine entre l'exploration et la première production varie de 5 ans pour le lithium à près de 17 ans pour le cuivre. La prise de conscience des impacts environnementaux des mines, l'acceptabilité sociale, les nouvelles exigences en termes de conditions de travail dans les mines, les conflits locaux entraînent de plus en plus le ralentissement voire l'arrêt de certains projets.

I. Les consommateurs de métaux et nature de leurs besoins

Les secteurs d'activités consommateurs de métaux dans le monde sont nombreux. Nous avons fait le choix dans nos travaux de faire un focus en France sur le secteur des énergies (production, distribution, déplacements) qui est, comme nous l'avons déjà vu, très consommateur de métaux. Il va entraîner une multiplication par 4 de la demande d'ici à 2040. D'autres secteurs industriels aussi stratégiques que l'aéronautique, la défense ou le numérique en France sont également consommateurs de métaux mais dans des quantités moindres et différents les uns des autres.

A. Les producteurs d'énergie

1. Métaux spécifiques consommés

	Batteries	Réseau	Nucléaire	Photovoltaïque	Éolien terrestre	Éolien en mer	Hydraulique	CCG Gaz	Charbon
Aluminium	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Cuivre	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Acier	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Béton	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Terres rares						●			
Argent	●			●					
Silicium		○		●					
Uranium			●						
Zirconium			●						
Graphite	●			●					
Lithium	●								
Cobalt	●								
Manganèse	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Nickel	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Chrome	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Zinc	○	○	○	○	○	○	○	○	○

● *Ressource mobilisée dans la structure ou pour le combustible* ○ *Ressource mobilisée dans des alliages (non quantifiable)*

Figure 6 : Les principales matières utilisées dans le secteur électrique (Source : EDF, 2025)

2. Principaux enjeux industriels

	Éolien Offshore	Éolien Onshore	PV	Nucléaire	Charbon	Gaz naturel
Cuivre	8	2,9	2,8221	1,473	1,15	1,1
Nickel	0,24	0,4035	0,0013	1,2974	0,721	0,0158
Chrome	0,525	0,47		2,19	0,3075	0,0483
Cobalt	—	—	—	—	0,2015	0,0018
Manganèse	0,79	0,78		0,1477	—	0,0046
Silicon	—	—	3,9483	—	—	—
Zinc	5,5	5,5	0,03	—	—	—
Molybdène	0,109	0,099	—	0,0708	0,0663	
Terres rares	0,239	0,014	—	0,0005	—	
Autres	0,006	—	0,032	0,0943	0,0339	
Total	**15,409**	**10,1665**	**6,8337**	**5,2737**	**2,4802**	**1,1705**

Figure 7 : L'intensité matière dans la production d'énergies, exprimé en Tonne / MW installé
(Source : AIE 2021, EDF R&D)

Intensité matière. On pourra noter à la lecture de ce tableau : une faible intensité des besoins en matières premières dans la filière nucléaire, les enjeux sont beaucoup plus marqués pour les énergies renouvelables (hors réseaux), pour la fabrication des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques, avec un facteur 6 à 7 fois supérieur aux besoins de l'industrie nucléaire à puissance électrique égale.

Stratégie énergétique. En misant sur une production d'électricité majoritairement nucléaire — près de 70 % du mix — la France s'est dotée d'un modèle où la pression sur les matières premières reste maîtrisée. La densité énergétique exceptionnelle de l'uranium combinée à une filière industrielle mature constitue un levier majeur de stabilité pour la politique énergétique nationale. A noter que la dépendance française en terme d'approvisionnements en uranium souligne l'importance de rester vigilant quant à la diversification de nos sources.

Quasi-souveraineté. La France possède l'immense atout à travers le groupe FRAMATOME d'avoir une filière quasi souveraine dans la production de zirconium et d'hafnium, garantissant ainsi un approvisionnement continu de la filière nucléaire (gaines de crayons, guides, feuillards...). Il s'agit d'une métallurgie très complexe nécessitant de lourds investissements. Cependant, les gisements de minerais de zirconium sont en Australie, Afrique (du sud notamment), Kazakhstan...

Métaux sous surveillance. La prolongation du parc de centrales existant (LTO) et des programmes EPR 1+6(+8) vont conduire à augmenter la part de l'électricité d'origine nucléaire à l'horizon 2050, contribuant ainsi à la transition énergétique mais aussi nécessitant plus de zirconium pour le gainage des combustibles.

Contrats sécurisés. Les cycles de rechargements des réacteurs ayant lieu en moyenne tous les 18 à 24 mois, la sécurisation des contrats est centrale pour tenir les délais de réapprovisionnement. L'intérêt des études menées par EDF est d'essayer de toujours mieux répondre aux spécificités de sa filière nucléaire, peu prises en compte au niveau européen, en surveillant des éléments aussi spécifiques que le bore, l'indium...

Energies renouvelables. Concernant les énergies renouvelable, le point critique est la fabrication des aimants pour les éoliennes, aujourd'hui dominée par la Chine.

B. Les distributeurs d'énergie

1. Métaux spécifiques consommés

Pour la conduction de l'électricité dans les réseaux et les équipements, le cuivre reste la référence grâce à sa conductivité élevée, mais l'aluminium, plus léger et moins coûteux, est de plus en plus utilisé dans les lignes à haute tension. L'or et l'argent interviennent dans les composants électroniques de haute performance, notamment pour garantir la fiabilité et la durabilité des connexions.
EDF surveille de très près les marchés de l'aluminium et du cuivre utilisés dans les réseaux, via un Comité de veille cuivre piloté par la Direction Générale des Entreprises du Ministère de l'Economie et des Finances. La consommation de ces métaux par EDF reste limitée à moins de 5 000 tonnes par an, bien loin derrière les besoins de RTE ou d'ENEDIS.

2. Principaux enjeux industriels

Le développement et le renforcement des réseaux électriques vont nécessiter beaucoup de cuivre et d'aluminium, déjà très sollicités par l'électrification de la mobilité par exemple.

Réseau électrique français. Agé de 50 ans en moyenne, son architecture est historiquement centrée sur les grandes centrales de production. Il se compose de 3 principaux réseaux : le réseau de grand transport 46 000 km (lignes à très haute tension) et de répartition régionale 54 000 km (lignes à haute tension) confié à RTE, le réseau de distribution 1,4 millions de km (lignes à moyenne ou basse tension) confié principalement à ENEDIS.

Choix énergétiques. Le choix du mix électrique influence fortement les besoins en matériaux : un scénario 100 % renouvelable (ce qui est exclu en France) demanderait environ deux fois plus de cuivre et d'aluminium qu'un scénario à 50 % nucléaire. Cette différence provient surtout de l'intensité matière des ENR et du renforcement des réseaux pour les raccorder et transporter leur production.

Empreinte carbone. RTE intégrera 10 % d'aluminium recyclé dès cette année et vise progressivement 30 % d'ici 2040. RTE entend recycler et valoriser environ 600 tonnes d'aluminium par an, au bénéfice du réseau français et d'autres clients. Cette nouvelle filière permettra à RTE de réduire l'empreinte carbone de l'aluminium.

Filière circulaire. Le projet Nexagreen de Nexans soutenu par France 2030 va permettre d'étendre son usine de Lens pour produire 240 000 T/an de fil de cuivre, dont 80 000 T recyclés, augmentant ainsi de 50 % la capacité du site et lançant une filière circulaire nationale du cuivre. Cet investissement permettra à Nexans d'anticiper les risques d'une éventuelle pénurie de cuivre.

Batteries stationnaires. Les batteries utilisées par EDF pour des applications stationnaires sont de composition LiFePO4 mobilisant ainsi moins de matériaux critiques tels que le cobalt ou le nickel. Parmi les nouvelles technologies stationnaires de stockage d'énergie étudiées, EDF n'exclue pas l'utilisation du stockage thermique, gravitaire…

Arrivée de la fibre. A noter qu'Orange met fin, zone par zone, à l'ancien réseau téléphonique en cuivre qui servait à l'ADSL et au téléphone fixe traditionnel. Ce réseau, vieillissant et coûteux à entretenir, est remplacé par la fibre optique, plus performante et plus fiable. D'ici 2030, l'ensemble du territoire doit basculer vers ces nouvelles technologies sans cuivre.

Fonctions critiques. SCHNEIDER Electric, expert de la gestion de l'énergie, a adopté une approche plus par fonction que par matériaux pour gérer ses priorités. La question centrale pour l'industriel est : quelles fonctions critiques sont au cœur de son métier ? Quels sont les métaux au cœur de ses fonctions les plus critiques à dérisquer ?

Stocks industriels. SCHNEIDER Electric utilise le stockage de matières premières comme dernier recours. L'industriel donne comme exemple l'argent pour les contacts électriques. La priorité reste pour cette entreprise la sécurisation de ses contrats avec ses fournisseurs.

C. L'industrie automobile

1. Métaux spécifiques consommés

Les moteurs, présents dans les véhicules électriques, mobilisent des métaux comme le néodyme pour fabriquer des aimants permanents puissants. Ces aimants permettent de réduire la taille et d'améliorer l'efficacité énergétique des moteurs. Le cuivre, quant à lui, est indispensable à la fabrication des bobinages et au transport du courant électrique.

Enfin, les batteries, au cœur du stockage de l'énergie et de la mobilité électrique, nécessitent des métaux stratégiques tels que le lithium, le nickel, le manganèse et le graphite. Ces matériaux assurent la capacité énergétique, la stabilité et la durée de vie des batteries lithium-ion.

On pourrait aussi citer l'utilisation du nitrure de gallium (GaN) pour l'électronique de puissance. Le gallium est souvent donné comme exemple de métal critique au titre de son utilisation dans les ABS.

L'approvisionnement durable de ces métaux constitue donc un enjeu majeur, tant pour la sécurité énergétique que pour la réussite de la transition vers un modèle bas carbone.

2. Principaux enjeux industriels

Faibles quantités. L'OFREMI donne l'exemple du gallium dans l'automobile. Le gallium joue un rôle stratégique dans les systèmes ABS. Même en très faibles quantités, une restriction chinoise sur ses exportations peut bloquer la production automobile européenne.

Sans terres rares. Des constructeurs comme BMW ou NISSAN développent des moteurs sans terres rares, remplaçant le néodyme et le dysprosium par des systèmes à excitation en cuivre, réduisant ainsi la dépendance stratégique aux terres rares.

Sans cobalt et nickel. Les batteries Li-ion à énergie spécifique plus faible mais sécurisée LFP offrent des alternatives au lithium-ion à énergie spécifique élevée NMC et LCO, en supprimant le nickel et le cobalt, tout en gardant le graphite qui est essentiel pour les anodes.

Contrats off-take. Les contrats off-take sécurisent l'accès des industriels aux métaux critiques tout en garantissant aux mineurs des débouchés stables. Ces contrats off-take au niveau des miniers sont insuffisants pour une sécurisation des industries de produits finis. Ces contrats sont aussi essentiels aux industries de transformation de la métallurgie.

Nouveaux usages. La demande en métaux pourrait aussi dépendre de nouvelles approches dans nos mobilités. Des batteries plus petites pour des véhicules plus petits, les robot-taxis ou les reports modaux pourraient réduire nos besoins en métaux.

Nouvelles approches. La batterie interchangeable, relancée par RENAULT et NIO, offre également une alternative rapide à la recharge classique.

D. L'industrie aéronautique

1. Métaux spécifiques consommés

La structure d'un avion repose largement sur l'aluminium, un métal léger, résistant à la corrosion et facile à usiner. Toutefois, pour les zones soumises à de fortes contraintes mécaniques ou thermiques, comme les ailes ou le train d'atterrissage, le titane est privilégié. Il allie une grande solidité à une densité relativement faible, tout en supportant de hautes températures. Les matériaux composites, souvent renforcés par des fibres de carbone, viennent compléter cet ensemble pour réduire encore le poids des appareils et donc leur consommation de carburant.

Le moteur d'un avion concentre les métaux les plus critiques et les plus stratégiques. Les superalliages à base de nickel, de cobalt, de niobium, de rhénium ou encore d'hafnium sont indispensables pour résister aux températures extrêmes et aux fortes pressions rencontrées dans les turbines. Ces éléments assurent une durabilité et une efficacité énergétique accrues, contribuant directement à la réduction des émissions de CO_2 par vol.

Le cuivre, pour sa part, est omniprésent dans le câblage électrique, garantissant la conduction fiable des signaux et de l'énergie à bord. Les aimants permanents, à base de samarium et de cobalt, jouent un rôle clé dans les systèmes de commande, différents types d'actionneurs, où la stabilité magnétique est essentielle.

Enfin, l'électronique embarquée — cœur des systèmes de navigation, de communication et de contrôle — mobilise des métaux spécifiques comme le silicium, le gallium, le palladium, le tantale, l'or et l'argent. Ces matériaux permettent la miniaturisation, la vitesse de traitement et la fiabilité des circuits électroniques.

2. Principaux enjeux industriels

Coût de revient. AIRBUS reconnait que même si le constructeur aéronautique chinois COMAC propose des appareils moins performants qu'AIRBUS, Pékin reste un véritable compétiteur avec un coût de production de ses avions deux fois moindre.

Enjeux complexes. Selon le constructeur et le motoriste, le recyclage aéronautique doit tenir compte de plusieurs spécificités : la très longue durée de vie des avions (plus de 40 ans), leur dispersion à l'échelle de la planète, la nécessité de tracer les matériaux et l'historique des réparations, ainsi que les délais de certification très longs pour intégrer des matériaux recyclés (plus de 10 ans).

Droit de propriété. Selon SAFRAN, la clarification de qui est propriétaire des matériaux - élaborateurs d'alliages ? constructeurs de moteur ? ou compagnies aériennes ? - est déterminante afin de définir des modèles d'affaires efficaces pour le recyclage des pièces en fin de vie.

Gouvernance. Chez SAFRAN, c'est au niveau de la R&D que sont testées les preuves de concept de circularité. Les décisions stratégiques sur cette circularité sont prises au plus haut niveau de l'entreprise. C'est le COMEX et le CEO qui arbitrent les choix majeurs en la matière.

Coordination. Si pendant longtemps, le recyclage des déchets aéronautiques n'a pas fait l'objet d'un contrôle par l'industriel, AIRBUS entend aujourd'hui peser dans la coordination des différents acteurs du recyclage, sans forcément s'y substituer.

Circularité. AIRBUS conçoit ses avions pour être démantelés et vise à valoriser sur ses 420 sites et à travers ses 20 000 fournisseurs 90 000 tonnes de déchets annuels.

Titane métal. Le titane (couple titane / composite) remplace progressivement l'aluminium dans les avions, représentant 14 % de la masse d'un AIRBUS A350. Pour sécuriser l'approvisionnement en titane, AIRBUS s'est associé avec SAFRAN et a mis en place des boucles de récupération et de recyclage. L'industrie aéronautique consomme 50 à 75 % du titane mondial.

Alliages d'aluminium. L'aluminium constitue 70 à 75 % de la masse d'un AIRBUS A320, qui représente 56 % de la flotte AIRBUS en service. Plus de 400 alliages différents sont utilisés, rendant parfois complexe le recyclage. Cependant, AIRBUS consomme seulement 0,1 % du flux mondial d'aluminium (100 à 120 000 tonnes/an), limitant son pouvoir de négociation.

Conflits d'usage. Les superalliages base nickel ou cobalt (le nickel représente la moitié du poids d'un moteur) offrent un fort potentiel de recyclage mais sont également considérés comme critiques par le motoriste SAFRAN, car ils entrent directement en compétition avec les besoins de la transition énergétique très consommatrice de ces métaux dans les batteries.

Enjeux de substitutions. Dans les moteurs d'avion, la substitution par des composites à matrice céramique (CMC) ou à matrice organique(CMO) et le développement de la fabrication additive visent à optimiser l'utilisation des matières premières et à réduire leur consommation.

Stocks stratégiques. SAFRAN se concentre sur des stocks de produits plutôt que les métaux eux-mêmes. AIRBUS explique que la guerre en Ukraine a poussé l'industriel à constituer également des stocks. Mais pour être efficace, cette stratégie doit être coordonnée à l'échelle de toute la filière aéronautique.

Filières produit. Il faut créer des filières non pas seulement sectorielles mais aussi dédiées à des produits incontournables. Ainsi, SAFRAN pointe du doigt la problématique particulière mais stratégique des aimants permanents samarium-cobalt très utilisés dans l'aéronautique.

Démantèlement. Le démantèlement est aussi un axe fort de la politique du motoriste. Pour mettre en oeuvre ses ambitions, il faut changer les pratiques de conception et de fabrication (éco-conception pour être plus facilement démantelable) et structurer des filières de démantèlement à l'échelle internationale.

Soutien européen. En dehors de l'inscription récente du titane comme métal critique et stratégique dans la liste du CRMA, AIRBUS demande à l'Europe de mettre en place des fonds souverains pour soutenir concrètement ses efforts dans la circularité de ses matériaux.

E. L'industrie de la Défense

1. Métaux spécifiques consommés

Dans l'aéronautique militaire, notamment pour les avions de chasse, le titane occupe une place prépondérante : il combine légèreté, solidité et résistance à la chaleur, qualités indispensables aux structures soumises à des contraintes extrêmes. Le chrome, le cobalt, le molybdène et le niobium renforcent les alliages utilisés dans les moteurs et les pièces mécaniques, garantissant une durabilité accrue et une tenue exceptionnelle à haute température.

Les missiles et les munitions nécessitent des métaux à très haute densité comme le tungstène et le tantale, capables de supporter de fortes pressions et d'offrir une puissance de pénétration élevée. Dans les optiques militaires — jumelles de vision nocturne, systèmes de visée ou capteurs infrarouges — le germanium et le béryllium sont essentiels. Le germanium permet la détection infrarouge, tandis que le béryllium, léger et rigide, est utilisé dans les structures optiques de précision.

Les systèmes de guidage, cruciaux pour la précision des armements modernes, reposent largement sur les terres rares, utilisées dans les capteurs, gyroscopes et composants électroniques miniaturisés. Les blindages, destinés à protéger véhicules et personnels, mobilisent des métaux comme le manganèse, le vanadium ou le bore, qui confèrent aux aciers et alliages une grande résistance aux chocs et à la perforation.

Dans le domaine hautement stratégique de la propulsion nucléaire, le zirconium et l'hafnium jouent un rôle clé : le premier est utilisé dans les gaines de combustible en raison de sa transparence aux neutrons, tandis que le second sert à contrôler la réactivité du réacteur. Enfin, les aimants permanents à base de néodyme ou de samarium sont indispensables aux moteurs, aux radars et aux systèmes de détection.

2. Principaux enjeux industriels

Les métaux dans les chaînes de valeur de l'industrie de Défense sont déterminants pour assurer notre souveraineté et la sécurité de notre nation.

Montée en compétences. La France souffre d'une perte de compétences dans les secteurs minier, du raffinage et métallurgique. La formation dans ces domaines est insuffisante, freinant le développement industriel. Le raffinage comme le recyclage, pourtant cruciaux, restent des secteurs négligés par les décideurs souvent peu formés techniquement.

Dépendance russe. L'Europe est devenue fortement dépendante de la Russie pour plusieurs métaux stratégiques, essentiels à sa Défense, comme le titane, le nickel ou l'aluminium. Après l'invasion de l'Ukraine, ces métaux ont échappé aux sanctions, révélant l'importance critique de ces approvisionnements. Cette dépendance constitue une menace majeure pour la sécurité européenne.

Capacités manufacturières. La Défense française souffre d'un manque critique de produits semi-finis, aussi basiques que certains types de tôles ou d'écrous, essentiels à la fabrication d'équipements militaires. Ce déficit est souvent plus problématique que celui des matières premières. Il devient urgent de relancer notre industrie.

Technologies duales. La Défense ne consomme qu'une très faible part des métaux : moins de 1 % de la consommation européenne, 4 à 5 % pour quelques métaux spécifiques. Or, 80 % des technologies de défense sont duales (ex : l'électronique), donc dépendantes des chaînes civiles, elles-mêmes vulnérables aux importations de pays tiers.

Coordination européenne. En Europe, malgré la volonté de reprendre le contrôle des secteurs stratégiques, le manque de coordination entre pays et l'absence de planification freinent les progrès. Les initiatives butent sur les coûts, les réglementations et la confidentialité.

Stocks stratégiques. La constitution de stocks stratégiques est essentielle en cas de crise, comme le montrent les États-Unis avec leurs réserves de cuivre et titane. En France, seuls certains industriels de la Défense en disposent. Ni l'État français ni l'Union Européenne n'ont constitué jusqu'à présent de stocks, jugés trop coûteux. L'Europe a annoncé vouloir copier le modèle japonais du JOGMEC (objectifs en moyenne de stockage de 60 jours de consommation nationale japonaise).

F. L'industrie numérique

1. Métaux spécifiques consommés

Les semi-conducteurs constituent la base de tous les composants électroniques modernes, des ordinateurs aux téléphones portables. Le silicium, métal semi-conducteur le plus utilisé, permet la fabrication des puces et circuits intégrés grâce à sa capacité à contrôler le flux d'électrons. D'autres métaux comme le gallium et l'arsenic sont essentiels pour les semi-conducteurs (GaAs), employés dans les dispositifs à haute fréquence, les diodes laser ou les systèmes de télécommunication. On peut aussi noter l'utilisation de GaN dans l'électronique de puissance.

Les conducteurs transparents, présents notamment dans les écrans tactiles, les panneaux OLED ou les cellules photovoltaïques, utilisent l'indium sous forme d'oxyde d'indium-étain (ITO). Ce matériau unique combine transparence optique et conductivité électrique.

Les condensateurs, éléments essentiels au stockage temporaire d'énergie dans les circuits, mobilisent des métaux tels que l'aluminium, le tantale et le palladium. Le tantale, en particulier, est très prisé pour sa stabilité et sa capacité à former des couches minces à haute densité énergétique, indispensables dans des appareils miniaturisés.

Les connectiques et soudures reposent sur des métaux comme le cuivre, l'étain, l'or et l'argent, choisis pour leur conductivité exceptionnelle et leur fiabilité. L'or et l'argent sont utilisés dans les contacts de haute précision pour éviter l'oxydation, tandis que le cuivre assure la conduction dans les circuits imprimés.

2. Principaux enjeux industriels

Société numérique. Nos sociétés, de plus en plus connectées, dépendent fortement des technologies avancées comme les semi-conducteurs. D'ici 2030, 60 % de la croissance dans ce secteur proviendra de domaines transverses tels que l'Internet des Objets, les communications et l'automobile.

Deux transitions. Les matériaux utilisés en microélectronique pour la transition numérique comme énergétique couvrent presque tout le tableau périodique de Mendeleïev. Si l'on considère la chaine d'approvisionnement, on s'aperçoit que beaucoup risquent d'être indisponibles, faute de minerais, et surtout d'industrie pour les traiter et les raffiner aux degrés de pureté attendus.

Deux approches. Pour les circuits intégrés, il y a deux approches technologiques principales : la miniaturisation extrême des composants (« More Moore »), et l'incorporation de plus de fonctions dans un circuit intégré (« More than Moore »). Dans les deux cas, les matériaux sont au cœur de l'innovation et leur disponibilité est hautement stratégique.

Optimisation. La complexité croissante stimule l'innovation en multipliant les alternatives possibles. La notion de matériaux critiques oriente la recherche vers une utilisation optimale et minimaliste des ressources. La microélectronique, en évolution constante, est particulièrement impactée par ces défis.

Substrats avancés. Les substrats traditionnels sont souvent épais et coûteux, surtout lorsqu'ils contiennent des matériaux critiques comme le nitrure de silicium. Le CEA-LETI et SOITEC développent des substrats avancés via la technique « smartcut ». Pour les matériaux disponibles en petites quantités, on utilise un collage moléculaire afin d'optimiser l'usage et la fabrication des circuits intégrés.

Réduction matière. Pour optimiser l'utilisation des matériaux, le dépôt atomique couche par couche permet de déposer ou retirer précisément les atomes nécessaires. Le CEA-LETI

travaille sur deux procédés clés, l'ALDAS (dépôt sélectif) et l'ALE (gravure atomique). Ces techniques offrent un contrôle atomique, réduisant le gaspillage et améliorant la performance des composants.

Recyclage matière. Le CEA-LETI cherche également à récupérer et réutiliser les atomes non déposés sur les substrats, qui se retrouvent sur les parois des enceintes ou dans les rejets. Cette démarche vise à réduire le gaspillage de matériaux coûteux et rares. Optimiser ce recyclage est crucial pour la durabilité et l'efficacité des processus de fabrication.

Enjeux de substitution. L'objectif est de minimiser, voire d'éliminer, l'usage de métaux critiques grâce à une « engineering » atomique sur mesure. Le Leti développe des outils, notamment basés sur l'IA, pour accélérer cette innovation du matériau au système. Le gallium illustre ces défis, nécessitant une approche globale.

II. Confrontation des besoins avec les producteurs de métaux

Les producteurs de métaux font face à une forte hausse de la demande. Ils incluent l'industrie minière, du raffinage, le recyclage et la recherche de technologies alternatives. L'enjeu principal est d'aligner l'offre en amont des producteurs avec la demande en aval des consommateurs industriels pour éviter des pénuries. Le recyclage est un levier stratégique mais sera insuffisant pour couvrir la demande future. La recherche de technologies alternatives (dont la substitution) est également un levier pour réduire voire remplacer certains métaux mais pas pour augmenter directement la production de métaux. L'industrie minière et le raffinage restent donc les principaux leviers pour faire face à la demande mondiale.

A. Les mines

1. Données générales sur les mines

Fortes contraintes. A l'échelle mondiale, les principales problématiques minières sont la forte concentration de la production et du traitement des métaux, les tensions géopolitiques, les instabilités politiques, la baisse des rendements d'extraction, la difficulté à ouvrir de nouvelles mines, surtout sous contrôle chinois. Le Rapporteur Philippe VARIN parle d'une offre très contrainte.

Concentrations à risque. L'extraction et le raffinage sont concentrés géographiquement notamment pour les terres rares, le graphite le nickel et le cobalt entre la Chine, l'Indonésie et la RDC. D'ici 2030, 70 à 75 % de la croissance de l'approvisionnement en lithium, nickel, cobalt et terres rares viendra de ces 3 pays, selon l'AIE.

Offre et demande. Même si notamment la production de lithium a été capable de suivre la demande, l'équilibre reste fragile. Le cœur du problème réside dans l'explosion de besoins en métaux liés à la transition énergétique et l'offre minière qui peine à suivre ce rythme.

Fragilisation des liens. L'Europe ne représente plus que 5 à 6 % de l'activité minière mondiale, avec une quasi-absence de la France, autrefois acteur majeur. Le transfert des activités dans les années 1980-90 a entraîné notamment la fragilisation des liens entre technologies et ressources, le manque d'acceptabilité sociale et la perte de certaines compétences scientifiques.

Chaîne de valeur. En France, la connaissance des chaînes de valeur est coordonnée par l'État via l'OFREMI, qui rassemble acteurs publics, industriels et partenaires européens. L'OFREMI vise à suivre les marchés et les technologies, développer des indicateurs de criticité, réaliser des tests de résilience, qui servent de référence au niveau européen.

Mines responsables. Les mines doivent être plus responsables. Il en va de l'acceptabilité sociale. De plus en plus de technologies innovantes permettent de réduire de moitié l'impact de 4 indicateurs essentiels : les déchets, le CO2, l'énergie et l'eau liés à l'industrie minière. Le pôle de compétitivité des industries du sous-sol Avenia s'inscrit notamment dans cette dynamique.

Acceptabilité sociale. L'acceptabilité sociale est en effet un enjeu majeur pour la réouverture de mines notamment en France. A cet égard, le projet IMERYS d'exploitation du lithium

dans l'Allier est très intéressant, avec la mise en œuvre d'une forte concertation en amont du projet, pour atténuer les oppositions voire susciter l'adhésion d'un territoire et de ses habitants.

Analyse du sous-sol. La France relance son inventaire minier à travers le BRGM, le précédent datant des années 1980 et ne couvrant que 22 matériaux sur la cinquantaine aujourd'hui jugés stratégiques. Ce nouveau programme, qui s'étendra sur 15 ans, mobilise des techniques non intrusives et des outils numériques. Il vise aussi à repérer d'anciens sites à dépolluer et à valoriser.

Multiples coopérations. La France a signé 14 accords bilatéraux et multilatéraux avec des partenaires stratégiques (Australie, Brésil, Canada, RDC, Japon...) pour sécuriser et développer des projets miniers. Elle participe à des instances internationales comme l'AIE et l'ITIE.

Montée en compétences. Le renouveau des mines en Europe nécessite de former des techniciens et des ingénieurs, en intégrant les enjeux sociétaux et économiques dans ces formations. La coopération avec des pays nordiques comme la Finlande, la Norvège et la Suède pourrait renforcer ces compétences.

Réduction des risques. Tout l'art des géosciences repose sur les enjeux d'incertitudes et de risques. L'un des objectifs des formations en géosciences est de préparer les étudiants à essayer de réduire au mieux ces incertitudes et ces risques.

Partenariats publics-privés. L'exemple est donné du partenariat entre les formations en métallogénie de l'Université de Lorraine et le projet industriel d'IMERYS : 5 ans de projet scientifique partenarial avec le laboratoire GéoRessources, pas moins de 6 thèses, la création d'une start-up... avec l'idée de produire in fine un minerai zéro résidu.

Partenariats sur le long terme. La recherche doit s'inscrire sur le temps long pour pouvoir en retirer des bénéfices. Ce temps long se rapproche du temps long que l'on trouve dans tout nouveau projet industriel minier. L'exemple de création d'un chaire industrielle ANR dédiée a pu être donnée par l'Université de Lorraine.

2. Enjeux pour deux industriels français majeurs

Côté industries minières, nous avons auditionné IMERYS et ERAMET. Pour rappel : IMERYS compte 12 400 collaborateurs, réalise un chiffre d'affaires de 3,6 milliards d'euros, est N°1 dans 75 % des marchés de minerais industriels qu'elle exploite. ERAMET compte 10 160 collaborateurs, réalise un chiffre d'affaires de 3,4 milliards d'euros dont 59 % avec l'Asie, 23 % avec l'Europe, 16 % avec l'Amérique du Nord, 2 % avec le reste du monde. Nous avons également entendu l'entreprise LITHIUM DE FRANCE.

IMERYS est aujourd'hui l'une des très rares grandes entreprises françaises à exploiter encore des ressources minières sur notre territoire, avec une expertise historique dans la concentration des minerais. Parmi ses minerais : la pouzzolane, le carbonate de calcium, le silicium, le kaolin, le talc, l'andalousite, la mullite (...) pour les marchés de la construction, de la papeterie, de l'automobile...

IMERYS contribue à sécuriser la transition énergétique en fournissant des minerais clés pour les panneaux solaires comme le silicium, le lithium, l'andalousite-mullite et le graphite naturel et synthétique pour les batteries. Elle est aussi active dans les secteurs traditionnels en apportant des minéraux pour améliorer les matériaux de construction, filtrer et réduire l'empreinte carbone.

ERAMET est une entreprise française, avec l'État parmi ses actionnaires, très présente à l'international, elle exploite des ressources majeures au Gabon (manganèse), en Nouvelle-Calédonie et Indonésie (nickel), et au Sénégal (sables minéralisés : titane et zirconium). Elle développe également des projets lithium en Argentine, Chili, Brésil, USA et en France.

ERAMET considère que la relocalisation de la chaîne de valeur en Europe est un défi, la Chine restant pour l'instant plus compétitive. Sa stratégie est de reproduire le modèle chinois en implantant une partie de sa chaîne de valeur au plus près de ses sites d'exploitation, notamment pour le lithium et le nickel.

3. Zoom sur l'extraction du lithium

Projet EMILI dans l'Allier

Le projet EMILI, lancé en France par IMERYS, incarne le renouveau de l'activité minière nationale.

Contexte général : Le projet lithium à Échassières, situé dans la carrière de kaolin déjà exploitée, prévoit une production de 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium d'ici fin 2028. Il souligne l'importance d'impliquer dès le départ les acteurs locaux pour garantir l'acceptabilité sociale, avec plus de 30 000 demandes traitées. IMERYS mène une concertation active et s'engage dans une exploitation responsable (ex : réutilisation de l'eau à 85 % en circuit fermé).

Technologies innovantes : IMERYS combine savoir-faire traditionnel en concentration des minerais (compétences fortes dans les process de flottation) avec des compétences nouvelles en raffinage hydro-métallurgique (pour la production de carbonate ou d'hydroxyde de lithium), en valorisant mieux des sous-produits (comme le niobium et le tantale), les déchets miniers (issus du minerai de lépidolite pour l'industrie du pneumatique par exemple).

Projet CENTENARIO en Argentine

Contexte général : Le projet CENTENARIO en Argentine, lancé en décembre dernier par ERAMET à 4 000 m d'altitude, prévoit une production de 24 000 tonnes de carbonate de lithium par an, suffisant pour faire rouler l'équivalent de 600 000 véhicules électriques, avec un objectif à terme de 2 millions. ERAMET explore aussi un projet géothermal en Alsace, en partenariat avec Électricité de Strasbourg.

Technologies innovantes : ERAMET utilise un procédé d'extraction directe du lithium, dite DLE, offrant un rendement de 90 % contre 50 % dans les salars chiliens traditionnels (évaporation pendant 18 mois). Ce procédé réduit fortement la consommation d'eau, avec 60 % d'eau recyclée, ce qui en fait un véritable « game changer » pour l'industrie du lithium.

Projet LITHIUM DE FRANCE en Alsace

Contexte général : Le projet de lithium en Alsace combine production d'énergie géothermale et extraction de lithium à partir de saumures géothermales. Il vise à réduire la dépendance aux méthodes traditionnelles sud-américaines, souvent très consommatrices en eau et énergie et promet une production locale durable, avec un fort potentiel pour couvrir jusqu'à un tiers des besoins français en lithium pour véhicules électriques d'ici 2030.

Technologies innovantes : L'extraction directe de lithium (DLE) à partir de saumures géothermales offre un rendement élevé (+ de 90 %) en un temps réduit, avec un impact environnemental minimisé grâce à un circuit fermé d'eau. Le projet mise sur la co-innovation industrielle (production de chaleur et de lithium) pour optimiser les procédés à moindre coût et prévoit d'explorer la valorisation d'autres éléments chimiques contenus dans les saumures.

4. Zoom sur le raffinage des déchets miniers

Recycler les résidus miniers représente une opportunité à la fois environnementale et économique, permettant de dépolluer les anciens sites tout en récupérant des métaux critiques. Le BRGM est chargé de réaliser un inventaire national de ces ressources secondaires.

Exemples de potentiels
En France (Gardanne) : les résidus de bauxite entreposés à Gardanne contiennent environ 230 tonnes de gallium et 500 tonnes de scandium métal, des quantités très importantes comparées aux productions annuelles mondiales de ces métaux.

En Ouganda (Kilembe) : les drainages miniers acides très polluants autour de l'ancienne mine de cuivre de Kilembe, générés par un million de tonnes de résidus sulfurés, ont été traités. Le site a été dépollué tout en valorisant le cobalt présent. 10 000 tonnes de cobalt ont été ainsi extraits.

Technologies innovantes
Le BRGM a mis au point un procédé innovant associant des bactéries (pour la biolixiviation) et des protéines spécifiques (modifiées génétiquement) afin d'extraire et de séparer efficacement les métaux contenus dans les déchets miniers. Par exemple, la landmoduline est une protéine très sélective pour les terres rares.

Ces technologies, encore en phase de recherche et de validation économique, pourraient aussi s'appliquer au recyclage des déchets électroniques (D3E), avec des résultats prometteurs obtenus sur les plateformes du CEA et du BRGM.

Enfin, d'autres secteurs s'y intéressent : les enzymes pour dégrader les polymères dans le domaine du recyclage des plastiques et les protéines pour traiter les actinides dans le domaine nucléaire.

B. Le raffinage

Maillon intermédiaire de la chaîne de valeur, le raffinage, permet de transformer le minerai en métal utilisable. Aujourd'hui, cette expertise est largement maitrisée par la Chine, créant une dépendance critique. Pour la France et l'Europe, l'enjeu est de reconstruire ce savoir-faire parfois historique (exemple du raffinage des terres rares à La Rochelle par Rhône-Poulenc) et de relancer des formations en génie des procédés.

1. Données générales sur le raffinage

Enjeux de souveraineté. L'Europe a bien compris que l'étape du raffinage dans la chaîne de valeur de la production de métaux était cruciale. Le CRMA a fixé comme objectif une transformation intra-européenne d'au moins 40% de la consommation annuelle à l'intérieur de l'Union Européenne d'ici 2030.

Enjeux européens. L'enjeu de réindustrialisation sur 34 CRMs doit être Européen, car la France ne peut pas porter seule la totalité des filières à réindustrialiser. S'appuyer sur les compétences métallurgiques et les capacités de raffinage de nos voisins, en particulier Allemands ou Scandinaves, permettra d'accélérer notre remontée en compétences et d'assurer une montée en production des différents métaux sur le sol de l'Union Européenne.

Domination chinoise. La Chine domine largement le raffinage des métaux critiques. Par exemple, elle n'extrait que 13 % du lithium mondial, mais produit près des deux tiers du lithium raffiné. Selon les prévisions de l'AIE pour 2030, la Chine fournira aussi plus de 90 % du graphite de qualité batterie et 77 % des terres rares raffinées.

Place des petits métaux. En 2022, la production mondiale de gallium n'a pas dépassé 400 tonnes. Ces métaux clés, comme le gallium (issu du minerai à aluminium) ou le germanium (issu du minerai à zinc), sont des sous-produits de métaux plus courants. Leur production repose en grande partie sur le savoir-faire chinois en matière de raffinage.

Chimie des procédés. Il existe un manque de compétences en chimie des procédés, que ce soit dans le raffinage (du minerai jusqu'au métal ou ses oxydes), la chimie des poudres (ex : la production des batteries), la métallurgie des poudres (ex : le recyclage des aimants) ou encore la métallurgie classique (indiqué notamment par la Défense).

Nouvelles formations. La France dispose d'excellentes compétences en science des matériaux grâce à ses laboratoires et écoles de haut niveau. Cependant, il devient crucial de former davantage d'ingénieurs et de techniciens aux procédés industriels de raffinage, notamment en hydrométallurgie et pyrométallugie.

Idée de raffinerie intégrée. Il a été proposé d'inventer une raffinerie intégrée capable de traiter des flux de déchets variés pour produire des matériaux à haute valeur ajoutée, par exemple en extrayant les métaux rares des déchets électroniques pour fabriquer des alliages métalliques à haute entropie utilisables par exemple dans l'aéronautique.

2. Zoom sur le raffinage des terres rares

Les reconversions de l'usine de La Rochelle

Souveraineté historique. Dans les années 1980, RHONE-POULENC était le leader mondial du raffinage des terres rares, traitant jusqu'à 50 % de la production mondiale. Son usine de La Rochelle, spécialisée dans la purification des minerais de monazite, exportait alors 90 % de sa production. Ces terres rares étaient alors principalement utilisées dans les vieux tubes cathodiques de télévision.

Questions environnementales. En raison des risques environnementaux liés au thorium radioactif, l'usine française de La Rochelle a fermé en 1994. La concurrence chinoise à bas coût avec ses normes environnementales moins strictes a rendu la production française non compétitive. Depuis, la production mondiale de terres rares s'est progressivement concentrée en Chine.

Du raffinage au recyclage. L'usine de La Rochelle a conservé ses équipements de séparation et de purification des terres rares, qu'elle a utilisés dans des technologies à haute valeur ajoutée. Ces équipements ont servi successivement au recyclage de luminophores, à la production de cérium pour catalyseurs et polissage électronique, ainsi qu'à d'autres marchés spécialisés.

Recyclage et gisements. Le recyclage de terres rares comme le cérium (des pots catalytiques) ou l'europium (des lampes fluocompactes) chez SOLVAY (anciennement RHÔNE-POULENC) a été bouleversé par l'arrivée des véhicules électriques et des LED. Le manque de modèle économique pour exploiter chaque élément individuellement (cérium, europium…) a renforcé ces difficultés. Aujourd'hui, SOLVAY mise sur le recyclage de terres rares dans les aimants permanents.

D'autres entreprises de raffinage en France

En France, plusieurs entreprises conservent encore un savoir-faire dans le raffinage dans des secteurs stratégiques comme :

- FERROGLOBE raffine dans son usine de Montricher-Albanne du quartz de haute pureté pour produire du silicium métallique destiné aux semi-conducteurs et aux cellules solaires.
- TRONOX raffine dans son usine de Thann des sables d'ilménite pour produire du dioxyde de titane (TiO_2), utilisé dans les peintures, plastiques et papiers.

- AMG Antimony raffine dans son usine de Chauny des concentrés de stibine pour produire du trioxyde d'antimoine, essentiel pour les retardateurs de flamme et la microélectronique.
- NYRSTAR raffine dans son usine d'Auby de la sphalérite pour produire de l'indium, utilisé dans les écrans tactiles et les cellules solaires.

C. Le recyclage

La circularité est un pilier sur lequel il faudra compter. C'est à l'échelle locale qu'il faudra savoir jouer cette circularité et réduire le coût du recyclage. Mais ce n'est qu'à partir de 2030-35, que la fin de vie des premières générations de différents équipements génèrera une véritable massification des flux de déchets recyclables. En attendant, industriels et chercheurs s'y préparent sans vraiment savoir à quoi ressemblera le monde du recyclage de demain.

1. Données générales sur le recyclage

Enjeux de durabilité et de souveraineté

Economie circulaire. L'économie circulaire est un modèle global de production et de consommation qui vise à limiter le gaspillage des ressources. Elle englobe plusieurs stratégies comme : le réemploi, la réparation, le partage… Le recyclage est un maillon de cette chaîne. Le recyclage consiste à faire des déchets une matière première secondaire.

Réduction des GES. L'ADEME a pu rappeler l'impact environnemental très positif du recyclage à travers les exemples de quelques métaux recyclés permettant d'éviter : 58 % des émissions de GES nécessaires à la production d'acier primaire, 93 % pour de l'aluminium primaire, 10 % pour du cuivre primaire.

Impact énergétique. Les procédés de recyclage émettent beaucoup moins de CO_2 et restent également bien moins énergivores que l'extraction minière. Si l'on prend l'exemple du recyclage des aimants permanents, la consommation d'énergie varie selon la méthode de recyclage : les filières dites de recyclage par « voie courte » consomment moins que les filières par « voie longue ».

Ambition européenne. L'Europe s'est fixée, dans le cadre du Critical Raw Materials Act (CRMA), l'objectif de recycler 25 % des métaux critiques à l'échelle du continent. Parmi les 47 projets jugés stratégiques et soutenus par l'Union européenne, 10 concernent le recyclage, incluant notamment des initiatives sur la valorisation des aimants permanents et des batteries.

Une solution parmi d'autres. Selon l'ADEME, augmenter le recyclage des matières critiques pourrait réduire de 25 à 40 % les besoins en ressources vierges d'ici 2050, mais cela restera insuffisant face à la demande croissante. Pour le cuivre, même avec un recyclage à 24 %, un déficit mondial de 1,4 à 9,4 millions de tonnes est attendu d'ici 2035. Pour compenser, plus de 60 nouvelles mines devront être ouvertes. L'utilisation massive de l'aluminium comme substitut n'est pas ici pris en compte.

Taux de recyclage contrastés. À l'échelle mondiale, certains métaux affichent de bons taux de recyclage, comme le plomb et l'or, recyclés à plus de 80 %. En revanche, le cobalt et le nickel ne le sont qu'à 40–50 %, et le lithium ainsi que les terres rares sont à moins de 1 %. Selon l'ADEME, seuls quelques métaux courants (plomb, cuivre, fer, nickel…) sont bien recyclés, tandis que les métaux rares présents dans les cartes électroniques le sont très peu, à l'exception des métaux précieux.

Enjeux techniques et industriels

Eco-conception. Très en amont d'un nouveau matériau, il faut essayer d'élaborer entre industriels et laboratoires un cahier des charges qui anticipe ces enjeux du recyclage. C'est l'éco-conception ou l'éco-design. Si cela a été bien fait pour les batteries c'est un échec pour les smartphones. On ne doit pas reproduire cette erreur sur les nouvelles chaînes de valeurs.

Structuration. Il est important de rappeler que la logique qui soutiendra les investissements structurants nécessaires (collecte, démantèlement, isolation des « fractions à concentration viable », assets de recyclage et de purification), doit être vue comme une logique d'autonomie stratégique. Une simple logique de marché ne pourra pas, a priori, porter le développement de ces filières sans un soutien stratégique garanti sur le court et le long terme. Et cela est encore plus vrai pour l'économie circulaire que pour la production de matières vierges.

Démontage. Le démontage de produits électroniques comme la déconstruction d'un avion soulèvent encore de nombreuses questions. Jusqu'où aller dans la séparation des composants d'un téléphones ou d'une batterie, dans le démantèlement d'un avion ou d'une voiture pour que l'opération reste pertinente commercialement.

Procédés. Un exemple : le recyclage du cuivre. En France, il repose surtout sur la fusion des déchets pour produire des lingots, avec de gros investissements comme ceux de NEXANS. Cependant, la filière d'affinage, qui permettrait de produire des cathodes de cuivre, est presque absente. Ainsi, la France exporte encore une grande partie de ses déchets de cuivre.

Maturité. Si les matériaux sont critiques, la mise au point des procédés l'est tout autant. Le projet de recyclage des aimants d'ORANO et du CEA-LITEN montre l'importance de tester un pilote avant son industrialisation. Pour réussir, il faut un partenariat recherche-industrie, une réglementation européenne adaptée et l'intégration dans la chaîne de valeur notamment des utilisateurs.

Opacité. Les vols de cuivre devraient s'intensifier avec l'aggravation du déséquilibre entre l'offre et la demande, alimentés par un marché opaque où la traçabilité des alliages est insuffisante. Pour y faire face, il est nécessaire de renforcer les filières de recyclage des métaux critiques grâce à des outils réglementaires et des contrôles adaptés.

Traçabilité. La traçabilité sert à distinguer métaux recyclés et vierges afin d'en garantir l'origine et la qualité. Des travaux de recherche sur le traçage isotopique, notamment portés par le BRGM au niveau européen, pourraient permettre à terme une certification via la Bourse des Métaux de Londres (LME). Dans l'aéronautique, cet enjeu est crucial car la réincorporation de matériaux recyclés exige une connaissance précise de leur « histoire », notamment après plusieurs décennies d'usage.

Savoir-faire. La préservation et la transmission des savoir-faire industriels, ainsi que la remise en service de processus et d'équipements, sont essentielles pour relancer certaines productions. L'usine SOLVAY de La Rochelle a conservé ses équipements de séparation et de purification des terres rares, qu'elle a su adapter d'abord pour le recyclage des luminophores, puis des pots catalytiques, aujourd'hui des aimants permanents.

Utilisation de l'IA. L'Intelligence Artificielle peut améliorer les process du recyclage. VEOLIA donne comme exemple le tri des composants électroniques qui pourrait s'inspirer des technologies de tri optique déjà utilisées pour les plastiques en utilisant l'IA. Elle peut aussi permettre d'automatiser le démantèlement des batteries, aujourd'hui encore majoritairement effectué manuellement.

Nouvelles formations. Certaines compétences très spécifiques nécessitent d'(ré-)ouvrir de nouvelles formations. Ce constat a été fait par l'ensemble des intervenants. Ainsi, l'hydrométallurgie comme la chimie souffrent d'une baisse d'offres de formation liée au recul de l'activité industrielle. Pourtant, les besoins augmentent avec les projets de recyclage des batteries et des aimants.

Enjeux de gisements nouveaux

Enjeux différés. Le recyclage ne pourra vraiment se développer qu'à partir de 2030, lorsque les premières générations d'équipements arriveront en fin de vie, entraînant une hausse des volumes de déchets recyclables. D'ici 2035, les quantités recyclées resteront faibles. L'exemple est donné des batteries qui vivent plus longtemps que les véhicules et qui peuvent avoir une seconde vie, d'où l'incertitude sur les volumes à recycler avant 2035.

Accessibilité. Par ailleurs, se pose la question de l'accessibilité du gisement. Les métaux sont diffus et leur concentration faible dans la plupart des gisements. Il est donc primordial de développer des procédés industriels adaptés pour dépolluer dans un premier temps puis recycler la part valorisable dans un second temps. Cela a un impact économique important.

Filières de recyclage. De nombreuses filières de recyclage se sont développées ces dernières années dans l'hexagone : comme celle des aimants par ORANO et le CEA-LITEN, de la « black mass » (lithium, cobalt, graphite…) des batteries par VEOLIA, des terres rares des anciennes lampes par SOLVAY, du titane par ECO-TITANIUM, de l'aluminium par CONSTELLIUM…

Cartes électroniques. VEOLIA recycle les métaux stratégiques des déchets électroniques sur huit sites économisant ainsi 0,7 tonne de CO_2 par tonne traitée. Le recyclage des métaux spéciaux comme les terres rares, le gallium ou l'indium reste un défi, seuls les métaux précieux comme l'or sont valorisés. Les enjeux actuels portent sur le développement de procédés pilotes innovants (biolixiviation, nouveaux solvants) pour extraire ces métaux complexes, avec des résultats prometteurs du CEA et du BRGM.

Alliages spéciaux. Le recyclage des alliages à base titane ou aluminium, des superalliages à base nickel et cobalt, est devenu stratégique pour des industriels comme AIRBUS, SAFRAN ou la Défense. Il répond à la préservation de secteurs industriels clés pour la souveraineté française, comme l'aéronautique et la Défense…

Nombreux gisements. Les gisements de métaux à recycler sont partout : aussi bien dans les enceintes de l'industrie électronique (récupération et réutilisation « des atomes » des métaux perdus lors de la fabrication des semi-conducteurs) qu'à travers les 800 000 tonnes de mâchefers issus des 50 incinérateurs d'ordures ménagères que recycle VEOLIA pour récupérer 6 000 tonnes de métaux non ferreux.

Enjeux économiques et stratégiques

Marché. Le recyclage peut être développé lorsqu'il répond à un besoin industriel réel et qu'il est économiquement viable. Bien que les nouvelles techniques de recyclage de l'europium par exemple soient prometteuses sur un plan scientifique, leur utilité dépendra de la demande future pour ce matériau. La question des débouchés est centrale.

Réglementation. Par ailleurs, il faut aussi considérer les cas où la réglementation va créer de nouveaux marchés : par exemple, la réglementation batteries en imposant des taux de recyclage et la nécessité de ré-incorporer des matériaux issus du recyclage dans les nouvelles batteries.

Adaptation. La très forte volatilité des marchés des métaux rend nécessaire une capacité d'adaptation pour les industriels. Beaucoup de petites entreprises de recyclage de batteries ont disparu après la baisse des prix du lithium en 2020. VEOLIA, en revanche, a réussi à résister grâce à la diversification de ses activités, notamment dans l'eau et l'incinération des déchets.

Pilotage. Si les preuves de concept de recyclage sont développées au niveau de la R&D, les décisions stratégiques sont désormais prises directement par le COMEX et le CEO. AIRBUS reprend en main la maîtrise du recyclage en coordonnant les acteurs de la filière sans s'y substituer. SAFRAN comme AIRBUS affirment que la circularité est devenue un enjeu central de gouvernance.

Propriété. La question de la propriété des matières premières devient centrale dans les nouveaux modèles d'affaires du recyclage. Il faut clarifier le rôle de chacun dans la chaîne de valeur. Qui seront demain les acteurs de la collecte des alliages d'un moteur. Cette même question se pose dans tous les domaines.

2. Zoom sur le recyclage des aimants

Plusieurs sociétés françaises travaillent sur le recyclage des aimants permanents et leurs terres rares : CARESTER à Lacq et SOLVAY à La Rochelle utilisent la voie longue hydro-métallurgique, produisant des oxydes de terres rares, mais pas d'aimants finis. MagREEsource et ORANO/CEA-LITEN à Grenoble privilégient la voie courte, produisant directement des aimants permanents, avec une consommation énergétique moindre pour des aimants de haute performance.

Aimants permanents. Les aimants frittés $Nd_2Fe_{14}B$, utilisés dans les moteurs électriques et les éoliennes, sont les plus puissants produits industriellement. Ils contiennent des terres rares dites légères (Néodyme) et lourdes (Dysprosium) pour atteindre une forte coercivité stable en température. Ces matériaux sont classés comme critiques par l'Union Européenne. La fabrication des aimants dépend de 70 à 80 paramètres, du broyage à la re-magnétisation en passant par l'alignement des grains.

Projet de recyclage. ORANO et le CEA-LITEN souhaitent recycler les aimants permanents utilisés dans 80 % des moteurs électriques, en conservant rémanence et coercitivité. Ils intègrent 25 % de matières recyclées dans les nouveaux aimants, le reste étant à 75 % des matières primaires. Le processus repose sur 8 étapes complexes et la maîtrise de la métallurgie des poudres. Le partenariat ORANO/CEA-LITEN combine expertise des procédés et industrialisation.

Partenariat public-privé. Le succès du recyclage industriel des aimants repose sur le lien recherche-industrie et l'usage de l'IA pour optimiser les procédés. Trois conditions clés : tester le pilote de 4 tonnes sur le site du CEA-LITEN qui vient d'être inaugurée pendant 18–24 mois, adapter le cadre européen et mobiliser les utilisateurs pour sécuriser l'approvisionnement et limiter la dépendance.

Structuration de la filière. La filière de récupération des aimants reste à structurer, les volumes issus du recyclage des véhicules électriques n'arriveront qu'à partir de 2030. Aujourd'hui, chaque centre VHU (500 en France) traite un seul véhicule électrique par an. D'autres sources sont identifiées, comme les éoliennes off-shore et les rebuts industriels, reconnues comme ressources stratégiques.

3. Zoom sur le recyclage des batteries

Des projets emblématiques visent à relocaliser la production de batteries en France pour réduire notre dépendance aux importations asiatiques (ACC à Douvrin, VERKOR à Dunkerque…), d'autres visent à préparer le recyclage des batteries de voitures électriques même si ce n'est pas pour tout de suite… C'est le cas de VEOLIA, fort de 15 ans d'expérience dans le recyclage des piles et batteries, qui se prépare à ces enjeux. L'objectif est d'extraire les métaux classiques (cuivre, aluminium, acier) de la fraction de black mass (contenant les métaux stratégiques comme le nickel, le cobalt et le lithium) qui peut être valorisée dans un second temps.

Réglementations

Réglementations européennes. Les nouvelles réglementations européennes fixent des objectifs de contenu recyclé dans les batteries neuves pour réduire la dépendance aux

ressources primaires et encourager le recyclage entre 2031 et 2036 : Lithium 6→12 %, Nickel 6→15 %, Cobalt 16→26 %… Les fabricants devront indiquer la proportion de matériaux recyclés, favorisant la transparence et les pratiques durables.

Statut de « la black-mass ». La classification de la black mass comme produit ou déchet divise les États membres de l'Union Européenne, créant une insécurité réglementaire. Son inscription comme déchet dangereux par l'Europe limite les exportations hors OCDE. L'enjeu reste de bâtir en Europe des capacités industrielles pour traiter cette black-mass, en extraire les matériaux stratégiques qui pourront être réutilisés dans la fabrication de nouvelles batteries.

Actions industrielles

Pré-traitement. VEOLIA a développé un réseau d'unités de prétraitement d'une capacité de 32 500 tonnes de batteries, en France mais aussi au Royaume-Uni, en Suisse, en Slovénie avec des activités également aux Etats-Unis et au Japon, pour récupérer notamment la black mass.

Black-mass. L'usine de VEOLIA près de Metz (site Cedilor) traite la « black mass » issue de batteries usagées via un procédé d'hydrométallurgie adapté. Elle est capable de transformer 7 000 tonnes de black mass (correspondant à 21 000 tonnes de batteries) en sels de nickel et de cobalt, hydroxides et carbonate de lithium à des grades dit techniques en attendant de parvenir aux grades batterie.

Adaptation. VEOLIA a développé ses propres procédés d'hydrométallurgie pour traiter la black mass issue des batteries NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt). Avec la montée des ventes de batteries LFP (Lithium-Fer-Phosphate), dépourvues de nickel et de cobalt, l'entreprise doit adapter ses procédés chimiques pour valoriser le lithium, le phosphate, le fer et le graphite.

D. Technologies alternatives

La substitution n'augmente pas directement la production de métaux critiques, contrairement à l'extraction, au raffinage ou au recyclage. Cependant, elle peut réduire notre dépendance à certains métaux en les remplaçant. Cette approche repose souvent sur de nouvelles chimies voire des innovations technologiques qui permettent de s'en passer. En remplaçant certains métaux rares par d'autres plus disponibles ou par des technologies alternatives, elle permet de réduire notre dépendance à des ressources géopolitiquement sensibles.

Câbles sans cuivre. Le remplacement des câbles en cuivre par de l'aluminium pour les lignes à haute tension ou par la fibre optique pour le transport des données réduit la consommation de cuivre, métal stratégique.

Batteries sans cobalt. Les nouvelles chimies Lithium-Fer-Phosphate (LFP) et Sodium-ion évitent le cobalt, souvent extrait dans des conditions sociales et environnementales critiques. La quantité de graphite consommée pourrait-être également réduite avec l'arrivée du silicium.

Moteurs sans aimants. BMW et NISSAN, entre autres constructeurs, développent des moteurs sans aimants, avec excitation en cuivre.

Automobile. Ces évolutions sont souvent invisibles pour le consommateur. Ainsi, les platinoïdes des pots catalytiques ont été remplacés par des terres rares, aujourd'hui, les pots catalytiques disparaissent avec l'arrivée des véhicules électriques.

Aéronautique. Dans l'aéronautique, le couple composite et titane remplace de plus en plus l'aluminium de certaines structures, et la fabrication additive permet progressivement de

réduire la consommation de matière liée à l'usinage et production de copeaux « Buy to fly ».

Innovation et intelligence artificielle. Le CEA-LETI développe des approches d'« engineering atomique » et des outils basés sur l'IA en améliorant la conception depuis le matériau jusqu'au système, pour minimiser l'usage des métaux critiques comme par exemple le gallium.

III. Synthèse des leviers et actions de sécurisation

AXES	LEVIERS PRINCIPAUX	EXEMPLES D'ACTIONS
Outils institutionnels		
A l'échelle internationale	Politiques publiques à l'échelle internationale	Une vingtaine entre 2000 et 2009 à 251 entre 2020 et 2023 (Source : Critical Minerals Policy Tracker)
	Programme de sécurité pour les minéraux critiques (AIE)	Rapport Global Critical Minerals Outlook (dernier : 21/05/2025)
	Evaluation de la résilience des approvisionnements (AIE)	Evaluations des risques (dit N-1) pour 6 minéraux clés
	Idée de création d'un «Data hub mondial des métaux»	Idée d'une base de données communes sur les métaux comme sur l'énergie
A l'échelle de l'Europe	Etablissement d'une liste des métaux critiques	34 matières première critiques dont 17 stratégiques (2023)
	«Critical Raw Materials Act» (18/03/2024)	Objectifs : 10 % d'extraction, 40 % de transformation, 25 % de recyclage,moins de 65 % d'un seul pays tiers
	Diplomatie minérale européenne	Accélération des partenariats avec l'Ukraine, l'Australie, le Canada, le Kazakhstan, l'Ouzbékistan, le Chili, le Groenland…
	47 projets d'intérêt stratégique	Sur 47 projets européens, 10 concernent le recyclage, 9 sont en France
	Annonce d'un centre d'achat et de stockage commun	Annonce récente par le Commissaire Européen sur le modèle japonais
	Idée de création d'un fonds souverain européen métaux	Pas de fonds dédié pour le moment au financement du CRMA
	Idée de préférence européenne fait son chemin…	…le principal atout de l'Europe reste son marché intérieur
A l'échelle de la France	«Rapport VARIN» sur sécurisation métaux (10/01/2022)	Suite à ce rapport, les décideurs publics créent la DIAMMS, l'OFREMI
	Création d'une Délégation Interministérielle (DIAMMS)	14 accords bilatéraux signés entre la France et des pays tiers
	Création d'un Observatoire des minerais et métaux (OFREMI)	Expertise en «Intelligence minérale» dont analyse des chaînes de valeur
	Appels à projet France 2030 «métaux critiques»	L'appel à projets « Métaux critiques » (450 millions d'euros)
	Fonds Infravia + crédits d'impôt + Garanties BpiFrance	Le fonds «métaux critiques» d'Infravia (2 milliards d'euros à terme)
	Nouvelles missions confiées au BRGM	Refonte du code minier, inventaire des ressources, innovations des procédés
	Contribution à la mise en place de standards ESG	La participation à des instances multilatérales (AIE, ITIE…)

AXES	LEVIERS PRINCIPAUX	EXEMPLES D'ACTIONS
Renouveau minier	Nouvel inventaire des ressources minières	Lancement d'un nouvel inventaire piloté par le BRGM
	Producteur mondial de minéraux industriels	N°1 mondial de talc, de diatomite, de kaolin… (IMERYS)
	Producteur mondial de minerais métalliques	N°1 mondial de manganèse, N°2 de nickel… (ERAMET)
	Nouveaux PER + lancement de mines domestiques	17 demandes en cours d'instruction, 12 permis exclusifs de recherche
	Lancement de 3 projets miniers sur le lithium	Projet EMILI + projets AGELI et LITHIUM DE FRANCE (saumures géothermales)
	Développement de nouveaux procédés d'extraction	Procédé d'extraction directe du lithium dit DLE (ERAMET)
	Valorisation des co-produits de minerais	Niobium et tantale en co-produit du lithium (IMERYS)
	Valorisation des résidus miniers	Gallium et scandium des résidus de bauxite de Gardanne
	La maitrise de l'eau et de l'énergie	Réutilisation de l'eau à 85 % en circuit fermé (IMERYS)
	Prise en compte de l'acceptabilité sociale	Réponses à plus de 30 000 demandes sur le projet EMILI (IMERYS)
	Sécurisation des contrats miniers avec l'industrie	Contrats off-take pluriannuels dans l'automobile
Raffinage	Savoir faire passé dans le raffinage des métaux	Raffinage des terres rares à La Rochelle (ex RHÔNE-POULENC)
	Savoir faire actuel dans le raffinage de certains minerais	FERROGLOBE (silicium), TRONOX (titane), NYRSTAR (indium)…
	Montée en compétence en hydrométallurgie	Besoins d'hydrométallurgistes en raffinage et recyclage
	Projet de «raffinerie intégrées d'alliages à haute entropie»	L'aéronautique pourrait être intéressée par ces alliages
Recyclage	Modèle économique et débouchés	Contre exemple : le raffinage de l'europium sans débouchés
	Pilotage stratégique de la circularité	Au niveau du COMEX et du CEO (SAFRAN)
	Réglementations européennes incitatives	Règlement batteries 2023/1542 : d'ici 2030, au moins 25 % des métaux critiques devront provenir de matières recyclées
	Développement de l'éco-conception	Cartes électroniques (métaux aujourd'hui trop dispersés)
	Structuration de nouvelles filières de collecte	Filière de collecte des aimants des VHU (ORANO-CEA)
	Idée de création de nouvelles filières produits	Filière de recyclage d'aimants samarium-cobalt (SAFRAN)
	Lancement de 4 projets sur le recyclage des aimants	CARESTER, SOLVAY, ORANO-CEA, MagREEsource
	Recyclage des home scraps (déchets d'usine)	ECO-TITANIUM (titane), CONSTELLIUM (aluminium)
	Développement de nouveaux procédés de recyclage	Procédés d'hydrométallurgie pour traiter la black mass (VEOLIA)
	Nouveaux gisements de métaux recyclables	Recyclage des machefers (VEOLIA), des câbles (NEXANS)
	Définition des taux de réincorporation	25 % de matières recyclées dans leurs nouveaux aimants (ORANO)
	Traçabilité des métaux vierges et recyclés	Recherche sur le traçage isotopique (BRGM)
	Clarification sur la propriété des matières	Elaborateur matière ? Constructeur moteurs ? Compagnie aérienne ? (SAFRAN)

AXES	LEVIERS PRINCIPAUX	EXEMPLES D'ACTIONS
Substitution	Réduction des quantités de matières consommées	Dépôt sélectif ALDAS et gravure atomique ALE (CEA-LETI)
	Remplacement d'une technologie par une autre	Moteurs sans terres rares dits EESM (NISSAN…)
	Remplacement d'un métal par un autre	Le cuivre par l'aluminium (SCHNEIDER ELECTRIC) L'aluminium par le titane et les composites (AIRBUS)
	Remplacement d'une chimie par une autre	Batteries NMC par LFP, par Sodium-ion (TIAMAT)
	Recherche de matériaux alternatifs	IGBT et Mosfet au silicium par SiC et GaN (SOITEC)
	Nouvelles techniques de production	Fabrication additive de pièces aéronautiques (SAFRAN)
Formation	Développement de nouvelles formations	Minéralurgie, métallogénie, hydrométallurgie, métallurgie, chimie des poudres, métallisation des poudres…
	Intégration des enjeux sociétaux et économiques	Normes ESG, mines responsables, acceptabilité sociale, économie…
Recherche	Amplification des partenariats public-privé	CEA-LITEN + ORANO (recyclage des aimants) Lab GéoRessources + IMERYS (lithium d'Echassières)
	Contractualisation de partenariats long terme	Chaire industrielle UL-CNRS-ORANO
	Création de comités de liaison scientifique	Comité de Liaison Scientifique de l'OFREMI
	Création de pilotes industriels	Halle pilote Plat'Inn dont biolixiviation (BRGM)
	Passage à la création d'entreprise	«WEEEMET» (après thèse Univ. de Lorraine), MagREEsource (Spin-off du CNRS)…

Encadré 3 : Métaux à la loupe

Le cuivre. La consommation de métaux est en hausse constante. Même constat pour le cuivre, qui est passé d'une consommation de 500 000 tonnes en 1900 à 22 millions de tonnes aujourd'hui, soit… 40 fois plus en 125 ans. Face à l'explosion de la demande avec l'électrification des transports et des difficultés multi-factorielles d'ouvertures de nouveaux gisements (notamment baisse des teneurs), et malgré une production secondaire maîtrisée (mais qui ne suffira pas), le risque de déficit en cuivre en 2030 est évalué à 6 millions de tonnes. Selon l'AIE, à horizon 2050, le recyclage devrait couvrir 40 % des besoins en cuivre, le reste devra provenir des mines. Le cuivre est présent partout… Ce métal est même sous surveillance dans l'aéronautique, car il reste le conducteur électrique par excellence dans un avion, plus de 200 km de câble dans un seul avion. Selon l'AIE, la demande en cuivre à horizon 2040 par rapport à 2023 devrait être multipliée par 1,5. Si la part des technologies bas carbone dans la consommation de cuivre en 2023 était de 24 %, les technologies bas-carbone absorberont 50 % de production de cuivre en 2040. La majorité des réserves sont au Chili, la principale extraction a lieu également au Chili, l'essentiel du raffinage se fait en Chine.

Le lithium. Le lithium est devenu le métal incontournable des batteries, une batterie de véhicule électrique a besoin en moyenne de 40 kg de lithium. On consommait un peu plus de 5 000 tonnes en 2010, c'est presque 100 000 tonnes aujourd'hui et ce devrait être 500 000 tonnes en 2030, soit 100 fois plus en vingt ans. Le risque de déficit dans la production de lithium est faible comparé au cuivre. Le principal risque est géopolitique. Le lithium est essentiellement produit en Argentine-Bolivie-Chili, on parle du « triangle ABC » du lithium, avec un risque fort de création de cartel (à l'image de l'OPEP). L'offre N-1 (outils utilisé par l'AIE pour évaluer les vulnérabilités d'un système en excluant son plus grand fournisseur) ne couvrirait alors que 60 % de la demande. La Chine maîtrise par ailleurs une grande partie de la chaîne de valeurs : le raffinage (60 % du lithium mondial), la production des précurseurs, des batteries, les véhicules électriques. La France entend reconquérir une souveraineté lithium à travers 3 projets : EMILI à Echasssières (groupe IMERYS), le lithium géothermal en Alsace (LITHIUM DE FRANCE, ERAMET). Ces projets pourraient couvrir l'équivalent des deux tiers des besoins du parc automobile électrique français en 2030. Selon l'AIE, la demande en lithium à horizon 2040 par rapport à 2023 devrait être multipliée par 8,7. Si la part des technologies bas carbone dans la consommation de lithium en 2023 était de 56 %, les technologies bas carbone absorberont 90 % de la production de lithium en 2040. Selon, l'AIE, à horizon 2050, le recyclage devrait couvrir 25 % des besoins en lithium.

Le gallium. Le gallium est un sous-produit du raffinage de l'aluminium ou du zinc. Il relève d'un marché à la production limitée : moins de 400 tonnes (2022). 44 % de ses applications sont liées à l'optoélectronique : fabrication de leds, de lasers… C'est une substance stratégique dans l'industrie des semi-conducteurs à base GaN ou AsGa. La Chine est en situation de monopole, elle contrôle 97 % de la production mondiale de gallium. Le gallium est un « petit » métal sur lequel pèse des risques d'approvisionnement, la Chine menace régulièrement de restreindre ses exportations. L'OFREMI a ainsi pu mettre en évidence la vulnérabilité de l'industrie automobile à travers le rôle stratégique du gallium dans les systèmes ABS. Même si la quantité de gallium utilisée est extrêmement faible, les menaces de restriction de la Chine pourraient suffire à bloquer la production automobile européenne. Vu l'importance du gallium dans les LEDs, il conviendrait de s'intéresser

à leur recyclage, selon l'ancien directeur scientifique de SOLVAY. D'autant que ses applications dans la Défense (« phased array » radars, satellites.), ou l'électrification des transports (ex : convertisseurs de puissance) vont faire exploser sa demande.

Le nickel. Une batterie de véhicule électrique nécessite des quantités importantes de matière premières dont 45 kg de nickel. Dans le cas du nickel comme du cuivre, l'offre en raisonnant « pipeline projets actuels » sera insuffisante pour répondre à la demande à venir. On retrouve aussi du nickel dans les superalliages base nickel de l'aéronautique. Ce métal représente la moitié du poids d'un moteur d'avion, il est considéré comme critique par SAFRAN. Il entre directement en compétition avec les besoins de la transition énergétique très consommatrice de ce métal. L'entreprise française ERAMET exploite des mines de nickel en Nouvelle Calédonie et la plus grande mine de nickel au monde à Weda Bay en Indonésie. Selon l'AIE, la demande en nickel à horizon 2040 par rapport à 2023 devrait être multipliée par 2,1. Si la part des technologies bas carbone dans la consommation de nickel en 2023 était de 15 %, les technologies bas carbone absorberont 56 % de la production de nickel en 2040. Selon, l'AIE, à horizon 2050, le recyclage devrait couvrir 22 % des besoins en nickel.

Les terres rares. Dans la projection de base de l'AIE, 77 % des terres rares raffinées en 2030 proviendront de Chine, même si la Chine n'a qu'un tiers des réserves, elle a déjà un quasi-monopole sur le raffinage. Elle a sécurisé ses capacités d'extraction à travers « Les routes de la soie ». Quand on raffine des minerais de terres rares, on sépare 17 éléments chimiques différents dont le néodyme et le samarium. Les aimants frittés néodyme-fer-bore sont les plus puissants produits à l'échelle industrielle. Même si un véhicule électrique ne contient en moyenne que 2 Kg pour un prix moyen de 100-200 euros, les aimants permanents à hautes performances sont devenus incontournables. Des aimants permanents à base de terres rares, cette fois du samarium, sont utilisés aussi dans l'aéronautique. Recycler ces aimants permanents en conservant leurs hautes performances à travers la maîtrise de la métallurgie des poudres est au coeur de la stratégie française. Plusieurs lignes pilotes viennent d'être lancées : par ORANO avec le CEA-LITEN, SOLVAY, CARRESTER et MAGREESOURCE. Selon l'AIE, la demande en terres rares à horizon 2040 par rapport à 2023 devrait être multipliée par 1,9. Si la part des technologies bas carbone dans la consommation de terres rares en 2023 était de 18 %, les technologies bas-carbone absorberont 41 % de la production de terres rares en 2040.

Le titane. En moyenne 30 % de la masse d'un moteur d'avion est en titane. Mais la majorité du titane produit dans le monde (89 %) est utilisée sous la forme d'oxyde de titane (TiO2) par l'industrie du pigment. Une faible part (11 %) est utilisée sous forme métallique : 5 % sous forme de ferrotitane (aciers inoxydables et aciers à outils) et 6 % sous forme de titane métal. C'est ce titane métal qui est utilisé dans la fabrication des avions commerciaux (45 %), la défense (9%), des équipements industriels (nucléaire, pétrochimie… 40 %), le reste dans le médical (prothèses). En 2023, la consommation totale de titane métal dans le monde a été de 130 000 tonnes. Le taux de croissance annuel de la consommation de titane métal est estimé à environ 5 %. Si les principaux pays extracteurs de minerais à titane sont l'Afrique du Sud, l'Australie, la Chine (…), l'éponge de titane (à la base du titane métal) provient de la Chine, du Japon, du Kazakhstan … et de la Russie. Ainsi l'avionneur européen Airbus demeure fortement dépendant de la Russie qui fournit 40 % du titane métal de qualité aéronautique mondial. Il est à souligner que 80 à 90 % de la matière première initiale pour usiner une pièce aéronautique part en copeaux ou chutes, on parle du ratio « Buy to fly. Le potentiel de recyclage de cette matière valorisable est donc très important. Plusieurs projets industriels en France dont Eco-Titanium visent à la valoriser.

Conclusion : les messages forts

1er MESSAGE : **définir et appliquer une vision stable à moyen et long terme**

Les investisseurs asiatiques se distinguent par leur patience et leur vision industrielle de long terme, tandis que la France reste trop dépendante de décisions politiques déconnectées du terrain industriel. Japon, Corée et Chine ont investi durablement, souvent à perte dans un premier temps, dans des technologies prometteuses, la Chine profitant en plus de la puissance de son marché intérieur. Pour se réindustrialiser, la France doit adopter une vision claire et durable, en ciblant les technologies essentielles à sa souveraineté et celles d'avenir où elle peut exceller.

2ème MESSAGE : **intensifier la R&D pour des substitutions durables**

Le Critical Raw Materials Act (CRMA) fixe pour l'Union Européenne des objectifs pour l'extraction, le raffinage, le recyclage et la diversification des approvisionnements, sans insister sur la substitution. Les opportunités offertes par la substitution (ex : moteurs sans aimants) voire des ruptures (ex : batteries à électrolytes solides) sont pourtant stratégiques pour pouvoir remplacer des métaux critiques par des métaux plus accessibles. La recherche et l'industrialisation de ces nouveaux process seront décisives pour s'affranchir de certains métaux critiques.

3ème MESSAGE : **relancer l'extraction minière en recherchant le consensus**

Le CRMA fait de la relance des mines domestiques en Europe un objectif stratégique. La France dispose d'un potentiel minier important, appuyé par l'expertise reconnue du BRGM, avec notamment des projets d'extraction de lithium portés par des industriels français et la nécessité de préserver les sites existants en outre-mer (ex : nickel en Nouvelle-Calédonie). Cette dynamique est freinée par un manque d'investissements, des délais d'autorisation trop longs et une faible acceptabilité sociale. Le développement minier pose des défis environnementaux majeurs, impliquant la préservation de ressources vitales telles que l'eau, les sols agricoles et la biodiversité.

4ème MESSAGE : **mieux maîtriser les procédés de raffinage et industriels**

La France doit reconstruire ses capacités de raffinage pour réduire sa dépendance à la Chine. Le développement de technologies complexes (technologies de la chimie et de la microélectronique, avec production de grande série sans défaut) exige de nombreux essais coûteux et une forte coopération entre industrie et recherche, notamment pour les batteries et les aimants où la maîtrise des procédés manque. Une alliance européenne ciblée, soutenue par un financement de long terme et un vaste programme de formation, apparaît comme la voie à suivre pour ce retard.

5ème MESSAGE : **former nos jeunes à innover et produire en France**

La désindustrialisation a fait disparaître des compétences clés, alors même que la demande mondiale en nouvelles technologies et donc en métaux explose. Former et attirer de nouveaux talents en géosciences, métallurgie, chimie, recyclage (...) devient indispensable pour sécuriser toute la chaîne de valeur. La France doit relancer et valoriser ces filières pour répondre efficacement aux besoins stratégiques à venir. L'ANRT avec ses Partenaires a vo-

cation à soutenir cette relance en continuant à faire travailler ensemble le monde industriel et académique.

6ème MESSAGE : **développer le recyclage pour plus d'indépendance**

Les industriels voient le recyclage comme un moyen de réduire leur dépendance, même si certaines filières comme celle des batteries ne fournira pas de volumes significatifs avant longtemps. Plusieurs défis restent à relever : éco-conception, structuration des filières, développement du raffinage européen et définition d'un droit de propriété sur la matière recyclée. Le recyclage pourrait couvrir 25 à 40 % des besoins d'ici 2050, mais ne suffira pas à absorber la hausse de la demande. Les stratégies d'efficacité restent essentielles pour limiter l'impact sur les ressources primaires comme secondaires.

7ème MESSAGE : **soutenir les secteurs économiques français les plus menacés**

La France paye aujourd'hui le prix fort de trente ans de démobilisation et de désindustrialisation face à la concurrence internationale. Les approvisionnements en métaux critiques font désormais partie de la cartographie des risques pour nos industriels. Les secteurs français les plus exposés à ce risque sont : 1 - L'automobile. 2 - L'électronique et l'électricité. 3 - L'aéronautique et la Défense (malgré la consommation de petits volumes de métaux). Des efforts devraient être menés, y compris par les pouvoirs publics, pour mieux identifier les chaînes de valeur.

8ème MESSAGE : **défendre nos intérêts et renforcer la préférence européenne**

La France doit sortir une fois de plus de sa naïveté vis-à-vis de l'Europe et mieux défendre ses intérêts économiques (ex : industrie automobile, aéronautique…) 1 - considérer le marché européen comme un levier majeur de consommation. 2 – mieux peser politiquement à Bruxelles pour imposer la préférence économique européenne (orienter les normes et les achats publics), mettre en place plus de protections douanières, inciter à produire en Europe et à acheter européen.

Annexes

Les atomes du tableau périodique de Mendeleïev

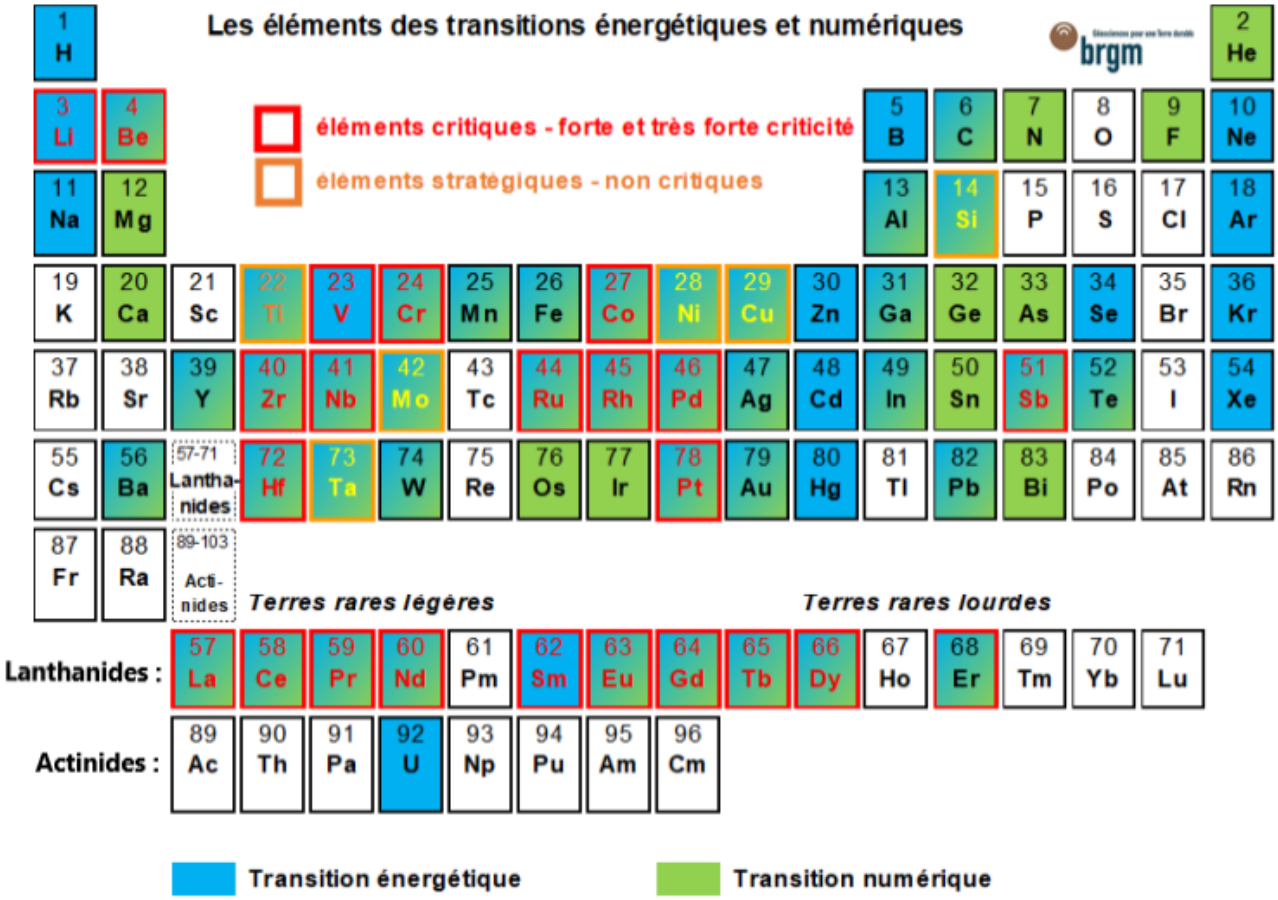

Figure 8 : Les transitions énergétiques et numériques mobilisent des ressources similaires
(Source : BRGM, 2025)

Points de vocabulaire

Minéraux / Roches / Minerais

Les minéraux. Les minéraux sont des corps inorganiques présents dans l'écorce et le manteau terrestre. Un minéral peut être constitué d'un seul élément (comme l'or) ou de plusieurs éléments (comme le quartz, composé de silicium et d'oxygène).

Les roches. Une roche est une association naturelle de minéraux. Les roches peuvent être composées d'un seul minéral ou d'une combinaison de plusieurs minéraux et autres matériaux (roches magmatiques, métamorphiques, sédimentaires).

Les minerais. Un minerai est un minéral ou une roche dont on peut extraire avec profit un ou plusieurs éléments pour répondre aux besoins des activités humaines.

Indice / Gîte / Gisement / Mine

Un indice correspond à l'indication de l'existence d'une occurrence minéralisée sans prévaloir d'un quelconque intérêt économique.

Un gîte minéral est une minéralisation considérée comme substantielle, après travaux d'exploration préliminaires d'un indice, là encore sans notion économique.

Un gisement est un gîte qui s'avère techniquement, économiquement, socialement exploitable.

Une mine est un gisement en exploitation.

Ressources / Réserves

Les ressources désignent les gîtes minéraux identifiés et quantifiés par les géologues, considérés comme potentiellement exploitables. C'est une notion géologique. En fonction du degré de confiance dans l'évaluation, on parlera de « ressources mesurées », « ressources indiquées » et « ressources supposées ».

Les réserves désignent les gîtes minéraux identifiés et suffisamment quantifiés par les ingénieurs miniers pour être jugés économiquement exploitables. C'est une notion économique. En fonction du degré de confiance dans l'évaluation, on parlera de « réserves prouvées » ou de « réserves probables ». Les réserves sont toujours plus petites que les ressources.

Extraction / Minéralurgie / Métallurgie / Raffinage

La chaîne de valeur de l'industrie minière et métallurgique est découpée en différentes étapes :

La phase d'extraction. Cette phase se réalise uniquement quand les conditions techniques (fiabilité), économiques (rentabilité) sont réunies. L'acceptabilité sociale et environnementale sont des enjeux de plus en plus revendiqués.

La phase de minéralurgie. L'extraction des minerais bruts s'accompagne de différents traitements de minéralurgie - concassage, nettoyage, tri et concentration - qui permet d'obtenir un produit dit intermédiaire ou concentré.

La phase de métallurgie. Le concentré va être envoyé aux industriels du secteur de la métallurgie. Ces derniers vont utiliser différents procédés - pyrométallurgie ou hydrométallurgie – pour extraire des minerais les métaux*.

La phase de raffinage. Cette nouvelle étape va permettre de purifier les métaux extraits des concentrés et d'obtenir un métal primaire**, normé internationalement, ce métal qualifié de produit semi-fini servira à la fabrication de produits finis.

*généralement à chaque minerai correspond un métal dominant (ex : dans la bauxite l'aluminium) et d'autres métaux associés qui peuvent être valorisés (toujours dans la bauxite, comme sous-produit le gallium).

** L'étape de raffinage peut être réalisée très loin du lieu d'extraction. Depuis le milieu des années 1980, la Chine a accueilli une large part des activités mondiales de raffinage des métaux en jouant sur le coût du travail bas et des législations environnementales quasi-inexistantes.

Les grandes familles de ressources minérales

Employées brutes ou transformées dans nos industries, les ressources minérales sont classées habituellement en 4 catégories :

Les ressources énergétiques comme le charbon, le gaz, le pétrole ou l'uranium

Les minerais métalliques dont peuvent être extraits un ou plusieurs métaux

Les matériaux de construction pour nos habitats et nos espaces publics (voirie…)

Les roches et minéraux industriels (ex : les charges minérales comme le talc, le kaolin)

Les grandes familles de métaux

Les métaux ferreux. Le fer est le métal le plus commun de la terre. Il vient juste derrière l'aluminium. Les métaux ferreux sont constitués à 90 % de fer. Allié à du carbone, du nickel et du chrome, il peut constituer de l'acier, de la fonte. On les retrouve dans les infrastructures, les véhicules…

Les métaux de base. Ils tirent leur nom de leur large utilisation dans de nombreux domaines artisanaux et industriels. Les métaux de base comprennent le plomb, le zinc, le cuivre, l'étain et le nickel.

Les métaux précieux. Rares, ils ont une grande valeur économique : l'or, l'argent, les 4 platinoïdes (dont le platine) … Au-delà de la joaillerie ou des placements financiers, on les retrouve dans des applications courantes en raison de leurs propriétés (résistance à la corrosion, conductivité électrique…).

Les métaux technologiques. Ils sont utilisés dans les industries technologiques comme l'aéronautique, la défense, le nucléaire, le spatial, le médical… mais aussi dans des objets plus courants comme un téléphone portable ou une ampoule à leds. Ce sont tous les autres métaux, plus d'une soixantaine.

Home scrap / New Scrap / Old Scrap

Matière primaire / matière secondaire. Alors que certains métaux font l'objet de crainte quant à leur approvisionnement et que l'on cherche des alternatives plus environnementales à l'extraction des matières primaires, le recyclage des métaux est devenu l'axe majeur pour valoriser non plus une matière considérée comme un déchet mais comme une matière dite secondaire. Il existe différents types de déchets métalliques :

Les « home scrap ». Les déchets d'usine sont des matériaux générés pendant la production de produits manufacturés qui peuvent être directement réinjectés dans le processus qui les a générés. Pour une entreprise comme SAFRAN le recyclage de certains alliages est ainsi facilité grâce à sa parfaite connaissance de leur composition chimique et l'homogénéité des lots.

Les « new scrap ». Ils sont issus du même processus. Mais contrairement aux « home scrap », ces déchets d'usine ne sont pas recyclés dans l'usine qui les a générés mais transférés sur le marché des déchets dit « scrap market » et traités par des entreprises de recyclage. Ainsi, certains copeaux et chutes issus de l'usinage de pièces aéronautiques sont triés par des sociétés de recyclage.

Les « old scrap ». Les vieux déchets sont issus d'équipements en fin de vie. Leur recyclage demande plus de technicité surtout quand le métal est employé en petites quantités dans un produit complexe et qui n'a pas été « éco-conçu » dans la perspective d'être recyclé. C'est le cas des cartes électroniques issus des D3E (Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques ») que l'on trie dans nos poubelles.

Les principales étapes du recyclage

Le recyclage des déchets électroniques par exemple ne se limite pas seulement au tri par le particulier et à la collecte par une entreprise, le recyclage pour être efficient doit aller jusqu'à l'extraction / raffinage des métaux issus de ces déchets. Cette partie-là qui pourrait

assurer la véritable souveraineté matière de la France est malheureusement trop souvent réalisée par des pays tiers lointains. Les étapes d''un recyclage complet :

Structuration de la collecte (ex : apport volontaire des D3E en points de collecte / éco-organisme)

Collecte et transport par une entreprise de recyclage sur une plateforme dite de tri de déchets

Séparation des appareils par type d'équipements (téléphones portables, disques durs, frigos…)

Démantèlement manuel ou mécanique de l'équipement (structure, carte électronique, batteries…)

Prétraitement mécanique (broyage, séparation magnétique, par densité…) pour réduire leur taille jusqu'à quelques microns

Traitement métallurgique

- Voie pyrométallurgique (haute température) : fusion des métaux, séparation par densité, point de fusion…
- Voie hydrométallurgique (chimique) : dissolution des métaux par solutions acides ou basiques, extraction sélective par précipitation, électrolyse, échanges d'ions…

Raffinage. Les métaux extraits sont purifiés pour atteindre un niveau de pureté commercial

Les grandes familles de métaux recyclés

Les métaux ferreux. Ce sont les métaux constitués de plus de 90 % de fer pur ou faiblement allié à d'autres métaux (carbone, chrome, silicium, nickel…). Ce sont des métaux très utilisés dans la construction comme les aciers, les fontes…

Les métaux non-ferreux. Cette famille inclue tous les métaux et alliages qui ne contiennent pas ou très peu de fer (inférieur à 10 %). On y retrouve principalement l'aluminium (deuxième métal le plus utilisé dans l'industrie après l'acier), le cuivre (et ses alliages comme le bronze ou le laiton), le plomb, le zinc, l'étain…

Les métaux précieux. Deux sont très connus : l'or et l'argent que l'on trouve aussi bien dans les bijoux que les cartes électroniques des D3E (plus ou moins riches : cartes pauvres, cartes intermédiaires, cartes riches). Les platinoïdes sont au nombre de 4 et moins connus : platine, rhodium, ruthénium, iridium. On les retrouve dans des bijoux, l'électronique, des catalyseurs…

Les métaux spéciaux. Les métaux spéciaux sont caractérisés par la présence significative de métaux comme le titane, le nickel ou le cobalt (on parle de superalliages), le molybdène, le tungstène ou le zirconium, le tantale… Ces métaux peuvent être issus de l'industrie aéronautique, spatiale ou électronique.

Liste des figures et des encadrés :

Figure 1 :
Criticité des métaux, une évaluation des besoins à horizon 2040 (Source : AIE, 2024) 6

Figure 2 :
La complexité de la chaîne de valeur du lithium (Source : BRGM, 2025) 7

Figure 3 :
La concentration de la production des métaux dans le monde (Source : SGU, 2024) 8

Figure 4 :
Matières premières, 47 projets stratégiques dans l'Union Européenne (Source : CE, 2025) 10

Figure 5 :
Les projets industriels français positionnés sur la chaîne de valeur des aimants permanents
et des batteries hors gigafactories. (Source : EDF, 2025) 11

Figure 6 :
Les principales matières regardées dans le secteur électrique (Source : EDF, 2025) 13

Figure 7 :
L'intensité matière dans la production d'énergies (Source : AIE 2021, EDF R&D) 14

Figure 8 :
Les transitions énergétiques et numériques mobilisent des ressources similaires (Source : BRGM, 2025). 40

Encadré 1 : De quoi parle-t-on ? 4

Encadré 2 : Epuisements ou pénuries ? 12

Encadré 3 : Métaux à la loupe 36

Remerciements aux orateurs

ALLOUCHE Yohan, Head of Environnemental Roadmap chez AIRBUS

ANDRE-MAYER Anne-Sylvie, Professeur à l'Université de Lorraine en métallogénie, Directrice du laboratoire de recherche en GéoRessources et enseignante à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie

BEITIA Carlos, Responsable Ligne Programme Matériaux au CEA-LETI

BERGER Stéphane, Directeur de projets Matériaux à la Direction Général des Entreprise, Ministère de l'Economie et des Finances

BOURG Stéphane, Directeur de l'Observatoire Français des Ressources Minérales pour les Filières Industrielles (OFREMI)

BRICAULT Fabien, Economiste, expert senior Economie & Régulation à la R&D d'EDF

CANTON Joan, Chef d'unité Grow, Industries énergivores et matières premières à la Commission Européenne

COZZI Laura, Directrice du Développement Durable, de la Technologie et des Perspectives et BUISSON Eric, Analyste Minerais critiques de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)

DANINO-PERRAUD Raphaël, Docteur en économie des ressources et chercheur associé à l'Institut de Recherche Stratégique de l'École Militaire (IRSEM)

DEZOMBRE Julien, Direction Economie Circulaire à l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)

DUBOC Romain, Innovation et Développement de VEOLIA et Sven SAURA, Vice-Président Recycling de VEOLIA

HACHE Emmanuel, Adjoint Scientifique à la Direction Economie et Veille de l'IFP Energies Nouvelles

HENOCHSBERG Simon, Directeur de la Stratégie d'ERAMET

JOUFFRET Frédéric, Vice-Président Innovation d'IMERYS

LEFEBVRE Gaëtan, Chef de Projet, expert intelligence minérale à l'OFREMI

LE MOINE Didier, Délégué Interministériel adjoint aux Approvisionnements en Minerais en Métaux Stratégiques (DIAMMS)

MAESTRO Patrick, Ancien Directeur scientifique de SOLVAY, membre de l'Académie des Technologies

MILLOT Romain, Directeur scientifique de Lithium de France

PELATA Patrick, Président de Meta Stratégy Consulting, Président de l'Académie de Technologie, ancien Directeur Général de RENAULT

PICART Aurélie, Délégué Générale et RENAUD Camille, Chef de projet de CSF Nouveaux Systèmes Energétiques

POINSSOT Christophe, Directeur Général Délégué du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

RICHEBE Benoit, Directeur de projets Aimants chez ORANO et DELETTE Gérard, Ingénieur de recherche, Expert senior Matériaux au CEA-LITEN

SALLOT Pierre, Chef d'Equipe, Expert groupe Matériaux et Procédés Innovants de SAFRAN

TOULHOAT Pierre, Membre de l'Académie des Technologies, Ancien Directeur Général Délégué et Directeur Scientifique du BRGM

VARIN Philippe, Rapporteur sur la stratégie nationale en approvisionnement en minerais et métaux stratégiques, ancien PDG de Peugeot

VENET Cécile, Responsable Programme Résilience Matériaux de SCHNEIDER ELECTRIC

30 personnalités auditionnées

Les consommateurs de métaux (25 % des auditions)	Des institutions, des experts, la formation (50 % des auditions)	Les producteurs de métaux (25 % des auditions)
Branche énergie Gestion de l'énergie : SCHNEIDER ELECTRIC, CSF Nouveaux systèmes énergétiques Transport de l'énergie : EDF **Les transports :** Automobile : Expert automobile Aéronautique : AIRBUS, SAFRAN **Autres secteurs :** Défense : IRSEM Electronique : CEA-LETI	**Institutions :** AIE, COMMISSION EUROPENNE, DIAMMS, DGE, OFREMI, BRGM, IFPEN, ADEME **Experts :** Philippe VARIN **Formation :** Université de Lorraine	**Les producteurs de matière première** (extraction, raffinage) : IMERYS, ERAMET, LITHIUM DE FRANCE, SOLVAY **Les producteurs de matière secondaire** (industrie du recyclage) : VEOLIA, ORANO/ CEA-LITEN, Académie des Technologies

ASSOCIATION NATIONALE
RECHERCHE TECHNOLOGIE

33, rue Rennequin - 75017 Paris
Tél. : 01 55 35 25 50
www.anrt.asso.fr