

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

CIRCULARITE DES METAUX STRATEGIQUES EN EUROPE
PLACE DU RECYCLAGE DANS L'APPROVISIONNEMENT
ACTUEL ET A VENIR

CIRCULARITY OF STRATEGIC METALS IN EUROPE
THE ROLE OF RECYCLING IN CURRENT AND FUTURE SUPPLIES

Mars 2025

C. DEVAUZE, V. SIVELLE, I. BENNEOUALA,
M. IGHILAHIZ – In Extenso Innovation Croissance

In Extenso
INNOVATION CROISSANCE

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Circularité des métaux stratégiques en Europe. Place du recyclage dans l'approvisionnement actuel et à venir, 2025, 198 p, n°23-0927/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2025

RESUME

La circularité des métaux stratégiques est un enjeu central en Europe : ces métaux, essentiels à de nombreuses industries (véhicules électriques, électronique, énergies renouvelables, etc.), sont de plus en plus utilisés. Cependant, leur approvisionnement se faisant quasi-exclusivement hors Europe (Chine en grande partie, République Démocratique du Congo, Russie, etc.), il est soumis à des tensions géopolitiques et économiques. Le recyclage à partir de déchets représente un potentiel intéressant comme source d'approvisionnement secondaire de ces métaux pour réduire la dépendance aux matières premières primaires, mais reste encore marginal.

La présente étude s'attache à analyser le rôle que peut jouer le recyclage dans l'approvisionnement durable de ces métaux stratégiques, en abordant le sujet par couple métal / déchet. Elle est structurée en trois grandes étapes : tout d'abord, un état des lieux des connaissances sur les gisements actuels et à venir de métaux stratégiques dans les déchets est dressé. Ensuite, les technologies de recyclage en place et à l'étude sont investiguées, pour une quinzaine de couples métal / déchet sélectionnés au préalable. Pour chacun de ces couples, les freins et leviers (techniques, économiques, organisationnels, ou encore réglementaires ou environnementaux) à un déploiement du recyclage en Europe sont investigués, et des pistes sont proposées.

Pour certains métaux stratégiques (exemple : argent dans les composants électroniques, néodyme dans les aimants NdFeB), le recyclage en Europe est déjà bien engagé, tandis que pour d'autres (exemples : tantale dans les condensateurs, argent dans les panneaux photovoltaïque), des opportunités voient le jour pour faire du recyclage une source d'approvisionnement en métaux stratégiques en Europe, et ainsi renforcer l'autonomie européenne en matière de métaux critiques, réduire la dépendance aux importations et soutenir une économie circulaire.

MOTS CLES

Gisements de déchets, recyclage, métaux stratégiques, économie circulaire, argent (Ag) et silicium métal (Si) dans les panneaux photovoltaïques, cobalt (Co) et lithium (Li) dans les batteries au lithium, néodyme (Nd) dans les aimants NdFeB, cobalt (Co) et samarium (Sm) dans les aimants SmCo, antimoine (Sb) dans les plastiques bromés, tantale (Ta) dans les condensateurs, argent (Ag) et étain (Sn) dans les composants électroniques, gallium (Ga) dans les circuits intégrés, indium (In) dans les écrans, vanadium (V) dans les alliages HSLA, magnésium (Mg) dans les alliages d'aluminium

SUMMARY

The circularity of strategic metals is a central issue in Europe: these metals, essential to many industries (electric vehicles, electronics, renewable energies, etc.), are increasingly used. However, their supply almost exclusively depends on imports from outside Europe (primarily China, but also the Democratic Republic of Congo, Russia, etc.) and is subject to geopolitical and economic tensions. Recycling from waste represents an interesting potential as a secondary source of supply of these metals, and would reduce dependence on primary raw materials, but it remains limited.

This study analyses the role that recycling can play in the sustainable supply of these strategic metals, approaching the subject by metal / waste pair. It is organised in three main stages: firstly, an overview of current and future waste deposits of strategic metals is provided. Next, existing and planned recycling technologies are investigated, for 15 pre-selected metal / waste pairs. For each of these pairs, the technical, economic, organisational, regulatory, or environmental obstacles and levers to the deployment of recycling in Europe are investigated, and recommendations are suggested.

For certain strategic metals (e.g. silver in electronic components, neodymium in NdFeB magnets), recycling in Europe is already well established. For others (e.g. tantalum in capacitors, silver in photovoltaics), opportunities are emerging to make recycling a source of supply for strategic metals in Europe. This would strengthen Europe autonomy in critical materials, reduce dependence on imports, and support a circular economy.

KEY WORDS

Waste deposits, recycling, strategic metals, circular economy, silver (Ag) and silicon metal (Si) in photovoltaic panels, cobalt (Co) and lithium (Li) in lithium batteries, neodymium (Nd) in NdFeB magnets, cobalt (Co) and samarium (Sm) in SmCo magnets, antimony (Sb) in brominated plastics, tantalum (Ta) in capacitors, silver (Ag) and tin (Sn) in electronic components, gallium (Ga) in integrated circuits, indium (In) in screens, vanadium (V) in HSLA alloys, magnesium (Mg) in aluminium alloys

Contexte de l'étude

Les transitions numériques, écologiques et énergétiques placent l'Europe face à un double défi. Il s'agit d'une part de mettre en route ou poursuivre ces révolutions technologiques, économiques et comportementales, qui, outre une évolution des modes de production et de consommation, sont dépendantes de l'utilisation de certaines technologies plus durables et vertueuses. D'autre part, il convient de disposer des ressources desquelles dépend le déploiement de ces technologies.

Or, ces dernières reposent sur l'usage d'un certain nombre de matières premières, notamment métalliques, dont la demande mondiale croît rapidement et dont les chaînes d'approvisionnement sont fortement concentrées dans certains pays¹.

De plus en plus consciente de sa dépendance à l'égard de l'approvisionnement en ces matières premières, et au regard des risques que de potentielles tensions géopolitiques ou commerciales peuvent faire peser sur la pérennité des échanges, l'Union européenne a, à l'instar d'autres pays et régions du monde, élaboré des stratégies visant à sécuriser ses approvisionnements futurs en matières premières.

Cet état de fait renforce l'intérêt porté aux sources d'approvisionnement alternatives, notamment les matières premières issues d'un recyclage en Europe. Ainsi, face aux enjeux à la fois stratégiques et environnementaux que représente l'approvisionnement de l'Europe en métaux stratégiques, il est pertinent d'interroger la contribution actuelle et à venir que pourrait apporter leur recyclage.

Objectifs et méthode

L'étude a pour objectif de réaliser une revue des gisements existants et à venir de métaux stratégiques dans les déchets, gisements qui pourraient être mobilisés afin de contribuer à l'approvisionnement des industries européennes. Elle s'intéresse également aux technologies qui devront être exploitées ou mises en place pour y parvenir, afin de proposer différentes pistes d'actions pour dynamiser le recyclage en Europe de certains métaux stratégiques.

L'étude est structurée en trois grandes phases :

- Une **analyse des données disponibles dans la littérature et portant sur les gisements actuels et à venir**. Elle permet de mettre en avant les couples métal / déchet pour lesquels la mise en place ou l'amélioration du recyclage pourraient être particulièrement pertinents, du fait de gisements potentiels importants.
- Un **panorama détaillé des différentes voies technologiques de valorisation des métaux** est conduit sur l'exemple de quinze couples métal / déchet retenus.
- L'identification des couples (parmi ceux retenus) qui pourraient être les plus appropriés à développer pour industrialiser la production de métaux stratégiques issus du recyclage des déchets en France et en Europe. **Les freins et leviers pour l'industrialisation du recyclage** des métaux stratégiques en France et en Europe y sont synthétisés, et différentes **pistes d'action** proposées.

Parce que les enjeux associés au recyclage des métaux sont indissociables des déchets qui les contiennent, les travaux ont été menés par **couple métal / déchet**.

Study context

The digital, ecological, and energy transitions present Europe with a dual challenge. On one hand, it appears necessary to initiate or continue these technological, economic, and behavioural revolutions. These involve evolving production and consumption patterns, and rely on the use of more sustainable technologies. On the other hand, it is essential to secure the resources on which the deployment of these technologies depends.

These technologies depend on the use of a wide range of raw materials, particularly metals, for which global demand is rapidly increasing, and whose supply chains are highly concentrated in certain countries.¹

The European Union is increasingly aware of its dependence on the supply of these raw materials and of the risks that potential geopolitical or trade tensions may represent for the continuity of exchanges. Like other countries and regions worldwide, the EU developed strategies to secure its future supply of raw materials.

This situation strengthens the focus on alternative sources of supply, particularly raw materials from recycling within Europe. Given both the strategic and environmental challenges associated with Europe's supply of strategic metals, it is relevant to assess the current and future contribution that their recycling could provide.

Objectives and methodology

The study aims to conduct a review of strategic metals in existing and future waste deposits, which could contribute to the supply of European industries. It also examines the technologies that need to be used or developed to achieve this goal, in order to propose various action plans to enhance the recycling of certain strategic metals in Europe.

The study is structured into three main phases:

- **An analysis of available literature data** on current and future waste deposits. *This phase highlights metal/waste pairs for which the implementation or improvement of recycling could be particularly relevant due to significant potential deposits.*
- **A detailed overview of various technological recycling pathways** for metals, based on an analysis of fifteen selected metal/waste pairs.
- *The identification of the most suitable pairs (among those selected) for developing an industrial-scale production of strategic metals from recycled waste in France and Europe. **The barriers and levers for the industrialisation of strategic metal recycling** in France and Europe are synthesized, and various **action plans** are proposed.*

*Because the challenges associated with metal recycling are inherently linked to the waste containing these metals, the study has been conducted using a **metal/waste pair** approach. To illustrate the nature of the analyses carried out and the results obtained in the study, the document includes results on one of these metal/waste pairs (lithium in lithium-ion batteries).*

¹ IEA (2022), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (revised version), disponible à [ce lien](#) / at [this link](#) & JRC (2023) Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU - A Foresight Study, disponible à [ce lien](#) / at [this link](#)

Afin d'illustrer la nature des analyses effectuées et les résultats obtenus dans l'étude, des focus sur un des couples métal / déchet (lithium dans les batteries lithium-ion) ponctuent cette synthèse.

Exposé des principaux résultats obtenus

Phase 1 - Les gisements de métaux stratégiques dans les déchets

Le déploiement du recyclage des métaux stratégiques doit permettre de répondre aux besoins de l'industrie en Europe : en ce sens, il est clé d'étudier le contexte actuel et à venir des différents métaux stratégiques, en termes d'utilisation et d'approvisionnement. Ainsi, pour 26 métaux stratégiques entrant dans le périmètre de l'étude, ont été étudiés les enjeux actuels et à venir concernant :

- Leurs utilisations actuelles et anticipées (débouchés actuels dans des secteurs clés comme les énergies renouvelables, l'évolution envisagée des besoins) ;
- Leur approvisionnement (niveau de dépendance de l'Union européenne, les risques associés à la gouvernance des pays fournisseurs, anticipation des risques d'approvisionnement, etc.) ;
- Le recyclage et la part qu'il représente dans l'approvisionnement.

Focus sur le lithium

Actuellement, une partie significative des **applications du lithium** est considérée stratégique, notamment les batteries de technologie lithium-ion pour les solutions d'électrification des modes de vie comme dans le secteur de la mobilité.

L'Europe est caractérisée par une forte dépendance aux imports (81% à l'extraction, 100% à l'affinage en moyenne entre 2016 et 2020) et des **enjeux d'approvisionnement** considérés modérés en lien avec la gouvernance des pays fournisseurs.

Une forte augmentation de la **demande** est attendue dans les années à venir, principalement portée par le dynamisme du secteur des batteries. L'approvisionnement primaire devrait suivre la demande à court terme, mais des déficits d'offre pourraient survenir dès 2030.

Enfin, malgré des technologies existantes et émergentes, le **recyclage du lithium** est actuellement particulièrement faible.

L'analyse et la comparaison de ces différentes dynamiques permet de prioriser les métaux pour lesquels le recyclage pourrait représenter un potentiel approvisionnement stratégique. Le recyclage des métaux est directement lié aux déchets qui les contiennent : l'étude approfondit donc une quarantaine de couples métal / déchet associés à des secteurs d'activités et des produits dont la croissance ou la consommation est significative (volumes associés) ou stratégique (par exemple, car le métal est présent dans un niveau de pureté intéressant). Sont écartés les couples associés à un usage dissipatif, un faible gisement ou un recyclage bien en place avec un gisement peu dispersé. Pour les couples retenus, sont mis en exergue l'utilisation du métal dans le produit, le gisement potentiel en fin de vie actuel et à venir, et les conditions de fin de vie actuelles (performance de la filière, existence d'objectifs réglementaires, etc.).

Focus sur le lithium dans les batteries lithium-ion

Utilisation : sous forme métallique pour les anodes des piles portables, et sous formes de sels de lithium (électrolyte) ou d'alliage pour la cathode dans différentes technologies.

Durée de vie moyenne : liée à la durée de vie des équipements auxquels elles sont associées, soit entre 5 et 10 ans pour les

Presentation of key findings

Phase 1 – Strategic metal in waste deposits

The deployment of strategic metal recycling must address the needs of European industry. In this regard, it is essential to study the current and future context of various strategic metals in terms of their use and supply. Thus, for 26 strategic metals within the scope of this study, the present and future challenges were examined concerning:

- Their current and anticipated uses (current applications in key sectors such as renewable energy, projected evolution of demand);
- Their supply (the European Union's level of dependence, risks associated with the governance of supplier countries, anticipation of supply risks, etc.);
- Recycling and its share in overall supply.

Focus on lithium

Currently, a significant portion of **lithium applications** are considered strategic, particularly lithium-ion batteries used for the electrification of lifestyles, such as in the mobility sector.

Europe is characterised by its high dependence on imports (81% at the extraction stage, 100% at the refining stage on average between 2016 and 2020), with moderate **supply risks** linked to the governance of supplier countries.

A significant increase in **demand** is expected in the coming years, primarily driven by the dynamic battery sector. Primary supply is expected to meet short-term demand, but supply deficits could emerge as early as 2030.

Finally, despite the existence of current and emerging technologies, **lithium recycling** remains particularly low.

The analysis and comparison of these different dynamics make it possible to prioritise the metals for which recycling could represent a potential strategic supply source. Metal recycling is directly linked to the waste that contains it: the study therefore examines in depth around forty metal/waste pairs associated with sectors of activity and products whose growth or consumption is significant (associated volumes) or strategic (for example, because the metal is present at an interesting level of purity). Pairs associated with dissipative use, low waste deposits, or well-established recycling with a concentrated waste stream are excluded. For the selected pairs, the study highlights the use of the metal in the product, the potential waste deposit, both current and future, and the current end-of-life conditions (sector performance, existence of regulatory objectives, etc.).

Focus on lithium in lithium-ion batteries

Usage: In metallic form for the anodes of portable batteries and in the form of lithium salts (electrolyte) or alloy for the cathode in different technologies.

Average life span: dependent on the lifespan of the equipment they are associated with, ranging between 5 and 10 years for EEE. For electric vehicles, the average battery lifespan is estimated at 10 years.

Anticipated use in Europe (Source: European Commission, 2023):

- Regarding electric vehicles, lithium demand is expected to increase from 5 kt in 2020 to 40-54 kt in 2030 and approximately 58-82 kt in 2050.
- Energy storage currently represents a small share of demand but is projected to grow from 130 t in 2020 to 2.5-3.9 kt in 2030, and 12.1-20.1 kt in 2050, depending on the scenarios analyzed.

EEE. Pour les véhicules électriques, la durée de vie moyenne de la batterie est estimée à 10 ans.

Utilisation anticipée au niveau européen (Source : Commission européenne, 2023) :

- Concernant les véhicules électriques, la demande en lithium évoluerait de 5 kt en 2020 à 40-54 kt en 2030 et près de 58-82 kt en 2050.
- Le stockage d'énergie représente une faible part de la demande actuelle, mais qui augmenterait de 130 t en 2020 à 2,5-3,9 kt en 2030, et 12,1-20,1 kt en 2050 selon les scénarios étudiés.
- Pour les batteries portables, la demande en lithium devrait croître dans des proportions bien moindres, passant de 0,14 t en 2020 à 0,17 t en 2030.

Gisement actuel : estimé à près de 1 500 t en Europe en 2020, non connu pour la France. (PROSUM, 2017).

Gisement à venir : non connu pour la France et l'UE, estimé croissant (+++)

Fin de vie actuelle en Europe : Le lithium reste peu, voire pas valorisé lors du traitement des batteries en fin de vie. Des efforts ont été menés pour la récupération du lithium des piles et accumulateurs usagés, sous la forme de blackmass. Cependant, moins de 1% du lithium (tous usages confondus) est récupéré en 2021 (SCRREEN, 2023). Le règlement européen adopté en juillet 2023 sur les batteries encadre le recyclage de ces produits suivant les technologies ou les matériaux qui les composent.

Plusieurs constats émergent de ce travail :

- La faible disponibilité de données sur les gisements de métaux dans les déchets, en particulier dans les gisements à venir ;
- À contrario, l'existence d'un grand nombre de travaux de référence sur les besoins à venir en métaux, dans les différentes applications ;
- Le gisement potentiel à venir est dans la majorité des cas inconnu ce qui souligne la nécessité de travaux complémentaires afin de construire un mapping des gisements de métaux dans les déchets, première étape clé dans le déploiement du recyclage des métaux stratégiques.

Phase 2 - Technologies de recyclage des métaux stratégiques : état des lieux et perspectives

Sur la base de la première phase de l'étude, sont retenus les couples métal / déchet suivants :

- Argent et silicium métal dans les panneaux photovoltaïques
- Cobalt et lithium dans les batteries au lithium
- Néodyme dans les aimants NdFeB
- Cobalt et samarium dans les aimants SmCo
- Antimoine dans les plastiques bromés
- Tantale dans les condensateurs
- Argent et étain dans les composants électroniques
- Gallium dans les circuits intégrés
- Indium dans les écrans
- Vanadium dans les aciers faiblement alliés à haute résistance (HLSA)
- Magnésium dans les alliages d'aluminium (VHU, emballage, etc.)

Pour chacun de ces couples, l'enjeu est d'appréhender quelles sont les chaînes de recyclage qui existent ou sont en voie de développement. Pour ce faire, l'étude identifie les étapes clés et les technologies associées à chaque procédé de recyclage. Cela permet d'analyser les principaux freins et opportunités au déploiement du recyclage du couple.

- *For portable batteries, the demand in lithium is expected to increase in much smaller proportions, from 0.14 t in 2020 to 0.17 t in 2030.*

Current waste deposits: *Estimated at approximately 1,500 t in Europe in 2020, with no data available for France (PROSUM, 2017).*

Future waste deposits: *Unknown for France and the EU but expected to increase (+++)*

Current end-of-life management in Europe: *Lithium remains minimally or not at all recovered during the treatment of end-of-life batteries. Efforts have been made to recover lithium from used batteries and accumulators, primarily in the form of black mass. However, less than 1% of lithium (across all applications) was recovered in 2021 (SCRREEN, 2023). The European regulation adopted in July 2023 on batteries regulates the recycling of these products based on the technologies and materials they contain.*

Several key findings emerge from this study:

- *The low availability of data on metal in waste deposits, particularly regarding future waste deposits;*
- *Conversely, the existence of numerous reference studies on future metal needs in various applications;*
- *The future potential waste deposits remain mostly unknown, emphasizing the need for further studies to create a mapping of metal in waste deposits, a key first step in deploying the recycling of strategic metals.*

Phase 2 - Strategic metal recycling technologies: current state and outlook

Based on the first phase of the study, the following metal/waste pairs were selected:

- *Silver and silicon metal in photovoltaic panels*
- *Cobalt et lithium in lithium batteries*
- *Neodymium in NdFeB magnets*
- *Cobalt et samarium in SmCo magnets*
- *Antimony in brominated plastics*
- *Tantalum in capacitors*
- *Silver and tin in electronic components*
- *Gallium in integrated circuits*
- *Indium in screens*
- *Vanadium in HLSA alloys*
- *Magnesium in aluminium alloys (ELV, packaging, etc.)*

For each of these pairs, the objective is to understand which recycling chains exist or are under development. To achieve this, the study identifies the key stages and technologies associated with each recycling process. This approach helps analyze the main barriers and opportunities for deploying the recycling of the metal/waste pair.

Focus on lithium in lithium-ion batteries

Analysis of recycling steps and technologies:

Key players:

Over the past decade, China and South Korea established themselves as global leaders in lithium-ion battery recycling, holding nearly 70% of the market share.

European sector: *In Europe, particularly in connection with the establishment of extended producer responsibility (EPR) schemes for batteries and accumulators, various stakeholders involved in the management of end-of-life batteries (recyclers, eco-organizations, etc.) are already present across the region. However, the development of a European recycling industry faces economic obstacles:*

Focus sur le lithium dans les batteries lithium-ion

Analyse des étapes et technologies de recyclage :

Acteurs clés : Durant la dernière décennie, la Chine et la Corée du Sud se sont imposées comme les leaders mondiaux du recyclage des batteries lithium-ion, disposant alors de près de 70% des parts de marché.

Filière européenne : En Europe, notamment en lien avec l'établissement de filières à responsabilité élargie du producteur (REP) pour les piles et accumulateurs, des acteurs impliqués dans la fin de vie des batteries maillent déjà le territoire (recycleurs, éco-organismes, etc.). Cependant, le développement d'une filière de recyclage européenne fait face à des obstacles d'ordre économique :

- Les projets européens naissant sont confrontés à la concurrence d'acteurs historiques bien identifiés et implantés sur le marché ;
- Des pratiques commerciales agressives d'acteurs historiques, caractérisées comme un dumping économique (i.e. maintenir des prix artificiellement bas sur un marché), menacent la viabilité économique des acteurs européens et donc le développement de projets ;
- Le développement du recyclage en boucle fermée en Europe repose également sur le développement de débouché, un enjeu aujourd'hui bloquant pour certains acteurs.

Procédés de recyclage : Les procédés d'extraction du lithium nécessitent des fractions plus ou moins préparées en amont, et plus ou moins en mélange. On distingue trois principales voies d'extraction des matériaux cathodiques :

- La voie pyrométallurgique n'est pas pertinente ici, en effet ses performances sont très limitées pour l'extraction du lithium ;
- La voie hydrométallurgique, qui nécessite un démantèlement et un tri entre les principales fractions, ensuite broyées et séparées (procédé magnétique, par flottation, etc.). La blackmass ainsi obtenue contient les matériaux des cellules (dont la cathode) ;
- La régénération cathodique, approche encore au stade de développement visant le recyclage direct des matériaux cathodiques par la régénération de leurs propriétés électrochimiques. Elle requiert des étapes de préparation amont plus poussées que la voie métallurgique.

Malgré ce déploiement technologique progressif, les capacités actuelles de traitement de la blackmass ne permettent pas d'atteindre des matières premières issues du recyclage de qualité suffisante pour être directement incorporées dans la production de batteries.

Principaux freins au déploiement du recyclage : A ce jour, l'absence de capacité de raffinage des matières premières aux niveaux de qualité requis pour la fabrication de batterie freine le développement d'une chaîne complète de recyclage européenne pour le lithium dans les batteries lithium-ion, ainsi que l'absence de projets, en volumes suffisants, de production de matériaux actifs de cathodes et leurs précurseurs pour la production de cellules. La concurrence que représentent les acteurs historiques extra-européens menace la viabilité économique des projets en développement sur le continent.

Plusieurs enseignements généraux émergent de ces travaux :

- Les technologies disponibles sont souvent spécifiques à un couple métal / déchet, mais peuvent être dupliquées et adaptées pour d'autres ;
- Une hétérogénéité s'observe dans les stades de développement et de déploiement des technologies de recyclage pour un même couple ou entre les différentes filières. Cela souligne l'importance de poursuivre une veille technologique ;

- *Emerging European projects face competition from well-established historical players already entrenched in the market;*
- *Aggressive commercial practices by incumbent players, characterised as economic dumping (i.e. keeping prices artificially low on a market), threaten the economic viability of European players and therefore the development of projects;*
- *The growth of closed-loop recycling in Europe also depends on the development of market outlets, which remains a blocking issue for certain players.*

Recycling processes: *Lithium extraction processes require various levels of pre-treatment and material separation. There are three main cathode material extraction pathways:*

- *Pyrometallurgical processing is not relevant in this case, as its performance in lithium extraction is highly limited;*
- *Hydrometallurgical processing, which requires dismantling and sorting between the main fractions, followed by crushing and separation (magnetic separation, flotation, etc.). The resulting blackmass contains cell materials, including the cathode.*
- *Cathode regeneration, an approach still in the development phase, aims for the direct recycling of cathode materials by restoring their electrochemical properties. This method requires more advanced pre-treatment steps compared to metallurgical processes.*

Despite the gradual technological deployment, the current processing capacities for blackmass do not allow for the production of recycled raw materials of sufficient quality to be directly incorporated into battery manufacturing.

Main obstacles to the deployment of recycling: *To date, the absence of refining capacities for raw materials at the quality levels required for battery manufacturing hinders the development of a complete European recycling chain for lithium in lithium-ion batteries, as is the absence of projects, in sufficient volumes, to produce active cathode materials and their precursors for cell production. Additionally, there are no sufficiently large-scale projects to produce cathode active materials and their precursors for cell production. The competition posed by historical non-European players threatens the economic viability of projects under development on the continent.*

Several key takeaways emerge from this work:

- *Available technologies are often specific to a metal/waste pair but may be duplicated and adapted for others;*
- *A heterogeneity is observed in the development and deployment stages of recycling technologies for the same pair or across different sectors, highlighting the importance of continuing technological monitoring;*
- *Several parallel technological pathways can be applied to the same pair. However, it is crucial to consider the recycling chain as a whole. The technological components are interdependent throughout the chain, making it essential to have a comprehensive view of a recycling sector to account for the implications of each technology (e.g., differences in the quality of inputs and outputs);*
- *Some data is unavailable, particularly concerning the environmental and health impacts of technologies and the costs associated with technological components;*
- *Depending on the metal/waste pair, the main obstacles may be linked to different stages. These challenges manifest as regulatory, technical, organizational, or economic issues (see Figure 1).*

- Plusieurs voies technologiques parallèles peuvent être appliquées à un même couple. Il est néanmoins crucial d'envisager la chaîne de recyclage dans son ensemble. En effet, les briques technologiques sont interdépendantes tout au long de la chaîne. Il faut donc avoir une vision d'ensemble d'une filière de recyclage pour tenir compte des implications de chaque technologie (ex : différences de qualité des intrants et sortants) ;
- Certaines données ne sont pas disponibles : principalement sur les impacts environnementaux et sanitaires des technologies, ainsi que les coûts rattachés aux briques technologiques ;
- En fonction du couple métal / déchet, les principaux freins peuvent être associés à des étapes différentes. Ils se déclinent en enjeux réglementaires, techniques, organisationnels ou encore économiques (cf. Figure 1).

Other barriers (environmental, regulatory)			Sb/plastics	Sn/PCB
Technical barriers	Nd/magnets Sm-Co/magnets	Ga/IC & LED Mg/Al alloys	Sb/plastics Sn/PCB	
Economic barriers	V/HSLA	Ga/IC & LED Ta/capacitors	Ga/IC & LED In/LCD Li-Co/batteries Si-Ag/PV	Sm-Co/magnets Sb/plastics
Organisational barriers	V/HSLA Mg/Al alloys Nd/magnets Sm-Co/magnets	Ta/capacitors		Si-Ag/PV Li-Co/batteries In/LCD
End-of-life stage	Waste collection and sorting	Waste and fraction preparation	Metal extraction and purification	Incorporation in new products

Figure 1 : Analyse transversale des typologies de principaux freins (liste non exhaustive), replacés selon les étapes de fin de vie des déchets (RECORD, 2025)

Figure 1: Cross-analysis of the main types of barriers according to the stages of waste recycling (non exhaustive list) (RECORD, 2025)

Phase 3 - Possibilités de déploiement du recyclage des métaux stratégiques en Europe

Le potentiel de déploiement du recyclage est ensuite investigué, pour les différents couples retenus. Ce potentiel est caractérisé suivant quatre enjeux : l'intérêt stratégique, l'intérêt économique, la faisabilité technique et la faisabilité organisationnelle.

Focus sur le lithium dans les batteries lithium-ion

- Intérêt stratégique : très fort
- Intérêt économique : moyen
- Faisabilité technique : modérée
- Faisabilité organisationnelle : modérée

Comme le présente la Figure 2, parmi les couples analysés et ceux qui présentent un potentiel de déploiement du recyclage le plus élevé sont :

- Le lithium et le cobalt dans les batteries lithium ion ;
- Le silicium et l'argent dans les panneaux PV ;
- Le néodyme (et autres terres rares) dans les aimants NdFeB ;
- L'argent contenu dans les circuits imprimés.

Phase 3 – Opportunities for recycling strategic metals in Europe

The potential for recycling deployment is then investigated for the different selected pairs. This potential is characterised according to four key aspects: strategic interest, economic interest, technical feasibility, and organisational feasibility.

Focus on lithium in lithium-ion batteries

- Strategic interest: very high
- Economic interest: medium
- Technical feasibility: moderate
- Organisational feasibility: moderate

As shown in Figure 2, among the analysed pairs, those with the highest potential for recycling deployment are:

- Lithium and cobalt in lithium-ion batteries;
- Silicon and silver in PV panels;
- Neodymium (and other rare earths) in NdFeB magnets;
- Silver contained in printed circuit boards.

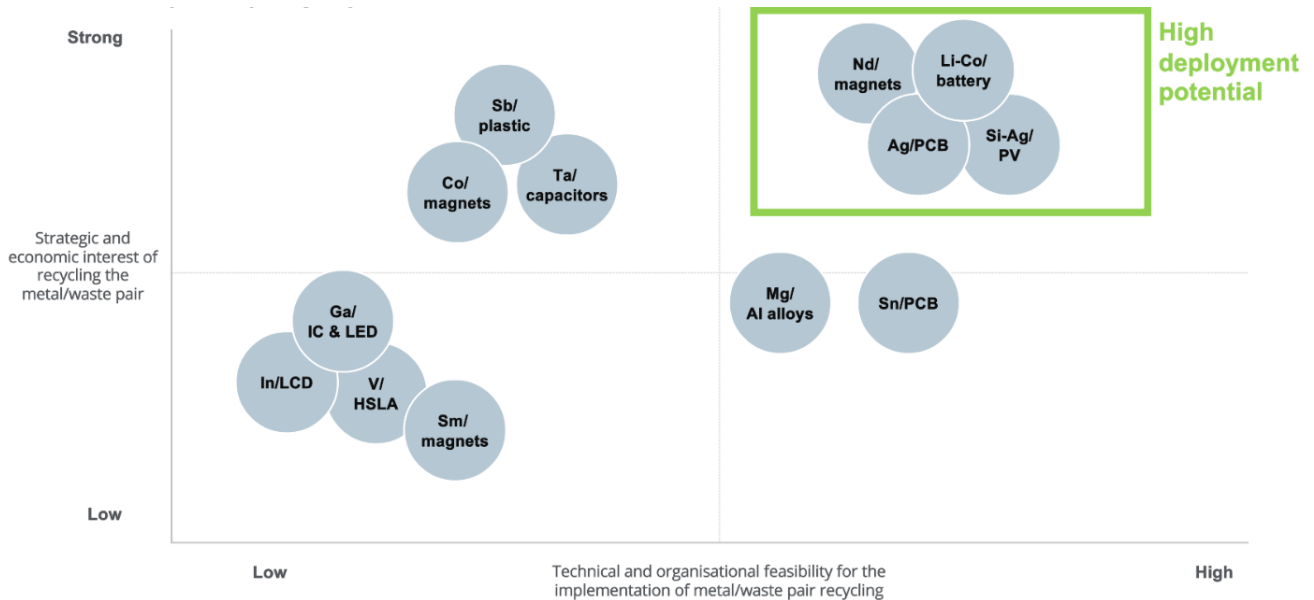


Figure 2 : Analyse transversale des couples métal / déchet selon l'intérêt et la faisabilité de la mise en place du recyclage (RECORD, 2025)

Figure 2: Cross-analysis of metal/waste pairs based on the interest and feasibility of recycling implementation (RECORD, 2025)

L'étude décline ensuite des pistes de recommandations visant à faciliter le déploiement du recyclage des métaux stratégiques. Qu'elles soient transverses ou spécifiques à chaque couple, elles se rattachent à l'une des 5 familles suivantes :

The study then outlines recommendations aimed at facilitating the deployment of strategic metal recycling. Whether they are cross-cutting or specific to each pair, they fall into one of the following five categories:



Pistes organisationnelles et de structuration : relatives aux interactions entre les différentes parties prenantes clés, la coordination de travaux, etc.



Organisational and structuring pathways: related to interactions between key stakeholders, coordination of work, etc.



Pistes techniques portant notamment sur les procédés ou encore la conception des produits



Technical pathways: focusing notably on processes or even product design



Pistes économiques visant principalement à viabiliser l'activité des acteurs clés des étapes stratégiques.



Economic pathways: primarily aiming to ensure the viability of key actors in strategic stages



Pistes réglementaires et normatives concernant notamment la manière dont le cadre législatif en vigueur pourrait évoluer en faveur du recyclage.



Regulatory and normative pathways: concerning, in particular, how the existing legislative framework could evolve in favor of recycling



Pistes liées au développement de connaissances en lien avec la poursuite de travaux spécifiques et les enjeux relatifs aux manques de données.



Knowledge development pathways: related to the continuation of specific work and the challenges associated with data gaps

Focus sur le lithium dans les batteries lithium-ion

Piste organisationnelle et de structuration :

Développer l'entièreté du savoir-faire requis – que ce soit d'un point de vue technique ou en termes de capacité volumique de traitement – de la collecte des déchets en fin de vie à la fabrication de nouvelles batteries.

- Temporalité : moyen terme
- Acteurs concernés : recycleurs, producteurs, recherche
- Niveau de maturité : moyen

Afin de contribuer à la viabilisation économique de la chaîne de recyclage des batteries lithium-ion en Europe, plusieurs **pistes réglementaires et normatives** sont envisagées :

- Sécuriser la conservation des intrants à chaque étape en Europe
 - Temporalité : moyen terme
 - Acteurs concernés : pouvoirs publics
 - Niveau de maturité : forte

Focus on lithium in lithium-ion batteries

Organisational and structuring pathway:

- Develop the full range of required expertise – both from a technical perspective and in terms of volumetric processing capacity – from end-of-life waste collection to the manufacturing of new batteries.

- Timeline: Medium-term
- Stakeholders: Recyclers, producers, research
- Maturity level: Medium

To contribute to the economic viability of the lithium-ion battery recycling chain in Europe, several **regulatory and normative pathways** are being considered:

- Secure the retention of inputs at each stage within Europe
 - Timeline: Medium-term
 - Stakeholders: Public authorities
 - Maturity level: High

- Limiter la concurrence déloyale qui peut exister entre les acteurs européens et leurs concurrents
 - Temporalité : moyen terme
 - Acteurs concernés : pouvoirs publics
 - Niveau de maturité : forte
- Favoriser le développement d'une demande des batteries issues d'une filière de traitement européenne
 - Temporalité : moyen terme
 - Acteurs concernés : industriels, pouvoirs publics, consommateurs
 - Niveau de maturité : moyen

L'hétérogénéité des produits et les évolutions technologiques que connaît le secteur des batteries invitent aussi à s'interroger sur la flexibilité et la transposabilité **technique et logistique** des chaînes de recyclage mises en place.

Conclusions

Le recyclage des métaux stratégiques reste encore peu développé au niveau européen à partir de produits en fin de vie. Cette situation s'explique par plusieurs facteurs, variables selon les métaux et les déchets qui les contiennent : l'absence d'intérêt économique identifié, la dispersion des métaux dans des produits complexes, ou encore des gisements insuffisants pour justifier une récupération ciblée, etc. C'est suivant cette approche par couple métal / déchet que la présente étude a été menée.

La place du recyclage dans les approvisionnements actuels et à venir repose sur la prise en compte de plusieurs enjeux associés aux différentes étapes nécessaires à la circularité des métaux :

- La nécessité d'assurer des exutoires au recyclage, qui implique de prendre en compte les besoins actuels et à venir des industriels en incorporation de matière première de recyclage ;
- L'identification du « meilleur » débouché pour chaque métal : privilégier un recyclage pour la même application (ou du moins, avec le même niveau de pureté) ou plutôt dans d'autres applications (par exemple, recyclage en boucle ouverte, downcycling, etc.). Il s'agit de trouver le meilleur compromis entre l'efficacité (économique, environnementale) du recyclage et les besoins des filières utilisatrices ;
- La recherche de boucles de recyclage les moins complexes possible, afin d'assurer une meilleure maîtrise de la qualité des matières ;
- Le choix de cibler un métal spécifique ou un mélange de plusieurs métaux (alliages) dans les procédés de recyclage (compromis entre l'efficacité technologique et matière) ;
- L'importance de chacune des étapes contribuant à la circularité, depuis la collecte jusqu'à l'incorporation, afin d'optimiser les quantités de métaux recyclées issues de gisements de déchets.

De grands enjeux se dégagent : le besoin d'amélioration de la connaissance, de communication entre acteurs et de structuration de filières à l'échelle nationale mais surtout européenne, et de la protection d'une chaîne de valeur 100% locale face à des marchés mondiaux.

Ces enjeux font écho aux évolutions récentes telles que le Critical Raw Material Act (dont une partie est consacrée aux aimants permanents, par exemple), et aux travaux menés à la fois au niveau français (plan de circularité des matières premières critiques, lancement de l'OFREMI suite au rapport Varin, etc.) et européen.

- *Limit unfair competition that may exist between European players and their competitors*
 - *Timeline: Medium-term*
 - *Stakeholders: Public authorities*
 - *Maturity level: High*

- *Promote the development of demand for batteries stemming from a European processing sector*
 - *Timeline: Medium-term*
 - *Stakeholders: Industry, public authorities, consumers*
 - *Maturity level: Medium*

*The heterogeneity of products and the technological advancements in the battery sector also call for reflection on the flexibility and **technical and logistical** transferability of the recycling chains being established.*

Conclusions

The recycling of strategic metals remains underdeveloped at the European level from end-of-life products. This situation is explained by several factors, which vary depending on the metals and the waste containing them: the absence of identified economic interest, the dispersion of metals in complex products, or even insufficient waste deposits to justify targeted recovery, etc. It is following this metal/waste pair approach that the present study was conducted.

The role of recycling in current and future supply chains relies on considering several challenges associated with the different steps necessary for metal circularity:

- *The necessity of ensuring recycling outlets, which involves taking into account the current and future needs of industries for the incorporation of recycled raw materials;*
- *Identifying the "best" end-use for each metal: prioritising recycling for the same application (or at least, maintaining the same level of purity) or redirecting it to other applications (e.g., open-loop recycling, downcycling, etc.). The goal is to find the best compromise between the economic and environmental efficiency of recycling and the needs of user sectors;*
- *Seeking the least complex recycling loops to ensure better quality monitoring of materials;*
- *Choosing whether to target a specific metal or a mix of several metals (alloys) in recycling processes (balancing technological and material efficiency);*
- *Recognising the importance of each step contributing to circularity, from collection to incorporation, in order to optimize the quantities of recycled metals sourced from waste deposits.*

Major challenges emerge: the need for improved knowledge, communication between stakeholders, and the structuring of recycling sectors at the national and especially European levels, as well as the protection of a 100% local value chain against global markets. These challenges resonate with recent developments such as the Critical Raw Materials Act (which, for instance, includes a section dedicated to permanent magnets) and ongoing efforts at both the French (circularity plan for critical raw materials, launch of OFREMI following the Varin report, etc.) and European levels.