

Etude du potentiel d'amélioration du recyclage des métaux en France

Etat des lieux du recyclage de
l'acier, de l'aluminium et du
cuivre en France et plan d'action

RAPPORT FINAL

REMERCIEMENTS

Pour ce rapport, nous tenons à remercier l'ensemble des personnes ayant participé au projet, notamment les membres du Comité de Pilotage, mais aussi les différents contributeurs interviewés au cours de l'étude.

Membres du Comité de pilotage et de relecture :

A3M – Maxime LAZARD, Marc PLEUVY

ADEME – Hélène BORTOLI PUIG, Julien DEZOMBRE, Raphael GUASTAVI, Pauline JOSSERAND, Olga KERGARAVAT, Julien LERCHUNDI, Agathe JARRY, Eliott MARI

Aluminium France – Cyrille MOUNIER

BRGM – Patrick D'HUGUES, Mathieu LEGUERINEL

CEA/ISEC – Yannick GOMEZ

Direction Générale des Entreprises – Stéphane BERGER, Mélanie LE DAIN, Elodie MAXIME-LECLEIRE, Adrien PEUCH

Ecosystem – Alice BIZOUARD, Xavier LANTOINETTE,

FEDEREC – Géraldine BULOT, Manuel BURNAND, Adèle MOTTE

FIEEC – Oriane MOURET, Anne-Charlotte WEDRYCHOWSKA

IFP Energies Nouvelles – Emmanuel HACHE

IRT M2P – Gaël FICK, Laurent LABOUS

Ministère de la Transition Ecologique – Hélène GAUBERT, Julien HARDELIN, Hugo JAKOMULSKI, Doris NICKLAUS, Mouna TATOU-BRETON

Coordination ADEME : Olga KERGARAVAT

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Pierrick DRAPEAU, Louis OLLION, Guillaume BOUYER. 2023. Etude du potentiel de recyclage de l'acier, de l'aluminium et du cuivre en France. 220 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2022MA000258

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par DELOITTE

Coordination technique - ADEME : KERGARAVAT Olga

Direction/Service : Direction Economie Circulaire / Service Ecoconception et Recyclage

SOMMAIRE

1. CONTEXTE DU PROJET	9
1.1. Contexte de l'étude	9
1.1.1. Une consommation de métaux de base croissante s'accompagnant de tensions d'approvisionnement significatives	9
1.1.2. A première vue, le recyclage des métaux de base présente certains avantages mais reste perfectible	11
1.1.3. Le recyclage permet de réduire les impacts environnementaux des métaux	12
1.2. Périmètre, finalités et objectifs	14
1.2.1. Périmètre de l'étude et notions clés	14
1.2.2. Objectifs de l'étude	15
2. METHODOLOGIE D'ETAT DES LIEUX DU RECYCLAGE DES METAUX EN FRANCE	16
2.1. Méthodologie de l'état des lieux	16
2.2. Focus sur les principaux gisements de déchets métalliques recyclables	16
2.3. Focus sur les entretiens réalisés	17
3. ETAT DES LIEUX DU RECYCLAGE DE L'ACIER EN FRANCE	19
3.1. Vision synthétique de la chaîne de valeur du recyclage de l'acier en France	19
3.1.1. Présentation des filières de recyclage de ferrailles et de la chaîne de valeur de l'acier en France	19
3.1.2. Déterminants de l'incorporation de ferrailles	22
3.1.3. Comparaison entre les ferrailles disponibles et les ferrailles incorporées aujourd'hui	23
3.1.4. Récapitulatif des principaux produits semi-finis, produits finis et marchés consommateurs d'acier en France	26
3.2. Benchmark européen de l'incorporation et des imports-exports de ferrailles	27
3.2.1. Rappels préliminaires sur les codes douaniers relatifs aux imports-exports de ferrailles	27
3.2.2. Incorporation et imports-exports pour tous types d'aciers	28
3.2.3. Focus sur les imports-exports de ferrailles inox	35
3.3. Enjeux à 2030 pour la filière acier	39
3.3.1. Tendances de production d'acier à 2030	40
3.3.2. Tendances réglementaires en matière de décarbonation de la sidérurgie	46
3.3.3. Une industrie en transformation	47
3.3.4. Conséquences sur la consommation de ferrailles et enjeux de circularité de l'acier à 2030	50
3.4. Principaux freins au recyclage de l'acier	52
3.4.1. Une faible part de l'acier n'est pas collectée pour des raisons économiques	53
3.4.2. Les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs contraignent l'incorporation de ferrailles par l'industrie sidérurgique	54
3.4.3. Les technologies existantes et en cours de développement ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'exigence dans les conditions actuelles de marché, ce qui entraîne le recyclage en boucle ouverte d'une partie des ferrailles en France	57
3.4.4. Les ferrailles sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et la demande	60
3.4.5. Les prix des matières premières et de l'énergie jouent un rôle important et peuvent constituer un frein au recyclage de l'acier en France	62
3.4.6. Le développement du réemploi reporte la disponibilité des MPR métalliques	63
3.5. Principal gisement potentiel pour l'acier	65
3.5.1. Gisements de Véhicules Hors d'Usage non collectés et exportés	65

3.6.	Synthèse de l'état des lieux du recyclage de l'acier en France	67
4.	ETAT DES LIEUX DU RECYCLAGE DE L'ALUMINIUM EN FRANCE	69
4.1.	Vision synthétique de la chaîne de valeur du recyclage de l'aluminium en France	69
4.1.1.	Présentation des filières et déterminants de l'incorporation de MPR d'aluminium et de la chaîne de valeur de l'aluminium en France	69
4.1.2.	Comparaison entre les MPR d'aluminium disponibles et incorporées aujourd'hui	71
4.1.3.	Récapitulatif des principaux produits semi-finis, produits finis et marchés consommateurs d'aluminium en France	73
4.2.	Benchmark européen de l'incorporation et des imports-exports de MPR d'aluminium	74
4.2.1.	Rappels préliminaires sur les codes douaniers relatifs aux imports-exports de MPR d'aluminium	74
4.2.2.	Incorporation et imports-exports de MPR d'aluminium	75
4.3.	Enjeux à 2030 pour la filière aluminium	81
4.3.1.	Tendances de production d'aluminium à 2030.....	81
4.3.2.	Tendances réglementaires en matière de décarbonation de l'industrie de l'aluminium.....	85
4.3.3.	Une industrie en transformation	86
4.3.4.	Conséquences sur la consommation de MPR d'aluminium et enjeux de circularité de l'aluminium à 2030	87
4.4.	Principaux freins au recyclage de l'aluminium	88
4.4.1.	Une faible part de l'aluminium n'est pas collectée pour des raisons économiques.....	89
4.4.2.	Les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs contraignent l'incorporation de MPR d'aluminium par l'industrie métallurgique	90
4.4.3.	Les technologies existantes et en cours de développement ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'exigence dans les conditions actuelles de marché, ce qui entraîne le recyclage en boucle ouverte d'une partie des MPR d'aluminium en France.....	93
4.4.4.	Les MPR d'aluminium sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et la demande.....	97
4.4.5.	Les prix des matières premières et de l'énergie jouent un rôle important et peuvent constituer un frein au recyclage de l'aluminium en France	98
4.4.6.	Le développement du réemploi reporte la disponibilité des MPR d'aluminium	100
4.5.	Principaux gisements potentiels pour l'aluminium	101
4.5.1.	Gisements de Véhicules Hors d'Usage non collectés et exportés	101
4.5.2.	Gisements d'emballages usagés non collectés et exportés	103
4.6.	Synthèse de l'état des lieux du recyclage de l'aluminium en France.....	105
5.	ETAT DES LIEUX DU RECYCLAGE DU CUIVRE EN FRANCE	107
5.1.	Vision synthétique de la chaîne de valeur du recyclage du cuivre en France	107
5.1.1.	Présentation des filières d'incorporation de MPR de cuivre et de la chaîne de valeur du cuivre en France.....	107
5.1.2.	Comparaison entre les MPR de cuivre disponibles et incorporées aujourd'hui	110
5.1.3.	Récapitulatif des principaux produits semi-finis, produits finis et marchés consommateurs de cuivre en France.....	112
5.2.	Benchmark européen des imports-exports de MPR de cuivre	114
5.2.1.	Rappels sur les codes douaniers relatifs aux imports-exports de MPR de cuivre	114
5.2.2.	Incorporation et imports-exports de MPR de cuivre	115
5.3.	Enjeux à 2030 pour la filière cuivre	122
5.3.1.	Tendances de production de cuivre à 2030	122
5.3.2.	Tendances réglementaires en matière de transformation de l'industrie du cuivre.....	125

5.3.3.	Une industrie en transformation	125
5.3.4.	Conséquences sur la consommation de MPR de cuivre et enjeux de circularité du cuivre à 2030	127
5.4.	Principaux freins au recyclage du cuivre	128
5.4.1.	Une faible part du cuivre n'est pas collectée pour des raisons économiques.....	129
5.4.2.	Les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs contraignent l'incorporation de MPR de cuivre par l'industrie métallurgique	130
5.4.3.	Les technologies actuelles et en cours de développement ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'exigence dans les conditions actuelles de marché, ce qui entraîne le recyclage en boucle ouverte d'une partie des MPR de cuivre en France.....	134
5.4.4.	Les MPR de cuivre sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et la demande	136
5.4.5.	Les prix des matières premières et de l'énergie jouent un rôle important et peuvent constituer un frein au recyclage du cuivre en France	138
5.4.6.	Le développement du réemploi diminue la disponibilité des MPR de cuivre au recyclage	139
5.5.	Principaux gisements potentiels pour le cuivre	140
5.5.1.	Gisements de Véhicules Hors d'Usage non collectés et exportés	141
5.5.2.	Gisements de Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques non collectés et exportés	142
5.6.	Synthèse de l'état des lieux du recyclage du cuivre en France	144
6.	RECOMMANDATIONS SOUS LA FORME D'UN PLAN D'ACTION	147
6.1.	Objectifs et méthodologie du plan d'action	147
6.2.	Principaux résultats – Six actions prioritaires.....	148
6.2.1.	Action n°1 : Créer une instance de dialogue pérenne entre les représentants des différentes étapes de la chaîne du recyclage des métaux en France.....	148
6.2.2.	Action n°2 : Renforcer le soutien à la préparation de MPR métalliques à faibles taux de résiduels	151
6.2.3.	Action n°3 : Identifier toutes les catégories de MPR métalliques en France par spécification commerciale	154
6.2.4.	Action n°4 : Définir une méthode et des outils de traçabilité pour l'incorporation de MPR par les fabricants de produits finis.....	156
6.2.5.	Action n°5 : Inciter les fabricants de produits finis à intégrer davantage de MPR métalliques, notamment via un « label contenu recyclé »	161
6.2.6.	Action n°6 : Mettre en place des obligations réglementaires liées à des seuils d'intensité carbone des matériaux.....	164
6.3.	Synthèse des recommandations sous la forme d'un plan d'action	167
7.	CONCLUSIONS	169
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	171
	INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	177
8.	ANNEXES.....	180
8.1.	Cartographie détaillée de la chaîne de valeur de l'acier	180
8.1.1.	Tonnages d'acier en France à chaque étape de la chaîne de valeur	180
8.1.2.	Vision détaillée des étapes de la chaîne de valeur de l'acier en France	181
8.2.	Cartographie détaillée de la chaîne de valeur de l'aluminium.....	189
8.2.1.	Tonnages d'aluminium en France à chaque étape de la chaîne de valeur.....	189
8.2.2.	Vision détaillée des étapes de la chaîne de valeur de l'aluminium en France	190
8.3.	Cartographie détaillée de la chaîne de valeur du cuivre	199

8.3.1.	Tonnages de cuivre en France à chaque étape de la chaîne de valeur	199
8.3.2.	Vision détaillée des étapes de la chaîne de valeur du cuivre en France	200
8.4.	Notes méthodologiques des analyses approfondies de gisements potentiels.....	208
8.4.1.	Gisement de métaux dans les VHU	208
8.4.2.	Gisement d'aluminium dans les emballages	209
8.4.3.	Gisement de cuivre dans les DEEE	210
8.5.	Projets réglementaires en cours à l'échelle française et à l'échelle européenne	211
8.5.1.	Proposition de règlement sur l'écoconception pour des produits durables (ou « Ecodesign for Sustainable Products Regulation » - ESPR)	211
8.5.2.	Révision du Règlement relatif aux transferts de déchets (ou « Waste Shipment Regulation » - WSR)	211
8.5.3.	Législation européenne sur les matières premières critiques (ou « Critical Raw Materials Act »)	212
8.5.4.	Loi industrie verte.....	212
8.5.5.	Mise en place des filières REP Véhicules Hors d'Usage (VHU) et Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment (PMCB)	213
8.5.6.	Révision de la directive relative aux Véhicules hors d'usage.....	214
SIGLES ET ACRONYMES		215
GLOSSAIRE.....		216

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, **la quasi-totalité des déchets métalliques (acier, aluminium, cuivre) sont recyclés**, c'est-à-dire collectés, préparés et réincorporés dans un nouveau cycle de production. Des filières d'incorporation de Matières Premières de Recyclage (MPR) métalliques existent pour tous les métaux. Les **freins au recyclage des métaux en France** résident en revanche dans la **non-valorisation et/ou la non-incorporation en France de certains types de MPR**, notamment les MPR post-consommation, pour plusieurs raisons :

- Des **exigences techniques et réglementaires** concernant les **teneurs en certains éléments résiduels** des secteurs consommateurs (ex. teneurs maximales en plomb) ;
- Des **technologies de tri** ne permettant pas d'atteindre ce niveau d'exigence **dans les conditions actuelles de marché** (ex. tri alliage par alliage) ;
- Des MPR métalliques exportées au niveau mondial selon la **répartition géographique de l'offre et la demande** et selon les qualités demandées.

L'offre de MPR françaises étant nettement supérieure à la demande, **les MPR post-consommation françaises sont en grande partie recyclées en boucle ouverte** en France **ou exportées** vers des pays tiers.

A ce titre, **la France est le principal exportateur net de MPR métalliques par comparaison avec l'Allemagne, la Belgique l'Espagne et l'Italie**. La France est un exportateur net de 5 507 kt de MPR d'acier, de 342 kt de MPR d'aluminium et de 280 kt de MPR de cuivre en 2021, représentant respectivement 45 %, 47 % et 100 % des MPR collectées en 2019. La France exporte des MPR métalliques directement vers des pays frontaliers ayant des **tissus industriels plus favorables à l'incorporation** de MPR métalliques et indirectement vers des pays tiers, où le **consentement à payer est plus élevé** pour tous types de qualités commerciales (MPR à teneurs élevées et faibles en résiduels).

D'ici à 2030, une augmentation de la demande en métaux est attendue en France et en Europe, notamment en raison de l'utilisation grandissante de métaux non ferreux (aluminium et cuivre) dans les technologies de la transition énergétique : les demandes européennes de cuivre et d'aluminium augmenteront annuellement de 1,0 % et de 1,4 % entre 2018 et 2030.

Les gisements de MPR métalliques devront être de plus en plus conservés en France pour répondre à cette demande additionnelle, pour **décarboner** le secteur de la métallurgie et ses filières aval, et pour répondre aux enjeux de **criticité** des matières premières vierges, en particulier le cuivre. Les métallurgistes pourront s'appuyer sur l'amélioration continue des technologies de tri entre métaux et de tri alliage par alliage pour incorporer des volumes plus élevés de MPR issus de déchets post-consommation. A noter qu'il sera essentiel de **poursuivre l'amélioration du recyclage de certains gisements d'intérêt** (DEEE, VHU et emballages) qui sont aujourd'hui soit partiellement collectés, soit perdus ou exportés sous la forme de produits d'occasion, de produits en fin de vie ou de pièces.

Dans les prochaines années, afin de poursuivre l'amélioration du recyclage des métaux en France, l'étude conclut qu'il sera nécessaire d'agir à la fois :

- Sur l'offre de MPR métalliques en France, notamment en renforçant le **soutien à la préparation de MPR métalliques à faibles taux de résiduels** ;
- Sur la demande de MPR métalliques : en définissant des **méthodes et outils de traçabilité** et de labellisation du **contenu recyclé** et en incitant/obligeant les **fabricants de produits finis à incorporer des MPR métalliques**.

ABSTRACT

Nearly all scrap metals (steel, aluminium and copper) are recycled today, i.e. they are collected, prepared, and reintegrated into a new production cycle, and there are recycling routes for the three metals. However, **the barriers to metal recycling** in France today lie in the **non-recovery and/or the non-incorporation of certain types of scrap**, especially post-consumer scrap, for several reasons:

- **Technical and regulatory requirements** regarding the content of certain **tramp elements** in end-use sectors (e.g., maximum lead content);
- **Sorting technologies** that cannot meet these requirements **under current market conditions** (e.g., alloy by alloy sorting);
- Global exports of scrap metals based on the **geographical distribution of supply and demand** and the required scrap specifications.

As the French supply of scrap metals far exceeds demand, **French post-consumer scrap is largely downcycled** in France **or exported** to European and non-European countries. **France is the primary net exporter of scrap metals compared to Germany, Belgium, Spain, and Italy.** In 2021, France exported a net 5,507 kt of steel scrap, 332 kt of aluminium scrap, and 280 kt of copper scrap, representing respectively 45%, 45%, and 100% of the scrap collected in 2019. The country directly exports scrap metals to **border countries with stronger industries**, more likely to use high volumes of scrap for the manufacturing of semi-finished and end-use products, and indirectly to **non-European countries where willingness to pay is higher** for all types of commercial specifications (high and low content of tramp elements).

By 2030, an increase in demand for metals is expected in France, notably due to the growing use of ferrous and non-ferrous metals in energy transition technologies. European demand for copper and aluminium is expected to increase annually by 1.0% and 1.4% between 2018 and 2030.

The use of scrap metals will increase in France to **meet this additional demand**, to **decarbonize** the metallurgical players and their downstream industries, and to address the challenges related to **critical raw materials**, particularly copper. Metallurgists will rely on the continuous improvement of sorting technologies – metals sorting and alloy-by-alloy sorting – to incorporate higher volumes of post-consumer scrap. It will be essential to **continue improving the recycling of certain additional scrap sources** (WEEE, ELV, and packaging), which are currently either partially collected, lost, or exported as second-hand products, EoL products or components.

In the coming years, to further improve metal recycling in France, the study concludes that action will be necessary on both:

- The supply of scrap metals in France, especially by strengthening financial and technical support for the **production of scrap with low tramp element content**;
The demand for scrap metals, by defining **traceability and labelling methods and tools for recycled content** and by encouraging/mandating **manufacturers of finished products to incorporate metallic scrap**.

1. Contexte du projet

1.1. Contexte de l'étude

1.1.1. Une consommation de métaux de base croissante s'accompagnant de tensions d'approvisionnement significatives

Les métaux de base, notamment **l'acier, l'aluminium et le cuivre** et leurs alliages, sont au cœur des sociétés humaines : construction, transports, emballages, câbles, etc.

Leur consommation est amenée à croître au cours des prochaines décennies – cf. Figure 1, notamment du fait de :

- **La hausse globale de la population ainsi que du niveau de vie**, et donc de la consommation en général ;
- **Leur omniprésence dans notre société du fait de propriétés physiques uniques** leur permettant des applications dans de nombreux secteurs : urbanisation (bâtiment, plomberie, câble électrique, etc.), électronique (circuits imprimés, puces électroniques, etc.), transports (châssis, carrosserie, etc.) ;
- Leur importance pour la transition écologique :
 - **Energies renouvelables** : Le *Sustainable Development Scenario* (atteinte de tous les objectifs en matière d'énergie durable) de l'Agence Internationale de l'Energie postule que la demande en minéraux des technologies d'énergie propre liées aux véhicules électriques et au stockage des batteries, aux réseaux d'électricité, à l'énergie solaire photovoltaïque, à l'énergie éolienne et à l'hydrogène (ordre décroissant) pourrait quadrupler entre 2020 et 2040 ;
 - **Transports bas carbone** : Le déploiement des véhicules électriques (VE) et du stockage en batterie augmentera rapidement au cours des deux prochaines décennies, notamment en raison de l'interdiction de la vente des véhicules thermiques dans l'Union européenne à partir de 2035. La demande minérale pour les VE du *Sustainable Development Scenario* pourrait augmenter de près de 30 fois entre 2020 et 2040 (Agence internationale de l'énergie, 2022) ;
 - **Économie circulaire** : La mise en place de réglementations en lien avec l'économie circulaire contribue à augmenter la demande en métaux. Par exemple, la mise en place de la directive européenne sur les plastiques à usage unique (*Directive Single Use Plastics*) pourrait entraîner une augmentation de la demande en aluminium et en acier inoxydable dans les emballages à usage unique et dans les emballages réemployables.

Plus particulièrement, l'acier, l'aluminium et le cuivre sont des matériaux indispensables à la majorité des seize principales technologies de la transition énergétique (priorité 3/4 pour le projet SURFER¹), ainsi que des spécificités de certaines technologies comme le cuivre pour les technologies de l'éolien, les trois métaux pour celles de l'énergie photovoltaïque ou le fer (et l'acier) pour les technologies de l'information de la communication (priorité 4/4 pour le projet SURFER) (ADEME, 2020, D).

¹ Le projet de recherche SURFER vise à fournir des éléments de réponse sur la faisabilité de la transition énergétique française au regard des besoins en matières minérales, en matières énergétiques, en eau et en sols qui en découlent. Le projet SURFER caractérise les intensités matières des principales technologies du système énergétique, c'est-à-dire la quantité de matière mobilisée pour une performance donnée.

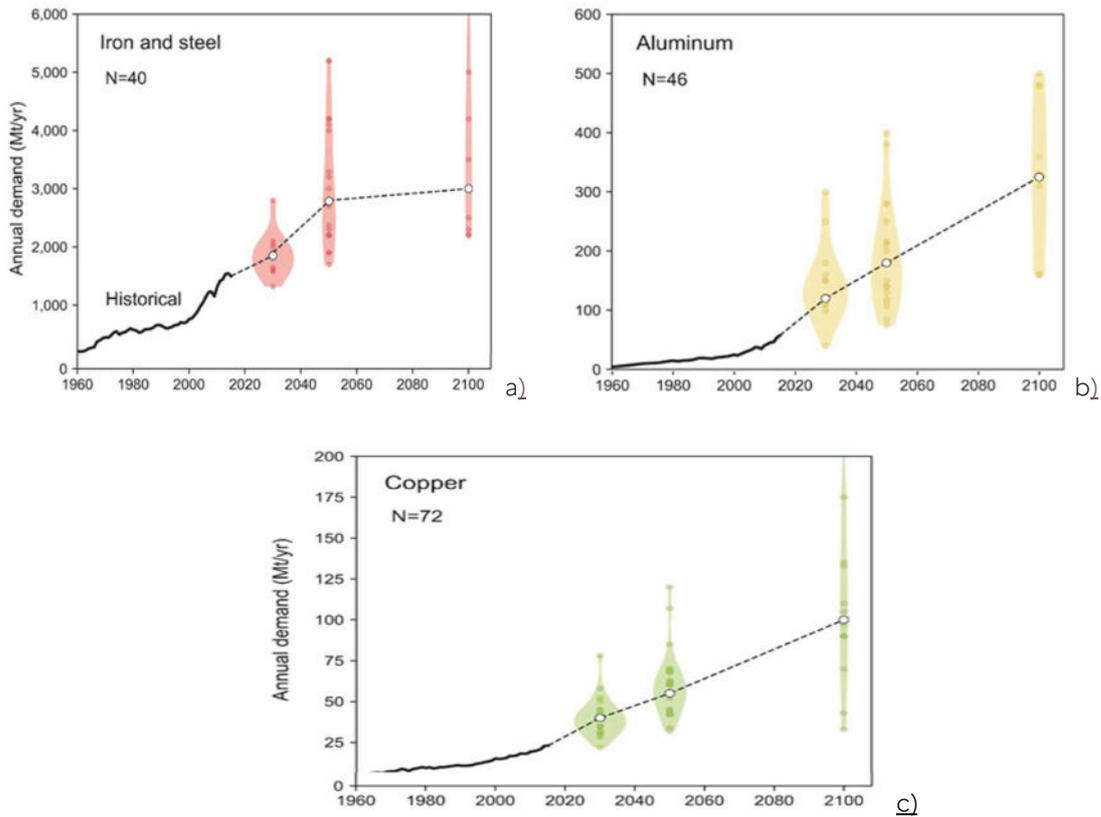


Figure 1 : Evolution de la demande mondiale en fer et en acier (a), en aluminium (b) et en cuivre (c) de 1960 à 2019 ainsi que les estimations de ces demandes d'ici 2100 (Watari, et al., 2021)

Cependant, **l'offre en métaux de base peut, dans certains cas, subir des tensions d'approvisionnement** liées à plusieurs facteurs (événements climatiques extrêmes, événements géopolitiques, hausse du prix de l'énergie, etc.), se traduisant par une hausse de prix. A ce titre, la Figure 2 présente l'évolution du prix mondial du minerai de fer, de l'aluminium et de cuivre en 2015 et 2022.

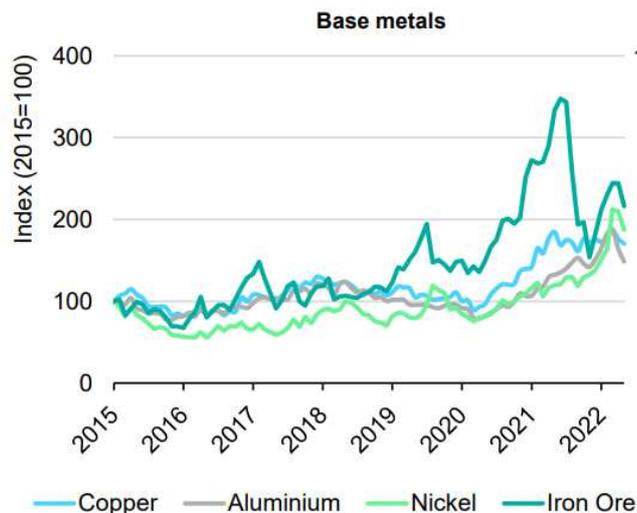


Figure 2 : Evolution du prix de métaux de base - indice 100= 2015 (Agence Internationale de l'Energie, 2022)

Le cuivre est particulièrement sujet à ces tensions d'approvisionnement, puisque sa demande devrait augmenter de 16 % d'ici à 2030, alors que certaines prévisions estiment que l'offre diminuera de 12 % par rapport aux niveaux de 2021 au niveau mondial. Ces tensions sont particulièrement liées à la diminution

de la concentration des minerais de cuivre dans les mines actuellement exploitées² et à la fermeture de mines (Agence Internationale de l'Énergie, 2023). La Figure 3 présente l'évolution de la demande mondiale en cuivre entre 1990 et 2050 d'après les scénarios STEPS (Stated Policies Scenario – continuité des politiques actuelles) et SDS (Sustainable Development Scenario – mise en place d'une politique de transition énergétique ambitieuse). Par comparaison avec 1990, **la demande mondiale en cuivre pourrait doubler à l'horizon 2030 et quadrupler à l'horizon 2050**, ce qui entrainera irrémédiablement des tensions d'approvisionnement.

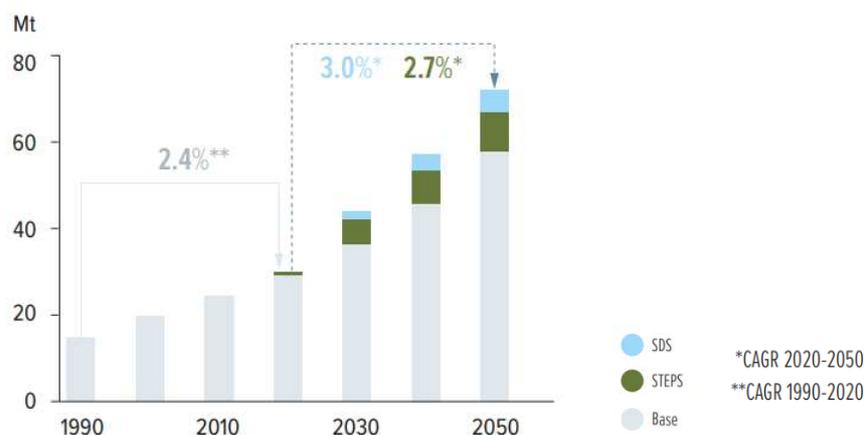


Figure 3 : Projection de la demande mondiale de cuivre selon les scénarios STEPS (Stated Policies Scenario) et SDS (Sustainable Development Scenario) (Eurométaux, 2022)

1.1.2. A première vue, le recyclage des métaux de base présente certains avantages mais reste perfectible

Les études passées associent le recyclage des métaux à des avantages économiques et environnementaux et à plusieurs types de freins. L'objectif de cette étude est de confirmer ou d'infirmer ces postulats.

Qu'est-ce qu'une Matière Première de Recyclage (MPR) ?

Tout au long de ce rapport, on entend par **Matière Première de Recyclage (MPR)** tout matériau répondant à des caractéristiques techniques définies et issu de matériaux ayant déjà servi dans un cycle économique. Le terme de MPR est générique et ne préjuge pas de l'étape de la chaîne où a eu lieu le « recyclage » au sens strict de l'Article L. 541-1-1 du code de l'environnement. Les MPR métalliques sont donc des MPR d'acier (ou « ferrailles »), d'aluminium ou de cuivre.

Ce terme s'oppose aux **Matières Premières Vierges (MPV)**, qui sont les matériaux n'ayant jamais été incorporés dans un cycle économique.

Le recyclage des grands métaux permet de :

- **Sécuriser les chaînes d'approvisionnement.** D'une part, le recyclage permet de réduire la dépendance aux importations (ex. pour l'aluminium, la dépendance à l'égard des importations s'élevait à 87 % pour la bauxite en 2019). D'autre part, il permet d'anticiper la baisse des gisements métalliques disponibles. La réduction de la dépendance vis-à-vis des importations est un élément important pour de nombreuses matières, même non critiques ;

² Par exemple, la teneur moyenne du minerai de cuivre au Chili a diminué de 30 % au cours des 15 dernières années. L'extraction des métaux contenus dans les minerais nécessite plus d'énergie, ce qui exerce une pression à la hausse sur les coûts de production, les émissions de gaz à effet de serre et les volumes de déchets (Agence Internationale de l'Énergie, 2023).

- **Diminuer l’empreinte environnementale de leur extraction et transformation**, comme présenté dans la section suivante ;
- **Développer l’intégralité de la filière métallurgique**, en entretenant des liens et synergies forts tout au long de la chaîne de valeur. Ces synergies permettraient le partage de compétences et de savoir-faire, ainsi que le développement de l’emploi pour la filière.

Le recyclage des métaux de base en France reste néanmoins perfectible. Les principaux freins au recyclage de l’acier, de l’aluminium et du cuivre en France sont respectivement détaillés en sections 3.4, 4.4 et 5.4.

Tout d’abord, **le recyclage des métaux est confronté à des contraintes techniques**, notamment l’utilisation de matériaux en tant qu’éléments d’alliage qui peuvent constituer un frein à la récupération et à la réutilisation en fin de vie du produit et nécessiter une infrastructure métallurgique sophistiquée et agile. Il est aujourd’hui impossible, d’un point de vue économique et dans les conditions actuelles du marché français, de créer un système de recyclage traitant un nombre important d’alliages sans mélanger les différentes références. A titre d’illustration on retiendra que plus de 400 alliages de cuivre sont utilisés sur le marché. Les clients finaux utilisateurs d’acier et d’aluminium requièrent également des alliages propres aux performances attendues pour leurs produits. Cette situation limite la possibilité d’un recyclage fonctionnel et conduit le plus souvent à une **perte des propriétés physiques initialement recherchées (recyclage en boucle ouverte)**.

Ensuite, **ces contraintes techniques sont intimement liées à des contraintes économiques**. En effet, la mise en place d’un système de collecte efficace des métaux – voire d’une collecte séparative des différents métaux – est complexe car elle est coûteuse, compte tenu de la conception des produits, de leur usage dispersif et des limites aux gestes de tri. Le tri des métaux alliage par alliage nécessite quant à lui l’utilisation de **technologies avancées** qui peuvent s’avérer onéreuses et peu matures (faible productivité, nombre d’erreurs élevé, etc.).

Le marché du recyclage des métaux est également international. L’exportation de ressources complique l’estimation d’un taux d’incorporation ou de recyclage, et l’intégration de MPR métalliques en France. Certaines opérations de tri sont effectivement plus économiques à l’international.

Enfin, **les informations disponibles permettant de quantifier et de qualifier le gisement de métaux recyclables** en France restent lacunaires. Par exemple, il n’existe pas de données précises sur les tonnages de métaux et types d’alliages contenus dans les produits en fin de vie.

1.1.3. Le recyclage permet de réduire les impacts environnementaux des métaux

La production de métaux a **un impact environnemental significatif** :

- Les émissions de la filière sidérurgique en France représentaient en 2017 environ 4 % des émissions françaises totales de CO₂ (Sénat, 2019) et 22 % des émissions de l’industrie française (ADEME, 2021) ;
- Les émissions de la filière aluminium ne représentent que 1,5 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) de l’industrie française mais 5 % de sa consommation d’électricité (ADEME, 2020 A).

Au-delà de la contribution au changement climatique, l’extraction et la transformation des grands métaux ont des **effets négatifs en matière d’écotoxicité et de toxicité pour l’homme (cuivre, acier) et de risques pour la santé** liés aux particules en suspension (acier, aluminium, cuivre). A ce titre, la Figure 4 présente les quantités produites par métal et impacts environnementaux de l’extraction et de la transformation des métaux de 2000 à 2015. Proportionnellement aux volumes produits, **le cuivre est le métal étudié dont l’extraction et la transformation génèrent le plus d’externalités négatives** pour l’environnement et la santé humaine (PNUE, 2019).

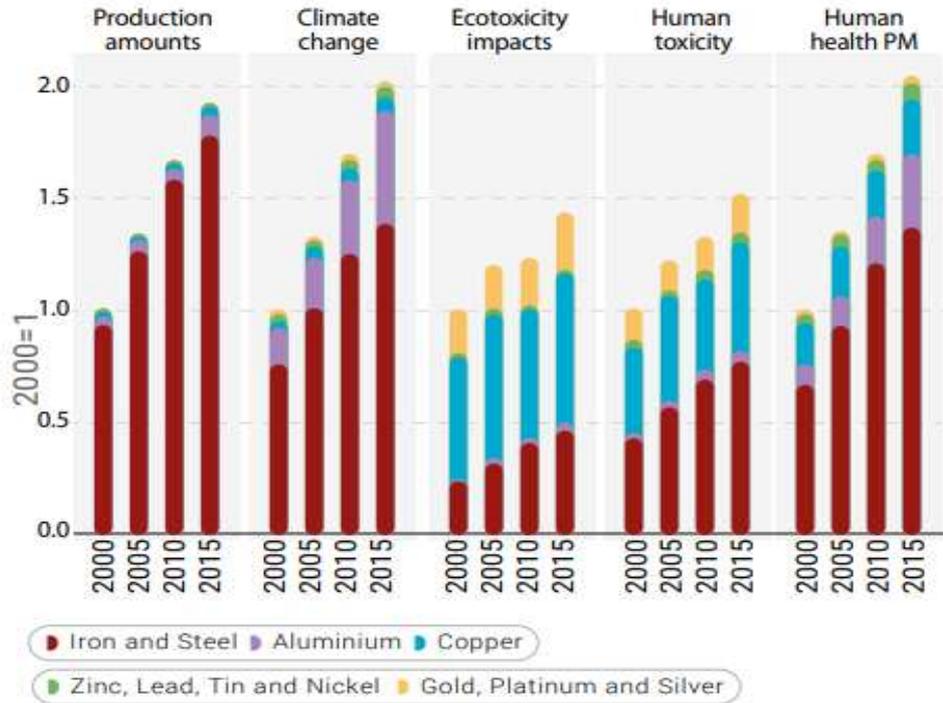


Figure 4 : Quantités produites et impacts environnementaux de l'extraction et de la transformation des métaux* de 2000 (Indice base 1) à 2015 (PNUE, 2019)
 *Sélection de 10 métaux couvrant plus 95 % de l'extraction domestique mondiale de minerais métalliques en 2015

L'incorporation de matières premières de recyclage permet de diminuer l'impact environnemental de la production et de la transformation des métaux de base.

La Figure 5 indique que pour un kilogramme d'acier ou d'aluminium produit, les émissions de CO₂ à la production de métaux sont moins importantes lorsque ceux-ci ont été préparés à partir de MPR métalliques. Au total, d'après l'ADEME et FEDEREC (ADEME et FEDEREC, 2017), le recyclage d'une tonne de MPR métalliques (acier, aluminium, cuivre) permet d'éviter :

- 58 % des émissions de GES nécessaires à la production de l'équivalent en **acier** primaire ;
- 93 % des émissions de GES nécessaires à la production de l'équivalent en **aluminium** primaire ;
- 10 % des émissions de GES nécessaires à la production de l'équivalent en **cuivre** primaire.

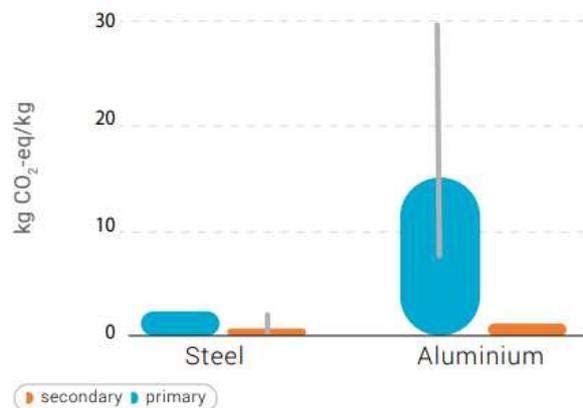


Figure 5 : Impacts du recyclage des métaux sur le changement climatique en kg équivalent CO₂ par kg de métal produit (PNUE, 2019)

Le recyclage des métaux permet à certains secteurs consommateurs de métaux de **réduire l'empreinte environnementale liée à la production de matériaux**. Par exemple, dans le cas des véhicules électriques, la neutralité de la filière à l'horizon 2050 imposera en effet de décarboner non seulement la batterie, mais aussi l'acier et l'aluminium contenus dans les véhicules. Cette décarbonation s'appuiera notamment sur une hausse du recyclage et de l'incorporation de matières premières de recyclage.

Pilotés par l'ADEME dans le cadre du projet Finance ClimAct, les Plans de Transitions Sectoriels (PTS) permettent d'élaborer des trajectoires de décarbonation, pour les filières industrielles les plus consommatrices d'énergie (sucre, ciment, acier, aluminium, chimie, verre, papier-carton), en proposant différents scénarios permettant de concrétiser les objectifs énergie-climat de la France à l'horizon 2050, et ce, dans une démarche de concertation avec les acteurs des filières.

Parmi les leviers de décarbonation identifiés dans ces travaux de prospective, celui du recyclage apparaît comme incontournable, notamment, pour les secteurs de l'acier et de l'aluminium."

Plus d'informations disponibles sur le lien suivant :

<https://agirpoulatransition.ademe.fr/entreprises/demarche-decarbonation-industrie/plans-transition-sectoriels>

1.2. Périmètre, finalités et objectifs

1.2.1. Périmètre de l'étude et notions clés

La présente étude traite de 3 grands métaux ou métaux de base³ :

- **L'acier** est un alliage de fer et de carbone dont la proportion massique est comprise entre 0,02 % et 2 % ;
 - En particulier, **l'acier inoxydable** (acier inox) est un acier comportant moins de 1,2 % de carbone et plus de 10,5 % de chrome, et dont la propriété remarquable est d'être peu sensible à la corrosion et de ne pas s'oxyder (rouiller).
- **L'aluminium** est un métal blanc léger. Il s'agit du métal le plus abondant de l'écorce terrestre et le plus employé après le fer. Il existe deux types d'alliages d'aluminium : **les alliages d'aluminium de corroyage** (destinés pour la majorité à être transformés par des techniques de laminage, filage, matriçage, forge, etc.) et **les alliages d'aluminium de fonderie** (ou « alliages légers », destinés à être transformés par des techniques de fonderie) ;
- **Le cuivre** est un métal de couleur rouge-brun. Il est très malléable et est un bon conducteur électrique.

La chaîne de valeur du recyclage comprend différentes étapes : collecte des déchets ; tri des déchets (« recyclage » au sens strict de l'Article L. 541-1-1 du code de l'environnement⁴) ; surtri des déchets (optionnel, cf. glossaire) ; incorporation de ces matières dans la fabrication de nouveaux produits. Les cartographies détaillées des chaînes de valeur des trois métaux sont disponibles en Annexes 8.1 (acier), 8.2 (aluminium) et 8.3 (cuivre).

Tout au long de ce rapport, **les Matières Premières de Recyclage métalliques sont parfois catégorisées selon leurs teneurs en résiduels**. En effet, à une échelle internationale, les MPR sont standardisées et catégorisées (ex. Steel Scrap Specification pour l'acier) selon des exigences de composition et/ou de forme, notamment au regard de leur teneur en éléments contaminants organiques (plastique, terre, etc.) ou métalliques (cuivre, plomb, etc.). La différence entre une MPR ayant des teneurs en résiduels faibles et une MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées est donc que la première est plus régulièrement réincorporée en boucle fermée alors que la seconde est généralement réincorporée en boucle ouverte en France et à l'étranger.

³ Les grands métaux (ou métaux de base) sont des métaux disponibles en grande quantité dans la croûte terrestre et utilisés dans plusieurs types d'industries. L'acier, l'aluminium et le cuivre sont des métaux de base, tout comme le plomb ou le zinc.

⁴ Le recyclage y est défini comme « toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins ».

Le périmètre géographique de la présente étude est la France, bien que des comparaisons avec quatre pays frontaliers (Allemagne, Belgique, Espagne et Italie) soient effectuées pour chaque métal dans une section « Benchmark européen de l'incorporation et des imports-exports de MPR ».

1.2.2. Objectifs de l'étude

La présente étude vise les objectifs suivants :

- Mieux connaître et quantifier les **gisements disponibles en recyclage en France** pour l'acier, l'aluminium et le cuivre, en tenant compte de la diversité des alliages et applications de ces métaux ;
- Identifier les **solutions** permettant **d'améliorer le taux de recyclage des métaux de base** sur le territoire national ;
- Estimer **l'impact des tendances de consommation et de circularité des métaux d'ici à 2030** sur l'industrie métallurgique, notamment en lien avec la décarbonation de l'économie.

2. Méthodologie d'état des lieux du recyclage des métaux en France

2.1. Méthodologie de l'état des lieux

A noter : Pour la partie état des lieux, il a été décidé de structurer le rapport en trois chapitres autoporteurs et indépendants. Certains éléments communs à plusieurs métaux (ex. certains freins au recyclage) sont donc répétés dans les états des lieux des différents métaux concernés.

Pour chaque métal, **les visions synthétiques des chaînes de valeur du recyclage de chaque métal en France** sont issues de recherches bibliographiques, d'informations partagées en entretiens ainsi que de documents transmis par les experts interviewés.

Les benchmarks européens de l'incorporation et des imports-exports de MPR métalliques de quatre pays de l'UE permettent d'identifier le niveau de valorisation des métaux exportés depuis la France vers quatre autres pays de l'UE et de comprendre la structure des boucles d'économie circulaire dans ces pays par métal. Ces benchmarks ont été réalisés à partir de données publiées par Eurostat ainsi que de pistes d'analyses partagées par des experts lors d'entretiens.

Afin de sélectionner quatre pays européens pour les comparer avec le cas français, les pays de l'UE ont été sélectionnés sur le fondement de plusieurs critères :

- Volume de production d'acier, d'aluminium et de cuivre ;
- Volumes des échanges commerciaux de MPR d'aluminium, acier et cuivre avec la France
- Existence d'une filière d'affinage du cuivre ;
- Volume de MPR métalliques importées et exportées ;
- Part d'exportation vers des pays tiers (hors UE) ;
- Recommandations par les experts interviewés.

Les pays ainsi sélectionnés sont la Belgique, l'Espagne, l'Italie et l'Allemagne.

Les tendances de consommation des métaux de base, de consommation de MPR métalliques et de circularité des métaux à l'horizon 2030 ont été mentionnées lors des entretiens d'experts. Elles ont été complétées par des ressources bibliographiques telles que des rapports technico-économiques prospectifs.

Les freins au recyclage des grands métaux en France sont issus d'entretiens et de recherches bibliographiques.

La caractérisation des gisements collectables et des gisements collectés mais non valorisés en France est réalisée en plusieurs étapes :

1. Identification de ces gisements lors d'interviews avec les acteurs de la chaîne de valeur ;
2. Méta-analyse des gisements identifiés (gisements DEEE, VHU, construction, etc.), permettant de caractériser les tonnages non collectés ou non-valorisés en France.

2.2. Focus sur les principaux gisements de déchets métalliques recyclables

Les entretiens avec les experts de la chaîne de valeur du recyclage des métaux en France ont permis de dégager **six gisements prioritaires, soit cinq focus dans trois secteurs**. Ceux-ci sont présentés dans la Figure 6. Il existe des gisements non collectés ou perdus, ainsi que des gisements généralement collectés mais dont une partie est exportée légalement et illégalement. Toutes les notes méthodologiques de ces analyses approfondies sont disponibles en Annexe 8.4.

	Acier	Aluminium	Cuivre
Gisements non collectés ou perdus	<i>Peu de gisements non collectés.</i>		 
Gisements exportés (dont exports illégaux)			

Gisements prioritaires :  Véhicules Hors d'Usage (VHU)  Déchets d'emballages  Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE)

Figure 6 : Récapitulatif des gisements de déchets métalliques sélectionnés

Plusieurs gisements d'intérêt n'ont pas été retenus pour être analysés de manière approfondie.

D'une part, **l'acier contenu dans les navires n'a pas été retenu**. Les navires sont des consommateurs importants d'acier et plus particulièrement d'acier à faibles teneurs en résiduels. Bien que le taux de collecte des navires soit élevé, il est difficile de les préparer et de les démanteler en Europe. Ainsi, malgré l'existence de projets innovants en France (ex. entreprise Navaleo en Bretagne ; démantèlement de navires par ArcelorMittal à Fos-sur-Mer), ils sont généralement exportés en Inde, au Pakistan et au Bangladesh. Les phases de fabrication, d'utilisation et de fin de vie de ces produits étant toutes mondiales, les experts consultés n'ont pas recommandé d'intégrer ce gisement. Plusieurs organisations, tant gouvernementales (Commission européenne) que non gouvernementales (Shipbreaking Platform), étudient actuellement ce gisement (Entretien d'experts).

D'autre part, **le cuivre stocké dans les bâtiments n'a pas été retenu**. Compte tenu de la difficulté à récupérer certains fils intégrés dans les murs, et du manque d'intérêt économique, ce gisement de cuivre n'est généralement pas collecté lors des travaux de rénovation (Entretien d'experts). Néanmoins, les acteurs français du secteur du bâtiment estiment qu'une augmentation de la collecte de cuivre par rapport à la situation actuelle dans le secteur du bâtiment ne représenterait qu'un apport de MPR de cuivre faible. En particulier, les déchets de cuivre sont systématiquement collectés et valorisés en raison de la valeur de ce métal (Entretien d'experts).

2.3. Focus sur les entretiens réalisés

Une série d'entretiens a été menée avec les acteurs présentés en Tableau 1, couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur des trois métaux (fédérations professionnelles, entreprises, éco-organismes, experts techniques). Ces entretiens avaient trois objectifs :

- **Quantifier les gisements et l'utilisation de déchets métalliques** : Principaux gisements de déchets, MPR produites, MPR consommées en France et exportées, etc. ;
- **Identifier les freins** (sociaux, économiques, techniques) au recyclage et à l'incorporation de MPR en France **et les leviers** français et européens pour améliorer les performances de collecte, de tri et de recyclage ;
- **Identifier les tendances de consommation de MPR métalliques d'ici à 2030** :
 - Les enjeux pour l'industrie du recyclage des principales tendances à 2030 (décarbonation, évolution de la demande de métaux, évolution des technologies de recyclage, etc.) ;
 - L'impact sur la circularité des métaux de ces tendances à 2030 (taux de réincorporation, évolution des alliages utilisés, etc.).

Tableau 1 : Liste des acteurs interviewés au cours de la présente étude

	Incorporateurs de MPR métalliques	Consommateurs de métaux	Récupérateurs et trieurs	Autres experts et éco-organismes
Acier	<ul style="list-style-type: none"> • Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M) ; • Aperam ; • Riva Acier ; • EUROFER ; • ArcelorMittal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Renault ; • Fédération des Industries Mécaniques (FIM) ; • Fédération Française du bâtiment (FFB) ; • Fédération Forge Fonderie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Derichebourg Environnement ; • Fédération Professionnelle des Entreprises du Recyclage (FEDEREC) ; • Syndicat des Entreprises de Déconstruction, Dépollution et Recyclage (SEDDRe). 	<ul style="list-style-type: none"> • IRT M2P ; • Direction de Supervision des filières REP de l'ADEME (experts VHU).
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminium France ; • Constellium ; • SOREMO ; • European Aluminium. 	<ul style="list-style-type: none"> • Renault ; • Fédération des Industries Mécaniques (FIM) ; • Fédération Française du bâtiment (FFB) ; • RTE ; • Fédération Forge Fonderie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Derichebourg Environnement ; • Fédération Professionnelle des Entreprises du Recyclage (FEDEREC) ; • Aluminium France ; • MTB Recycling ; • Syndicat des Entreprises de Déconstruction, Dépollution et Recyclage (SEDDRe). 	<ul style="list-style-type: none"> • IRT M2P ; • Direction de Supervision des filières REP de l'ADEME (experts VHU).
Cuivre	<ul style="list-style-type: none"> • European Copper Institute ; • Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M). 	<ul style="list-style-type: none"> • Nexans ; • Renault ; • RTE ; • Fédération des Industries Mécaniques (FIM) ; • Fédération Française du bâtiment (FFB) ; • Fédération Forge Fonderie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Derichebourg Environnement ; • Fédération Professionnelle des Entreprises du Recyclage (FEDEREC) ; • MTB Recycling ; • Syndicat des Entreprises de Déconstruction, Dépollution et Recyclage (SEDDRe). 	<ul style="list-style-type: none"> • IRT M2P ; • Ecosystem ; • Direction de Supervision des filières REP de l'ADEME (experts VHU).

3. Etat des lieux du recyclage de l'acier en France

Cette partie présente une vision synthétique de la chaîne de valeur de recyclage de l'acier en France (3.1), un benchmark européen des imports-exports et de l'incorporation de ferrailles (3.2), les principaux enjeux à 2030 pour le recyclage de l'acier (3.3), les freins à son recyclage (3.4) et le principal gisement potentiel recyclable pour l'acier (3.5).

A noter : Les matières premières de recyclage (MPR) d'acier sont aussi appelées « **ferrailles** ».

3.1. Vision synthétique de la chaîne de valeur du recyclage de l'acier en France

Les filières qui incorporent des ferrailles sont les filières sidérurgiques intégrée et électrique, ainsi que les fonderies (3.1.1). Les procédés de production de chaque filière et les cahiers des charges des filières aval sont les principaux déterminants de l'incorporation de ferrailles de ces trois filières (3.1.2). La prépondérance de la filière intégrée, moins consommatrice de MPR d'acier, en France explique que les volumes de ferrailles disponibles en France soient nettement supérieurs aux volumes de ferrailles incorporés en fonderie et en sidérurgie, notamment pour les ferrailles post-consommation (3.1.3). Les différences entre les volumes de ferrailles incorporées par les trois filières se répercutent donc tout au long de la chaîne de valeur de l'acier (3.1.4).

Une vision détaillée de la chaîne de valeur de l'acier est disponible en Annexe 8.1.

3.1.1. Présentation des filières de recyclage de ferrailles et de la chaîne de valeur de l'acier en France

- **En amont de la chaîne de valeur, les préparateurs de Matières Premières de Recyclage (MPR) jouent un rôle essentiel.**

Ils ont pour objectif de collecter, trier et préparer des ferrailles correspondant aux cahiers des charges des trois filières incorporatrices. Au total, en 2021, pour tous matériaux, les adhérents de la Fédération professionnelle des entreprises du recyclage (FEDEREC) représentaient 1 200 entreprises, 2 450 établissements et 32 600 emplois directs. En particulier, ces entreprises ont collecté 12 900 kt de métaux ferreux et ont vendu 12 255 kt de ferrailles triées en 2021, pour un chiffre d'affaires de 2,7 milliards d'euros (FEDEREC, 2022).

Trois filières d'incorporation des ferrailles existent :

- **1. La filière sidérurgique intégrée (ou filière fonte) représente deux tiers de la production d'acier en France et contribue partiellement au recyclage de l'acier.**

L'acier y est élaboré dans un haut-fourneau essentiellement à partir d'aggloméré de minerai de fer et de coke, et en France de 10 à 15 % de ferrailles (taux d'incorporation maximal : environ 25 %). La fonte (minerai de fer et coke) sortant du haut-fourneau passe dans un convertisseur à oxygène, dans lequel des ferrailles sont ajoutées afin de baisser la teneur en carbone (élimination du carbone sous forme de CO₂) et ainsi de produire de l'acier liquide (ADEME, 2022, A). La filière intégrée fabrique principalement des produits plats (plaques, feuilles, tôles en bobine, feuillards, etc.) à destination des secteurs de l'automobile, de l'emballage, des biens de consommation et de la construction (Xerfi, 2022, A).

En France, la filière sidérurgique intégrée est très largement dominée par ArcelorMittal France. En janvier 2023, l'entreprise employait 15 250 salariés, sur 40 sites de productions (ArcelorMittal, 2023 A). En particulier, les deux principaux sites de production d'acier sidérurgique sont ceux de Dunkerque (environ 7 millions de tonnes de capacités de production par an) et de Fos-sur-Mer (environ 4 millions de tonnes

de capacités de production par an) (Sénat, 2019). D'après World Steel, en 2019, cette filière produisait environ 10 022 kt d'acier en France (World Steel, 2020).

- **2. L'incorporation de MPR d'acier en France est en majorité effectuée par la filière sidérurgique électrique, qui représentent environ un tiers de la production d'acier en France.**

L'acier y est élaboré dans un four à arc électrique, majoritairement à partir de ferrailles. En Europe, cette filière est presque intégralement dédiée à la production de produits longs⁵ (rails, poutrelles, ronds à béton, etc.) et d'aciers inoxydables. La filière électrique sert principalement le secteur de la construction, le BTP et les industries mécaniques (Xerfi, 2022, A), aussi que les biens de consommation (ex. électroménager), l'automobile, le nucléaire, l'aéronautique et les technologies de la transition énergétique (Entretien d'expert).

En France, en 2021, la filière sidérurgique électrique employait plus de 31 000 salariés au total, dont 10 000 emplois directs. En 2021, cette filière représentait 17 entreprises et 25 aciéries électriques : Riva Acier, Celsa, Aperam, etc. (Comité Stratégique de la Filière Mines et métallurgie, 2021 A). D'après World Steel, en 2019, cette filière produisait environ 4 378 kt d'acier en France (World Steel, 2020).

- **3. Enfin, l'incorporation de MPR d'acier est également effectuée en fonderie.**

La fonderie est une activité de mise en forme de produits métalliques (en acier ou en fonte⁶) par coulée du métal liquide dans un moule. Les ferrailles sont incorporées dans des cubilots⁷ ou des fours à induction⁸. La fonderie sert principalement les secteurs de l'automobile et les industries mécaniques (Xerfi, 2022, B).

En France, en 2020, on recensait 307 établissements de fonderie, dont 32 fonderies d'acier (2 841 salariés) et 60 fonderies de fonte (8 086 salariés). Au total, la production en fonderie (acier, fonte, métaux légers, autres métaux non ferreux) en 2020 s'élevait à environ 1,4 Mt. Le leader est Saint-Gobain. (Xerfi, 2022 A). En particulier, 900 kt de ferrailles ont été incorporées par les fonderies de métaux ferreux en 2019 (Entretien d'experts).

La Figure 7 synthétise la consommation de ferrailles et de matières premières vierges (MPV) en France par les trois filières d'incorporation de ferrailles. Pour les deux filières sidérurgiques, le schéma représente une estimation des volumes de MPV et de MPR incorporées dans le cadre de la production d'acier en 2019⁹.

⁵ A noter que certains sites industriels fabriquent des produits plats via la filière électrique : ex. ArcelorMittal à Sestao, Arvedi en Italie.

⁶ La fonte est un alliage fer-carbone avec une teneur en carbone supérieure à 2 %. Elle est obtenue à partir d'un oxyde de fer et de coke. La fonte peut être destinée à l'élaboration de pièces moulées ou être transformée en acier.

⁷ Le cubilot est un four dans lequel le métal à fondre (principalement des ferrailles) est en contact direct avec le combustible. Ce contact à haute température entraîne une carburation (enrichissement en carbone) importante, ce qui conduit à réserver le cubilot à la production de fonte. Il existe deux types de cubilot : à vent froid (l'air injecté est à température ambiante) et à vent chaud (l'air injecté est chauffé par les fumées). Les cubilots ont des capacités de production très importantes, notamment parce qu'ils fonctionnent en continu (Entretien d'experts).

⁸ Le four à induction est un four où les métaux sont fondus grâce à un champ magnétique. Ce type de fours n'a pas besoin de coke et est beaucoup moins émetteur de CO₂. Les fours à induction ont des capacités de production plus souples que les cubilots. Il n'est donc pas nécessaire de les faire fonctionner en continu, ce qui peut intéresser des producteurs de plus petite taille ou lorsqu'il faut changer régulièrement de nuance d'alliage (Entretien d'experts).

⁹ Les ferrailles incorporées par filière intégrée en 2019 ont été calculées comme le produit de la production d'acier (14,4 Mt d'après World Steel, 2020), de la part de la filière dans la production (69,6 % d'après World Steel, 2020) et d'un taux estimé de ferrailles de 15 % (taux lissé sur plusieurs années – Entretien d'experts).

Quant aux fonderies de métaux ferreux, celles-ci incorporent des ferrailles mais ne produisent pas d'acier, ce qui explique que seules les MPR incorporées en fonderie soient prises en compte dans cette représentation. Les volumes de ferrailles incorporées en fonderie sont issus de données de la Fédération Forge Fonderie (Entretien d'experts).

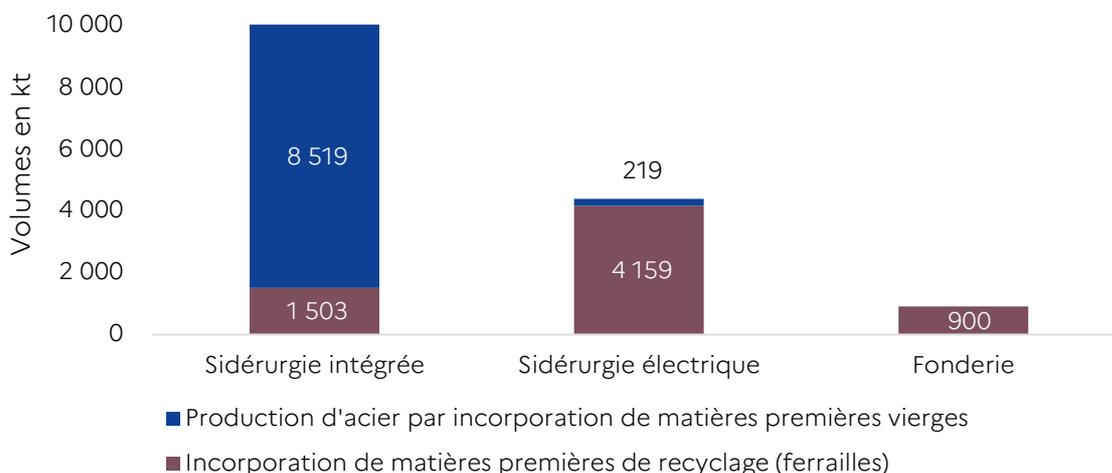


Figure 7 : Synthèse de la consommation de ferrailles et de matières premières vierges en France par les trois filières d'incorporation de ferrailles⁹⁹ (en kt, en 2019)

Une présentation exhaustive des trois filières ci-dessus (procédés, acteurs, produits, chiffres clés) est disponible en Annexe 8.1.2.

- **En France, des volumes importants de ferrailles sont collectées et des volumes plus faibles de ferrailles sont incorporées par les deux filières sidérurgiques.**

La Figure 8 synthétise les tonnages d'acier produits ou consommés en France en 2019 à chaque étape de la chaîne de valeur de l'acier, de la production de métal jusqu'à l'incorporation de ferrailles en sidérurgie. Le gisement total de ferrailles en France n'étant pas connu, il n'est pas possible de comparer ce gisement à la collecte de ferrailles. **Des informations complémentaires sur chaque donnée sont disponibles en Annexe 8.1.1 (cf. Tableau 23).** Ce graphique montre qu'à première vue, des tonnages élevés de ferrailles sont collectés (12 307 kt) et triés (10 728 kt), mais qu'une part importante de ces ferrailles n'est pas incorporée par les filières sidérurgiques françaises. A noter que seules les MPR incorporées en sidérurgie (5 662 kt : 1 503 kt par la filière intégrée et 4 159 kt par la filière électrique) ont été représentées dans la synthèse ci-dessous, par souci de cohérence avec le Bilan National du Recyclage qui ne recensait pas les MPR incorporées en fonderie dans sa dernière édition (ADEME, 2022 A).

Les ferrailles incorporées par filière électrique en 2019 ont été calculées comme le produit de la production d'acier (14,4 Mt d'après World Steel, 2020), de la part de la filière dans la production (30,4 % d'après World Steel, 2020) et d'un taux estimé de ferrailles de 95 % (Entretien d'experts).

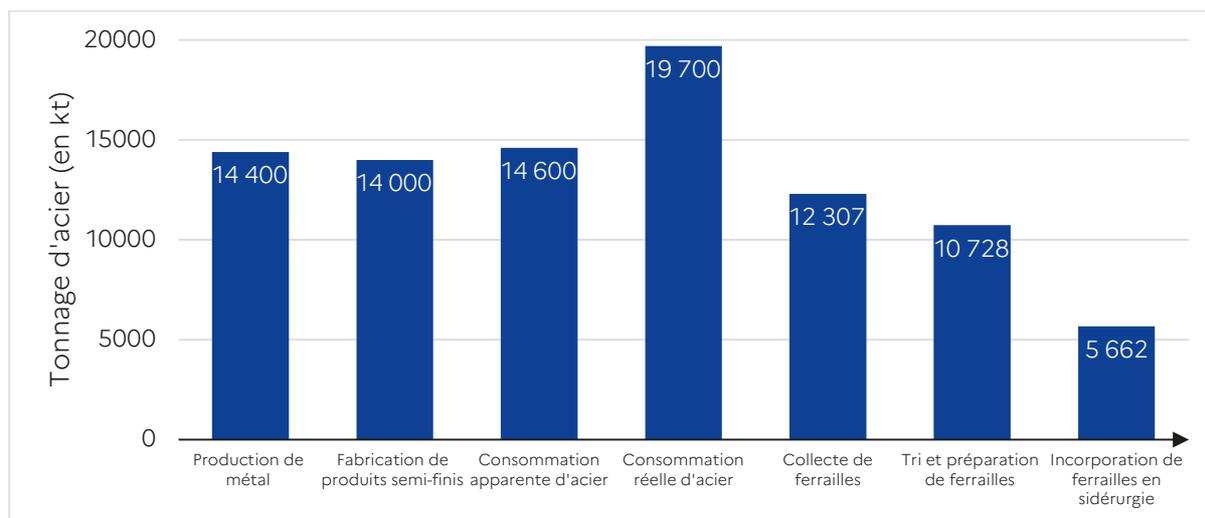


Figure 8 : Synthèse des tonnages d'acier en France à chaque étape de la chaîne de valeur (en kt, en 2019).

3.1.2. Déterminants de l'incorporation de ferrailles

Les ferrailles sont organisées par type d'après la European Steel Scrap Specification. Celle-ci couvre des exigences sur la sécurité, les éléments exclus et la tolérance en éléments résiduels (contaminants métalliques – cuivre, plomb, etc. – et non métalliques – stériles tels que la terre et le plastique) des ferrailles en Europe. Cette spécification fournit également une description détaillée de ces spécifications par catégorie, qui correspond au type de ferraille¹⁰.

Les volumes de ferrailles incorporées varient entre les deux filières sidérurgiques, notamment en raison de différences de :

- **Procédés de production :** La filière sidérurgique intégrée française incorpore de 10 % à 15 % de ferrailles et pourrait, au moins théoriquement, envisager d'atteindre le seuil maximal théorique de 25 % (limites thermodynamiques du convertisseur). La filière sidérurgique électrique peut en théorie incorporer jusqu'à 100 % de ferrailles parmi les intrants métalliques ;
- **Cahiers des charges à respecter :**
 - Dans certains cas, il peut y avoir un décalage entre les exigences de composition et les ferrailles disponibles. Dans le cas de l'industrie automobile par exemple, les ferrailles sont principalement utilisées pour la production de produits longs – essentiellement produits par la filière électrique – et de pièces de fonderie, pour lesquels une teneur en cuivre plus élevée peut être tolérée (ex. pièces composant le moteur : piston, culasse, turbocompresseur, etc.). Les produits plats – principalement produits par la filière intégrée – utilisent de plus faibles quantités de ferrailles mais avec une concentration en cuivre beaucoup plus faible, en raison du risque de défauts de surface dus à l'effet de court-circuit à chaud (*hot shortness surface defects*) (Entretien d'experts). Aujourd'hui, les experts interrogés estiment que plus de la moitié des nuances d'acier à destination du marché automobile ne peuvent pas être produites avec des taux d'incorporation de ferrailles importants (Entretien d'experts). C'est le cas des pièces de sécurité telles que les roues ou les liaisons au sol.
 - L'impact des cahiers des charges des clients finaux sur les volumes de ferrailles incorporés se matérialise également dans le **secteur de la fonderie**. Les fondeurs incorporent 42 %

¹⁰ Aperçu des différentes catégories en Annexe 8.1.2

de ferrailles pour la fabrication de grosses pièces industrielles, contre 100 % de ferrailles pour la fabrication de contrepoids (Entretien d'experts).

3.1.3. Comparaison entre les ferrailles disponibles et les ferrailles incorporées aujourd'hui

La prépondérance de la filière sidérurgique intégrée en France (66,8 % de la production d'acier en 2021 d'après World Steel, 2022), ainsi que les exigences des industries utilisatrices aval, restreignent les possibilités d'incorporer des ferrailles en France en grandes quantités. En conséquence, **les volumes de ferrailles disponibles** (c'est-à-dire collectées et triées) **en France sont nettement supérieurs aux volumes de ferrailles incorporés** en fonderie et en sidérurgie, notamment pour les ferrailles post-consommation. La Figure 9 compare les volumes de déchets d'acier post-consommation incorporés en sidérurgie en 2019 avec les volumes de ferrailles disponibles sur la même période.

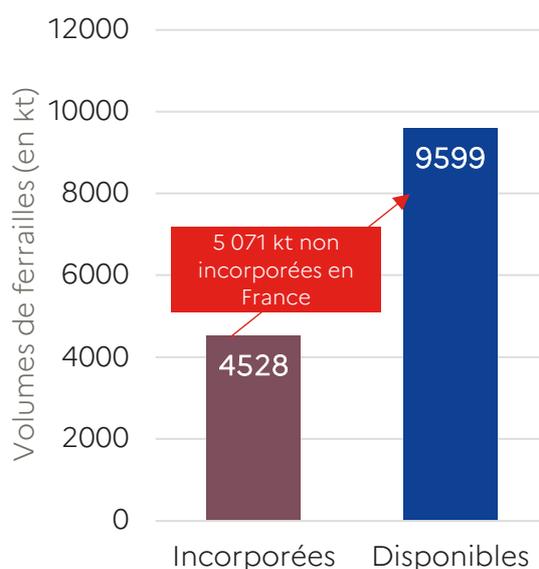


Figure 9 : Volumes de déchets d'acier post-consommation en France en 2019 en kt (ADEME, 2022 A., d'après A3M et Eurostat)

Le Tableau 2 détaille les volumes et types de ferrailles disponibles en France en 2019 et le Tableau 3 présente les volumes et types de ferrailles incorporées en France en 2019.

L'écart entre les volumes de ferrailles disponibles et les volumes de ferrailles incorporées en France s'explique par la structure de la chaîne de valeur française de l'acier :

- **La plupart des acteurs de la filière sidérurgique intégrée s'approvisionnent en ferrailles à faibles teneurs en résiduels**, les chutes internes représentant leur principale source d'approvisionnement. Deux raisons sous-jacentes expliquent cela : une consommation limitée de ferrailles et une capacité résiduelle d'incorporation qui porte essentiellement sur des références commerciales peu disponibles en France (ferrailles très faiblement contaminées) ;
- Aujourd'hui, **la filière électrique, qui représente 33,2 % de la production d'acier** (World Steel, 2022), **est la principale filière consommatrice de ferrailles en France**. La filière se positionne sur des types de ferrailles avec des taux de résiduels potentiellement plus élevés mais broyées et nettoyées comme les ferrailles E40¹¹. Riva Acier, qui produit des billettes (produits semi-finis) et des produits finis, est le premier acteur du marché français de la filière électrique et est le premier incorporateur de ferrailles en France (consommation d'environ 2,2 millions de tonnes de ferrailles par an) (Entretien d'experts) ;

¹¹ La ferraille E40 est une ferraille d'acier déchiquetée. Il s'agit d'une ferraille d'acier fragmentée en morceaux ne dépassant pas 200 mm dans n'importe quelle direction pour 95 % de la charge et dont aucun morceau, dans les 5 % restants, ne dépasse 1000 mm. Ce type de ferrailles est préparé de manière à assurer une charge directe (EFR, 2007).

- Les fonderies se positionnent également sur des ferrailles aux compositions moins exigeantes, notamment pour des pièces pour le marché automobile (ex. pièces composant le moteur) (cf. Tableau 3).

A noter :

- Les volumes de ferrailles disponibles post- et pré-consommation du Tableau 2 sont issus du Bilan National du Recyclage et s'élèvent à 11 719 kt de MPR (ADEME, 2022 A) et diffèrent des volumes estimés à partir des données FEDEREC, qui s'élèvent à 12 307 kt de MPR (Calcul Deloitte d'après FEDEREC, 2021. Données 2019) ;
- Les volumes de ferrailles incorporées en sidérurgie (filières intégrée et électrique) du Tableau 3 sont issus de calculs Deloitte à partir de diverses sources (World Steel et entretiens) pour un volume total de 5 662 kt⁹, alors que le Bilan National du Recyclage estime ce volume à 6 648 kt (ADEME, 2022 A).

Tableau 2 : Volumes et types de ferrailles disponibles en France en 2019

Déchets post-consommation	Déchets pré-consommation
9 599 kt de déchets post-consommation dans la collecte apparente ¹² de ferraille en 2019. (ADEME, 2022 A d'après A3M et Eurostat)	2 120 kt de chutes neuves dans la collecte apparente de ferraille en 2019. (ADEME, 2022 A d'après A3M et Eurostat)
Répartition des tonnages vendus des adhérents FEDEREC en 2021 : <ul style="list-style-type: none"> • 42 % de ferrailles broyées ; • 38 % de ferrailles cisailées et découpées ; • 2 % de fontes ; • 17 % d'autres catégories. (FEDEREC, 2022) 	<ul style="list-style-type: none"> • Déchets de fabrication (2 120 kt) ; • Chutes internes (<i>hors périmètre BNR</i>). (ADEME, 2022 A d'après A3M)

¹² D'après le Bilan National du Recyclage, collecte apparente en vue du recyclage = Incorporation de MPR Incorporation de ferraille en sidérurgie (6 648 kt en 2019) + Exports de déchets (6 595 kt) – Imports de déchets (1 524 kt), soit 11 719 kt – y.c. chutes neuves, 9599 kt hors chutes neuves. En prenant en compte les stocks de ferrailles en sidérurgie (587 kt), la collecte apparente de ferrailles atteint 12 306 kt. A noter : Ces données excluent la fonderie pour 2019 (ADEME, 2022 A).

Tableau 3 : Volumes et types de ferrailles incorporées en sidérurgie et en fonderie en France en 2019

Sidérurgie – Filière intégrée	Sidérurgie – Filière électrique	Fonderie
<p>Environ 1 503 kt de ferrailles incorporées (calcul en Figure 7) <i>Taux d'incorporation : de 10 % à 15 % de ferrailles (donnée lissée sur plusieurs années : environ 15%).</i> <i>Seuil maximal théorique : 25 % (Entretien d'experts)</i></p>	<p>Environ 4 159 kt de ferrailles incorporées (calcul en Figure 7) <i>Taux d'incorporation : plus de 90 % de ferrailles. (Sénat, 2019 et Entretien d'experts)</i></p> <p><i>A noter que ce taux varie selon le type d'acier produits¹³.</i></p>	<p>Environ 900 kt de ferrailles incorporées. <i>Taux d'incorporation : 42 % (grosses pièces pour l'industrie), 80 % (pièces de voirie), 95 % (pièces à destination de l'automobile) ou 100 % (contrepois à destination du bâtiment) (Entretien d'experts).¹⁴</i></p>
<p>MPR incorporées :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chutes internes ; • Déchets pré-consommation à faibles teneurs en résiduels (ex. E2, E6, E8¹⁰) • Déchets post-consommation ayant des teneurs en résiduels modérées (ex. E3¹⁰). (Entretien d'experts). 	<p>MPR incorporées (Comité Stratégique de la Filière Mines et métallurgie (2021):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chutes internes (38 %) ; • Importations (35 %) ; • Achats en France (27 %). <p>Les aciéries électriques achètent les mêmes références en France et à l'étranger : ferrailles E40, ferrailles de démolition, etc. Cette filière peut incorporer des ferrailles contenant plus d'éléments résiduels (Sénat, 2019).</p>	<p>MPR incorporées (en cubilot) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Production de pièces très réglementées : E1C, fontes à faibles teneurs en résiduels, déchets de sidérurgie souillés, etc. ; • Production de pièces peu réglementées : E3, E8C, E40, etc. (Entretien d'experts).

¹³ Par exemple dans le cas de l'acier inox, les taux d'incorporation de matières recyclées sont supérieurs à 80% mais varient d'un produit à un autre : les aciers inox austénitiques incorporent plus de 90% de MPR, du fait du prix élevé du nickel (compris entre 25 000 et 30 000 €/t) (Entretien d'experts). Pour les aciers longs produits par la filière électrique, entre 95 % et 99 % des intrants sont des ferrailles (Entretien d'experts).

¹⁴ Le taux d'incorporation hors chutes internes du secteur de la fonderie de métaux ferreux est d'environ 81% : 19% de matières premières vierges, 38,5% de déchets pré-consommation et 42,5% de déchets post-consommation.

3.1.4. Récapitulatif des principaux produits semi-finis, produits finis et marchés consommateurs d'acier en France

La Figure 10 représente schématiquement les principaux produits (semi-finis et finis) en acier, ainsi que les marchés consommateurs d'acier en France. La flèche en pointillés signifie que seules certaines entreprises françaises et européennes fabriquent des aciers plats via la filière électrique (ex. Industeel, Aperam).

Une vision détaillée de la chaîne de valeur de l'acier est disponible en Annexe 8.1.

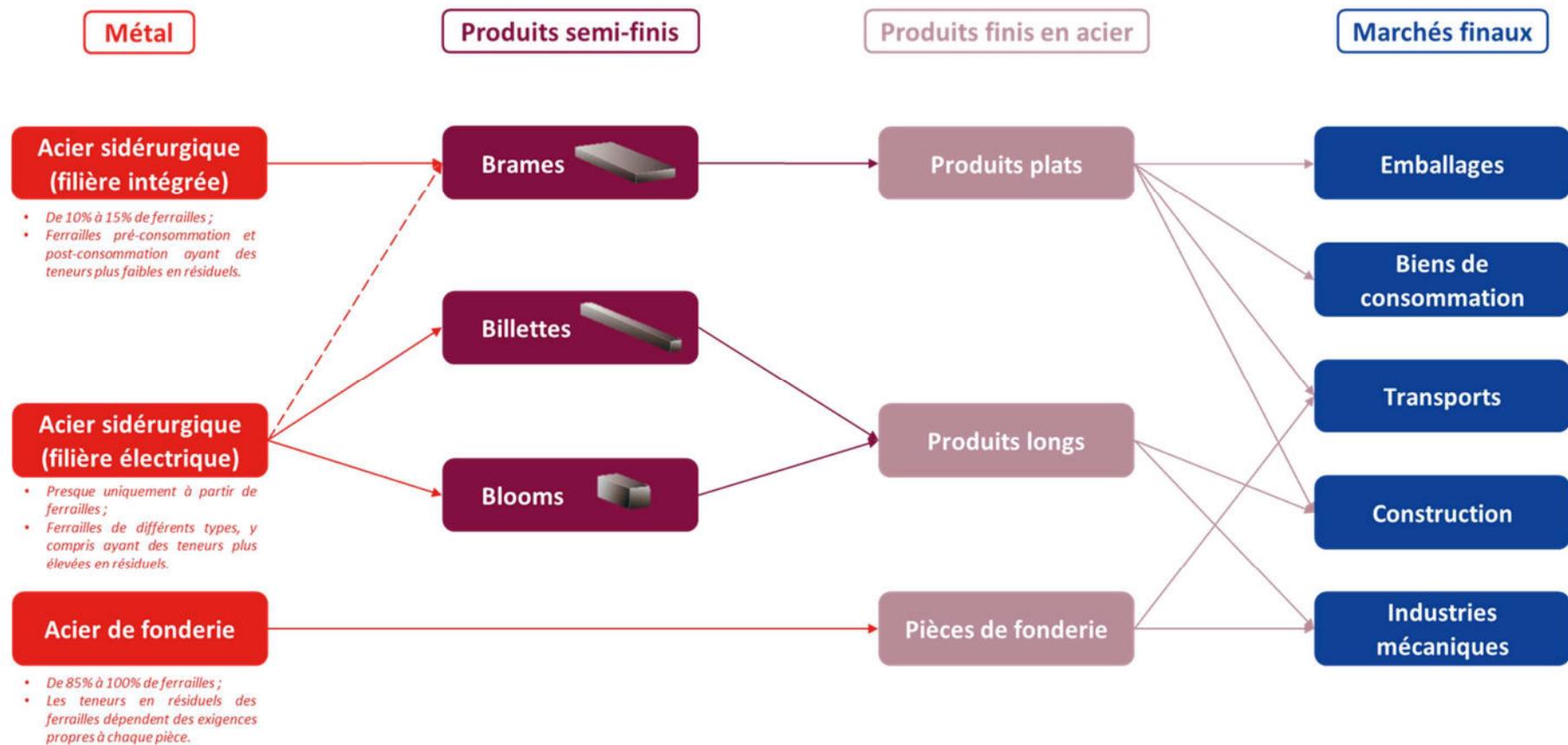


Figure 10 : Représentation simplifiée des principaux produits semi-finis, produits finis et principaux marchés consommateurs d'acier en France (XERFI, 2022 A et B).

3.2. Benchmark européen de l'incorporation et des imports-exports de ferrailles

Cette sous-partie compare la France avec quatre autres pays européens : l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne et l'Italie. Pour l'ensemble des ferrailles échangées (3.2.2), la France est le principal exportateur net de ferrailles et la Belgique est le principal ré-exportateur de ferrailles. Du point de vue des teneurs en résiduels des ferrailles, la prépondérance de la filière intégrée et, selon une partie des acteurs interrogés, des volumes élevés de « ferrailles cisailées et non broyées » expliquent la majeure partie des exports (3.2.2.1). Les pays européens, et notamment la France, peuvent exporter ces ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées soit directement vers des pays hors UE (ex. la Turquie ou l'Égypte), soit indirectement via des « plateformes de réexport » telle que la Belgique (3.2.2.2). Les taux d'incorporation de ferrailles et la collecte apparente de ferrailles des cinq pays varient principalement en fonction de la répartition entre les filières sidérurgiques intégrée et électrique (3.2.2.4).

Un focus sur les imports-exports de ferrailles d'acier inoxydable (3.2.3) montre que les chaînes de valeur sont européennes : la Belgique - production de métal est fortement développée - est le premier pays d'importation de MPR d'aciers austénitiques, alors que l'Allemagne est le principal exportateur de MPR d'aciers austénitiques (3.2.3.3).

3.2.1. Rappels préliminaires sur les codes douaniers relatifs aux imports-exports de ferrailles

L'analyse des importations et exportations de ferrailles repose sur l'utilisation de codes douaniers. Dans le cadre de cette étude, douze codes relatifs aux échanges de ferrailles, tels que définis par la nomenclature de l'Union européenne, ont été utilisés. Ils sont regroupés ici en six catégories :

- **Fontes**
 - 72041000 : « Déchets et débris de fonte » ;
- **Ferrailles cisailées et découpées**
 - 72042900 : « Déchets et débris d'aciers alliés » ;
 - 72043000 : « Déchets et débris de fer ou d'acier étamés » ;
 - 72044930 : « Déchets et débris de fer ou d'acier, non déchetés, présentés en paquets » ;
- **Ferrailles broyées**
 - 72044910 : « Déchets et débris de fer ou d'acier, déchetés » ;
- **Chutes neuves et tournures**
 - 72044110 : « Tournures, frisons, copeaux, meulures, etc. » ;
 - 72044191 : « Chutes d'estampage ou de découpage, de fer ou d'acier, en paquets » ;
 - 72044199 : « Chutes d'estampage ou de découpage, de fer ou d'acier, autres qu'en paquets » ;
- **Autres déchets de métaux ferreux**
 - 72044990 : « Déchets ou débris de fer ou d'acier, non déchetés, ni présentés en paquets » ;
 - 72045000 : « Déchets lingotés en fer ou en acier » ;
- **Aciers inoxydables**
 - 72042110 : « Déchets et débris d'aciers inoxydables, contenant en poids \geq 8 % de nickel » ;
 - 72042190 : « Autres déchets et débris d'aciers inoxydables ».

A noter : Les codes douaniers reflètent à la fois des **différences d'alliages** (aciers inoxydables, fontes, etc.) et **de format** (cisailés, déchetés, en paquets, etc.) des ferrailles.

3.2.2. Incorporation et imports-exports pour tous types d'aciers

3.2.2.1. Imports-exports de ferrailles selon le type de ferrailles échangées

La Figure 11 présente les **volumes d'exports** de ferrailles des cinq pays européens étudiés, ainsi que la répartition entre les types de ferrailles indiqués ci-dessus. Ces données sont exprimées en kilotonnes pour 2021.

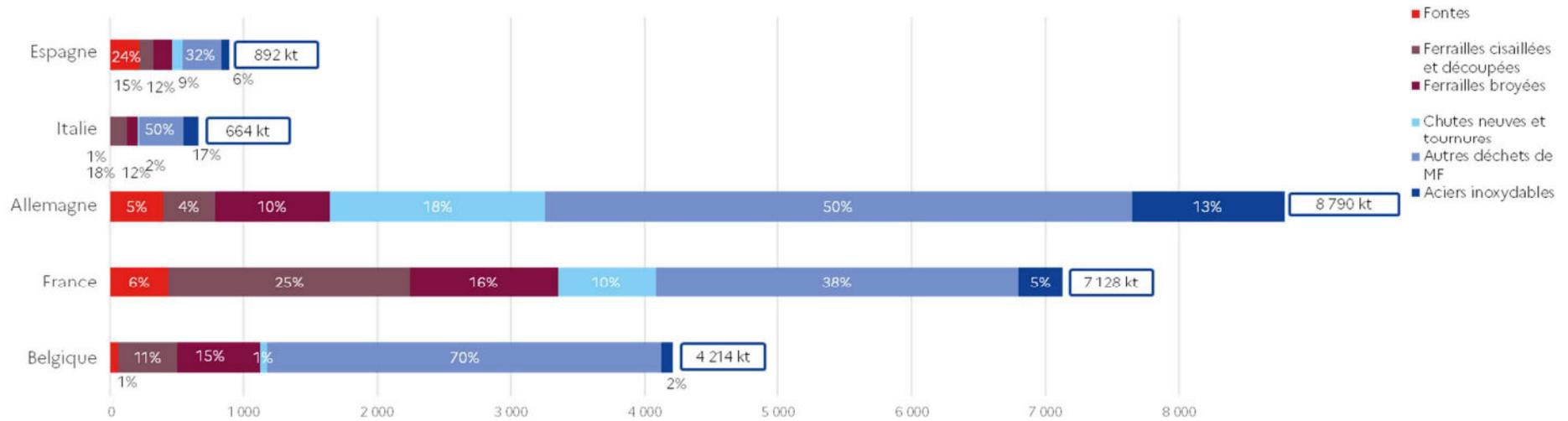


Figure 11 : Répartition des exports de ferrailles de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

La Figure 12 présente les **volumes d'imports** de ferrailles des cinq pays européens étudiés, ainsi que la répartition entre les types de ferrailles indiqués ci-dessus. Ces données sont exprimées en kilotonnes pour 2021.

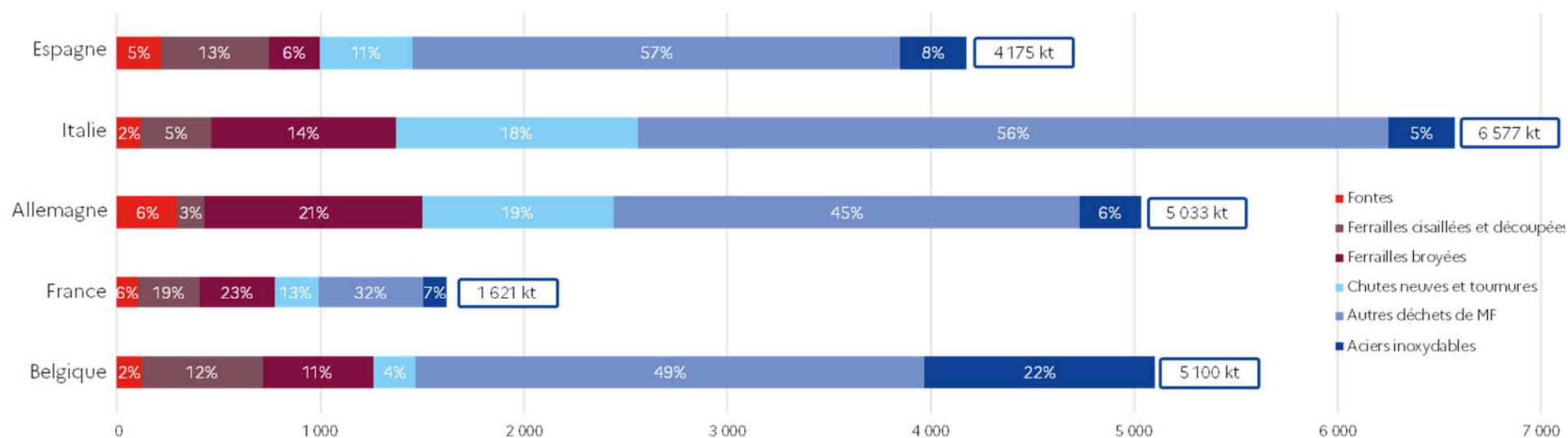


Figure 12 : Répartition des imports de ferrailles de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

- **Les niveaux d'imports-exports des cinq pays s'expliquent essentiellement par les volumes d'acier produits et par la répartition entre les filières intégrée et électrique.**

La France est le second exportateur de ferrailles parmi les cinq pays étudiés (elle n'est dépassée que par l'Allemagne), avec des volumes très significativement supérieurs aux pays suivants dans la liste : 69 % de plus que la Belgique qui arrive en troisième position et près de onze fois plus que l'Italie, à la cinquième place. **Les importations offrent cependant une image inversée, la France occupant ici la dernière place des pays étudiés** avec des volumes importés quatre fois inférieurs à ceux de l'Italie et près de trois fois inférieurs à ceux de l'Allemagne. Cette situation place la France en tête du panel étudié en termes d'excédent d'exportations de ferrailles.

Deux éléments permettent d'expliquer cette situation : **la prépondérance de la filière intégrée et les volumes de production.**

S'agissant des exportations de ferrailles :

- Le niveau élevé d'exportations de ferrailles de la France et de l'Allemagne peut être corrélé à la **part de la filière intégrée dans la production d'acier** dans ces deux pays (67 % et 70 % en 2021 pour la France et l'Allemagne respectivement, d'après WorldSteel 2022). Cette filière est en effet moins demandeuse de ferrailles (relativement aux volumes produits) et recherche un nombre restreint de catégories de ferrailles (cf.
- Tableau 3), réduisant par conséquent les débouchés pour les autres catégories de ferrailles (World Steel, 2022) ;
- L'Espagne et l'Italie exportent très peu de ferrailles afin de conserver ces gisements pour la production d'acier en filière électrique (en 2021, 68 % de la production d'acier en Espagne et 86 % en Italie), cette filière s'approvisionnant presque uniquement à partir de ferrailles (World Steel, 2022).

S'agissant des importations :

- **La filière intégrée est majoritaire en France.** Elle incorpore des quantités limitées de ferrailles. Parmi ces ferrailles incorporées, seule une faible part proviennent d'importations :
 - 1,8 % des ferrailles pré-consommation consommées par les sites sidérurgiques voie intégrée sont importés,
 - 10,2 % des ferrailles post-consommation ayant des teneurs en résiduels modérées sont importés,
 - 6,2 % des ferrailles post-consommation ayant des teneurs en résiduels plus élevées sont importés (Entretien d'experts),
- Le niveau élevé d'importations de l'Allemagne s'explique, malgré la prépondérance de la filière intégrée, par **l'importance des volumes de production de cette filière** ;
- Les sidérurgistes espagnols et italiens importent quant à eux des quantités élevées de ferrailles afin de répondre à la demande de leur filière électrique.

Concernant la Belgique, les volumes élevés d'importations de ferrailles s'expliquent en partie par un **taux élevé de réexportation des ferrailles**, notamment vers la Turquie¹⁵ et l'Égypte. Certaines ferrailles faiblement contaminées sont également conservées sur place, afin d'être incorporées dans la filière intégrée, qui est majoritaire en Belgique (environ 70 % de la production d'acier d'après WorldSteel, 2022).

¹⁵ La Turquie n'a pas intégré dans son droit l'acquis de la directive sur les émissions industrielles (IED), qui impose des valeurs limites d'émissions (air, eau, etc.) définies dans les conclusions des meilleures techniques disponibles (MTD), et n'est pas totalement alignée avec la réglementation européenne sur les déchets (Waste Framework Directive – WFD), dont le traitement en Europe est soumis à la directive IED, comme les activités sidérurgiques (Entretien d'expert).

- **Les analyses des types de ferrailles exportées vers des pays tiers (ex. Turquie) divergent.**

D'une part, selon un acteur expert de l'incorporation de ferrailles, les MPR exportées vers des pays tiers (ex. Turquie), notamment depuis la Belgique, **peuvent avoir des teneurs en stériles¹⁶** (caoutchouc, terre, etc.) **et en contaminants métalliques** (ex. plomb, cuivre) **plus importantes que les autres pays européens étudiés**, parfois supérieures à 10 %. Leur incorporation par les aciéristes est plus polluante et énergivore, dont a priori moins compatible avec les normes environnementales de l'Union européenne. Par exemple, environ 70 % des exports de ferrailles de la Belgique sont des « déchets ou débris de fer ou d'acier, non déchetés, ni présentés en paquets »¹⁷. Ces ferrailles sont majoritairement des **« ferrailles cisailées et non broyées », c'est-à-dire des ferrailles cisailées et découpées sur les ports belges mais qui ne passent pas par l'étape de broyage**, une étape que l'acteur considère comme essentielle pour que ces ferrailles puissent être incorporées en grande quantité dans les fours à arc électrique français. **Des volumes élevés de ferrailles belges sont exportés vers des pays tiers à l'UE** notamment depuis le port d'Anvers (Entretien d'experts).

D'autre part, selon un acteur expert de la préparation de MPR métalliques, **le broyage n'est pas une condition indispensable pour que des ferrailles soient incorporables en France**. En effet, si certains déchets métalliques doivent être broyés pour assurer une « libération » des métaux contenus (ex. VHU, DEEE), d'autres déchets sont plus adaptés au cisailage (ex. poutrelles issues des déconstructions) (Entretien d'experts). Selon ce même acteur, **les teneurs en résiduels des ferrailles ne sont supérieures à 10 % qu'en amont des opérations de préparation de MPR**. Ces teneurs décroissent systématiquement lors de la préparation des MPR, y compris lorsqu'il s'agit de ferrailles cisailées. Par ailleurs, les ferrailles cisailées comportent les mêmes teneurs en résiduels qu'elles soient vendues en France ou à l'étranger et les ferrailles ne sont jamais exportées non broyées ou non cisailées (Entretien d'experts).

Selon un préparateur de ferrailles belge, environ deux tiers des ferrailles exportées vers la Turquie sont des ferrailles cisailées et environ un tiers sont des ferrailles broyées. Dans les deux cas, des contrôles très stricts sont réalisés avant les départs des cargaisons pour s'assurer de la conformité des ferrailles préparées vis-à-vis des cahiers des charges des sidérurgistes turcs (Entretien d'experts).

3.2.2.2. Imports-exports de ferrailles selon la provenance et la destination des ferrailles échangées

Le Tableau 4 et le Tableau 5 indiquent respectivement les destinations des exportations de ferrailles des cinq pays européens en 2021 et les provenances de leurs importations de ferrailles (dont la part de MPR venant de et allant vers des pays non-membres de l'UE).

- **La France est le principal exportateur net de ferrailles parmi les cinq pays étudiés.**

La France est le pays dont la balance commerciale de ferrailles est la plus excédentaire. Ses principaux exutoires sont situés en Belgique et en Espagne :

- Les exportations de ferrailles vers l'Espagne sont majoritairement conservées afin d'être incorporées dans des fours à arc électrique ;
- Les exportations de ferrailles vers la Belgique sont majoritairement envoyées vers la Turquie et l'Égypte, qui représentent environ deux tiers des exportations belges. Une partie minime de ces exportations est incorporée par la filière intégrée belge.

¹⁶ Pour les MPR métalliques, les stériles correspondent aux matériaux sans valeur économique qui ont été mélangés avec les métaux lors du processus de préparation des MPR. Le terme est également employé dans l'industrie minière, avec une signification légèrement différente (mais une même logique). Dans ce cas, les stériles correspondent aux matériaux sans valeur économique qui ont été extraits avec le minerai lors du processus d'extraction.

¹⁷ Catégorie 72044990 – « Autres déchets ». A noter que de nombreux acteurs de la chaîne de valeur du recyclage de l'acier ont souligné que la nomenclature douanière n'était plus conforme à la réalité des MPR échangées.

L'Espagne et l'Italie sont les principaux importateurs nets de ferrailles (+ 3 283 kt et + 5 913 kt) parmi les cinq pays étudiés. Ils s'approvisionnent notamment en ferrailles provenant de France et d'Allemagne, - cf. Tableau 5.

Tableau 4 : Destinations des exportations de ferrailles de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).

Espagne		Italie		Allemagne		France		Belgique	
Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)
1. Portugal	445	1. Turquie	291	1. Pays-Bas	1 945	1. Belgique	1 882	1. Turquie	1 673
2. Maroc	133	2. Slovénie	69	2. Italie	1 631	2. Espagne	1 863	2. Egypte	1 158
3. Turquie	88	3. Hongrie	51	3. Belgique	1 153	3. Luxembourg	859	3. France	430
4. France	57	4. Pakistan	48	4. Luxembourg	1 047	4. Turquie	720	4. Pays-Bas	315
5. Italie	40	5. France	44	5. Turquie	718	5. Italie	706	5. Luxembourg	211
Total	892	Total	664	Total	8 790	Total	7 128	Total	4 214
Part hors EU-27	35 %	Part hors EU-27	58 %	Part hors EU-27	15 %	Part hors EU-27	14 %	Part hors EU-27	75 %

Tableau 5 : Provenances des importations de ferrailles de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).

Espagne		Italie		Allemagne		France		Belgique	
Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)
1. France	1856	1. Allemagne	1 909	1. Pays-Bas	1 153	1. Allemagne	717	1. France	2 434
2. UK	731	2. Autriche	814	2. Tchéquie	955	2. Belgique	534	2. Allemagne	1 475
3. Portugal	374	3. France	653	3. Pologne	834	3. Luxembourg	82	3. Pays-Bas	794
4. Allemagne	198	4. Hongrie	602	4. France	513	4. UK	70	4. UK	127
5. Irlande	167	5. Rep. Tchèque	503	5. Suisse	327	5. Espagne	54	5. Luxembourg	76
Total	4 175	Total	6 577	Total	5 033	Total	1 621	Total	5 100
Part hors EU-27	28 %	Part hors EU-27	19 %	Part hors EU-27	11 %	Part hors EU-27	8 %	Part hors EU-27	5 %

- **Les exports de ferrailles vers la Turquie peuvent s'expliquer par un manque de demande en ferrailles en France et/ou par des avantages économiques à l'exportation.**

La destination des exportations montre **l'importance de l'exutoire de la filière turque**, vers laquelle les cinq pays étudiés exportent des volumes importants de « ferrailles cisailées et non broyées » mentionnés ci-dessus. De nouveau, les analyses technico-économiques de ces exports divergent :

- Selon un acteur expert de l'incorporation de ferrailles, il peut être plus avantageux économiquement pour des préparateurs de MPR de vendre des ferrailles cisailées et non broyées à l'étranger que des ferrailles broyées (ex. ferrailles E40) localement à des acteurs sidérurgiques et de fonderie français. En effet, le passage par l'étape de broyage représente des dépenses d'investissement à amortir, des émissions à surveiller et contrôler, des autorisations à obtenir ou encore du personnel qualifié à employer. Pour les préparateurs de MPR métalliques, la différence entre le prix de vente des ferrailles broyées en France et le prix de vente des ferrailles cisailées et non broyées à l'étranger pourrait être de 30 € à 40 € par tonne¹⁸. Aujourd'hui, les prix de vente des produits finis des sidérurgistes voie électrique ne permettent pas de justifier cette différence de prix d'achat (Entretien d'experts) ;
- Selon un acteur expert de la préparation de MPR métalliques, les ferrailles broyées (ex. E40) et les ferrailles cisailées (HMS 80-20 ou E3) peuvent toutes les deux être consommées par les fours à

¹⁸ A noter : Cette différence de prix dont les préparateurs de MPR métalliques ont besoin rentabiliser l'opération de broyage des ferrailles en France n'est pas issue de données statistiques mais d'échanges avec des préparateurs de MPR métalliques.

arc électrique français et étrangers. Bien que les ferrailles E40 soient généralement plus chères que les ferrailles E3, l'écart de prix n'est parfois que d'une quinzaine d'euros par tonne. L'acteur rappelle également que les volumes d'exports de ferrailles en France s'expliquent majoritairement par un surplus de ferrailles disponibles par rapport à la demande des filières incorporatrices.

Les ferrailles européennes exportées vers la Turquie, l'Inde ou l'Afrique du Nord sont ensuite partiellement réimportées sous la forme de produits sidérurgiques. Certains quotas trimestriels nationaux sur les importations de produits sidérurgiques, mis en place dans le cadre des mesures de sauvegarde de l'acier¹⁹, sont rapidement atteints dès le début de chaque nouveau trimestre (Entretien d'expert). Selon plusieurs acteurs de la filière acier, les importateurs de produits sidérurgiques cherchent à préempter le plus rapidement possible les volumes autorisés (hors taxes d'importation) au-delà de la demande réellement exprimée (Entretien d'expert).

3.2.2.3. Focus sur les exportations françaises de ferrailles

La majorité des ferrailles exportées par la France correspondent, selon la nomenclature douanière, à des « déchets et débris déchiquetés », des « déchets et débris non déchiquetés », des « déchets et débris mis en paquets », et « déchets et débris ni déchiquetés ni mis en paquet ». Comme précisé ci-dessus, il est envisageable selon certains acteurs que **des « ferrailles cisillées et non broyées » soient d'une part incorporées sur place par les pays vers lesquels la France exporte (après ou sans étape de broyage) et, d'autre part, réexportées vers des pays tiers comme la Turquie.**

La contribution directe de la France au « grand export » est faible, puisque seulement 14 % des exportations françaises de ferrailles sont envoyées à des pays hors UE-27. Néanmoins, **la France exporte de manière indirecte vers le grand export**, puisque les taux d'exportation hors UE de ses principaux partenaires européens d'exportation sont élevés : Belgique (75 %), Espagne (35 %), Luxembourg (28 %), Italie (58 %), Allemagne (15 %, également exportateur indirect), Portugal (6 %) et Pays-Bas (62 %) – cf. Figure 13 (Eurostat, Données 2021). Selon plusieurs experts, certaines structures portuaires regroupent et exportent des volumes importants de ferrailles au-delà des frontières de l'UE. C'est le cas d'Anvers et de Gand en Belgique (Multiples entretiens d'experts).

¹⁹ Règlement d'exécution (UE) 2019/159 du 31 janvier 2019 instituant des mesures de sauvegarde définitives à l'encontre des importations de certains produits sidérurgiques.

La Figure 13 représente les types de ferrailles que la France a exportées en 2021 (à gauche), la répartition entre les ferrailles exportées au sein de l'UE et vers des pays hors UE (au centre) et les principaux pays destinataires des ferrailles françaises (à droite). Ces données sont exprimées en kilotonnes pour 2021.

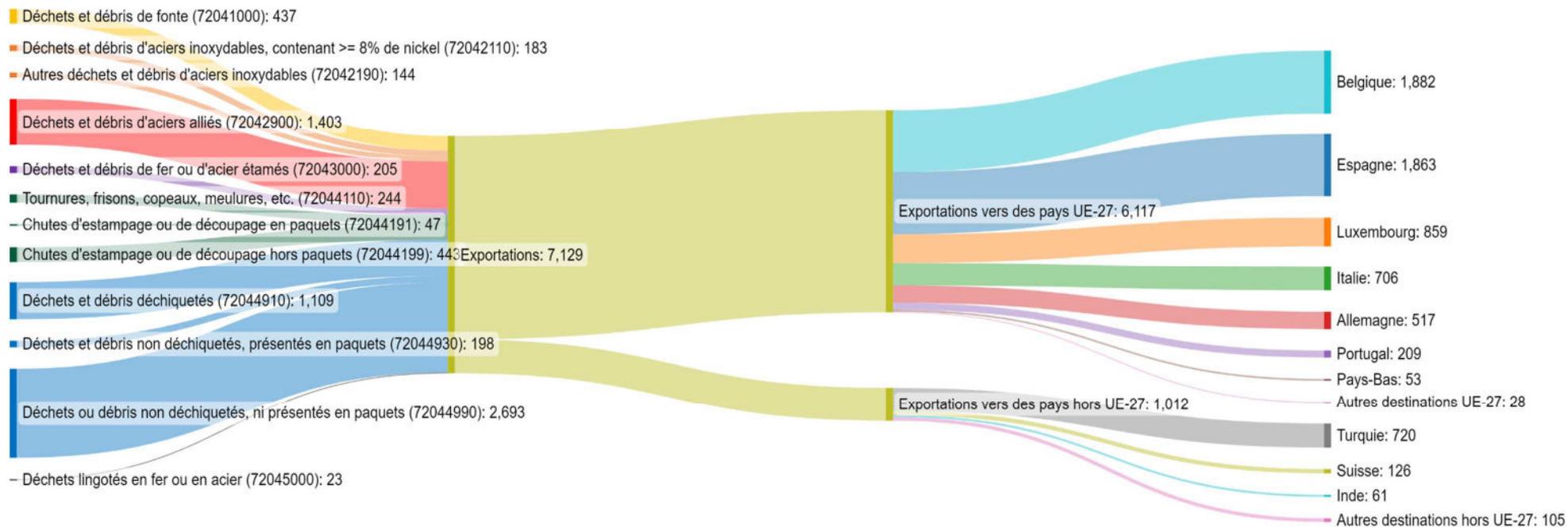


Figure 13 : Représentation des types de MPR d'acier (ferrailles) françaises et de leurs premières destinations en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

3.2.2.4. Taux d'incorporation de ferrailles de cinq pays européens

Le Tableau 6 présente les taux d'incorporation et les volumes de collecte apparente de ferrailles des cinq pays étudiés pour 2016²⁰. **Les pays ayant développé la filière électrique sont les principaux importateurs de ferrailles et, a fortiori, les pays dont les taux d'incorporation de ferrailles sont les plus élevés** : Espagne (environ 76 %) et Italie (environ 85 %).

Avec les projections de décarbonation des acteurs en filière intégrée, et en particulier le remplacement progressif des hauts-fourneaux par des fours à arc électrique, **les taux d'incorporation de ferrailles de la France, de l'Allemagne et de la Belgique devraient croître progressivement à l'horizon 2030** (Entretien d'experts).

Tableau 6 : Taux d'incorporation et collecte apparente de ferrailles en 2016 (BIR, 2017 - Eurostat, Données 2016)

Pays	Taux d'incorporation <i>Taux d'incorporation = consommation de ferrailles / production d'acier brut. Données 2016.</i>	Collecte apparente <i>Collecte apparente = Incorporation de ferrailles en sidérurgie (y.c. chutes neuves) + Exportations de ferrailles – Importations de ferrailles. Données 2016.</i>
France	46,9 % (Consommation : 7 028 kt / Production : 14 633 kt)	10 730 kt (Consommation : 7 028 kt / Exports : 5 549 kt / Imports : 1 847 kt)
Belgique	40,0 % (Consommation : 3 075 kt / Production : 7 686 kt)	2 331 kt (Consommation : 3 075 kt / Exports : 3 559 kt / Imports : 4 303 kt)
Allemagne	43,6 % (Consommation : 18 360 kt / Production : 42 082 kt)	22 683 kt (Consommation : 18 360 kt / Exports : 8 675 kt / Imports : 4 352 kt)
Espagne	76,1 % (Consommation : 10 396 kt / Production : 13 654 kt)	7 165 kt (Consommation : 10 396 kt / Exports : 774 kt / Imports : 4 005 kt)
Italie	85,3 % (Consommation : 19 911 kt / Production : 23 341 kt)	15 835 kt (Consommation : 19 911 kt / Exports : 353 kt / Imports : 4 429 kt)

3.2.3. Focus sur les imports-exports de ferrailles inox

La chaîne de valeur de recyclage et production de l'acier inox étant européenne avec un taux d'incorporation de MPR significatif (Tableau 3). Il est donc intéressant d'analyser les imports-exports des ferrailles inox des cinq pays étudiés selon leur type et leurs provenances/destinations afin de mieux comprendre leur recyclage en France et en Europe.

3.2.3.1. Rappels préliminaires sur les codes douaniers relatifs aux imports-exports de ferrailles inox

Deux codes douaniers traitent des ferrailles d'acier inoxydables (« inox ») :

- Le code 72042110 regroupe les « Déchets et débris d'aciers inoxydables, contenant en poids plus de 8 % de nickel », c'est-à-dire les aciers austénitiques ;

²⁰ Il s'agit de données pour 2016. Pour la France, en 2019, le Bilan National du Recyclage estimait le **taux d'incorporation à 48 %** (consommation de ferrailles : 7 028 kt et production d'acier brut : 14 633 kt). Comme précisé plus haut, il estimait la **collecte apparente hors stocks à 11 719 kt** (incorporation de ferrailles en sidérurgie : 6 648 kt ; exports de ferrailles : 6 595 kt ; imports de ferrailles : 1 524 kt) (ADEME, 2022 A).

- Le code 72042190 regroupe les « Déchets et débris d'aciers inoxydables (à l'exclusion des déchets et débris contenant en poids ≥ 8 % de nickel) », c'est-à-dire les aciers ferritiques et martensitiques.

3.2.3.2. Imports-exports de ferrailles inox selon le type de ferrailles échangées

La Figure 14 présente les volumes d'imports et d'exports de ferrailles d'acier inoxydable des cinq pays européens étudiés, ainsi que la répartition entre les deux types de ferrailles inox indiqués ci-dessus. Ces données sont exprimées en kilotonnes pour 2021.

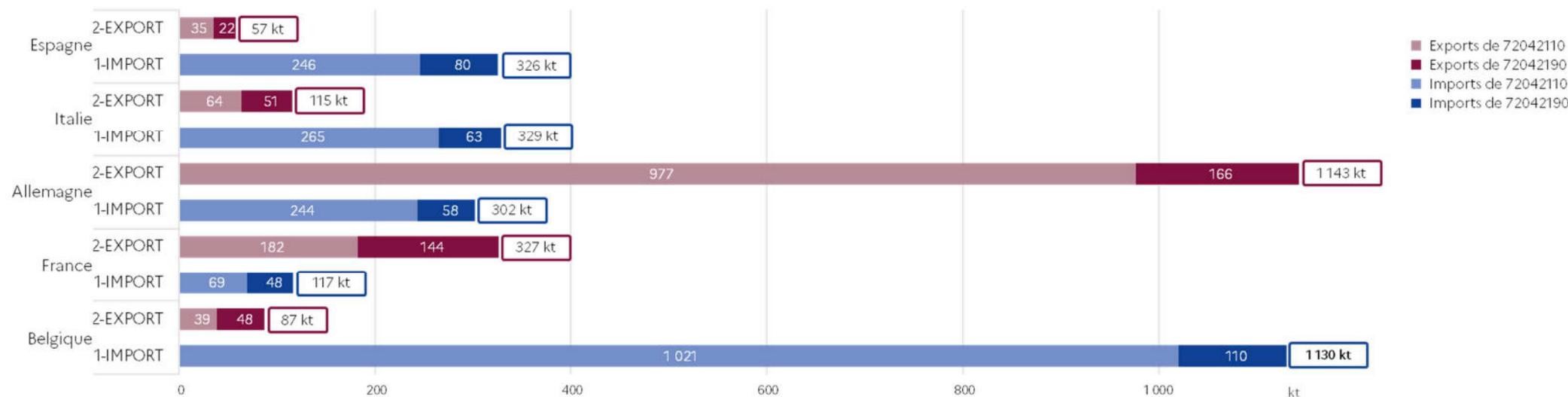


Figure 14 : Répartition des imports-exports de ferrailles d'acier inoxydable de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

La Belgique est le premier pays d'importation de MPR d'acier inox et est importateur net de 1 044 kt de ferrailles inox. **L'Allemagne constitue quant à elle le principal exportateur de ferrailles inox** (exportateur net de 841 kt de ferrailles inox). Cela s'explique par le caractère européen de la chaîne de valeur des produits en acier inoxydable : si les activités de fabrication de produits finis en inox (ex. laminage) sont réparties dans plusieurs pays européens, **la production de métal en aciérie a lieu en grande partie en Belgique** (ex. sites d'Aperam à Genk et à Châtelet), ce qui augmente les imports de ferrailles inox du pays (Entretien d'experts). En 2019, la production d'acier inoxydable représentait 18 % de la production d'acier en Belgique, soit près de 1 397 kt d'inox (Belgian Steel Federation, 2020). Ce volume de production nécessite des imports élevés de ferrailles.

Les MPR d'acier inoxydable austénitique sont le type d'inox le plus échangé à l'international, en raison de leur valeur. En effet, **le contenu en nickel dont le cours est relativement élevé augmente le prix de ces ferrailles et rentabilise les coûts liés à l'export**. A l'inverse, les ferrailles d'aciers inoxydables ferritiques sont peu orientées vers le grand export en raison d'un ratio coûts (en particulier coûts de transport) sur prix de vente peu intéressant pour les grossistes en aciers inoxydables (Entretien d'experts).

3.2.3.3. Imports-exports de ferrailles inox selon la provenance et la destination des ferrailles échangées

Le Tableau 7 et le Tableau 8 indiquent respectivement les destinations des exportations de ferrailles inox de cinq pays européens en 2021 et les provenances de leurs importations de ferrailles inox (dont la part de MPR échangées avec des pays non-membres de l'UE).

La Belgique est le principal importateur européen de ferrailles inox. Ces MPR métalliques sont presque intégralement conservées en Belgique, comme l'indique le faible volume d'exportations de la Belgique en Tableau 7. Plusieurs raisons expliquent ce phénomène :

- Dans le cadre de la chaîne de valeur européenne de la fabrication de produits en inox, **la fabrication de métal a majoritairement lieu en Belgique**. Cela explique que la France exporte 223 kt de ferrailles inox en 2021 alors qu'elle n'en importe que 13 kt depuis la Belgique. S'agissant par exemple de la société Aperam, la production de brames d'acier inoxydable en aciéries électriques est intégralement belge, alors que les étapes de laminage (à chaud et à froid) sont françaises²¹ et belges ;
- **La production d'acier inoxydable est essentiellement réalisée via la filière électrique**, qui incorpore des volumes très élevés de ferrailles. Les taux d'incorporation de matières premières de recyclage des produits sidérurgiques sont supérieurs à 80 %, sauf dans le cas de la production de nuances austénitiques, qui incorpore plus de 90 % de matières recyclées.

Bien que la majorité des ferrailles exportées soit incorporée dans le cadre de la production d'acier inox, **d'autres ferrailles sont réexportées**. A dire d'expert, les principaux ports d'export de ferrailles inox vers des pays tiers sont néerlandais (Rotterdam), belges (Anvers), italiens (Gênes), espagnols (Barcelone, Bilbao) et anglais. **Les destinations du grand export sont constituées de pays** ayant généralement des exigences sociales et environnementales inférieures à celles européennes et françaises, comme l'Inde, l'Indonésie, Taiwan ou le Pakistan (Entretien d'experts). En effet, alors que la production d'acier inoxydable en Europe repose presque intégralement sur l'incorporation de ferrailles en filière électrique, la production importée, notamment depuis l'Asie, repose quant à elle sur la production de « fonte de nickel » à partir de minerai, très émettrice de CO₂ (Entretien d'expert).

²¹ En France, Aperam exploite une aciérie électrique à Imphy. Elle est spécialisée dans les alliages spéciaux de Nickel.

Tableau 7 : Destinations des exportations de ferrailles d'acier inoxydable de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).

Espagne		Italie		Allemagne		France		Belgique	
Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)
1. Pays-Bas	22	1. France	41	1. Belgique	463	1. Belgique	223	1. Pays-Bas	47
2. Inde	11	2. Belgique	22	2. Finlande	152	2. Luxembourg	45	2. Inde	22
3. Belgique	6	3. Inde	13	3. Italie	145	3. Pays-Bas	22	3. Allemagne	10
4. France	5	4. Autriche	8	4. Slovaquie	78	4. Allemagne	13	4. France	6
5. Pakistan	4	5. Espagne	8	5. Pays-Bas	72	5. Italie	12	5. Turquie	0,4
Total	57	Total	115	Total	1 143	Total	327	Total	87
Part hors EU-27	32 %	Part hors EU-27	36 %	Part hors EU-27	6 %	Part hors EU-27	1 %	Part hors EU-27	52 %

Tableau 8 : Provenances des importations de ferrailles d'acier inoxydable de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).

Espagne		Italie		Allemagne		France		Belgique	
Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)
1. Allemagne	128	1. Allemagne	204	1. Pays-Bas	60	1. Italie	43	1. Allemagne	691
2. Turquie	66	2. Autriche	41	2. Autriche	47	2. Finlande	23	2. France	304
3. Pays-Bas	40	3. Suisse	19	3. Tchéquie	38	3. Allemagne	19	3. Pays-Bas	55
4. Portugal	36	4. France	14	4. Suisse	33	4. Belgique	13	4. Pologne	19
5. UK	11	5. Slovaquie	10	5. Pologne	17	5. Espagne	12	5. Italie	19
Total	326	Total	329	Total	302	Total	117	Total	1 130
Part hors EU-27	24 %	Part hors EU-27	10 %	Part hors EU-27	19 %	Part hors EU-27	14 %	Part hors EU-27	1 %

3.3. Enjeux à 2030 pour la filière acier

Cette sous-partie présente les principaux enjeux pour le recyclage de l'acier à l'horizon 2030. Alors que la production d'acier devrait stagner ou légèrement augmenter d'ici à 2030, la pression des filières aval pour décarboner l'acier sera très forte (3.3.1). Cette pression affectera directement les entreprises sidérurgiques par le biais de réglementations (réforme du système d'échange de quotas d'émission, mise en place du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières) (3.3.2). En conséquence, l'industrie de l'acier – notamment la filière sidérurgique intégrée – poursuivra sa transformation afin d'augmenter sa consommation de ferrailles dans l'optique de se décarboner (3.3.3). Cette augmentation posera notamment des questions de teneur de résiduels des gisements disponibles et de concurrence pour l'accès à ces gisements (3.3.4).

3.3.1. Tendances de production d'acier à 2030

3.3.1.1. Une stagnation des volumes produits d'ici à 2030...

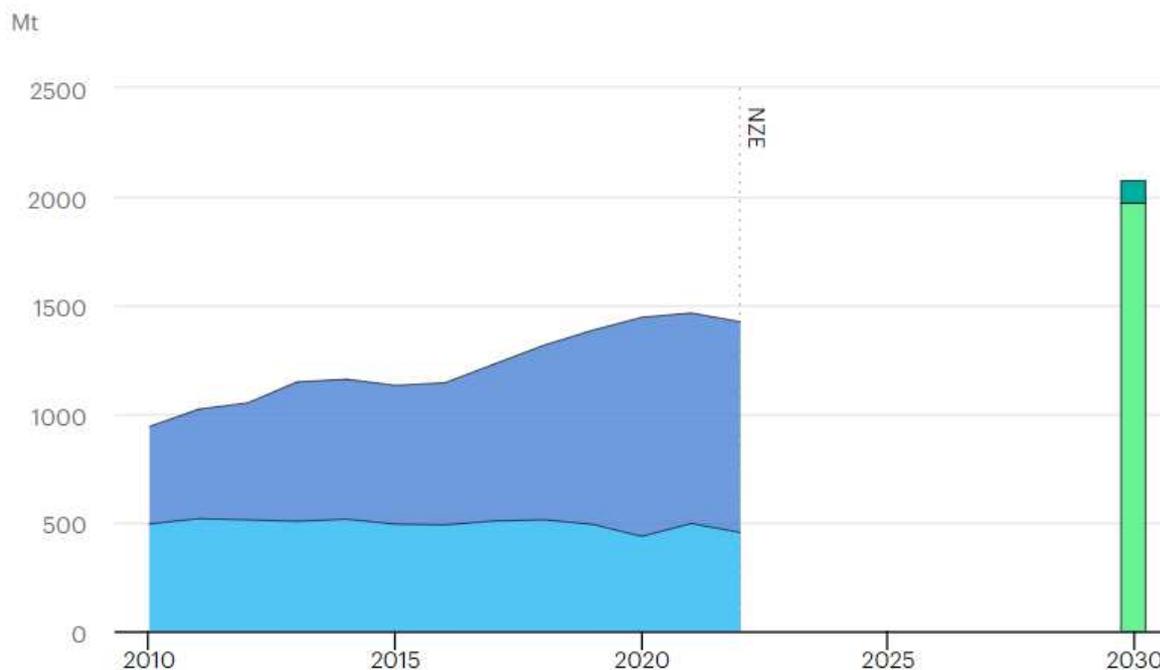
- **D'ici à 2030, la production mondiale d'acier devrait soit stagner, soit légèrement augmenter.**

D'après l'Agence Internationale de l'Energie, alors que la production mondiale d'acier était de 1 961 Mt en 2021, elle atteindrait 1 974 Mt en 2030 dans le cadre d'un scénario Net Zero²² (taux de croissance annuel moyen : 2021-2030 : 0,07 %), contre 2 079 Mt pour le scénario de référence (taux de croissance annuel moyen : 2021-2030 : 0,65 %). Le scénario Net Zero induit donc une stagnation de la production mondiale d'acier (Agence Internationale de l'Energie, 2022).

Cette légère hausse serait notamment portée par l'Inde et les pays de l'ASEAN. Selon l'AIE, bien que la production de la Chine devrait atteindre son pic au cours des prochaines années, la tendance mondiale de croissance devrait se poursuivre mais à un rythme plus lent que lors de la décennie précédente, grâce à la croissance de la population et du PIB en Inde, dans les pays de l'ASEAN et en Afrique (Agence Internationale de l'Energie, 2022).

A l'inverse, **les volumes d'acier produits par les pays les plus développés (Union européenne, Etats-Unis) devraient rester stables à l'horizon 2030**, dans le prolongement de leur évolution entre 2010 et 2021. En effet, alors que la production d'acier des pays les plus développés était de 496 Mt en 2010, elle stagnait à 496 Mt en 2021 (Agence Internationale de l'Energie, 2022). La Figure 15 présente la production mondiale d'acier entre 2010 et 2030. Les courbes bleu foncé et bleu clair représentent respectivement les volumes d'acier produits par les pays en développement et les pays développés entre 2010 et 2021. La barre verte représente la production mondiale d'acier dans le cadre du scénario « Net Zero ».

²² Le scénario Net Zero repose sur la mise en place de stratégies d'efficacité des matériaux comprenant l'augmentation des rendements de fabrication, l'allègement des véhicules, la prolongation de la durée de vie des bâtiments et la réutilisation directe de l'acier sans fusion (AIE, 2022).



IEA. Licence: CC BY 4.0

- Advanced economies
- Emerging market and developing economies
- World
- Material efficiency

Figure 15 : Production mondiale d'acier dans le scénario de neutralité carbone, de 2010 à 2030 (en millions de tonnes) (Agence Internationale de l'Energie, 2022)

En particulier, **la demande d'acier de l'Union européenne ne devrait augmenter que de 0,5 % par an d'ici à 2030**, d'après les prévisions d'EUROFER, cf. Figure 16. Selon la fédération, ces projections sont conditionnées par le fait que les importations n'augmentent pas davantage. Si les niveaux d'importation continuent d'augmenter, cela serait lié à la consommation d'acier produit hors de l'UE dans le cadre de « fuites de carbone » (EUROFER, 2019).

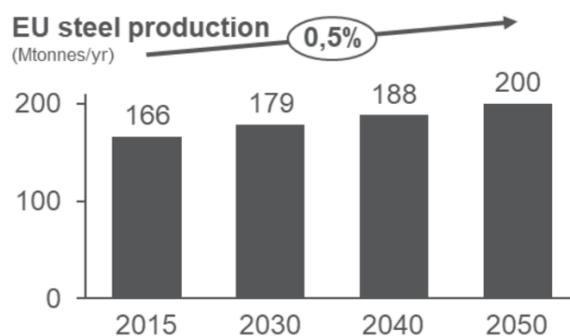


Figure 16 : Production d'acier de l'Union européenne en 2015, 2030, 2040 et 2050 en millions de tonnes (EUROFER, 2019)

- **Cette stagnation de la production d'acier s'explique notamment par les projections des principaux marchés consommateurs d'acier en France**

Aujourd'hui, les secteurs consommateurs d'acier en France sont la construction (43 % de la consommation totale d'acier), les transports (26 %), la mécanique (16 %), le travail des métaux (10 %), les équipements ménagers (3 %) et les autres secteurs (2 %) (Sénat, 2019 d'après A3M).

En Europe, le **marché automobile** devrait entraîner une croissance faible de la demande d'acier d'ici à 2030. En effet, alors qu'en 2015, l'UE était le deuxième producteur mondial avec 16 millions de véhicules, elle ne devrait observer qu'une croissance marginale de sa production dans les années à venir, atteignant environ 18 millions de voitures produites en 2030. La Figure 17 présente les perspectives d'évolution de la production de voitures particulières par marché mondial et indique que la hausse de la flotte de véhicules sera principalement liée au développement de la Chine et de l'Inde.

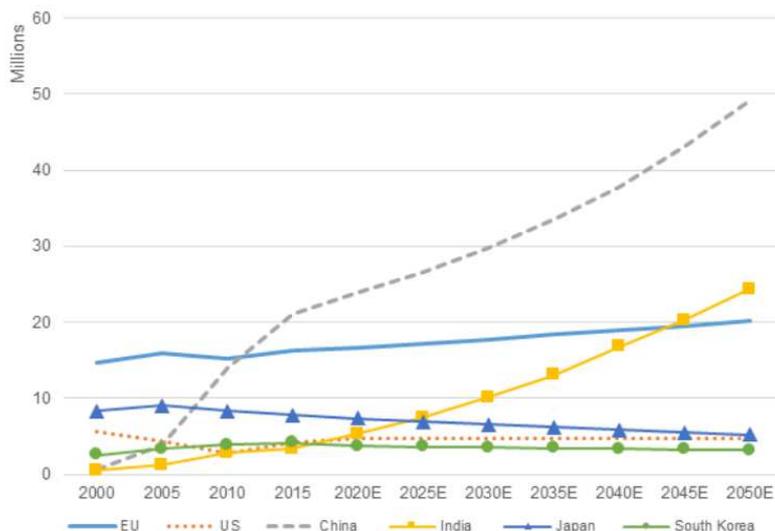


Figure 17 : Production de voitures particulières sur les principaux marchés mondiaux, 2000-2050 (Commission Européenne, 2017)

En Europe de l'Ouest, le **marché de la construction** devrait contribuer, bien que dans une moindre mesure, à l'augmentation de la demande d'acier à l'horizon 2030. La Figure 18 compare les taux de croissance annuels moyens (TCAM) des différents marchés mondiaux entre 2021 et 2030. Le TCAM de l'Europe de l'Ouest est l'un des plus faibles au monde (2,1 % par an).

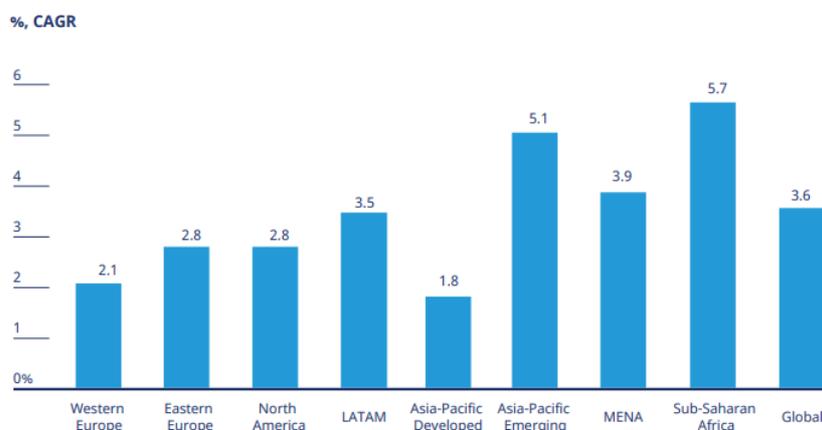


Figure 18 : Croissance du secteur de la construction sur les principaux marchés mondiaux, 2021-2030 (Oxford Economics, 2021)

En France, le **réseau de transport d'électricité augmentera la demande d'acier d'ici à 2030**. Dans le cadre du Schéma Décennal Développement de Réseau (SDDR), RTE a construit deux stratégies

prospectives : une « stratégie minimale, dans la continuité des pratiques existantes », ainsi qu'« une **stratégie de référence** [...] qui intègre l'ensemble des mesures d'amélioration envisagées, permettant ainsi d'optimiser le service rendu, les coûts et les incidences environnementales ». La mise en place de cette stratégie de référence augmente la consommation d'acier, comme l'indique la Figure 19, issue du SDDR (SDDR, 2019). En effet, le développement des énergies renouvelables (notamment l'éolien et le solaire) suppose une consommation d'acier importante, notamment pour les pylônes. (Entretien d'experts). Il convient de préciser que l'impact de cette demande d'acier supplémentaire sur la demande d'acier globale sera faible, puisque le réseau de transport d'électricité n'est pas l'un des principaux marchés consommateurs d'acier en France (à l'inverse de la construction et des transports). Le prochain SDDR sera publié courant 2024 et révisera ces valeurs à la hausse (Entretien d'experts).

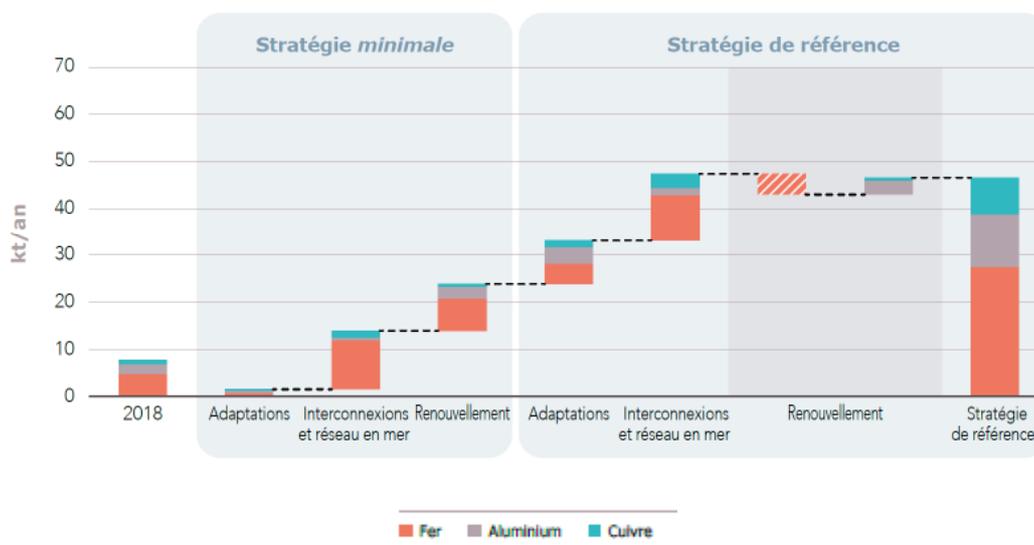


Figure 19 : Impact de la mise en œuvre du Schéma Décennal Développement de Réseau (SDDR) sur la consommation de ressources minérales à l'horizon 2035 (PPE, moyenne annuelle sur la période d'étude) (SDDR, 2019)

Ces scénarios de stagnation ou d'augmentation limitée des volumes constituent une vision générale de la production d'acier. Ils masquent ainsi des croissances potentiellement plus soutenues pour certaines gammes de produits, tels que les aciers inoxydables. En effet, **les technologies de la transition énergétique devraient incorporer des volumes importants d'acier inoxydable d'ici 2030**, notamment pour la fabrication de véhicules électriques (*casing* des batteries lithium-ion et piles à combustible par exemple) et pour le stockage, le transport et la production d'hydrogène (Entretien d'experts). Cela s'explique notamment par un ratio prix-performance particulièrement adapté aux besoins des producteurs.

3.3.1.2. ...mais des attentes renforcées en matière de contenu carbone de la part des utilisateurs en aval

- **Les secteurs consommateurs d'acier devront inclure l'empreinte carbone totale des produits finis (scope 3) dans leurs politiques de décarbonation à l'horizon 2030 et augmenteront donc leur demande en acier à faible empreinte carbone.**

A l'horizon 2030, pour atteindre leurs objectifs de neutralité carbone, les secteurs consommateurs d'acier (bâtiment, automobile, industries mécaniques, etc.) devront décarboner leurs activités au-delà du scope 1 (émissions directes de GES, provenant des installations contrôlées par l'entreprise) et 2 (émissions indirectes associées à la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur importée pour les activités de l'organisation). Ils devront donc **inclure l'empreinte carbone totale des produits finis (scope 3)**²³ dans

²³ Scope 1 : émissions de gaz à effet de serre (GES) directement liées à la fabrication du produit, Scope 2 : émissions indirectes liées aux consommations énergétiques, Scope 3 : émissions indirectes à d'autres étapes du cycle de vie du produit tels que l'approvisionnement, le transport, l'utilisation et la fin de vie

leurs politiques de décarbonation, et seront donc de plus en plus exigeants vis-à-vis de leurs fournisseurs de produits semi-finis en acier (sidérurgistes et fondeurs).

Les politiques de décarbonation portant sur l'empreinte carbone totale des produits finis pourraient entraîner une **hausse de la demande d'acier à faibles émissions de GES**. Les entreprises consommatrices d'acier pourraient être prêtes à payer un coût supplémentaire pour que l'acier utilisé dans leurs produits finis soit « à faibles émissions de gaz à effet de serre ». L'augmentation du contenu recyclé est en effet l'un des leviers de la décarbonation du secteur sidérurgique (Entretien d'experts). Dans le cas de l'acier, la demande de plusieurs secteurs devrait contribuer à augmenter l'incorporation de ferrailles par l'industrie sidérurgique :

- Pour le **secteur automobile**, dans le cadre de la production de véhicules électriques, qui émettent très peu de gaz à effet de serre durant la phase d'utilisation en France, le principal enjeu de décarbonation porte sur la phase de fabrication. L'un des leviers d'action sera l'incorporation de MPR métalliques, et a fortiori de ferrailles (Entretien d'experts) ;
- Pour le **secteur du bâtiment**, la mise en place de la réglementation RE2020 – qui vise à diminuer l'impact sur le climat des bâtiments neufs en prenant en compte l'ensemble des émissions du bâtiment sur son cycle de vie – pourrait potentiellement augmenter l'incorporation de ferrailles pour décarboner les bâtiments neufs. Cependant cette augmentation reste à relativiser. En effet, plusieurs tendances du secteur liées à la RE2020 pourraient limiter la demande en acier, et donc en MPR d'acier : le développement de l'usage de matériaux de construction biosourcés, en particulier pour les habitations individuelles, et la priorité donnée à la rénovation des bâtiments par rapport à la construction neuve (donc un moindre besoin en matériaux de structure comme l'acier). En parallèle, la mise en place de la filière à Responsabilité Élargie des Producteurs PMCB²⁴ (cf. Annexe 8.5.5.28.5.5.2) ne devrait pas voir d'effets importants sur le recyclage des métaux, dont le taux de recyclage atteint déjà 90 %. Elle pourrait néanmoins contribuer à développer la filière de réemploi des PMCB (Entretien d'experts).

- **De ce fait, il est probable que les différents marchés consommateurs d'acier entrent dans une dynamique de concurrence pour s'approvisionner en acier à faible empreinte carbone.**

Ces marchés pourraient entrer en concurrence dans l'optique d'une obligation d'incorporation de MPR métalliques. Ce type d'obligations a notamment été mis en place pour le PET²⁵, avec des conséquences qui peuvent être analysées pour comprendre les impacts potentiels qu'auront ces dispositifs sur d'autres commodités, comme les métaux. A noter : l'exemple ci-dessous n'est pas entièrement transposable à la filière acier, notamment du fait qu'il existe deux filières pour l'acier et que celles-ci ont des options de décarbonation de leurs procédés différentes.

En créant des obligations d'incorporation, PET recyclés et vierges sont devenus non substituables entre eux, limitant par conséquent les effets d'indexation des prix en renvoyant leur fixation au jeu de l'offre et de la demande. Dans ces conditions, on a pu constater à plusieurs reprises que le prix du PET recyclé était supérieur à celui du vierge et soumis à des fluctuations différentes. La Figure 20 montre qu'à partir de décembre 2018, le prix du PET recyclé (rPET) transparent est devenu supérieur à celui du PET vierge et qu'à partir d'avril 2022, le prix des flocons de PET recyclé transparents est également devenu supérieur à celui du PET vierge.

²⁴ Les Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment (PMCB) sont notamment le bois, les métaux, le papier / carton, le plastique, le verre, les fractions minérales et le plâtre.

²⁵ Directive (UE) 2019/904 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement.

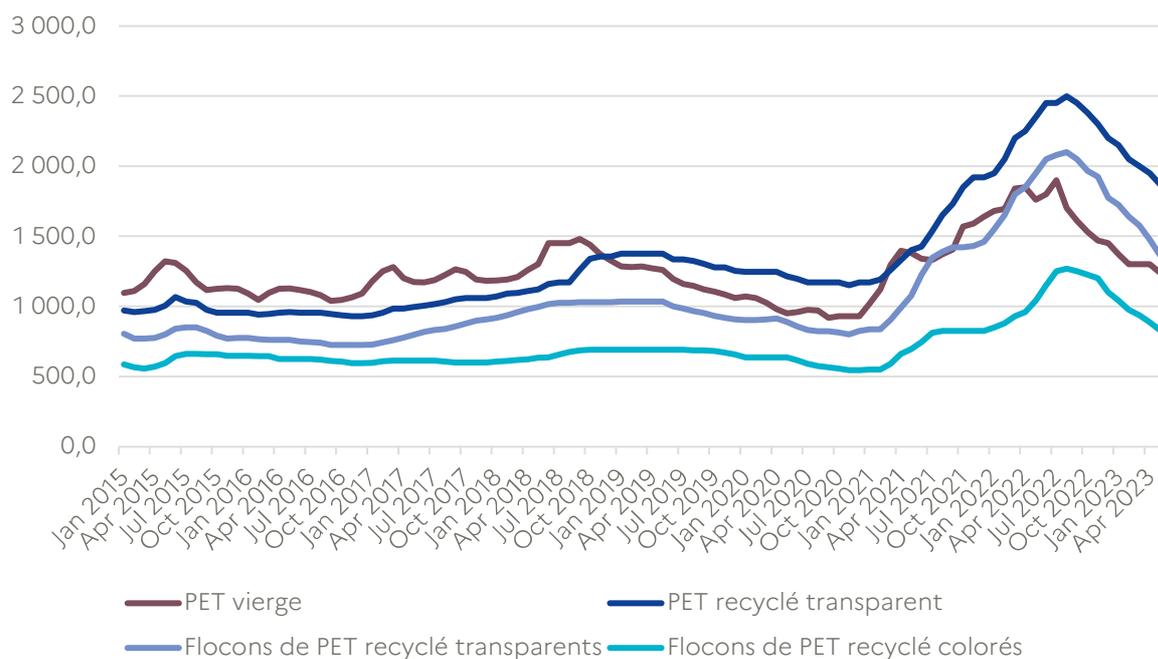


Figure 20 : Evolution des prix du PET et du rPET en €/t entre 2015 et 2022 (d'après Plastic Information Europe, 2023)

Ensuite, cette situation a entraîné une concurrence entre acteurs pour sécuriser les approvisionnements de PET recyclé de la catégorie recherchée. Cela a eu deux conséquences :

- Des acteurs qui historiquement évoluaient sur des marchés différents (emballage, textile, etc.) sont aujourd'hui en concurrence ;
- Certaines entreprises ont sécurisé des gisements de PET recyclé afin d'atteindre l'objectif d'incorporation de 25 % de PET recyclé en 2025 et de 30 % en 2030 de la Directive SUP²⁵. Ces industries aval ont ainsi accepté de payer une surprime pour sécuriser les gisements d'intérêt. C'est le cas de Nestlé, qui a annoncé en 2020 son intention d'investir jusqu'à 2 milliards de francs suisses (environ 2,05 milliards d'euros) « pour passer des plastiques vierges aux plastiques recyclés [...] et pour accélérer le développement de solutions d'emballages durables et innovantes » (Nestlé, 2020).

Au-delà de la capacité à payer, la nécessité de sécuriser les approvisionnements dans un environnement de plus en plus concurrentiel a conduit de nombreux acteurs en aval à faire évoluer leur stratégie industrielle :

- Dans le cas du PET et d'autres polymères, les metteurs en marché se sont parfois regroupés autour de porteur de technologie de recyclage. Par exemple, la société Carbios a développé un procédé de recyclage enzymatique capable de dépolymériser le PET. Cette technologie permet un recyclage de tous types de déchets en PET ainsi que la production de produits PET 100 % recyclés et 100 % recyclables, sans perte des propriétés du PET (Carbios, 2023) ;
- Dans d'autres cas, les entreprises ont cherché à intégrer de nouvelles étapes de la chaîne de valeur. C'est ce que l'on constate par exemple dans les nombreux partenariats, joint-ventures ou autres formes juridiques autour du recyclage des batteries Li-ion²⁶ ;
- Plus généralement, certains groupes automobiles intègrent aujourd'hui des activités de recyclage à part entière dans leur modèle d'affaire. Par exemple, en octobre 2022, le groupe Renault a annoncé de The Future Is NEUTRAL, une nouvelle entité proposant des solutions de recyclage en boucle fermée à chaque étape de la vie d'un véhicule : approvisionnement en pièces et matières premières, production, usage et fin de vie (Entretien d'experts).

²⁶ Par exemple, Veolia, Renault et Solvay ont annoncé en 2021 la création d'un consortium pour « unir leurs expertises pour recycler, en circuit fermé, les métaux contenus dans les batteries des véhicules électriques » (Veolia France, 2021).

Augmentation des prix des MPR et de la concurrence, restructuration des chaînes de valeur via une plus grande intégration verticale et/ou des partenariats inédits autour de technologies de recyclage, sont des conséquences à anticiper en cas de pression accrue (d'origine réglementaire ou non) sur les MPR métalliques.

Ces enjeux sont d'autant plus importants pour les filières métalliques qu'**il pourrait devenir obligatoire pour certains secteurs d'incorporer des MPR métalliques d'ici 2030** :

- Le pacte vert pour l'Europe²⁷ précise que « La Commission examinera la possibilité de stimuler le marché des matières premières secondaires par des dispositions juridiques imposant un contenu recyclé obligatoire (par exemple pour les emballages, les véhicules, les matériaux de construction et les batteries) » (Commission Européenne, 2019) ;
- La règlement batteries²⁸ « devrait fixer des objectifs contraignants en ce qui concerne le contenu recyclé pour le cobalt, le plomb, le lithium et le nickel, qui devraient être atteints d'ici à 2031 » (Commission Européenne, 2020, B).

3.3.2. Tendances réglementaires en matière de décarbonation de la sidérurgie

3.3.2.1. Le système d'échange de quotas d'émission (SEQE) de l'Union européenne pourrait obliger l'industrie de l'acier à accélérer sa décarbonation

Le **système d'échange de quotas d'émission²⁹ (SEQE)**, appliquant le « principe du pollueur-payeur », oblige les industries à disposer d'un permis pour chaque tonne de CO₂ émise. En pratique, les entreprises doivent acquérir ces quotas d'émission par le biais d'enchères et leur prix varie en fonction de l'offre et de la demande. Le total des quotas créés par les Etats baisse au fil du temps pour inciter l'industrie à réduire ses émissions. Certains quotas peuvent néanmoins être fournis gratuitement, en particulier aux secteurs pour lesquels il existe un risque que les entreprises déplacent leur production vers des régions aux normes environnementales moins ambitieuses. **Le SEQE s'applique aujourd'hui à 40 % des émissions de l'UE** (Parlement européen, 2023).

Le paquet législatif « Fit for 55 » comprend une évolution du SEQE, adoptée par le Parlement européen le 18 avril 2023. La réforme prévoit en particulier une **accélération du rythme de réduction des quotas proposés**, avec d'ici 2030 une baisse de 62 % par rapport à 2005, contre un objectif précédent de 43 %. **Les industriels concernés – notamment les sidérurgistes – devront diminuer drastiquement leurs émissions de gaz à effet de serre.** Outre l'accélération de la réduction des quotas attribués, la réforme du SEQE comprend notamment la suppression progressive des quotas gratuits pour l'industrie d'ici 2034 (Parlement européen, 2023).

3.3.2.2. Le Mécanisme d'Ajustement Carbone aux frontières pourrait contraindre le recyclage de l'acier à moyen terme

Le **Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF)³⁰** est une régulation des émissions de gaz à effet de serre engendrées par les produits importés en Europe. Il s'agit d'un dispositif destiné à appliquer aux importations européennes les critères du marché du carbone européen, où les industriels de l'UE sont tenus d'acheter des quotas couvrant leurs émissions (cf.3.3.3.1). En pratique, l'importateur devra déclarer les émissions liées au processus de production et, si elles dépassent le standard européen, acquérir un certificat d'émission au prix du CO₂ dans l'UE. Le MACF augmenterait donc le coût d'importation de

²⁷ Communication de la commission au Parlement européen, au Conseil européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au comité des régions. Le pacte vert pour l'Europe COM/2019/640

²⁸ Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC

²⁹ Directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans l'Union européenne (UE)

³⁰ Proposition de Règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières. COM/2021/564 final ([lien](#))

produits qui ne respectent pas les critères européens en matière d'émission de CO₂ (Ministère de l'Ecologie, 2023 A).

Ce texte du paquet législatif « Fit for 55 » a été adopté par le Parlement européen le 18 avril 2023. Une période test commencera dès octobre 2023, puis le dispositif montera en puissance entre 2026 et 2034.

Pour certains marchés consommateurs d'acier telles que les industries mécaniques, **la mise en place du MACF sur les seules matières premières risque d'entraîner des fuites de carbone**. En effet, si les matières premières sont soumises au MACF mais pas les pièces faiblement transformées issues de ces matières, il peut y avoir un écart de compétitivité significatif entre les pièces faites sur le territoire européen et celles importées. Le règlement prévoit que d'ici à 2026, certains produits situés en aval de la chaîne puissent être ajoutés en annexe pour être soumis au dispositif et prévenir ces fuites de carbone. Selon certains observateurs, l'impact économique du MACF sur le recyclage de l'acier doit être évalué (Entretien d'experts).

En définitive, d'ici à 2030, les exigences grandissantes des marchés consommateurs d'acier et des législateurs en matière de décarbonation imposeront à tous les acteurs la chaîne de valeur de l'acier de poursuivre et d'accélérer leur transformation. En première ligne, les sidérurgistes et les préparateurs de ferrailles joueront un rôle essentiel pour augmenter l'incorporation de ferrailles en sidérurgie et décarboner ainsi la production d'acier.

3.3.3. Une industrie en transformation

3.3.3.1. La sidérurgie est appelée à se décarboner, notamment en augmentant sa consommation de ferrailles

Au niveau européen, **la filière sidérurgique** – représentée par la fédération EUROFER – **s'est fixée pour objectif de réduire son empreinte carbone de 30 % entre 2018 et 2030** (Entretien d'experts). En France, la décarbonation de la filière intégrée, qui représente 66,8 % de la production française d'acier en 2021 (WorldSteel, 2022), induit une consommation de ferrailles plus élevée à 2030 et la mise en place de boucles de recyclage en France.

- **D'une part, à l'horizon 2025-2026, la filière intégrée devrait augmenter son usage de ferrailles jusqu'au maximum technique thermodynamique (seuil maximal théorique de 25 %, contre 10 % à 15 % aujourd'hui).**

Cet objectif est d'autant plus important pour la France que la filière intégrée française incorpore aujourd'hui moins d'aciers usagés que la moyenne européenne pour cette filière (Multiples entretiens d'experts). La Figure 21 illustre l'augmentation de l'usage de ferrailles de la filière sidérurgique intégrée jusqu'au maximum technique thermodynamique d'incorporation de ferrailles à partir du cas d'ArcelorMittal. En 2021, 1 305 kt tonnes de ferrailles ont été utilisées par ArcelorMittal, soit un taux d'incorporation de MPR de 12,6 % (Entretien d'experts). A production égale, l'augmentation de l'incorporation de ferrailles vers la limite technique de 25 % de ferrailles en 2025-2026 pourrait permettre d'utiliser jusqu'à 2 589 kt de ferrailles par an, soit 1 284 kt supplémentaires.

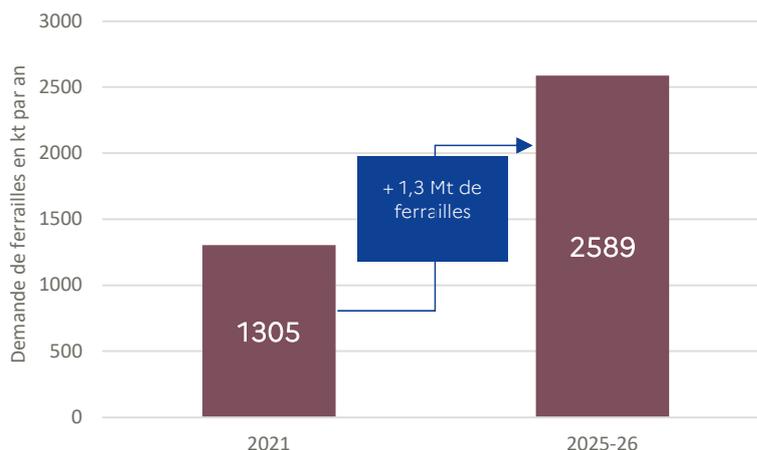


Figure 21 : Demande de ferrailles de la filière intégrée en atteignant la limite thermodynamique (seuil maximal théorique de 25 %) (Deloitte d'après Entretien d'experts)

- **D'autre part, à l'horizon 2030, la filière électrique pourrait se développer grâce à la substitution des hauts-fourneaux de l'actuelle filière intégrée par des fours à arc électrique.**

La voie Direct Reduced Iron ou « DRI à hydrogène » consiste à décarboner la réduction du minerai de fer, c'est-à-dire le procédé par lequel les atomes d'oxygène sont arrachés au minerai grâce à l'action d'un agent réducteur. Aujourd'hui, la réduction du minerai est réalisée dans un haut-fourneau avec le charbon comme agent réducteur. En remplaçant le procédé du haut-fourneau par celui du DRI dans un four à arc électrique, le charbon est donc remplacé par de l'hydrogène, ce qui réduit fortement les émissions de CO₂ (ArcelorMittal, 2023 B). L'hydrogène est dit « vert » si sa production se fait par électrolyse de l'eau, dont l'électricité provient d'énergies renouvelables.

Afin d'atteindre leurs objectifs de décarbonation tout en répondant aux cahiers des charges des fabricants de produits finis, les acteurs de la filière intégrée souhaitent substituer aux hauts-fourneaux des fours à arc électrique alimentés par des ferrailles à très faibles teneurs en résiduels et du DRI à hydrogène (Entretien d'experts) :

- Concernant les ferrailles à faibles teneurs en résiduels, plusieurs développements technologiques permettront d'**augmenter les volumes de ferrailles incorporés par cette filière sidérurgique**, tout en respectant les cahiers des charges des consommateurs de métaux. D'ici à 2030, les technologies de valorisation des ferrailles, notamment le sur-tri (deep cleaning) de ferrailles post-consommation, permettront de préparer des ferrailles ayant des teneurs en résiduels de plus en plus faibles, avec un prix plus élevé. Cette tendance est déjà visible en Italie, où les aciéristes peuvent s'approvisionner en « E40 standard » ou en « E40 amélioré », plus onéreux, mais avec une teneur réduite en cuivre (Entretien d'experts) ;
- Selon les aciéristes, toute la production d'acier ne pourra pas être satisfaite uniquement par des ferrailles. Il est donc important de décarboner les sources primaires de fer, notamment par la voie **DRI à hydrogène** (Entretien d'experts).

Selon un expert, la nouvelle capacité de production d'acier en four à arc électrique à partir de ferrailles et de DRI permettra d'augmenter la consommation de ferrailles des acteurs de la filière intégrée actuelle, en fonction des disponibilités locales. **Cette utilisation accrue de ferrailles dépendra de l'offre supplémentaire de ferrailles** provenant des produits arrivant en fin de vie, ainsi que de la conservation d'une plus grande quantité de ferrailles à fondre en Europe. Certaines ferrailles aujourd'hui exportées et nécessiteraient un traitement supplémentaire pour être incorporées par cette nouvelle filière électrique (Entretien d'experts).

EUROFER estime que les « nouvelles technologies de rupture » occuperont une part de plus en plus importante de la production européenne d'acier, la métallurgie à base d'hydrogène (H₂-DRI-EAF) étant la principale voie envisagée par les sidérurgistes européens. Il convient de préciser que ces technologies de

rupture n'occuperont une part considérable de la production d'acier européen qu'à très long terme ; elles représenteront environ la moitié de la production d'acier en Europe à l'horizon 2050 - Figure 22.

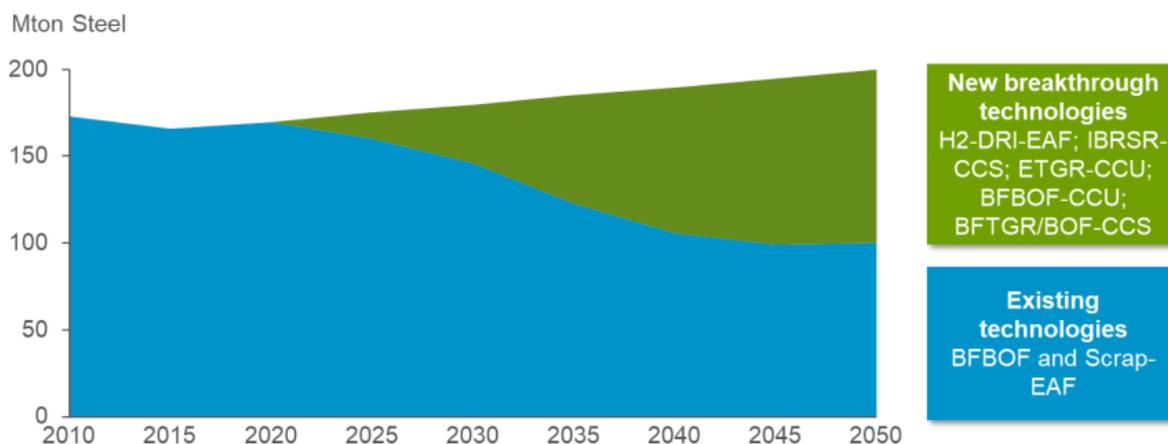


Figure 22 : Evolution des structures de production d'acier de l'Union européenne entre 2010 et 2050 (EUROFER, 2019)

Les politiques de décarbonation de l'industrie sidérurgique à l'horizon 2030 entraîneront donc des **investissements importants**.

- Du côté de l'offre d'acier, selon certains observateurs, **les dépenses liées à la décarbonation de l'actuelle filière intégrée sont susceptibles de rendre l'acier européen moins compétitif** (Entretien d'experts). En effet, les coûts en capital (CAPEX) et les coûts d'exploitation (OPEX) entraîneront des augmentations significatives des dépenses de production. Les coûts annuels totaux de la production d'acier en 2050, comprenant à la fois les CAPEX et les OPEX, sont estimés entre 80 et 120 milliards d'euros (EUROFER, 2019). D'ici à 2030, la transformation et la décarbonation de la sidérurgie conduiront les producteurs d'acier, notamment de la filière intégrée, à investir massivement et à remplacer progressivement le charbon et le coke comme vecteur énergétique par l'électricité, le gaz naturel et à terme l'hydrogène. In fine, en fonction des coûts de ces nouveaux vecteurs énergétiques et du coût de la ferraille, le coût de production de l'acier pourrait s'accroître (Entretien d'experts) ;
- Du côté de la demande d'acier, **certains sidérurgistes produisent d'ores et déjà des aciers à faible empreinte carbone**. Ces aciers – qui représentent encore une faible part de la production totale – sont aujourd'hui principalement vendus à des clients désireux de réduire leur empreinte carbone et prêts à payer un prix plus élevé (Entretien d'experts). Selon un représentant d'un secteur consommateur d'acier, les prix des produits sidérurgiques à faible empreinte carbone seraient 20 % à 30 % plus élevés que la moyenne (Entretien d'experts).

3.3.3.2. Le secteur de la fonderie devrait également se décarboner et augmenter sa consommation de ferrailles

D'ici 2030, **la transformation de cubilots en fours à induction permettrait de réduire l'empreinte carbone des fonderies**. Néanmoins, les fours à induction exigeant des ferrailles très faiblement contaminées, cela réduirait la capacité de recyclage des ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées en France.

Aujourd'hui, plus de 80 % des intrants de la fonderie de métaux ferreux sont des déchets. Les 20 % restants contiennent notamment de la fonte neuve ou du minerai pré-réduit. Ceux-ci pourraient à terme être remplacés par des ferrailles E8C (chutes neuves), E2 ou E3, à condition que celles-ci soient avantageuses pour les fondeurs (disponibilité et prix) par rapport à la fonte neuve ou au pré-réduit (Entretien d'experts).

3.3.3.3. La décarbonation des acteurs sidérurgistes voie électrique repose sur la transformation du capital fixe plutôt que sur la hausse de l'incorporation de ferrailles

Les sidérurgistes voie électrique sont déjà à des niveaux très élevés d'incorporation de ferrailles. A l'horizon 2030, leur principal levier de décarbonation sera la **réduction des émissions de GES pendant l'étape de laminage**, correspondant à la consommation de gaz naturel du four de réchauffage. Les acteurs en place étudient actuellement la possibilité de substituer le gaz naturel tout d'abord par électrification directe (induction, résistance) et ensuite par du biométhane, du e-méthane ou de l'hydrogène. Cette dernière solution potentielle pose des problèmes de faisabilité technique puisqu'il s'agit d'un nouveau procédé et économique, puisque le coût de l'hydrogène pourrait être élevé à long terme (Entretien d'experts).

3.3.4. Conséquences sur la consommation de ferrailles et enjeux de circularité de l'acier à 2030

3.3.4.1. La transformation des entreprises sidérurgistes passera par la sécurisation et le sur-tri de gisements de ferrailles pré- et post-consommation...

- **Afin de poursuivre leur transformation, les sidérurgistes voie intégrée devront incorporer de plus en plus de ferrailles post-consommation.**

De 2015 à 2050, le taux de croissance annuel moyen des volumes de ferrailles disponibles au sein de l'UE 28 est estimé à 1,1 %, comme l'indique la Figure 23. En effet, les volumes de déchets pré-consommations internes (*home scrap*) et externes (*prompt scrap*) devraient rester constants du fait de l'atteinte des limites de gains d'efficacité des procédés de production (baisse des volumes de ferrailles générés lors de la production de métal, du laminage, de l'utilisation en aval, etc.). Les acteurs de cette filière n'auront donc pas d'autre pas choix que d'**incorporer des volumes plus importants de déchets post-consommation** (*obsolete scrap*). Ces derniers composeront l'essentiel des nouvelles ferrailles disponibles (EUROFER, 2019).

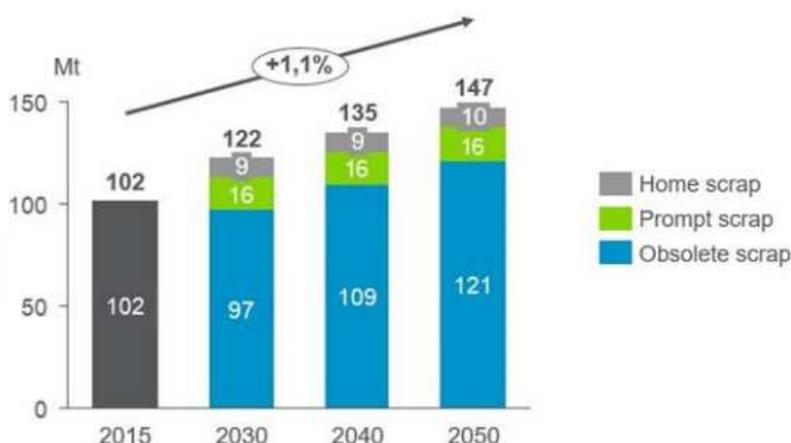


Figure 23 : Volumes de ferrailles disponibles au sein de l'UE 28, 2015-2050 (EUROFER, 2019)

- **Les ferrailles post-consommation ayant des teneurs en résiduels plus élevées, elles devront être traitées avant incorporation, ce qui représente un coût additionnel de sur-tri pour les acteurs sidérurgistes ou pour les préparateurs de MPR** (Entretien d'experts).

En parallèle de l'amélioration du démontage et du démantèlement de certains gisements d'acier (ex. véhicules hors d'usage), **l'utilisation d'installations de nettoyage des déchets en aval du processus de broyage est cruciale dans le processus de recyclage** des ferrailles pour éliminer certaines impuretés. Si le broyage garantit une définition optimale de la taille, le processus en aval permet une séparation efficace des différents métaux et résidus.

Pour incorporer des ferrailles plus faiblement contaminées dans les fours à arc électrique, **deux types de traitement sont envisagés** (Entretien d'experts) :

- Le « normal cleaning », avec une préparation des MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées dans des machines de nettoyage. Cette préparation des ferrailles s'applique aux ferrailles de types E1, E1C ou E46 (cf. Annexe 8.1.2) ;
- Le « deep cleaning » (sur-tri), où ces MPR sont de nouveau triés, broyés et nettoyés.

Par exemple, pour les ferrailles E1 (« vieux déchets d'acier mince » selon l'EFR, ex. déchets de démolitions légères), le taux de cuivre moyen du marché est de 0,4 %. Le « normal cleaning » permet de diminuer ce taux à 0,3 % et le « deep cleaning » permet de le réduire à 0,15 % (Entretien d'experts).

Afin de disposer d'un gisement stable de MPR à incorporer dans les fours à arc électrique, **les entreprises sidérurgiques seront donc amenées à sécuriser des gisements de ferrailles pré- et post-consommation**. A ce titre, il existe plusieurs stratégies de sécurisation des approvisionnements, telles que :

- **L'intégration verticale** via le partenariat avec des entreprises européennes de recyclage ;
- **Le développement de partenariats commerciaux** avec des vendeurs d'aciers usagés (« close loop ») (Entretien d'experts).

Ces stratégies de sécurisation ont pour objectif d'avoir en priorité un gisement élevé et stable de ferrailles très faiblement contaminées (ferrailles pré-consommation), mais également de ferrailles post-consommation à « sur-trier ».

Plus généralement, l'intégration verticale est une tendance forte dans de nombreux secteurs dépendants de matières premières métalliques. Par exemple, les fabricants automobiles ou de batteries (ex. CATL, BYD, Tesla) élargissent leurs activités en amont et en aval de la chaîne de valeur via des partenariats ou des coentreprises (*joint-ventures*) afin de sécuriser des gisements. Cette tendance s'ajoute à celle de la fabrication à façon³¹ qui consiste, pour certains secteurs de l'aval de la chaîne de valeur, à acheter les matières premières et à faire-faire par d'autres pour sécuriser leurs approvisionnements.

3.3.4.2. ... ce qui pourrait entraîner une concurrence pour l'accès aux ferrailles à court terme comme à moyen/long terme

- **A court terme, les acteurs de la filière intégrée et les fondeurs seront demandeurs des mêmes types de ferrailles dans le cadre de leurs politiques de décarbonation.**

Dans un premier temps, fondeurs et sidérurgistes souhaitent intégrer des volumes plus importants de ferrailles à faibles teneurs en résiduels, c'est-à-dire avec des teneurs faibles en contaminants métalliques et non métalliques. L'incorporation de ce type de ferrailles permettrait notamment à la filière intégrée de tendre vers la limite technique thermodynamique d'incorporation de ferrailles au niveau du convertisseur.

Néanmoins, les bassins métallurgiques se situent principalement aux frontières belges et allemandes et que les incorporateurs de MPR s'approvisionnent majoritairement en ferrailles à l'échelle locale. Ainsi, **sur un même bassin métallurgique, tous les acteurs en place devraient augmenter leur demande en ferrailles à faibles teneurs en résiduels dans les prochaines années**, ce qui pourrait entraîner une hausse des prix de ces ferrailles. Cette augmentation des prix des ferrailles pourrait jouer en la défaveur des acteurs de taille intermédiaire – tels que les fondeurs – qui n'ont pas la possibilité de sécuriser des gisements de ferrailles par intégration verticale (Entretien d'experts).

³¹ La fabrication à façon (ou toll manufacturing) consiste à confier tout ou partie de la production à une entreprise tierce à laquelle sont fournis les matières premières ou les produits semi-finis. Le travail de l'entreprise tierce consiste à transformer les produits ou les matières premières selon les spécifications requises.

- **A long terme, la concurrence pour l'accès aux ferrailles à faibles teneurs en résiduels pourrait se transformer en concurrence pour l'accès à tous types de ferrailles.**

D'ici à 2030, une pénurie de ferrailles pourrait s'installer à l'avenir, car les volumes de ferrailles ne suffiront pas à satisfaire tous les volumes de production d'acier. En d'autres termes, la demande de ferrailles post-consommation des fondeurs et des sidérurgistes (voie électrique et voie intégrée) deviendrait plus élevée que l'offre de MPR disponibles en France, une situation inverse par rapport à la comparaison entre les ferrailles disponibles et les ferrailles incorporées aujourd'hui telle que présentée en 3.1.3 (Entretien d'experts).

3.4. Principaux freins au recyclage de l'acier

Il existe plusieurs freins au recyclage de l'acier. Tout d'abord, une partie minoritaire des gisements n'est pas collectée car les coûts de collecte et de préparation des ferrailles sont plus élevés que leur prix de vente ou car ils sont captés par des filières illégales (3.4.1). L'un des freins majeurs à l'incorporation de ferrailles tient au fait que les teneurs actuelles en résiduels des MPR, combinées aux exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs d'aluminium, contraignent l'incorporation de MPR (3.4.2). Ces exigences concernent notamment la présence de contaminants métalliques tels que le plomb et le cuivre. Or, le sur-tri des MPR représente un coût additionnel significatif pour les préparateurs de MPR et les métallurgistes (3.4.3). En parallèle, les ferrailles sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et de la demande. Le décalage entre la teneur en éléments résiduels des MPR disponibles, et les exigences des cahiers des charges des industries consommatricesLe manque de débouchés en France, ainsi qu'une demande élevée à l'étranger pour des ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées conduit ainsi à l'export d'une part importante des ferrailles françaises (3.4.4). Les matières premières vierges et les matières premières de recyclage étant des commodités, la structure des marchés de commodités détermine également en partie les volumes de ferrailles achetés et incorporés en France (3.4.5). Enfin, l'essor du réemploi pourrait contribuer à retarder le recyclage des MPR métalliques, contraignant un peu plus encore le marché (3.4.6).

Le recyclage de l'acier repose sur un équilibre entre trois éléments :

- **Disponibilité par rapport à la demande de ferrailles :** Ce type de ferrailles est-il demandé en France et à l'étranger ? Par quel type d'acteurs métallurgiques ? Est-il disponible en quantités suffisantes par rapport à la demande des métallurgistes ?
- **Prix des ferrailles :** Quel est le coût de traitement de cette MPR afin qu'elle puisse être réincorporée en France ? Qui porte ce coût de traitement : les préparateurs de MPR métalliques et/ou les incorporateurs ? Est-il plus avantageux d'exporter la matière ou de l'incorporer en France ? A quel prix cette ferraille est-elle vendue sur le marché ?
- **Type de ferrailles :** De quel alliage est constitué cette Matière Première de Recyclage ? Contient-elle des impuretés ? Dans quelles proportions ? Les technologies de tri des préparateurs de MPR permettent-elles d'atteindre les exigences de composition des incorporateurs de MPR ? Dans quelles applications cette MPR peut-elle être réincorporée ?

3.4.1. Une faible part de l'acier n'est pas collectée pour des raisons économiques

Une partie minoritaire des gisements d'acier n'est pas collectée car les coûts de collecte et de préparation des ferrailles sont plus élevés que leur prix de vente³². L'hétérogénéité du gisement de ferrailles (typologies d'alliages, volumes collectables, etc.) est un frein majeur pour le recyclage des déchets métalliques. Les préparateurs de ferrailles n'ont parfois pas d'intérêt économique à déployer des moyens pour collecter et trier des déchets de petite taille ou issus de gisements trop diffus ou des déchets en mélange, notamment présents dans des produits complexes (EEE, véhicules) où la fraction recherchée est mêlée à d'autres matériaux. Par exemple, pour les DEEE, les liaisons entre des matériaux incompatibles pour le recyclage (entre plastique et métaux, entre deux métaux, etc.) dégrade le taux de recyclage des DEEE. Plus un produit est petit, plus les liaisons sont problématiques. Cela explique que certains DEEE, tels que les écouteurs, soient majoritairement détruits (Entretien d'experts).

3.4.1.1. Certains gisements sont non collectés ou non triés en raison de coûts de collecte et de préparation des ferrailles supérieurs au prix de vente ou car ils sont captés par des filières illégales

Plusieurs exemples illustrent cette situation :

Dans le secteur du bâtiment tout d'abord, **une partie des fondations (*steel piles*) ne peut être récupérée³³** au moment de la démolition (Entretien d'experts). Les acteurs de la maîtrise d'ouvrage décident du périmètre d'action des démolisseurs, ce qui peut compromettre la collecte de déchets métalliques. Plus précisément, certains cahiers des charges requièrent de ne pas collecter l'intégralité des fondations d'un bâtiment – voire exigent de ne pas les collecter du tout – puisque ces gisements sont parfois difficilement captables, en raison d'un trop faible intérêt économique à la collecte. Le prix de vente des ferrailles préparées ne justifie donc pas les coûts de collecte et de valorisation (Entretien d'experts) ;

- Dans le secteur des transports ensuite, **les bateaux, dont la coque est en acier, sont généralement exportés pour être démantelés**, principalement en Inde, au Pakistan et au Bangladesh (Entretien d'experts).

3.4.1.2. Il existe un manque de traçabilité de certains flux de produits en fin de vie

Certains produits en fin de vie sont peu traçables, notamment ceux du secteur industries mécaniques (équipements de production, équipements mécaniques, pièces mécaniques de sous-traitance, etc.). En effet, contrairement aux automobiles et aux emballages, ces marchés représentent des applications très diverses avec des durées de vie qui varient d'un produit à l'autre (Multiples entretiens d'experts). Ainsi, il est très difficile de savoir si ces gisements de ferrailles sont correctement collectés et triés et, in fine, dans quels types d'applications ils sont réincorporés.

3.4.1.3. Des gisements importants d'acier sont également collectés, triés et/ou exportés par des filières illégales

L'acier est le principal métal utilisé dans les véhicules. Or, les experts estiment généralement qu'environ 30 % des VHU sont traités par des filières illégales en France. **Des volumes de plus en plus importants d'acier échappent donc à la filière agréée.** Des volumes d'acier traités par les filières illégales sont donc

³² En Europe, en 2015, on estimait à 41,3 % le taux d'« obsolete stock »* dans le gisement de ferrailles (Panasiuk, 2019). Il convient de préciser que les résultats des analyses de flux de matières sont théoriques et qu'il y a toujours une différence entre les quantités estimées de déchets et la réalité. Ces estimations reposent notamment sur des hypothèses fortes en matière de durée de vie des produits (Entretien d'experts), non recalculées dans le cadre de cette étude.

*Le stock obsolète représente l'accumulation des flux de fer qui n'ont pas été traités par les gestionnaires de déchets et qui ne sont donc pas recyclés.

³³ Il n'existe pas de données concernant la France. Au Royaume-Uni, ce sont environ 15 % des fondations qui ne sont pas collectées (Ley, Sansom, et Kwan, 2001).

exportés. Ces volumes ne sont pas connus et relèvent uniquement d'estimations. Ce gisement d'intérêt pour améliorer le recyclage de l'acier en France est présenté en section 4.5.1.

3.4.2. Les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs contraignent l'incorporation de ferrailles par l'industrie sidérurgique

3.4.2.1. Les exigences techniques des secteurs consommateurs d'acier se répercutent dans les cahiers des charges des fabricants de produits semi-finis en acier

- **Les MPR métalliques collectés ? correspondent rarement aux cahiers des charges des incorporateurs de MPR métalliques.**

Le centre commun de recherche distingue trois grandes catégories d'aciers : les aciers non alliés ou faiblement alliés, les aciers inoxydables et les autres aciers alliés (Centre commun de recherche, 2010 A ; Entretien d'experts). Néanmoins, il existe de nombreux alliages d'acier, dont la composition dépend principalement des cahiers des charges des consommateurs de métaux. Les teneurs en manganèse, en chrome, en vanadium, en molybdène, en tungstène et en autres éléments sont propres à chaque alliage (Entretien d'experts).

Les secteurs consommateurs d'acier (construction, emballages, transports, etc.) ont des exigences techniques variées (résistance mécanique, légèreté, etc.). **Ces exigences se répercutent dans les cahiers des charges des fabricants de produits métalliques** (exigences sur la forme et la composition des alliages) et, in fine, dans les cahiers des charges des préparateurs de ferrailles. Or, **les MPR métalliques, du fait de la présence d'éléments résiduels y correspondent rarement sans sur-tri et/ou ajout de métal primaire**. En particulier, pour l'acier, où **les teneurs en contaminants sont limitées** :

- En sidérurgie, la production d'aciers plats nécessite le plus souvent des ferrailles très faiblement contaminées. La Figure 24 indique que la teneur moyenne en cuivre est inférieure à 0,1 % pour certains types de produits (acier à tréfiler, fil mince, etc.), contre 0,15 % en moyenne dans les ferrailles (Material Economics, 2020 ; DAEHN, 2017 ; Material Economics, 2020). Les taux de ferrailles utilisés pour la production de certains aciers plats est faible même aux Etats-Unis, où les produits plats sont pourtant fabriqués par la filière électrique (Entretien d'experts)³⁴ ;
- En sidérurgie, pour la production d'acier inox, la teneur en cuivre ne doit pas dépasser 0,5% et la teneur en phosphore ne doit pas dépasser 3% (Entretien d'experts) ;
- En fonderie, certains produits normalisés en fonte ont des exigences de résistance aux chocs ou à l'usure impliquant une utilisation plus faible de ferrailles et par conséquent la sélection de ferrailles à faibles teneurs en résiduels (Entretien d'experts).

³⁴ Par exemple l'aciériste Nucor, qui publie le contenu recyclé pré et post-consommateur de ses produits (Nucor, 2022)

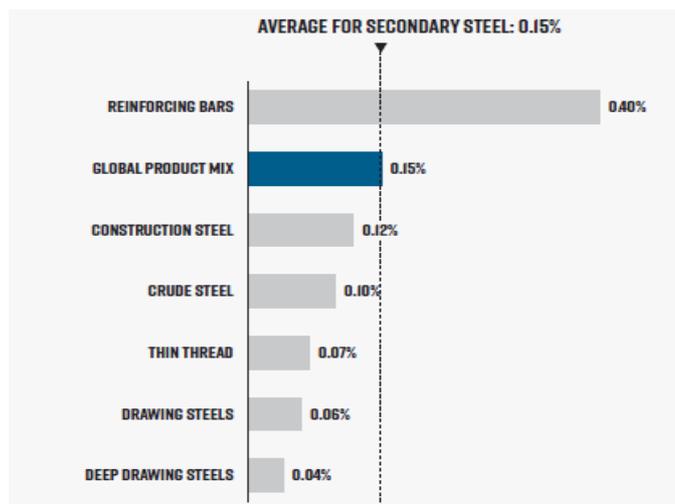


Figure 24 : Concentration maximale de cuivre dans l'acier pour différents produits sidérurgiques en % de cuivre (Material Economics, 2020)

3.4.2.2. Des exigences réglementaires entraînent des coûts additionnels tout au long de la chaîne de valeur du recyclage de l'acier

Certaines réglementations visent à réduire les risques des produits contenant des métaux sur la santé et la sécurité des personnes, ainsi que sur l'environnement. Pour ce faire, elles imposent ou devraient imposer des teneurs maximales en éléments contaminants (plomb, cobalt, etc.). Ces opportunités réglementaires sont néanmoins une contrainte pour le recyclage de l'acier, puisqu'elles génèrent des coûts additionnels de « sur-tri » des ferrailles.

- **Plusieurs réglementations majeures imposent ou devraient imposer des teneurs maximales en éléments contaminants afin de réduire les risques d'atteinte à la santé des personnes.**

Les restrictions suivantes sur la composition des alliages ont été identifiées :

- **Acier utilisé pour les emballages :** On retiendra notamment des restrictions sur la teneur en plomb et en cadmium (<0,01 %), ou encore en arsenic (<0,03 %). Des teneurs maximales pour le cuivre, le phosphore, etc. sont aussi prévues (DGCCRF, 2023) ;
- **Acier inoxydable utilisé pour la fabrication de cuisines professionnelles :** Règlement cadre CE 1935/2004 concernant les matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires. Les matériaux utilisés doivent être inertes. En pratique ces applications utilisent une part conséquente de métaux recyclés, notamment les aciers inoxydables qui, en Europe, sont presque intégralement issus du recyclage (Entretien d'experts) ;
- **Teneur en cobalt des aciers inox³⁵.** Par exemple, les modifications apportées au règlement MDR 2017/745 de l'UE³⁶ exigent que les dispositifs contenant plus de 0,1 % en poids de cobalt indiquent la présence de cobalt en tant que substance potentiellement cancérigène, mutagène et toxique pour la reproduction. De nouvelles restrictions pourraient être adoptées, qui impacteraient nécessairement la circularité de l'inox aux conditions technico-économiques actuelles, ces alliages contenant presque systématiquement du cobalt en concentration supérieure à 0,1 % (Multiples entretiens d'experts).

³⁵ Selon le Règlement CE 1272/2008 Classification, Etiquetage et emballage (dit « CLP »), et depuis le 1er octobre 2021, le Co est classé cancérigène (C) catégorie 1B (H350), reprotoxique (R) catégorie 1B (H360F) et mutagène (M) catégorie 2 (H341). Le Co métal et ses alliages en concentration supérieure à 0,1 % m/m ne sont plus autorisés au public non professionnel.

³⁶ Règlement (UE) 2017/745 du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2017 relatif aux dispositifs médicaux.

- **L'ensemble du droit des substances chimiques et, en particulier, l'objectif d'un environnement non toxique (CSS), peut être difficile à concilier avec les contraintes techniques et économiques de l'économie circulaire.**

Les réglementations ci-dessus s'inscrivent notamment dans le cadre de la stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques (CSS – Chemicals Strategy for Sustainability³⁷) de la Commission européenne. Sur la question plus spécifique des substances dangereuses, **la CSS propose une nouvelle hiérarchie dans la gestion des produits chimiques** (cf. Figure 25), qui vise à éliminer les substances dangereuses, y compris dans les déchets.

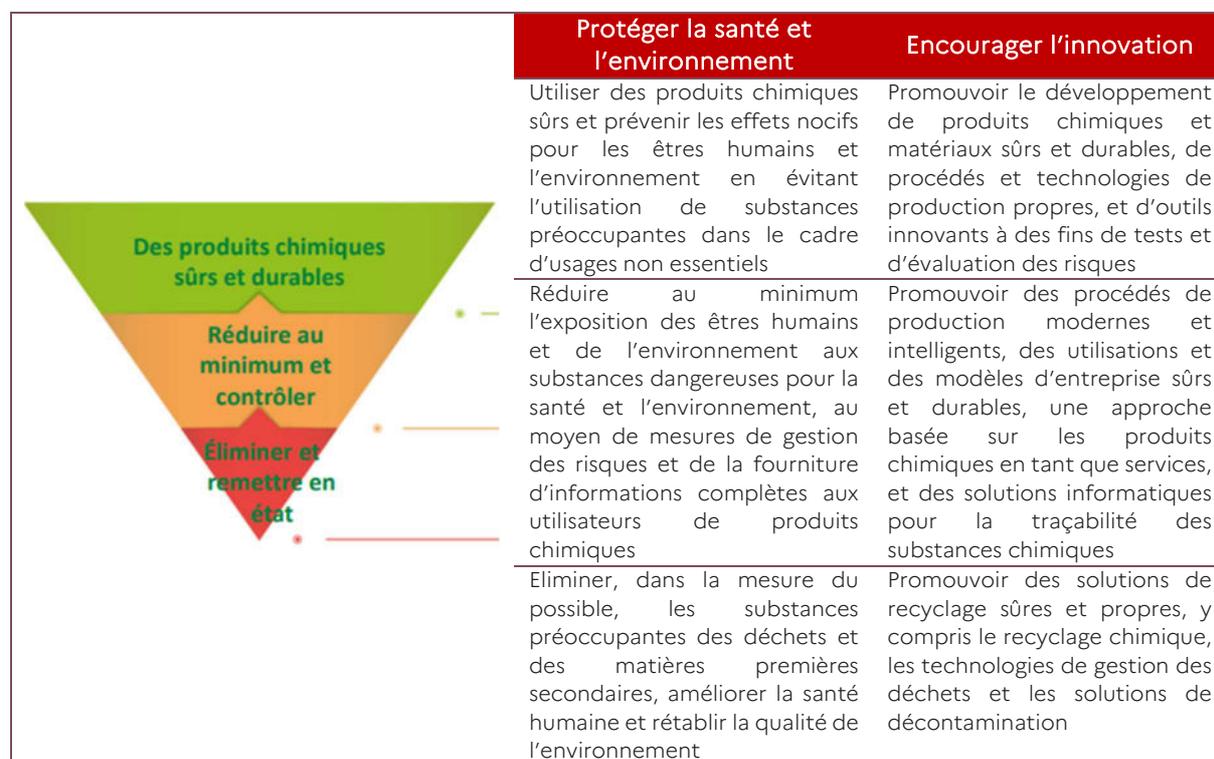


Figure 25 : Nouvelle hiérarchie dans la gestion des produits chimiques dans le cadre de la CSS (Commission européenne, 2020 C)

Le recyclage de l'acier en France peut être défavorisé pour deux raisons :

- D'une part, **les réglementations produits et déchets sont distinctes**. Si une substance est interdite dans un produit³⁸, elle ne le sera pas forcément dans le déchet contenant cette substance « héritée ». Or, la dépollution de ce déchet « contaminé » – qui est nécessaire pour le recycler en boucle fermée – est parfois irréalisable d'un point de vue technico-économique. C'est notamment le cas pour la contamination en plomb, qui a été intégré à la liste de restriction sous certaines conditions de certaines substances dangereuses (Annexe XVII³⁹ du Règlement

³⁷ Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques. Vers un environnement exempt de substances toxiques. COM/2020/667 final

³⁸ Par exemple par la Directive 2011/65/UE du Parlement européen et du Conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (RoHS – Restriction of Hazardous Substances) ;

³⁹ Restrictions applicables à la fabrication, à la mise sur le marché et à l'utilisation de certaines substances dangereuses et de certains mélanges et articles dangereux.

REACH⁴⁰), et dont la classification à la liste d'autorisation (annexe XIV du même règlement) a été proposée par la Commission européenne, impliquant une interdiction de son utilisation dans les alliages à plus de 0,1% sauf autorisation par la Commission ;

- D'autre part, **les réglementations produits et déchets sont toutes deux liées à la classification des substances** selon différentes réglementations (REACH, CLP⁴¹). Lorsqu'un déchet est classifié comme dangereux⁴², alors son recyclage est contraint techniquement et donc financièrement.
- **Ces réglementations pourraient contraindre le recyclage de l'acier et entraîner des coûts additionnels tout au long de la chaîne de valeur du recyclage de l'acier**

L'offre française de ferrailles issues des produits en fin de vie correspond aux mises sur le marché d'il y a plusieurs décennies. Au moment des mises sur le marché, ces exigences réglementaires étaient soit inexistantes, soit moins ambitieuses (Entretien d'experts). Ces gisements de déchets en fin de vie peuvent donc difficilement être recyclés en boucle fermée pour des raisons techniques et financières et sont parfois contraints au recyclage en boucle ouverte en France ou à l'exportation.

Ainsi, l'abaissement des teneurs maximales en contaminants pour l'acier complexifie souvent la valorisation des déchets post-consommation (Entretien d'experts). **Ces limites réglementaires peuvent entraîner des coûts additionnels pour les préparateurs de ferrailles, liés :**

- Au « **sur-tri** » des ferrailles. Celles-ci doivent alors passer par d'autres étapes de traitement pour correspondre aux cahiers des charges des clients ;
- A l'**augmentation de la consommation de matières premières vierges** pour « diluer » les ferrailles lorsque les étapes de sur-tri ne permettent toujours pas de respecter les réglementations en vigueur.

Dans le cadre de plusieurs entretiens avec différents experts de la chaîne de valeur du recyclage de l'acier, **le plomb est ressorti comme un élément problématique**, notamment pour des raisons réglementaires.

3.4.3. Les technologies existantes et en cours de développement ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'exigence dans les conditions actuelles de marché, ce qui entraîne le recyclage en boucle ouverte d'une partie des ferrailles en France

3.4.3.1. Certaines ferrailles peuvent difficilement être valorisées via les procédés conventionnels

- **La faible recyclabilité de certains produits contenant des métaux est une contrainte importante à la séparation des différents matériaux.**

En matière d'éco-conception, les entreprises interviewées estiment que l'appel à la **conception en vue du recyclage (*design for recycling*)** n'a pas été pris en compte par de nombreux secteurs

⁴⁰ Règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) no 793/93 du Conseil et le règlement (CE) no 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission

⁴¹ Règlement CE 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges (CLP – Classification, Labelling, Packaging).

⁴² Au titre de la liste des déchets européens : Décision de la Commission du 3 mai 2000 remplaçant la décision 94/3/CE établissant une liste de déchets en application de l'article 1 er , point a), de la directive 75/442/CEE du Conseil relative aux déchets et la décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux en application de l'article 1 er , paragraphe 4, de la directive 91/689/CEE du Conseil relative aux déchets dangereux [notifiée sous le numéro C(2000) 1147] (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) (2000/532/CE)

consommateurs de métaux. Ce serait notamment le cas de la majorité des constructeurs automobiles, qui sont incités à concevoir des véhicules recyclables mais qui n'ont pas d'objectifs fixés à l'échelle européenne (Multiples entretiens d'experts). Cette faible recyclabilité des véhicules explique que la majorité des éléments en acier des VHU sont valorisés par les broyeurs plutôt que par les centres VHU, comme le précise la section 3.5.1 dédiée au gisement d'acier dans les VHU. Seule la filière sidérurgique électrique incorpore aujourd'hui en quantités importantes ces ferrailles broyées (ex. E40) en France.

- **Il existe des contaminants organiques et métalliques, qui contraignent le tri et l'incorporation de ferrailles en sidérurgie dans les procédés conventionnels.**

Les contaminants organiques (substances contenues dans les déchets post-consommation : terre, caoutchouc, etc.) **présents dans les ferrailles** peuvent être problématiques. L'incorporation en grande quantité de ces matières génèrent de l'inefficacité énergétique, de la poussière, des émissions ou des co-produits (laitiers noirs). Or, les entreprises sidérurgiques françaises sont soumises à des réglementations européennes sur les sites industriels⁴³ et sur les déchets⁴⁴ qui visent à réduire les émissions et la pollution des installations (Entretien d'experts).

Les contaminants métalliques ne peuvent pas toujours être facilement retirés via les procédés conventionnels. La Figure 26 indique ainsi que s'agissant des deux filières principales de la sidérurgie (électrique et intégrée), certains contaminants – *tramp elements* – métalliques restent dans le métal ciblé, et ne sont pas éliminés dans le laitier ou les gaz issus du procédé. Le plomb⁴⁵ et le cuivre sont les principaux contaminants des ferrailles et peuvent limiter leur recyclage dans des usages similaires à ceux du produit d'origine (Entretien d'experts).

⁴³ La directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles (IED) vise à prévenir et à réduire la pollution provenant de certaines activités industrielles. Elle prévoit que les conditions d'autorisation d'exploitation d'un site industriel soient fondées sur les meilleures techniques disponibles (MTD).

⁴⁴ La directive n° 2008/98/CE du 19/11/08 relative aux déchets institue un cadre légal pour le traitement des déchets dans l'UE. Ce cadre souligne l'importance de l'utilisation de techniques appropriées pour la gestion, la valorisation et le recyclage des déchets permettant de réduire la pression sur les ressources et d'améliorer leur utilisation.

⁴⁵ Si la Figure 26 confirme que le plomb dans les procédés EAF est émis comme vapeur ou particules d'oxydes métalliques, l'US EPA (2009) suggère que la teneur en plomb est surveillée par les opérateurs d'EAF, puisqu'une concentration en plomb même faible – de l'ordre de 15kg dans une coulée de 100-150t – pourrait nuire à la qualité de l'acier produit.

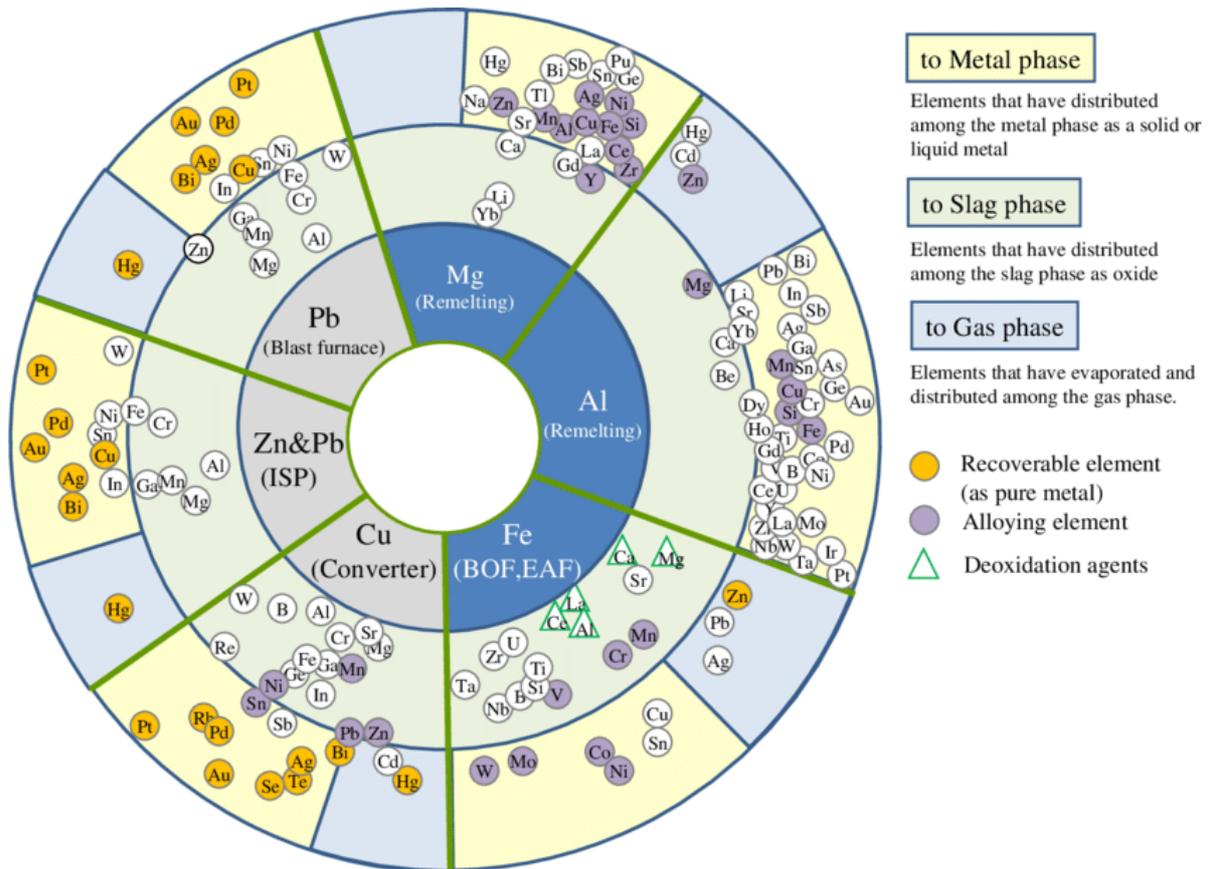


Figure 26 : Cartographie des éléments contaminants pour le recyclage de 6 métaux (Fe, Cu, Zn, Pb, Al et Mg) (Hiraki et al., 2011)

Le cuivre est très difficile à séparer de l'acier pendant la refonte. Or, il affecte profondément la résistance et les propriétés de l'acier. Le plus souvent, les ferrailles contiennent du cuivre en raison d'un tri imparfait, qui laisse des débris de moteurs électriques et de câbles électriques dans les ferrailles mélangées (Material Economics, 2020). Seules des applications comme le fer à béton permettent d'intégrer ces aciers hautement alliés en cuivre – cf. Figure 24, ce qui correspond à un **recyclage en boucle ouverte**. De nouvelles techniques permettant d'éviter cette contamination existent, mais sont trop onéreuses pour les acheteurs de ferrailles (Entretien d'experts) ou sont à un stade de développement précoce. Par exemple, les appareils de Spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser portatifs (HH LIBS) vise à identifier la présence de certains éléments à un niveau inférieur au pourcentage dans les matériaux (dont les ferrailles) en temps réel et in situ, afin de préparer des étapes ultérieures de caractérisation de matériaux complexes (Martin et al., 2018).

L'élimination du plomb est également un prérequis pour de nombreux produits sidérurgiques, pour des raisons environnementales et techniques. Le point de fusion du plomb étant plus faible que celui du fer, il fragilise la structure de l'acier ; il peut également s'infiltrer dans les matériaux réfractaires utilisés dans les fours) (Entretien d'experts).

3.4.3.2. Certaines technologies de pointe de tri sont peu déployées en raison d'une faible productivité et d'un coût élevé

- **Les technologies de pointe de tri des déchets métalliques sont coûteuses et peu déployées à une échelle industrielle.**

Les investissements nécessaires chez les préparateurs de ferrailles sont importants et les coûts supplémentaires liés au déploiement de ces nouvelles technologies peuvent être élevés (Multiples entretiens d'experts). Au total, pour la filière MPR métalliques, les investissements des adhérents FEDEREC représentent déjà près de 5% de leur chiffre d'affaires total et plus de la moitié de ces investissements ont pour objectif de moderniser les lignes de tri (installation de lignes de sur-tri, analyseurs XRF overband,

etc.). Le développement du sur-tri contribuerait à poursuivre l'augmentation de ces politiques d'investissement déjà importantes. Certains acteurs interviewés ont néanmoins soulevé le fait que les volumes sont parfois trop limités pour rentabiliser les investissements dans les technologies de sur-tri (ou *deep cleaning*).

Les coûts liés au sur-tri des MPR métalliques représentent **un coût additionnel significatif qui pourrait être d'autant plus important pour les acteurs de taille modérée** (PME-ETI) qu'ils ne peuvent pas bénéficier des mêmes économies d'échelle que des acteurs mondiaux (Entretien d'experts).

- **Concernant l'acier inoxydable, les technologies de tri des aciers ne permettent pas une séparation optimale des ferrailles.**

Des volumes de ferrailles inox collectés sortent in fine du cycle de l'acier inoxydable, notamment parce qu'ils sont mélangés avec des ferrailles d'acier carbone, puis intégrés dans la production d'acier « carbone ». D'après World Stainless, en 2019, dans le monde, plus d'un quart des ferrailles inox collectées étaient réincorporées dans un cycle de production d'acier carbone⁴⁶ (World Stainless, 2023)⁴⁷.

Des solutions avancées de tri (fluorescence des rayons X, intelligence artificielle, etc.) déjà utilisées pour le tri des déchets d'aciers carbone permettraient de conserver ces matières en Europe et de réduire drastiquement les exportations des ferrailles inox vers des pays pratiquant le dumping environnemental. Néanmoins, les faibles volumes de déchets d'acier inox ne permettent pas d'investir dans de telles technologies à date (Entretien d'experts). En conséquence, une part des ferrailles est incorporée en France dans des applications moins exigeantes en termes de composition, ce qui correspond à un **recyclage en boucle ouverte**.

3.4.4. Les ferrailles sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et la demande

3.4.4.1. Pour certains types de ferrailles, la demande est plus élevée à l'étranger qu'en France

La section 3.2 détaille les catégories et quantités de ferrailles exportées par la France, ainsi que les principales destinations des exports français et européens.

- **La demande de ferrailles et le consentement à payer de certains pays hors-UE peut restreindre le recyclage des ferrailles en France, à plusieurs égards.**

Tout d'abord, **les volumes d'export sont élevés si les coûts de préparation des ferrailles sont élevés en France**. En particulier, les coûts de logistique ont été cités comme un facteur majeur de décision d'export. Pour un collecteur de ferrailles, il peut être plus intéressant de les exporter hors UE (au « grand export »), si pour des volumes importants, le coût de transport par bateau est faible, ou vers les pays voisins, s'ils sont situés proches d'une frontière (Entretien d'experts). D'autant que **les volumes d'export sont élevés si les pays tiers – et notamment le grand export – peuvent pratiquer le dumping environnemental**. La réglementation française impose des modalités de collecte, de tri et d'incorporation des ferrailles exigeantes d'un point de vue environnemental. Au niveau européen, des volumes très significatifs de ferrailles quittent l'UE. Certains acteurs industriels interrogés dans le cadre de cette étude estiment que cette ressource ne fait pas toujours l'objet d'un traitement environnemental comparable à celui réalisé au sein de l'UE (Entretien d'experts).

⁴⁶ En 2019, parmi les 14 064 kt de ferrailles inox collectés, 9 794 kt étaient réincorporées dans un nouveau cycle de production d'acier inox (69,6 % des volumes collectés), 641 kt n'étaient pas comptabilisés (4,6 %) et 3 629 kt de ferrailles inox étaient réincorporées dans un cycle de production d'acier carbone (25,8 %) (World Stainless, 2023)

⁴⁷ L'inox austénitique n'étant pas magnétique, il peut être isolé plus facilement que l'inox ferritique, qui est magnétique et donc non isolé des aciers carbone (Entretien d'experts), l'aimantation étant le principal moyen de récupération de l'acier.

Ainsi, les volumes d'export sont élevés si le **consentement à payer pour une catégorie donnée** de MPR est plus élevé à l'étranger, et que la **demande française est limitée**. C'est en particulier le cas pour les ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées telles que les ferrailles cisailées et découpées. Ces exports peuvent être hors UE (au « grand export »), mais également vers le reste de l'UE, lorsque les pays frontaliers ont gardé des tissus industriels dynamiques et sont donc demandeurs de MPR métalliques (Multiples entretiens d'experts).

- **Des volumes importants de ferrailles sont donc vendues à l'exportation, où la demande est plus élevée et où le consentement à payer est plus important.**

La Figure 27 indique par la zone orangée qu'en UE-28, en 2017, l'offre de ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées (Q3/Q4) était supérieure à la demande pour le même type de ferrailles par l'industrie sidérurgique. L'article fait le parallèle entre le surplus de ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées et le solde exportateur net de ferrailles de l'UE-28, positif sur la période 2010-2017.

Cela vaut particulièrement pour les « **ferrailles cisailées et non broyées** » (cf. section 3.2.3), qui, selon certains acteurs interrogés, seraient en grande partie exportées – notamment vers des pays hors UE – alors qu'elles pourraient être incorporées par les sidérurgistes français en voie électrique après avoir été broyées. Pour les préparateurs de MPR métalliques, la différence entre le prix de vente des ferrailles broyées en France et le prix de vente des « ferrailles cisailées et non broyées » à l'étranger pourrait être de 30 € à 40 € par tonne (information issue d'échanges avec des préparateurs de MPR métalliques). Les prix de vente des produits finis des sidérurgistes voie électrique ne permettant pas de justifier cette différence de prix d'achat, ces ferrailles sont donc majoritairement exportées à date (Entretien d'experts).



Figure 27 : Analyse du gisement de matières pour les quantités et les types de la demande d'acier brut et des ferrailles disponibles dans l'UE-28 pour les années 1960, 1988, 1994, 2000, 2006 et 2017 en Mt (Dworak & Fellner, 2021)

3.4.4.2. Certains gisements sont traités et exportés par des filières illégales

Pour certains secteurs, des parts non négligeables de gisements sont traitées par des filières illégales. Ces filières peuvent conserver et réintégrer les matières en France ou les exporter sous la forme de produits d'occasion, de pièces ou de ferrailles. Les filières illégales sont aujourd'hui très peu connues.

L'acier est le principal métal utilisé dans les véhicules. Ainsi, **des tonnages élevés d'acier sont exportés par les filières illégales de traitement des Véhicules hors d'Usage (VHU)**. Un focus sur les tonnages d'acier contenus dans les VHU est disponible en section 3.5.

3.4.5. Les prix des matières premières et de l'énergie jouent un rôle important et peuvent constituer un frein au recyclage de l'acier en France

Cette section récapitule les principaux déterminants des prix, du type de MPR et de la disponibilité des métaux. Il s'agit de généralités communes à tous les métaux de base, qui s'appliquent donc au recyclage de l'acier. Les matières premières vierges et les matières premières de recyclage étant des commodités, **l'offre et la demande des agents, ainsi que les défaillances éventuelles des marchés déterminent en partie les volumes de ferrailles achetées et incorporées en France.**

En particulier, l'évolution des prix des matières premières vierges et l'évolution du prix de l'énergie sont déterminants pour inciter à la collecte, à la valorisation et à la réincorporation des métaux en France. On peut estimer que, jusqu'à présent, ces fondamentaux n'ont pas favorisé un plus haut niveau de recyclage en France. En effet :

- **Historiquement, la fixation des prix des métaux a en partie échappé aux acteurs du marché mondial en raison d'événements politiques majeurs et d'événements propres aux matières premières métalliques.**

L'US Geological Survey souligne que les principaux facteurs historiques qui ont influencé les prix de l'acier ont été les **événements internationaux majeurs ayant un impact macro-économique tels que les guerres et les récessions**, les événements nationaux majeurs tels que la dissolution de l'Union soviétique en 1991 et la croissance économique de la Chine, qui a commencé avec la politique de la porte ouverte dans les années 1970 mais n'a pas eu d'impact significatif sur le marché jusqu'au début des années 1990. **Les prix de l'acier ont également évolué en fonction d'événements spécifiques aux matières premières**, tels que les modifications des droits de douane, les changements d'utilisation des métaux et les grèves dans les mines (USGS, 2007).

- **Certaines défaillances de marché contraignent l'achat et l'incorporation de ferrailles.**

Le marché des Matières Premières de Recyclage peut présenter des **défaillances de marché**, c'est-à-dire des situations dans lesquelles le fonctionnement du marché échoue à produire un équilibre économique entre offre et demande de ferrailles. En outre, le commerce des MPR – notamment des ferrailles – peut entraîner des **coûts de recherche et de transaction** importants. Les marchés sont souvent diffus ou occasionnels et, dans certains cas, ils comprennent des acteurs ayant peu d'expérience du marché. Dans ces conditions, il peut être difficile pour les acheteurs et les vendeurs de se rencontrer. Lorsqu'ils y parviennent, les efforts déployés pour convenir d'un prix « équitable » peuvent être considérables en raison de la nature hétérogène et incertaine des produits échangés. Bien que ces coûts diminuent avec le temps, ils peuvent constituer des obstacles importants pendant une période longue. Par exemple, les marchés de certains types de déchets de construction et de démolition présentent des coûts de recherche et de transaction élevés (OCDE, 2006).

- Ces dernières années, le prix des matières premières vierges a augmenté, ce qui rend les ferrailles plus compétitives.

Si les prix des matières premières vierges diminuent, les sidérurgistes sont moins incités financièrement à incorporer des ferrailles. A titre indicatif, entre 2018 et 2021, le prix de la tonne sèche de minerai de fer a drastiquement augmenté, passant de 69,8 \$ en 2018 à 161,7 \$ en 2021. Cette hausse du prix des matières premières vierges a rendu les matières premières de recyclage (ferrailles) plus compétitives. Ce prix a ensuite diminué jusqu'à 121,3 \$ en 2022, réduisant ainsi les incitations à l'incorporation de MPR (Banque mondiale, 2023). Plusieurs éléments déterminent le prix des matières premières vierges :

- **La demande interne chinoise.** La Chine est à la fois un débouché majeur et un producteur important de matières premières. Ainsi, si la demande interne chinoise diminue, les exportations chinoises augmentent et les prix chutent au niveau mondial. C'est notamment le cas pour l'acier. Ainsi, une baisse de la demande chinoise de matières premières vierges entraîne une baisse des prix de l'acier issu de MPV pour les sidérurgistes européens et, indirectement, entraîne une incitation à l'incorporation de matières premières vierges pour les sidérurgistes (Jégourel, 2016 A) ;
- **La financiarisation des marchés des matières premières.** Ce phénomène correspond à l'externalisation d'une partie du risque de prix sur les marchés financiers. Des dynamiques spéculatives peuvent alors influencer en partie le prix des matières premières. Comme pour toute matière première, plus la volatilité anticipée des prix des MP métalliques est élevée, plus les acteurs financiers sont réticents à investir dans ces matières premières et plus le prix de ces matières premières diminue. Ainsi, cette volatilité se répercute indirectement dans l'incorporation de matières premières de recyclage : si les marchés financiers contribuent à diminuer le prix des matières premières vierges, alors leur incorporation par les sidérurgistes va augmenter et ceux-ci seront moins incités à incorporer des ferrailles.

- **En parallèle, les prix de l'énergie ont fortement augmenté ces dernières années⁴⁸. En cas de diminution de ceux-ci, les acteurs du marché seraient moins incités à incorporer des MPR.**

L'évolution des prix de l'énergie joue un rôle important et peut constituer un frein au recyclage des métaux en France. La production de matières premières vierges métalliques étant très énergivore, une baisse des prix de l'énergie entraîne une baisse du coût de ces matières et contribue à les rendre plus attractives économiquement que les MPR métalliques. A noter que **l'impact de l'évolution des prix de l'énergie dépend du mix énergétique et des réglementations en vigueur de chaque pays**. Les pays où le coût de l'énergie est plus faible peuvent être avantagés pour le traitement des ferrailles.

3.4.6. Le développement du réemploi reporte la disponibilité des MPR métalliques

Alors que certaines filières ont historiquement favorisé le réemploi pour des raisons économiques, d'autres filières ont toujours privilégié le recyclage. Ces dernières seront néanmoins amenées à développer le réemploi dans les prochaines années dans le cadre des filières REP.

⁴⁸ A titre indicatif :

- Le prix du gaz naturel en Europe est passé de 3,24 dollars par MMBtu (millions de BTU - British Thermal Units) en 2020 à 16,12 dollars par MMBtu en 2021, puis à 40,34 dollars par MMBtu en 2022 ;
- Le prix du pétrole brut (moyenne) est passé de 39,3 dollars par baril en 2020 à 69,1 dollars par baril en 2021, puis à 97,1 dollars par baril en 2022 ;
- Le prix du charbon australien est passé de 60,8 dollars par tonne en 2020 à 138,1 dollars par tonne en 2021, puis à 344,9 dollars par tonne en 2022 (Banque mondiale, 2023).

- **Certaines filières favorisent le réemploi, pour des raisons économiques et réglementaires.**

Le réemploi est placé plus haut que le recyclage dans la hiérarchie des modes de gestion des déchets⁴⁹ puisqu'il prolonge la durée de vie des produits, diminue l'utilisation de matières premières et réduit la production des déchets. **Le réemploi retarde donc l'entrée en recyclage des MPR métalliques.**

Certaines filières ont historiquement favorisé le réemploi par rapport au recyclage, pour des raisons économiques et réglementaires. En particulier, **la pratique du réemploi pour des raisons économiques a été soulignée pour les industries mécaniques**, qui consomment des volumes importants d'acier – cf. annexe 8.1.2. L'une des particularités des biens d'équipement (machines et travaux publics) est qu'une part importante des pièces est réemployée ou réutilisée. Les parties métalliques ne pouvant pas faire l'objet d'une nouvelle utilisation sont recyclées. Néanmoins, certains équipements en fin de vie échappent à la filière légale de recyclage et sont exportés. Leur devenir (recyclage et réemploi) n'est pas connu (Entretien d'experts).

- **Pour les autres filières, les procédés de valorisation actuels favorisent le recyclage plutôt que le réemploi.**

Pour l'automobile, en 2020, 31 % des centres VHU agréés n'ont pas démonté de pièces de réutilisation. Cela signifie qu'une majorité de centres VHU (69 %) démontraient des pièces sur les VHU qu'ils prennent en charge pour les revendre comme pièces d'occasion. Il reste néanmoins que les volumes extraits sont limités. En moyenne, pour chaque VHU traité, 82,4 kg de pièces ont été démontées pour réutilisation, alors que la masse moyenne d'un VHU était de 1 126 kg (ADEME, 2022 B).

Pour le secteur du bâtiment, il n'existe pas à date de référentiel technique pour réemployer les Produits et Matériaux de Construction du Bâtiment. Pourtant, selon un expert de la déconstruction et de la démolition, la principale piste d'amélioration de la circularité des bâtiments porte sur le réemploi et par conséquent sur l'éco-conception facilitant le réemploi en fin de vie. En revanche, la seconde vie du matériau doit permettre une valorisation économique plus importante que la vente du métal en tant que MPR (risque de « trappe au réemploi ») (Entretien d'experts).

- **A moyen terme, les filières dont la fin de vie des produits est gérée par des filières REP devraient progressivement développer le réemploi.**

Certaines filières REP se sont fixées des objectifs de réemploi. C'est le cas de la filière REP PMCB⁵⁰ et la REP DEEE⁵¹. S'agissant par exemple de la REP DEEE :

- La mise en œuvre des fonds réemploi et réutilisation vise à développer le réemploi des appareils et des pièces détachées pour allonger la durée de vie des EEE et, in fine, à réduire les tonnages de DEEE à long terme ;
- L'arrivée de nouveaux acteurs sur le marché de la réparation des EEE comme la grande distribution, devrait également contribuer à l'augmentation du réemploi et de la récupération des pièces détachées dans les EEE d'ici à 2030 (Entretien d'experts).

⁴⁹ En particulier celle instituée par la Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets.

⁵⁰ Arrêté du 10 juin 2022 portant cahier des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment.

⁵¹ Arrêté du 27 octobre 2021 portant cahiers des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques.

3.5. Principal gisement potentiel pour l'acier

Cette sous-partie présente l'un des gisements d'acier ayant un potentiel de recyclage élevé : les Véhicules Hors d'Usage (VHU). Aujourd'hui, une partie importante de ce gisement d'acier est exportée légalement sous la forme de véhicules d'occasion, de carcasses et de pièces. Une autre partie de ce gisement est traitée en France par la filière illégale.

3.5.1. Gisements de Véhicules Hors d'Usage non collectés et exportés

La Figure 28 présente la destination de métaux ferreux contenu dans les VHU en moyenne entre 2017 et 2020 en kt. La note méthodologique de la quantification de ce gisement est disponible en Annexe 8.4.1.1. Le gisement total d'acier dans les VHU s'élève à 1 784 kt, alors que le gisement valorisé en France par la filière agréée est estimé à 1 052 kt, soit une différence de **732 kt de ferrailles** (5,9 % de la collecte de ferrailles pour 2019).

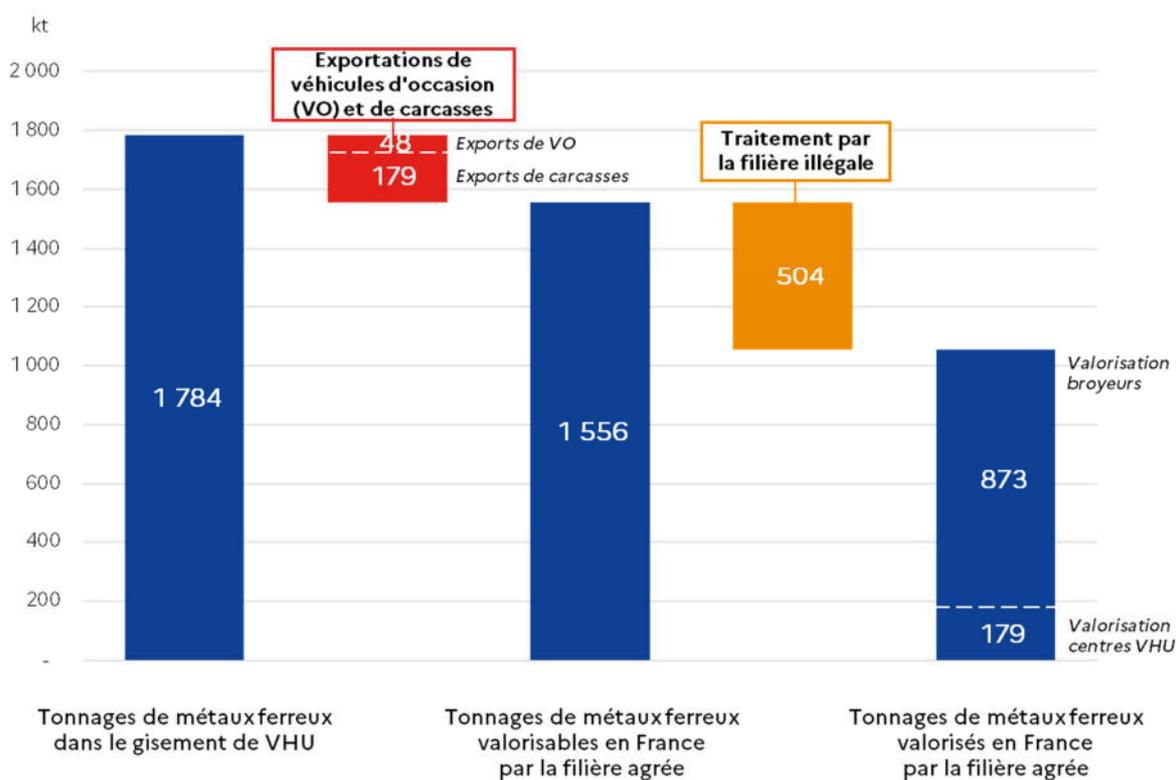


Figure 28 : Destinations des métaux ferreux contenus dans les VHU (moyenne annuelle sur la période 2017-2020, en kt)
(ADEME, 2022 B et Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).

- **Des gisements d'acier sont exportés dans le cadre des exports légaux de Véhicules d'Occasion (VO) et de carcasses.** Des tonnages d'acier sont exportés sous la forme de véhicules d'occasion de carcasses : environ 48 kt d'acier dans les véhicules d'occasion et 179 kt d'acier dans les exports de carcasses (deuxième colonne).
 - Pour les véhicules d'occasion, selon un expert, il s'agit principalement de véhicules haut de gamme achetés en Europe de l'Est ou en Afrique du Nord (Entretien d'experts). Le gisement d'acier dans les VO ne prend pas en compte les exports illégaux, inclus dans le traitement par la filière illégale ;
 - Pour les carcasses, celles-ci sont presque intégralement exportées vers la Belgique et l'Espagne.
- **Des gisements d'acier sont traités et/ou exportés par les filières illégales françaises.** On estime que 504 kt du gisement d'acier est traité par la filière illégale (environ 28 % du gisement, cf.

quatrième colonne). **La part du gisement de VHU traités par la filière illégale est généralement estimée à 30 % du gisement.** Cette filière comprend plusieurs types d'acteurs : particuliers « bricoleurs » ; épavistes ; garagistes ; centres VHU non agréés ; autres. Les centres VHU non agréés peuvent conserver les VHU/carcasses en France ou les exporter. La répartition entre ces deux voies n'est pas connue. Parmi l'acier traité par la filière illégale en moyenne entre 2017 et 2020, une part des volumes sont donc exportés illégalement.

- **Les MPR produites sont généralement exportées ou réincorporées en France dans des applications aux cahiers des charges moins exigeants.** L'ADEME estime que parmi les 1 052 kt de métaux ferreux traités par la filière agréée, **La quasi-totalité des tonnages de métaux ferreux sont valorisés.** En particulier, 82,3 % des tonnages sont valorisés par les broyeurs et 17,7 % sont valorisés par les centres VHU (cinquième colonne).
- Concernant 873 kt de ferrailles valorisées par les broyeurs, il convient de rappeler que **les teneurs en résiduels des MPR sortantes – notamment en cuivre – sont trop élevées pour que ces ferrailles soient réincorporées dans les applications dont elles sont issues.** La Figure 29 montre les flux d'acier impliqués dans la production de nouvelles voitures et le recyclage des véhicules hors d'usage à une échelle mondiale en 2008, superposés à une boucle fermée théorique. Elle indique également les teneurs moyenne en cuivre de l'acier à différentes étapes de la chaîne de valeur de l'automobile ; celle des VHU (environ 0,4 %) est nettement supérieure à la teneur maximale lors de la phase de production d'aciers plats à destination du secteur automobile (environ 0,06 %). Les barres d'armature sont la seule utilisation viable des VHU sans dilution (DAEHN, 2017). Aujourd'hui, ces ferrailles E40 sont généralement incorporées par la filière sidérurgique électrique ou exportées. **A noter que la teneur en cuivre des aciers issus des VHU devrait décroître dans les prochaines années.** En effet, un tri manuel est réalisé systématiquement sur le flux de métaux ferreux séparés par aimantation après le broyage des carcasses de VHU, en vue de limiter la teneur en cuivre de la fraction d'acier E40 destinée aux aciéristes et fondeurs. Des petits moteurs électriques sont ainsi sortis du flux de métaux ferreux pour alimenter les « induits »⁵², qui contiennent environ 20 % de cuivre.

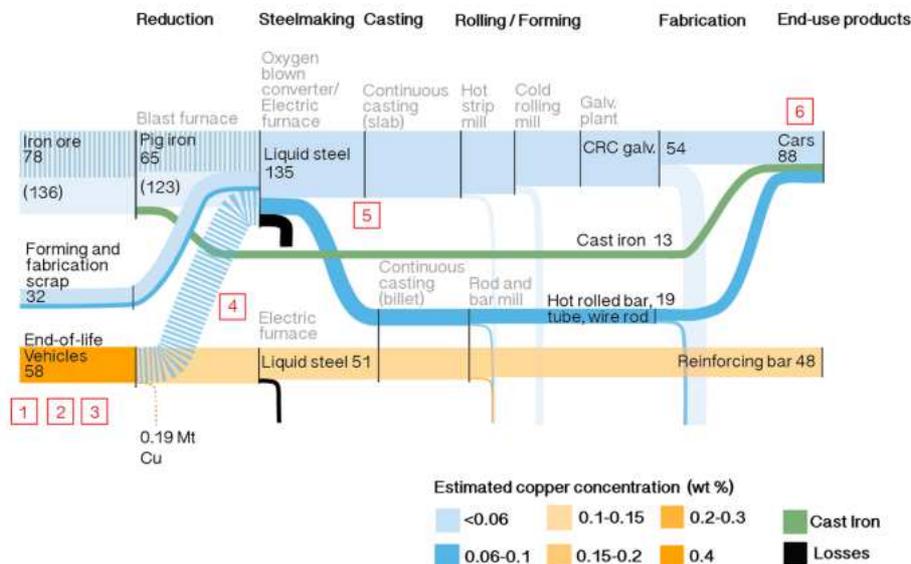


Figure 29: Estimation de la concentration en cuivre de l'acier dans les véhicules par étape de la chaîne de valeur de l'acier (DAEHN et al., 2017)

⁵² Pièces ferro-cuivreuses contenues dans les moteurs électriques, qui peuvent être récupérées lors du tri magnétique.

3.6. Synthèse de l'état des lieux du recyclage de l'acier en France

Il existe trois filières d'incorporation de ferrailles en France :

- La filière sidérurgique électrique s'approvisionne essentiellement à partir de ferrailles et incorpore des ferrailles ayant des teneurs plus élevées en contaminants. Cette filière est la principale filière consommatrice de ferrailles en France ;
- La filière sidérurgique intégrée consomme peu de ferrailles et se positionne sur des ferrailles à faibles teneurs en résiduels ;
- La fonderie s'approvisionne majoritairement à partir de ferrailles, dont la teneur en résiduels dépend des pièces à élaborer.

Aujourd'hui, **les volumes de ferrailles disponibles en France sont nettement supérieurs aux volumes de ferrailles incorporés en fonderie et en sidérurgie**, notamment pour les MPR post-consommation.

La France est aujourd'hui le principal exportateur net de ferrailles parmi cinq pays étudiés. Ce niveau élevé d'exports de ferrailles s'explique notamment par :

- La part élevée de la filière intégrée en France, dont la demande de ferrailles est relativement faible ;
- L'export de ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées vers des pays tiers comme la Turquie, les pays d'Afrique du Nord et l'Inde. Ces exports s'expliqueraient principalement par un manque de débouchés en France pour les ferrailles préparées en France et dans une moindre mesure, selon une partie des acteurs interrogés, par des avantages économiques à la vente de ferrailles cisailées et non broyées à l'étranger plutôt que des ferrailles broyées à des acteurs sidérurgiques et de fonderie français.

Les volumes d'acier produits en Europe devraient rester stables à l'horizon 2030, ce qui s'explique notamment par les prévisions des principaux marchés consommateurs d'acier en France (construction, automobile, etc.).

A l'horizon 2030, **les experts projettent une hausse des volumes de ferrailles incorporés en sidérurgie**, notamment post-consommation, puisqu'il s'agit du principal levier de décarbonation de la production d'acier. En effet, des exigences internes à la filière sidérurgique – notamment réglementaires – et externes – enjeux de décarbonation des filières aval – incitent la filière sidérurgique intégrée française à se transformer. La principale voie de transformation à long terme est le remplacement de hauts-fourneaux par des fours à arc électrique dans le cadre de la voie « DRI à hydrogène », dont le potentiel d'incorporation de ferrailles est supérieur à celui de la filière intégrée actuelle. Le déploiement du « sur-tri » des ferrailles pourrait permettre d'incorporer des volumes plus importants de déchets ayant des teneurs en résiduels plus élevées.

Seule une faible part des déchets pré- et post-consommation d'acier n'est pas collectée aujourd'hui. C'est le cas d'une partie des fondations des bâtiments et des bateaux en fin de vie.

Il existe plusieurs types de freins au recyclage de l'acier en France.

1. **Les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs d'acier contraignent l'incorporation de ferrailles par l'industrie sidérurgique :**

- Certaines exigences techniques de composition des filières aval ne permettent pas d'incorporer des volumes importants de ferrailles, notamment pour la fabrication d'aciers plats. Aujourd'hui, la teneur moyenne en cuivre des déchets post-consommation est nettement supérieure aux teneurs maximales de certains cahiers des charges (emballages, automobile, etc.) ;
- Les exigences réglementaires limitent de plus en plus la teneur en contaminants et s'appliquent à plus de produits (EEE, cuisines professionnelles, emballages, etc.). Elles représentent des contraintes techniques et économiques pour les préparateurs de ferrailles. Par exemple, la teneur maximale en cobalt des aciers inoxydables diminue alors qu'ils en contiennent systématiquement.

2. **Les technologies existantes et en cours de développement ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'exigence dans les conditions actuelles de marché.** Cela entraîne le recyclage en boucle ouverte d'une partie des ferrailles en France :
 - Les ferrailles contiennent régulièrement des contaminants organiques et métalliques (cuivre, plomb, etc.) en raison d'un tri n'allant généralement pas jusqu'au « sur-tri ». Or, en France, seules certaines applications comme le fer à béton permettent d'intégrer en grande quantité ces aciers ayant des teneurs élevées en cuivre, ce qui correspond à un recyclage en boucle ouverte ;
 - Il existe des procédés permettant de diminuer la teneur en contaminant des ferrailles (ex. cuivre des ferrailles E40). Néanmoins, le consentement à payer des incorporateurs de ferrailles n'est pas suffisant pour supporter les coûts supplémentaires liés au déploiement de ces nouvelles technologies chez les préparateurs de ferrailles.
3. **Les ferrailles sont des commodités échangées au niveau mondial.** Elles sont donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et de la demande :
 - Des volumes importants de ferrailles sont vendus légalement à l'exportation, où la demande est plus élevée et où le consentement à payer est plus important. Selon certains experts interrogés, les réglementations environnementales de certains pays tiers leur permettent d'incorporer des ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées ;
 - L'acier est le principal métal utilisé dans les véhicules et dans les EEE. Ainsi, des tonnages élevés d'acier sont exportés par les filières illégales de traitement des VHU et des DEEE.

Les gisements d'acier des VHU illustrent bien ces freins : d'une part, des volumes importants d'acier sont exportés sous la forme de véhicules d'occasion, de carcasses ou de pièces par les filières agréées et illégales, d'autre part, les teneurs en résiduels des MPR d'acier sortantes - notamment en cuivre - sont trop élevées pour que ces ferrailles soient réincorporées dans les applications dont elles sont issues.

4. Etat des lieux du recyclage de l'aluminium en France

Cette partie présente une vision synthétique de la chaîne de valeur de recyclage de l'aluminium en France (4.1), un benchmark européen des imports-exports et de l'incorporation de Matières Premières de Recyclage (MPR) d'aluminium (4.2), les principaux enjeux à 2030 pour le recyclage de l'aluminium (4.3), les freins à son recyclage (4.3.4.2) et les principaux gisements potentiels recyclables pour l'aluminium (4.5).

4.1. Vision synthétique de la chaîne de valeur du recyclage de l'aluminium en France

Les deux filières d'incorporation de matières premières de recyclage d'aluminium sont le recyclage direct, qui s'approvisionne principalement en déchets pré-consommation et en déchets post-consommation de composition homogène, ainsi que la filière affinage, qui s'approvisionne essentiellement en déchets post-consommation pour adresser les besoins du secteur automobile en alliages légers⁵³ (4.1.1). Aujourd'hui, ces deux filières ne permettent pas d'incorporer tous les déchets post-consommation disponibles, et les volumes de MPR d'aluminium disponibles en France sont nettement supérieurs aux volumes de MPR d'aluminium incorporées par les deux filières de recyclage (4.1.2). Les différences entre les volumes de MPR incorporées par les deux filières se répercutent donc tout au long de la chaîne de valeur de l'aluminium (4.1.3).

Une vision détaillée de la chaîne de valeur de l'aluminium est disponible est Annexe 8.2.2.

4.1.1. Présentation des filières et déterminants de l'incorporation de MPR d'aluminium et de la chaîne de valeur de l'aluminium en France

Le recyclage de l'aluminium en France repose sur un équilibre entre le recyclage direct et l'affinage. Ces deux filières permettent de produire de l'aluminium de seconde fusion (ou « aluminium secondaire ») à partir de Matières Premières de Recyclage (MPR).

- **En amont de la chaîne de valeur, les préparateurs de Matières Premières de Recyclage (MPR) jouent un rôle essentiel.**

Ils ont pour objectif de collecter, trier et préparer des MPR d'aluminium correspondant aux cahiers des charges des deux filières incorporatrices. Au total, en 2019, pour tous matériaux, les adhérents de la Fédération professionnelle des entreprises du recyclage (FEDEREC) représentaient 1 200 entreprises, 2 450 établissements et 32 600 emplois directs. En particulier, pour l'aluminium ces entreprises ont collecté 495 kt d'aluminium⁵⁴ (ADEME, 2022 A, d'après FEDEREC) et ont vendu environ 442 kt⁵⁵ de MPR d'aluminium triées en 2019 (Calcul Deloitte d'après FEDEREC, 2020).

Le chiffre d'affaires de la filière Métaux non ferreux de FEDEREC (aluminium, cuivre, plomb, zinc, inox, etc.) a augmenté de 60 % entre 2020 et 2021 en raison de la hausse des tonnages collectés et de la hausse des prix de vente. Celui-ci atteignait 3,9 milliards d'euros en 2021 (FEDEREC, 2022). Pour l'aluminium, les préparateurs de MPR peuvent également être des acteurs de la filière affinage. C'est le cas de Derichebourg Environnement, acteur majeur de l'affinage sur ses sites de Lomme et de Prémery.

Deux filières d'incorporation des MPR d'aluminium existent :

⁵³ Il existe trois types d'alliages légers pour l'aluminium : alliages d'aluminium/silicium ; alliages d'aluminium/cuivre ; alliages d'aluminium/magnésium. Ces alliages ont des propriétés mécaniques de résistance équivalentes aux alliages de métaux ferreux mais sont plus légers. Ils sont résistants à la corrosion et dotés d'une bonne conductivité thermique et électrique (Métallerie Chaudronnerie, 2023).

⁵⁴ Ce chiffre est différent de la collecte apparente pour 2019 (734 kt). La différence s'explique en partie par le fait que toutes les chutes neuves ne transitent pas par les adhérents FEDEREC en raison de contrats de récupération des chutes neuves « en direct ».

⁵⁵ Hors aluminium de moteurs électriques, cf. Annexe 8.2.2.

- **1. Le recyclage direct fabrique des alliages de composition identique à ceux des déchets incorporés.**

Il s'agit généralement de déchets pré- ou post-consommation de composition homogène – d'une même famille d'alliages par exemple, comme les canettes usagées non mélangées avec d'autres déchets d'aluminium (ADEME, 2022 A). Le recyclage direct s'adresse à tous les marchés consommateurs de demi-produits en aluminium : emballages, transports, construction, industries mécaniques, etc.

Les recycleurs direct sont les fabricants de demi-produits en aluminium qui ont investi dans des capacités de production pour incorporer des matières premières de recyclage. En 2019, ils incorporaient environ 290 kt de MPR d'aluminium (Entretien d'experts). Aluminium France recense plusieurs recycleurs directs :

- Constellium sur les sites de Neuf-Brisach et d'Issoire (au total, en 2021, cinq sites en France et 19 sites en Europe, soit 9 718 emplois) ;
- Eurofoil sur le site de Rugles (unique site en France, pour 194 emplois en 2020) ;
- Flandria sur le site de Warneton (unique site en France, pour 170 emplois en 2023) ;
- Hydro sur les sites de Puget et de Lucé (au total, 11 sites pour 1 790 emplois en 2021) (Entretien d'experts).

- **2. La filière affinage incorpore des déchets, chutes, débris, cendres d'aluminium constitués de différents alliages pour en faire de nouveaux alliages correspondant à un cahier des charges.**

Les alliages d'affinage sont dépendants des différents types de MPR disponibles sur le marché des MPR d'aluminium. Le principal marché adressé est l'industrie automobile, en particulier pour la fabrication de blocs moteurs.

Ces fabricants de lingots d'aluminium de seconde fusion incorporaient environ 183 kt de MPR d'aluminium en 2019 (Entretien d'experts). Aluminium France recense :

- AFFIMET, avec environ 50 000 tonnes de lingots produits par an ;
- Affinerie d'Anjou et Sadillek, avec environ 34 000 tonnes de lingots produits par an ;
- Derichebourg Environnement à Lomme (77 400 tonnes de lingots produits par an), et à Prémery (15 000 tonnes) ;
- Loiret Affinage, avec environ 12 000 tonnes de capacité de production ;
- SOREMO, avec environ 50 000 tonnes de lingots produits par an (Aluminium France, 2023 B).

- **En France, des volumes importants de MPR d'aluminium sont collectés et des volumes plus faibles de MPR d'aluminium sont incorporés par les deux filières d'incorporation.**

La Figure 30 synthétise les tonnages d'aluminium produits ou consommés en France en 2019, à chaque étape de la chaîne de valeur du recyclage de l'aluminium, de la production de métal jusqu'à l'incorporation d'aluminium (recyclage direct et affinage). Au total en 2019, la France produisait 893 kt d'aluminium, dont 420 kt en aluminium de première fusion et 473 kt en aluminium de seconde fusion⁵⁶. Le gisement total de MPR d'aluminium en France n'étant pas connu, il n'est pas possible de comparer ce gisement à la collecte apparente de MPR indiquée ci-dessous. Des informations complémentaires sur chaque donnée sont disponibles en Annexe 8.2.1. Ce graphique montre qu'à première vue, des tonnages élevés de MPR d'aluminium sont collectés en France (collecte apparente : 734 kt), mais qu'une part importante de ces MPR n'est pas incorporée par les affineurs et les recycleurs directs en France.

⁵⁶ Définition en Tableau 9

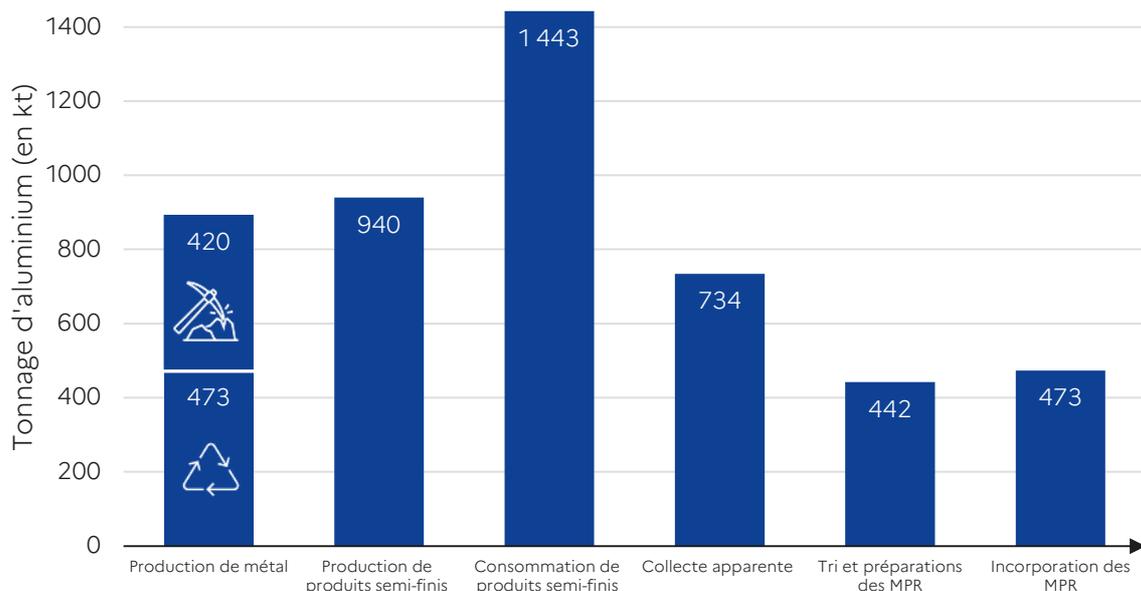


Figure 30 : Synthèse des tonnages d'aluminium en France à chaque étape de la chaîne de valeur (en kt, en 2019). Pour la partie « Production de métal » : partie haute : production minière, partie basse : production issue du recyclage

Une cartographie détaillée de la chaîne de valeur de l'aluminium est disponible en Annexe 8.2.2.

4.1.2. Comparaison entre les MPR d'aluminium disponibles et incorporées aujourd'hui

La Figure 31 compare les volumes de MPR d'aluminium incorporées en France par rapport aux volumes de MPR collectées (c'est-à-dire disponibles) en France en 2019. Le Tableau 9 et le Tableau 10 détaillent respectivement les volumes et types de MPR d'aluminium incorporées en France en 2019 et les volumes et types de MPR d'aluminium disponibles. Aujourd'hui, **les volumes de MPR d'aluminium disponibles en France sont nettement supérieurs aux volumes de MPR d'aluminium incorporées** par les deux filières d'incorporation de MPR.

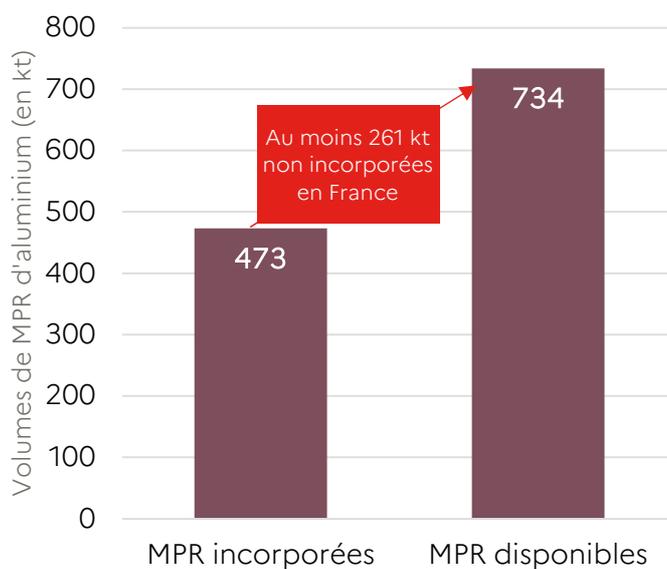


Figure 31 : Volumes de MPR incorporés et disponibles en France en 2019 en kt (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France)

Tableau 9 : Volumes et types de MPR d'aluminium incorporées par filière de valorisation en France en 2019

Aluminium primaire	Aluminium de seconde fusion - Recyclage direct	Aluminium de seconde fusion - Affinage
Production de 420 kt. Peu d'intégration de MPR. (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France)	Production de 290 kt. A partir de MPR et d'aluminium primaire. (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France)	Production de 183 kt. A partir d'environ 95 % de MPR. (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France)
La production d'aluminium primaire incorpore peu de MPR d'aluminium. Par exemple, en 2021, pour le site de TRIMET de Saint-Jean-de-Maurienne, l'alumine représentait environ 288 kt de matières premières, le coke 57 kt, le brai de houille 12 kt et les matières recyclées d'anodes d'origine externe moins d'1 kt (TRIMET, 2022).	MPR d'aluminium incorporées : <ul style="list-style-type: none"> • Déchets post-consommation de composition homogène (ex. canettes des systèmes de consigne pour recyclage) ; • Chutes neuves (issues de clients n'ayant pas de fonderie). (Entretien d'experts)	MPR d'aluminium incorporées : <ul style="list-style-type: none"> • Déchets post-consommation de différents types ; • Aluminium primaire afin de diluer les MPR métalliques si nécessaire.

Tableau 10 : Volumes et types de MPR d'aluminium disponibles en France en 2019

Déchets pré-consommation	Déchets post-consommation
236 kt de chutes neuves de production en 2019 (demi-produits)⁵⁷. (Calcul Deloitte d'après Aluminium France, 2022 et ADEME, 2022 A d'après Aluminium France)	567 kt de MPR produites et vendues en 2021 par les adhérents FEDEREC, dont chutes neuves. (FEDEREC, 2022) ⁵⁸
<ul style="list-style-type: none"> • Chutes des fabricants de demi-produits (réincorporées) ; • Chutes des fabricants de produits finis (réincorporées dans des fonderies internes ou par les fabricants de demi-produits). 	<ul style="list-style-type: none"> • L'aluminium représente 27 % des volumes vendus de métaux non ferreux (1 % câbles et 26 % hors câbles) (FEDEREC, 2022) ; • Plusieurs cotations existent aux niveaux français et européens. Néanmoins, les standards européens identifiés ne sont pas utilisés.

⁵⁷ Modalité de calcul : consommation de métal (1176 kt – Aluminium France, 2022) x part des déchets produits lors de la fabrication de demi-produits* (20 % – ADEME, 2022 A d'après Aluminium France).

*D'après Aluminium France, les déchets produits lors de la fabrication de demi-produits de première transformation représentent 20 % de la consommation de métal. Aluminium France a estimé ce chiffre à partir des déclarations des fabricants de demi-produits (laminés, profilés) (ADEME, 2022 A).

⁵⁸ A noter : Pour 2019, le Tableau 10 indique que 803 kt de MPR d'aluminium sont disponibles (567 kt post-consommation et 236 kt pré-consommation) alors que la Figure 30 indique une collecte apparente d'aluminium de 734 kt. En effet, puisque les adhérents FEDEREC collectent des MPR pré- et post-consommation, certains volumes de MPR pré-consommation ont pu être comptabilisés à deux reprises.

4.1.3. Récapitulatif des principaux demi-produits, produits finis et marchés consommateurs d'aluminium en France

La Figure 32 récapitule les principaux produits (demi-produits et produits finis) en aluminium, ainsi que les marchés consommateurs d'aluminium en France. Une vision détaillée de la chaîne de valeur de l'aluminium est disponible en Annexe 8.2.2.

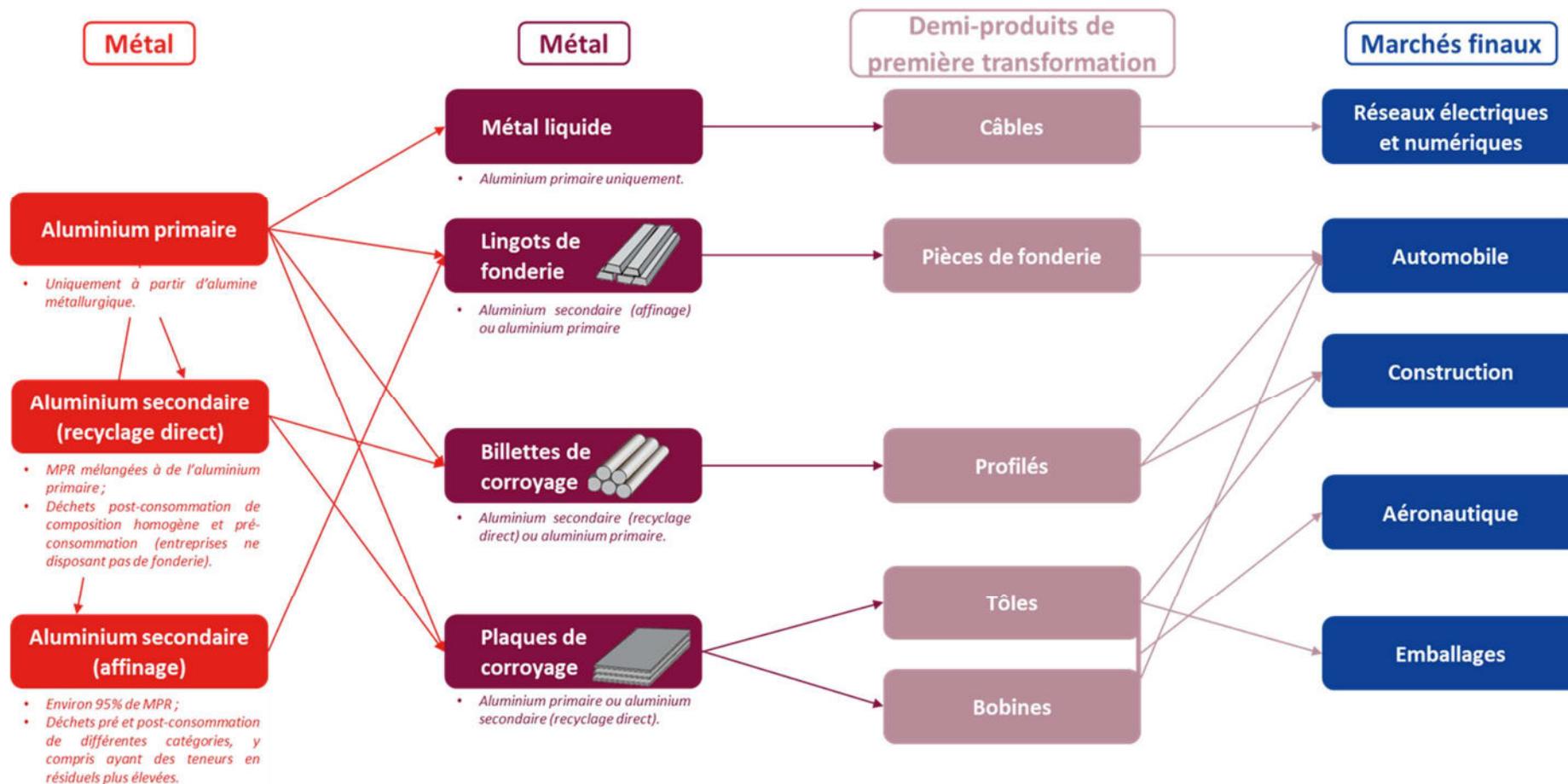


Figure 32 : Représentation simplifiée des principaux demi-produits et marchés consommateurs d'aluminium en France

4.2. Benchmark européen de l'incorporation et des imports-exports de MPR d'aluminium

Cette sous-partie compare la France avec quatre autres pays européens : l'Allemagne, le Belgique, l'Espagne et l'Italie. Il existe quatre codes douaniers relatifs aux imports-exports de MPR d'aluminium (4.2.1).

Pour l'ensemble des MPR d'aluminium échangées (4.2.2), la France est le principal exportateur net et l'Italie est le principal importateur net de MPR d'aluminium, la France exportant majoritairement des MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées (4.2.2.1). Les exportations de MPR d'aluminium des pays étudiés s'orientent majoritairement vers l'Allemagne, qui est l'acteur européen majeur des échanges de MPR d'aluminium en raison sa filière aluminium très développée. Quant aux exportations de MPR d'aluminium vers le « grand export » (Inde, Chine, etc.), celles-ci correspondent majoritairement à la fois à des broyas de métaux non ferreux principalement constitués d'aluminium (zorba) et à des MPR à faibles teneurs en résiduels (4.2.2.2). Bien que la France soit le plus faible contributeur direct au « grand export » parmi les cinq pays étudiés, les trois principales destinations des exports français (Espagne, Belgique, Italie) sont des acteurs du réexport de MPR d'aluminium (4.2.2.3). Au-delà des imports-exports de MPR, les taux d'incorporation de MPR d'aluminium post-consommation et les collectes apparentes de déchets aluminium post-consommation varient selon le niveau de développement de la filière aluminium et, plus particulièrement, de la filière affinage, celle-ci étant proportionnellement plus développée en Allemagne, en Italie et en France (4.2.2.4).

4.2.1. Rappels préliminaires sur les codes douaniers relatifs aux imports-exports de MPR d'aluminium

Il existe quatre codes douaniers sur les échanges de MPR d'aluminium au sens de nomenclature tarifaire et statistique de l' Union européenne :

- 76020011 : Tournures, frisons, copeaux, meulures, sciures et limailles⁵⁹ d'aluminium ;
- 76020019 : Déchets d'aluminium, y.c. les rebuts de fabrication ;
- 76020090 : Débris d'aluminium ;
- 26204000 : Scories, cendres et résidus, contenant principalement de l' aluminium.

A noter : La distinction entre les matériaux couverts par les codes douaniers est parfois complexe, notamment entre les codes 76020019 et 76020090.

⁵⁹ Déchets de différentes opérations de transformation des métaux

4.2.2. Incorporation et imports-exports de MPR d'aluminium

4.2.2.1. Imports-exports de MPR d'aluminium selon le type de MPR échangées

La Figure 33 présente les volumes d'exports de MPR d'aluminium des cinq pays européens étudiés, ainsi que la répartition entre les types de MPR d'aluminium indiqués

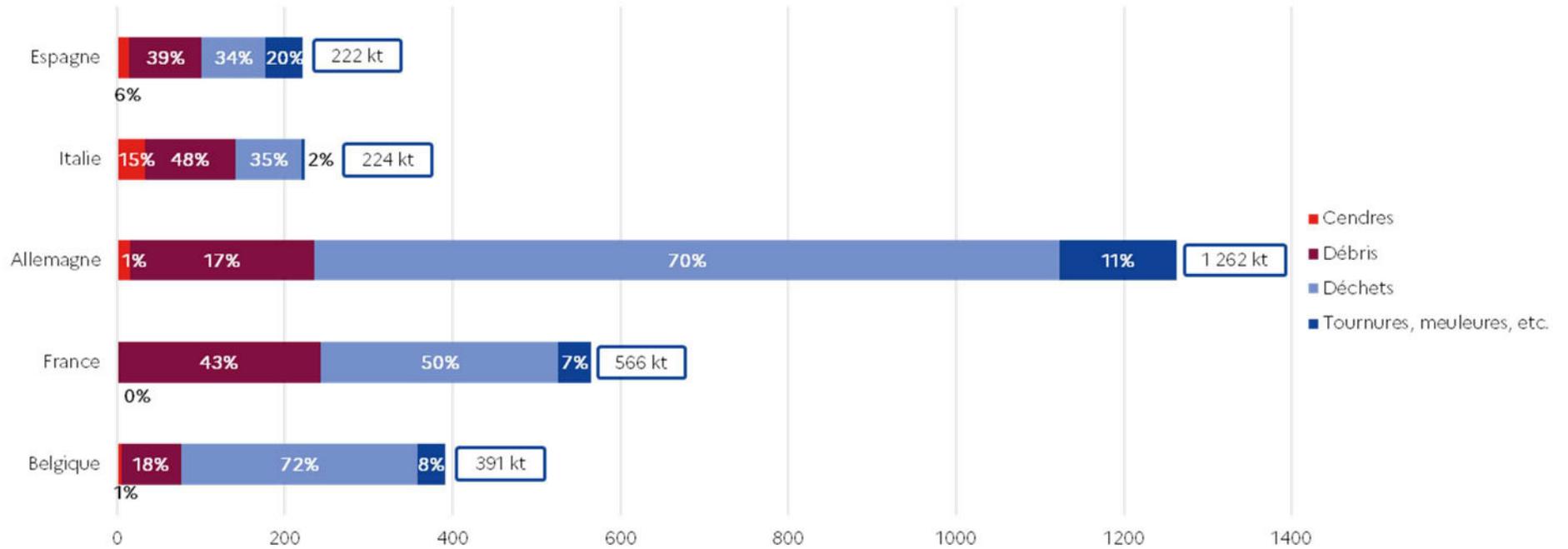


Figure 33 : Répartition des exports de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

ci-dessus. Ces données sont exprimées en kilotonnes pour 2021.

La Figure 34 présente les volumes d'imports de MPR d'aluminium des cinq pays européens étudiés, ainsi que la répartition entre les types de MPR d'aluminium indiqués ci-dessus. Ces données sont exprimées en kilotonnes pour 2021.

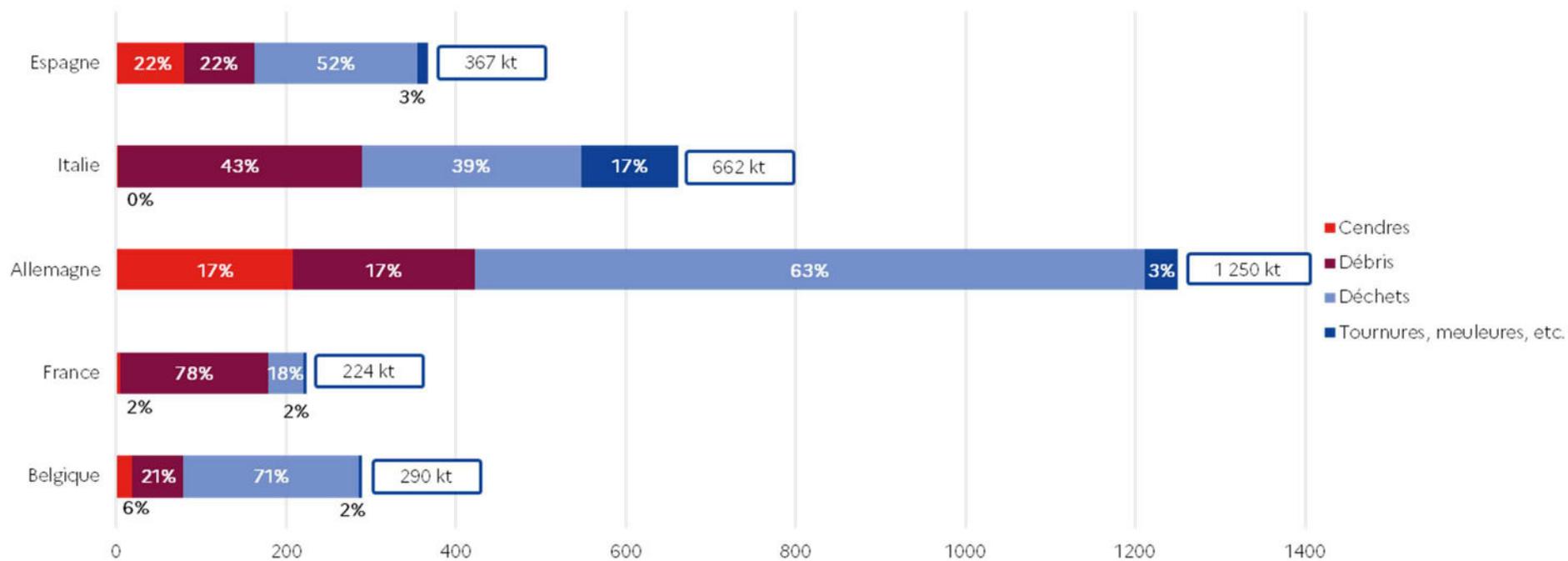


Figure 34 : Répartition des imports de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

La France est le principal exportateur net de MPR d'aluminium, pour plusieurs raisons :

- **Les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs en France** et les teneurs en résiduels des MPR d'aluminium disponibles sont différentes, ce qui contraint l'incorporation de MPR d'aluminium par l'industrie métallurgique(cf. section 4.4.4) ;
- **La demande de MPR d'aluminium est plus élevée à l'étranger** :
 - D'une part, pour les MPR d'aluminium ayant des teneurs faibles en résiduels, le consentement à payer est parfois plus élevé à l'étranger qu'en France, notamment en Asie, mais également en Europe (Italie, Espagne, Allemagne, Belgique, etc.) (Entretien d'experts). Par exemple, la consommation de MPR est plus importante en Allemagne et en Italie, où les capacités de sur-tri seraient plus développées ; ;

D'autre part, pour les MPR d'aluminium ayant des teneurs en résiduels plus élevées, certains pays dont les politiques environnementales sont moins exigeantes que le cadre réglementaire européen sont susceptibles de payer des prix plus élevés (ex. Inde, Turquie, Chine, Pakistan) (Entretien d'experts). En Europe, environ 1 à 1,5 Mt des 10 Mt de MPR d'aluminium produites chaque année sont exportées vers des pays tiers, principalement vers l'Asie du Sud-Est (Entretien d'experts).

L'Italie est le principal importateur net de MPR d'aluminium (+ 438 kt). En effet, bien que le pays ne produise plus d'aluminium primaire sur son sol, il est le deuxième producteur de demi-produits en aluminium et de pièces moulées de l'UE (Cassetta et al., 2019).

4.2.2.2. Imports-exports de MPR d'aluminium selon la provenance et la destination des MPR échangées

Le Tableau 11 et le Tableau 12 indiquent respectivement les destinations des exportations de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 et les provenances de leurs importations de MPR d'aluminium (dont la part de MPR issues et à destination de pays non-membres de l'UE).

Les exportations de MPR d'aluminium des cinq pays s'orientent majoritairement vers l'Allemagne.

Avec 1 262 kt d'exportations et 1 250 kt d'importations, l'Allemagne est l'acteur européen majeur des échanges de MPR d'aluminium. Cela s'explique notamment par la filière aluminium allemande, qui est la plus importante en Europe. A noter qu'en Allemagne, certaines alumineries de première fusion incorporent des MPR. Par exemple, pour l'entreprise TRIMET, le site d'Essen (aluminerie de première fusion associée à une fonderie) incorporait 20,7 % de MPR d'aluminium en 2021 (TRIMET, 2022).

Une faible part des exportations finales de MPR d'aluminium européens (U.E. 27 + Royaume-Uni) ont pour destinations des pays tiers. Les principaux pays représentés sont l'Inde, la Turquie, la Chine et Hong Kong (Entretien d'experts). Ces exportations extra-européennes sont majoritairement constituées de zorba⁶⁰ (Cassetta et al, 2019). A noter que l'aluminium y est ensuite systématiquement recyclé et non enfoui dans des décharges (Entretien d'experts).

Enfin, selon un expert du secteur, les MPR d'aluminium exportées vers les Pays-Bas (troisième destination pour l'Allemagne, cinquième pour la France et deuxième pour la Belgique) sont en partie réexporté vers des pays tiers, puisque l'industrie néerlandaise de l'aluminium est faiblement développée (Aluminium France, 2022 – complément).

⁶⁰ Mélange de déchets de métaux non ferreux broyés issus par exemple des DEEE et des VHU et principalement constitué d'aluminium, mais pouvant contenir d'autres métaux (cuivre, plomb, laiton, zinc, etc.).

Tableau 11 : Destinations des exportations de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).

Espagne		Italie		Allemagne		France		Belgique	
Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)
1. France	35	1. Espagne	42	1. Italie	212	1. Espagne	143	1. Allemagne	98
2. Allemagne	31	2. Allemagne	47	2. Autriche	175	2. Belgique	114	2. Pays-Bas	46
3. Italie	21	3. Autriche	16	3. Pays-Bas	147	3. Italie	105	3. Inde	42
4. Inde	20	4. Inde	15	4. Pologne	105	4. Allemagne	51	4. France	35
5. Chine	16	5. Turquie	13	5. Luxembourg	66	5. Pays-Bas	31	5. Turquie	25
Total	222	Total	224	Total	1 262	Total	566	Total	391
Part hors EU-27	50 %	Part hors EU-27	27 %	Part hors EU-27	21 %	Part hors EU-27	19 %	Part hors EU-27	43 %

Tableau 12 : Provenances des importations de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).

Espagne		Italie		Allemagne		France		Belgique	
Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)
1. France	158	1. Allemagne	211	1. Pays-Bas	259	1. Allemagne	71	1. France	113
2. Portugal	47	2. France	112	2. Pologne	174	2. Espagne	27	2. Pays-Bas	65
3. Italie	45	3. Suisse	55	3. France	116	3. Belgique	26	3. Allemagne	37
4. Allemagne	31	4. Pays-Bas	45	4. Belgique	85	4. Suède	12	4. UK	20
5. Pays-Bas	23	5. Autriche	43	5. Suède	84	5. Pays-Bas	11	5. Australie	18
Total	367	Total	662	Total	1 250	Total	224	Total	290
Part hors EU-27	13 %	Part hors EU-27	15 %	Part hors EU-27	14 %	Part hors EU-27	12 %	Part hors EU-27	20 %

4.2.2.3. Focus sur les exports français de MPR d'aluminium

La majorité des MPR d'aluminium exportées par la France sont des déchets d'aluminium (y.c. rebuts de fabrication) et des débris d'aluminium (Figure 35).

Avec 19 % d'exportations françaises de MPR d'aluminium envoyées à des pays hors UE-27, la France est le plus faible contributeur direct au « grand export » parmi les cinq pays étudiés. Néanmoins, **les trois principales destinations des exports français sont constituées par des acteurs du réexport de MPR d'aluminium** : l'Espagne (taux d'exportation hors UE 27 : 50 %, notamment vers l'Inde et la Chine), la Belgique (43 %, notamment vers l'Inde et la Turquie) et l'Italie (27 %, notamment vers l'Inde et la Turquie) (Eurostat, Données 2021).

La Figure 35 représente les types de MPR d'aluminium que la France a exportées en 2021 (à gauche), la répartition entre les MPR françaises exportées au sein de l'UE et vers des pays hors UE (au centre) et les principaux pays destinataires des MPR d'aluminium françaises (à droite). Ces données sont exprimées en kilotonnes pour 2021.

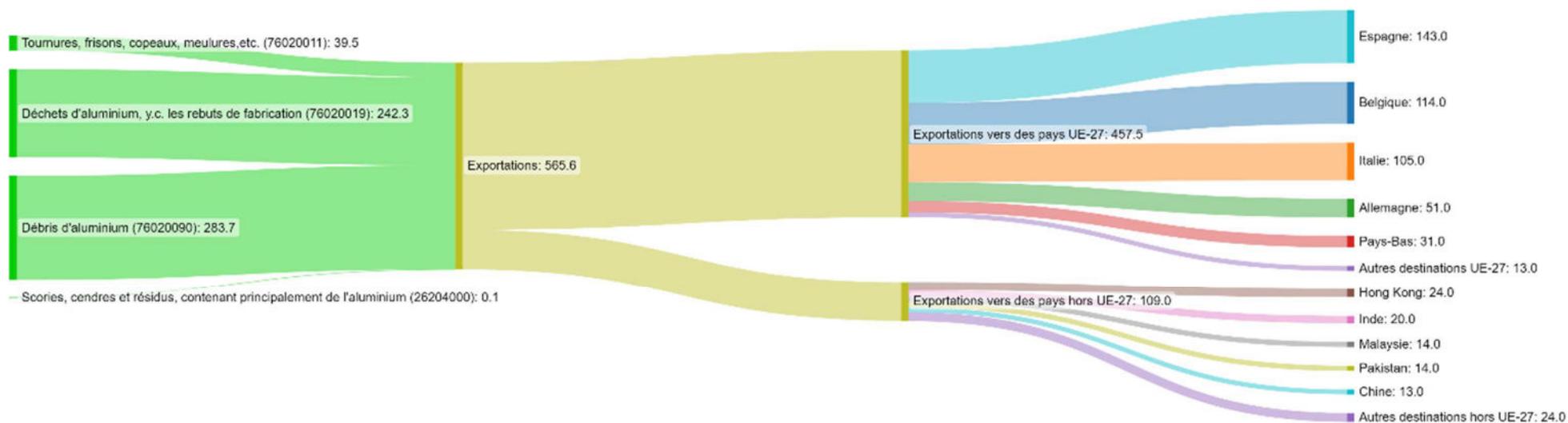


Figure 35 : Représentation des types de flux de déchets d'aluminium français et de leurs premières destinations en kt (Eurostat, Données 2021)

4.2.2.4. Taux d'incorporation de MPR d'aluminium de cinq pays européens

Peu de données sont disponibles sur les deux filières incorporatrices de MPR d'aluminium (recyclage direct et affinage) par pays. Dans le Tableau 13, deux indicateurs ont été estimés à partir des hypothèses suivantes :

- **Taux d'incorporation** : le taux d'incorporation de MPR post-consommation présenté a été calculé comme le produit de la production de pièces moulées et de la part de MPR utilisées en fonderie en Europe (72,4 %⁶¹), rapporté à la production de demi-produits ;
- **Collecte apparente** : La filière affinage incorpore très majoritairement des déchets post-consommation, les statistiques d'imports-exports du code douanier 76020011 (« Tournures, frisons, copeaux, meulures, sciures et limailles d'aluminium ») n'ont pas été prises en compte dans le calcul de la collecte apparente. En revanche, des déchets pré-consommation ont été inclus dans les calculs car le code 76020019 regroupe à la fois des déchets d'aluminium et des rebuts de fabrication (Cassetta et al., 2019 et Eurostat, Données 2017). Il ne s'applique qu'à l'aluminium de fonderie produit par la filière affinage et non au recyclage direct, qui se positionne sur des déchets à faibles taux de résiduels (chutes neuves et déchets post-consommation de composition homogène).

Cette approche permet de constater que l'Italie, l'Allemagne et la France⁶² disposent des principales filières de recyclage d'aluminium par la voie affinage. Plus particulièrement, en 2017, l'Allemagne est le principal producteur d'aluminium de seconde fusion et en produit plus que l'Italie, la France et le Royaume-Uni réunis (Cassetta et al., 2019).

Tableau 13 : Taux d'incorporation de MPR d'aluminium post-consommation et collecte apparente de déchets aluminium post-consommation en 2016 (Cassetta et al., 2019 et Eurostat, Données 2017).

Pays	Taux d'incorporation de MPR post-consommation <i>Production de pièces moulées x % de MPR en fonderie en Europe / Production de demi-produits. Données 2017.</i>	Collecte apparente de MPR post-consommation <i>Collecte apparente = Production de pièces moulées x % de MPR en fonderie en Europe + Exportations de MPR – Importations de MPR. Données 2017.</i>
France	22,7 % (Production de pièces moulées : 337 kt / Production de demi-produits : 1 077 kt)	405 kt (Consommation : 244 kt / Exports : 434 kt / Imports : 273 kt)
Belgique	<i>Non disponible.</i>	<i>Non disponible.</i> (Exports : 308 kt / Imports : 296 kt)
Allemagne	23,0 % (Production de pièces moulées : 1 119 kt / Production de demi-produits : 3 526 kt)	792 kt (Consommation : 810 kt / Exports : 902 kt / Imports : 920 kt)
Espagne	12,4 % (Production de pièces moulées : 131 kt / Production de demi-produits : 764 kt)	-91 kt (Consommation : 95 kt / Exports : 80 kt / Imports : 266 kt)
Italie	28,5 % (Production de pièces moulées : 826 kt / Production de demi-produits : 2 095 kt)	370 kt (Consommation : 598 kt / Exports : 189 kt / Imports : 417 kt))

Les importantes capacités de recyclage de l'Allemagne, de l'Italie et de la France se reflètent également dans le nombre de sites dédiés au recyclage (direct et par affinage). La Figure 36 illustre la répartition des

⁶¹ En 2017, la demande d'aluminium primaire pour les pièces moulées dans l'UE représentait 987 kt, contre 2590 kt d'aluminium secondaire (Cassetta et al., 2019), soit une part de MPR utilisées en fonderie en Europe de 72,4 %.

⁶² A noter : Il s'agit de données 2017. Pour la France, en 2019, le taux d'incorporation de la filière affinage était estimé par le Bilan National du Recyclage à 19,6 %, calculé comme le rapport entre l'incorporation de MPR par la filière affinage (184 kt) et la fabrication de produits de première transformation et de fonderie en aluminium (940 kt) (ADEME, 2022 A).

usines de recyclage de l'aluminium en Europe en 2022, cartographiés par European Aluminium (European Aluminium, 2022 B).

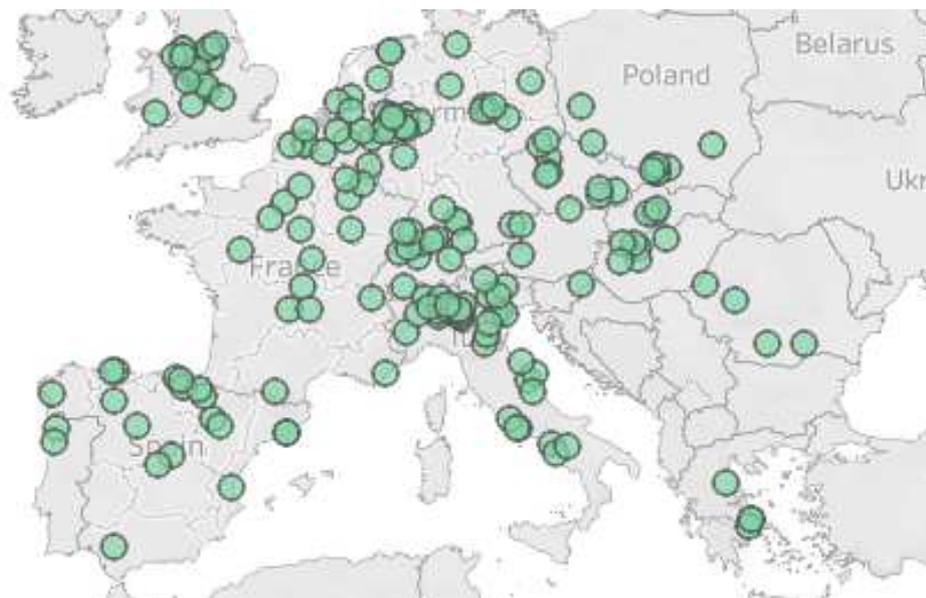


Figure 36 : Carte des usines de recyclage de l'aluminium en Europe (European Aluminium, 2022 B)

4.3. Enjeux à 2030 pour la filière aluminium

Cette sous-partie présente les principaux enjeux pour le recyclage de l'aluminium à l'horizon 2030. Alors que la production d'aluminium devrait connaître une forte augmentation d'ici à 2030, la pression des filières aval pour décarboner l'aluminium sera très forte (4.3.1). Cette pression affectera directement les entreprises métallurgistes par le biais de réglementations (réforme du système d'échange de quotas d'émission, mise en place du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières) (4.3.2). Alors que les fabricants de demi-produits poursuivront leur transformation afin d'augmenter leur consommation de MPR d'aluminium et se décarboner, les débouchés de la filière affinage devraient être restreints à l'horizon 2030 (4.3.3). Les fabricants de demi-produits s'appuieront notamment sur les développements technologiques d'amélioration du tri des déchets post-consommation (spectrométrie XRF et LIBS) pour incorporer davantage de MPR d'aluminium en France. Néanmoins, cette hausse de la consommation de MPR d'aluminium ne permettra pas de couvrir tous les besoins des marchés consommateurs d'aluminium et l'utilisation d'aluminium primaire restera nécessaire (4.3.4).

4.3.1. Tendances de production d'aluminium à 2030

4.3.1.1. Une forte augmentation des volumes produits d'ici à 2030...

- **La demande européenne en aluminium devrait continuer à croître d'ici à 2030.**

La consommation d'aluminium en Europe a augmenté de manière significative depuis 1990 et devrait continuer à croître d'ici à 2030. Le marché européen de l'aluminium pourrait atteindre une demande de 18 Mt à l'horizon 2030, avec un taux de croissance annuel moyen estimé à 1,4 % (Eurométaux, 2022), comme l'indique la Figure 37. La partie grise représente la demande mondiale d'aluminium dans la continuité des politiques actuelles alors que les parties en bleu clair, bleu modérément foncé et bleu foncé représentent les demandes additionnelles d'aluminium dues à des politiques environnementales correspondant faiblement, modérément et complètement aux ambitions de neutralité carbone en lien avec la transition énergétique.

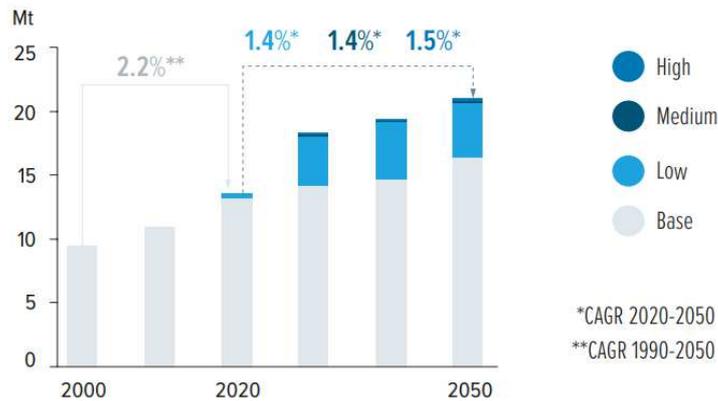


Figure 37: Demande totale d'aluminium en Europe par scénario de transition énergétique (Eurométaux, 2022)

L'adéquation des propriétés techniques de l'aluminium aux exigences de la transition énergétique permet d'expliquer cette tendance. En effet, **les propriétés de l'aluminium** (légèreté, résistance à la corrosion, conductivité, résistance mécanique, etc.) **présentent un intérêt pour de nombreux marchés et conduisent donc à une augmentation de sa consommation.** L'aluminium remplace ainsi et complète progressivement d'autres métaux pour diverses applications.

- **L'automobile, les emballages et le réseau de transport d'électricité sont des secteurs dont la consommation d'aluminium augmentera à l'horizon 2030.**

Pour les **voitures particulières**, European Aluminium et Ducker estiment que le contenu moyen en aluminium augmentera de 205 kg en 2022 à 237 kg en 2026, soit un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 3,7 %, puis à 256 g en 2030, soit un TCAM de 1,9 % (European Aluminium, 2023 C). Cette hausse de la consommation d'aluminium par véhicule produit s'explique par :

- **Une consommation additionnelle d'aluminium pour des usages existants, en substitution à l'acier.** Cela a notamment pour objectif d'alléger les véhicules thermiques (et réduire ainsi leur consommation de carburant) et électriques, et réduire l'empreinte matière de ces derniers. L'augmentation de l'usage de l'aluminium dans certains composants sera élevée entre 2022 et 2030 : caisse en blanc (+15,5 kg par véhicule), châssis (+ 6,4 kg), fermetures (ex. portes, capot, toit, coffre – +3 kg⁶³), etc. ;
- **Une consommation additionnelle d'aluminium pour de nouveaux usages dans le cadre de l'électrification des véhicules.** Les cinq principaux composants qui augmentent le contenu en aluminium sont les boîtiers de groupe motopropulseur électrique (+22,7 kg par voiture entre 2022 et 2023), les boîtiers de batterie (+11,8 kg), les pièces moulées de grande taille et de très grande taille pour les caisses en blanc (+8,4 kg), la protection balistique (+7,0 kg) et les plaques de refroidissement de batterie (+5,1 kg). Tous ces composants sont liés à l'électrification (European Aluminium, 2023 C).

Tous les types et formes d'alliages d'aluminium (cf. Annexe 8.2.2) seront amenés à croître d'ici à 2030 pour l'automobile :

- Les **pièces en aluminium de fonderie**, qui représentent 123 kg par voiture en 2022, représenteront environ 155 kg en 2030. La hausse du contenu en alliages de fonderie s'explique notamment par l'augmentation de la consommation d'aluminium pour les véhicules électriques : nouveaux composants des véhicules électriques (boîtiers de transmission électrique, boîtiers de batteries, boîtiers de dispositifs à haute tension, etc.), pièces des caisses en blanc, etc. Cette hausse surcompense la diminution des composants en alliages de fonderie du groupe motopropulseur (- 16,9 kg par voiture en 2022 et 2030), de la transmission (-10,2 kg) et de la chaîne cinématique (- 0,7 kg) ;
- Les **pièces en aluminium de corroyage laminées**, qui représentent 45 kg en 2022, représenteront environ 59 kg en 2030). Certains nouveaux composants des véhicules électriques (protection

⁶³ L'augmentation de la consommation d'aluminium liée aux fermetures est moindre puisque cette substitution a déjà progressé de 12 kg en 2019 à 18 kg en 2022 (European Aluminium, 2023 C).

ballistique, plaques de refroidissement de batterie) et certaines pièces des portes avant/arrière seront à l'origine de cette hausse ;

- Les **pièces en aluminium de corroyage extrudées/filées**, qui représentent 27 kg en 2022, représenteront environ 42 kg en 2030). Les pièces extrudées sont la forme de produit en aluminium qui connaîtra la croissance la plus rapide en raison d'une pénétration croissante dans les pièces spécifiques aux véhicules électriques (ex. boîtiers de batteries), les pièces de la caisse en blanc (ex. système de gestion des collisions) ou les freins ;
- Les **pièces de forge**, qui représentent 10 kg en 2022, représenteront environ 10,5 kg en 2030).

Pour les **emballages**, la substitution de l'aluminium à l'acier pour les canettes est totale aujourd'hui. D'ici à 2030, l'aluminium pourrait également se substituer au plastique pour les emballages souples en raison de sa recyclabilité plus élevée (Entretien d'experts).

Pour le **réseau de transport d'électricité**, la demande de câbles en aluminium devrait augmenter dans les prochaines années car les câbles en almélec⁶⁴ remplacent progressivement ceux en cuivre pour les lignes électriques aériennes⁶⁵ (Multiples entretiens d'experts). Dans le cadre du Schéma Décennal Développement de Réseau (SDDR), RTE présente deux stratégies prospectives : une « stratégie minimale, dans la continuité des pratiques existantes », ainsi qu'« une stratégie de référence [...] qui intègre l'ensemble des mesures d'amélioration envisagées permettant ainsi d'optimiser le service rendu, les coûts et les incidences environnementales ». La mise en place de **cette stratégie de référence augmente la consommation d'aluminium** liée au réseau de transport d'électricité, comme l'indique la Figure 19 disponible plus haut dans le document (SDDR, 2019). Le prochain SDDR sera publié courant 2024 et révisera ces valeurs à la hausse (Entretien d'experts).

- **La transition énergétique sera donc l'un des principaux leviers d'augmentation de la demande en aluminium en Europe d'ici à 2030.**

Au total, en Europe, la **transition énergétique** à l'horizon 2030 nécessitera à elle seule 4 Mt d'aluminium par an, soit environ un quart de la production européenne d'aluminium aujourd'hui, comme l'indique la Figure 38. Eurométaux précise que les véhicules électriques (en particulier pour l'aluminium de corroyage), le réseau de transport d'électricité et les panneaux photovoltaïques représentent la majorité de la demande additionnelle d'aluminium liée à cette transition à l'échelle mondiale (Eurométaux, 2022).

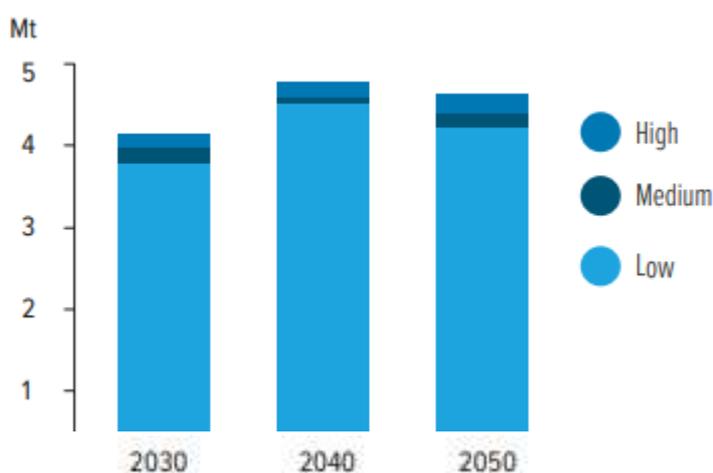


Figure 38 : Demande additionnelle d'aluminium par scénario de transition énergétique en 2030, en 2040 et en 2050 en millions de tonnes (Eurométaux, 2022)

⁶⁴ L'almélec est un alliage d'aluminium, de magnésium et de silicium, principalement utilisé pour la réalisation des lignes électriques aériennes.

⁶⁵ Il convient de préciser que la croissance de la demande de câbles en almélec n'entrave pas celle des câbles en cuivre, qui sont principalement utilisés pour le réseau de transport d'électricité européen et pour les nouvelles infrastructures de transport d'électricité (ex. déploiement de l'énergie éolienne).

4.3.1.2. ... et des attentes renforcées en matière de contenu carbone de la part des utilisateurs en aval

- **D'ici à 2030, la pression des filières aval pour décarboner l'aluminium sera de plus en plus importante.**

A l'horizon 2030, pour atteindre leurs objectifs de neutralité carbone, les secteurs consommateurs d'aluminium devront décarboner leurs activités au-delà du scope 1 (émissions de gaz à effet de serre directement liées à la fabrication du produit) et du scope 2 (émissions indirectes liées aux consommations énergétiques). Ils devront donc **les émissions indirectes à d'autres étapes du cycle de vie** du produit tels que l'approvisionnement, le transport, l'utilisation et la fin de vie (« scope 3 ») dans leurs politiques de décarbonation, et seront donc de plus en plus exigeants vis-à-vis de leurs fournisseurs de demi-produits en aluminium. Selon un refondateur, depuis 2019, le nombre de demandes d'informations des consommateurs d'aluminium relatives au contenu recyclé de demi-produits est restée modérée tandis que celles sur l'empreinte carbone ont augmenté de manière significative, ce qui montre que le sujet est devenu l'une des préoccupations principales des consommateurs finaux (Entretien d'experts).

- **L'incorporation de MPR d'aluminium est le principal levier de décarbonation de la production d'aluminium en France et permet de répondre à la pression des consommateurs d'aluminium.**

D'après la feuille de route de décarbonation de la filière Mines et Métallurgie, en supposant une proportion de 10 % d'aluminium primaire importé et de 90 % de MPR d'aluminium, l'empreinte carbone d'une tonne d'aluminium s'élève en moyenne à 1,3 tCO₂eq, contre 4,5 tCO₂eq pour l'aluminium primaire produit en France et 10,5 tCO₂eq pour l'aluminium primaire importé⁶⁶ (Comité Stratégique de la Filière Mines et Métallurgie, 2021 B). L'aluminium de seconde fusion pourrait ainsi répondre aux attentes élevées des consommateurs d'aluminium en matière de décarbonation de la production d'aluminium.

- **Les politiques de décarbonation portant sur l'empreinte carbone totale des produits finis des consommateurs d'aluminium pourraient donc entraîner une hausse de la demande d'aluminium de seconde fusion.**

Ces entreprises achèteraient des demi-produits de seconde fusion en priorité pour leur faible teneur en carbone, le contenu recyclé étant une considération utile mais secondaire. Ainsi, pour l'aluminium, plusieurs secteurs devraient augmenter leurs consommations de matières premières de recyclage pour décarboner leur production :

- Le **secteur automobile** anticipe une hausse de la consommation de MPR métalliques dans le cadre de la production de véhicules électriques. En effet, le principal enjeu de décarbonation des véhicules électriques au cours de leur cycle de vie porte sur la phase de construction. L'un des leviers d'action sera l'incorporation de MPR métalliques, dont de MPR d'aluminium. (Entretien d'experts) ;
- Le **secteur du bâtiment** sera impacté par la mise en place de la réglementation RE2020, qui vise à diminuer l'impact sur le climat des bâtiments neufs en prenant en compte l'ensemble des émissions du bâtiment sur son cycle de vie. Celle-ci pourrait augmenter l'incorporation de MPR métalliques pour décarboner les bâtiments neufs (Entretien d'experts).

- **De ce fait, il est probable que les différents marchés consommateurs d'aluminium entrent dans une dynamique de concurrence pour s'approvisionner en aluminium bas carbone.**

Ces marchés pourraient entrer en concurrence dans l'optique d'une obligation d'incorporation de MPR métalliques. Ce type d'obligations a notamment été mis en place pour le PET, avec des conséquences qui peuvent être utilement analysées pour comprendre les impacts potentiels qu'auront ces dispositifs sur d'autres commodités, comme les métaux. L'exemple du PET est détaillé en section

⁶⁶ La différence entre l'empreinte carbone de la production d'aluminium primaire en France et à l'étranger s'explique par une source d'énergie largement décarbonée en France.

3.3.1.2.. A noter : il n'est pas entièrement transposable à la filière aluminium, notamment en raison de l'existence de nombreux alliages d'aluminium.

4.3.2. Tendances réglementaires en matière de décarbonation de l'industrie de l'aluminium

Les tendances présentées précédemment s'inscrivent dans un contexte d'augmentation des contraintes en matière d'émissions de CO₂.

4.3.2.1. Le système d'échange de quotas d'émission (SEQE) de l'Union européenne pourrait obliger l'industrie de l'aluminium à accélérer sa décarbonation

Le **système d'échange de quotas d'émission⁶⁷ (SEQE)**, appliquant le « principe du pollueur-payeur », oblige les industries à disposer d'un permis pour chaque tonne de CO₂ émise. En pratique, les entreprises doivent acquérir ces quotas d'émission par le biais d'enchères et leur prix varie en fonction de l'offre et de la demande. Le total des quotas créés par les Etats baisse au fil du temps pour inciter l'industrie à réduire ses émissions. Certains quotas peuvent néanmoins être fournis gratuitement, en particulier aux secteurs pour lesquels il existe un risque que les entreprises déplacent leur production vers des régions aux normes environnementales moins ambitieuses. **Le SEQE s'applique aujourd'hui à 40 % des émissions de l'UE** (Parlement européen, 2023).

Le paquet législatif « Fit for 55 » comprend une évolution du SEQE, qui a été adoptée par le Parlement européen le 18 avril 2023. La réforme prévoit en particulier une **accélération du rythme de réduction des quotas proposés**, avec d'ici 2030 une baisse de 62 % par rapport à 2005, contre un objectif précédent de 43 %. **Les industriels concernés – notamment l'industrie de l'aluminium – devront diminuer drastiquement leurs émissions de gaz à effet de serre.** Outre l'accélération de la réduction des quotas attribués, la réforme du SEQE comprend notamment la suppression progressive des quotas gratuits pour l'industrie d'ici 2034 (Parlement européen, 2023).

4.3.2.2. Le Mécanisme d'Ajustement Carbone aux frontières pourrait contraindre le recyclage de l'aluminium à moyen terme

Le **Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF)⁶⁸** est une régulation des émissions de gaz à effet de serre engendrées par les produits importés en Europe. Il s'agit d'un dispositif destiné à appliquer aux importations européennes les critères du marché du carbone européen, où les industriels de l'UE sont tenus d'acheter des quotas couvrant leurs émissions. En pratique, l'importateur devra déclarer les émissions liées au processus de production et, si elles dépassent le standard européen, acquérir un certificat d'émission au prix du CO₂ dans l'UE. Le MACF augmenterait donc le coût d'importation de produits qui ne respectent pas les critères européens en matière d'émission de CO₂ (Ministère de l'Ecologie, 2023 A).

Ce texte du paquet législatif « Fit for 55 » a été adopté par le Parlement européen le 18 avril 2023. Une période test commencera dès octobre 2023, puis le dispositif montera en puissance entre 2026 et 2034 (Ministère de l'Ecologie, 2023 A).

Pour certains marchés consommateurs d'aluminium telles que les industries mécaniques, **la mise en place du MACF sur les seules matières premières risque d'entraîner des fuites de carbone.** En effet, si les matières premières sont soumises au MACF mais pas les pièces faiblement transformées issues de ces matières, il peut y avoir un écart de compétitivité significatif entre les pièces faites sur le territoire

⁶⁷ Directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans l'Union européenne (UE)

⁶⁸ Proposition de Règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières. COM/2021/564 final ([lien](#))

européen et celles importées. Le règlement prévoit que d'ici à 2026, certains produits situés en aval de la chaîne puissent être ajoutés en annexe pour être soumis au dispositif et prévenir ces fuites de carbone. Selon certains observateurs, l'impact économique du MACF sur le recyclage de l'aluminium doit être évalué (Entretien d'experts).

En définitive, d'ici à 2030, les exigences grandissantes des marchés consommateurs d'aluminium et des législateurs en matière de décarbonation et a fortiori de circularité de l'aluminium – puisque l'empreinte carbone de l'aluminium de seconde fusion est nettement plus faible que celle de l'aluminium de première fusion – imposeront à tous les acteurs la chaîne de valeur de l'aluminium de poursuivre et d'accélérer leur transformation. En première ligne, les fabricants de demi-produits et les préparateurs de MPR métalliques joueront un rôle essentiel pour augmenter l'incorporation de MPR tout au long de la chaîne de valeur de l'aluminium en France.

4.3.3. Une industrie en transformation

4.3.3.1. Les fabricants de demi-produits en aluminium sont appelés à décarboner leurs procédés, notamment en poursuivant le développement du recyclage direct

Comme précisé ci-dessus, d'une part, l'empreinte carbone de l'aluminium secondaire est nettement plus élevée que celle de l'aluminium primaire (français ou importé) et d'autre part, les filières aval des fabricants de produits finis leur font part de nouvelles exigences concernant l'empreinte carbone et le contenu recyclé de leurs demi-produits (Entretien d'experts).

L'incorporation de MPR d'aluminium étant le principal levier de décarbonation de la fabrication de demi-produits (Entretien d'experts), les experts envisagent ainsi une **hausse du taux d'incorporation de MPR d'aluminium** d'ici à 2030 (Multiples entretiens d'experts), par exemple Constellium qui, afin d'augmenter sa capacité de recyclage, a réalisé un investissement de 130 millions d'euros pour installer une nouvelle unité de production dédiée au recyclage de l'aluminium sur son site de Neuf-Brisach. Cet investissement permettra d'atteindre une capacité de production de matières recyclées de 285 kt d'aluminium, contre 175 kt aujourd'hui. D'ici à 2026, pour ses activités en France, la part de déchets de post-consommation dans ses approvisionnements en aluminium devrait donc augmenter (Entretien d'experts).

4.3.3.2. Les débouchés de la filière affinage devraient être restreints à l'horizon 2030

Le modèle économique de l'affinage serait amené à se réinventer pour deux raisons principales.

D'une part, **il existe un risque de déséquilibre entre recyclage direct et affinage**. Les recycleurs directs pourraient se positionner sur de nouvelles catégories de déchets post-consommation. Cette tendance augmenterait le taux de résiduels moyens de MPR incorporées par les affineurs, et donc augmenterait la dilution des lingots d'affinage avec de l'aluminium primaire. L'intensité de ce risque n'est pas perçue de manière identique par tous les acteurs de la filière aluminium. Certains relèvent un risque pour toute la filière, alors que d'autres experts estiment que seuls les MPR d'aluminium secteur du bâtiment seraient concernés. Dans le second cas, le recyclage direct serait la filière la plus adaptée aux exigences de décarbonation du bâtiment et des besoins de recyclage des matériaux en boucle fermée qui en découlent⁶⁹ (Multiples entretiens d'experts).

D'autre part, **le développement de l'électromobilité induit une baisse progressive de la demande en pièces de moteur**. Cela pourrait entraîner une offre excédentaire de déchets mixtes post-consommation nécessitant l'identification de nouvelles applications pour les incorporer en France (Entretien d'experts). Il est à noter ici que les affineurs français sont en grande partie tributaires des évolutions de l'industrie

⁶⁹ En France, la réglementation environnementale RE2020 vise à poursuivre l'amélioration de la performance énergétique et du confort des constructions, tout en diminuant leur impact carbone. L'un des piliers de cette réglementation est de diminuer l'impact sur le climat des bâtiments neufs en prenant en compte l'ensemble des émissions du bâtiment sur son cycle de vie.

automobile, qui représente environ 80 % de leurs débouchés. Or, les principales fonderies automobiles françaises ont disparu au cours des cinq dernières années. Les débouchés en France et en Europe devraient continuer à décroître à l'horizon 2035 avec le projet d'interdiction de la production de nouveaux véhicules thermiques. Les affineurs d'aluminium seraient contraints d'exporter une partie importante des lingots d'aluminium de seconde fusion à des pays tiers (Multiples entretiens d'experts).

4.3.4. Conséquences sur la consommation de MPR d'aluminium et enjeux de circularité de l'aluminium à 2030

4.3.4.1. Des développements technologiques permettront d'améliorer le tri des déchets post-consommation et d'incorporer davantage de MPR d'aluminium en France

Afin d'augmenter la part des déchets post-consommation incorporés en France, **la diffusion de nouvelles technologies** comme les spectrométries XRF (X-Ray Fluorescence, cf. glossaire) et LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, cf. glossaire) **permettrait un tri alliage par alliage** et, in fine, le **recyclage en boucle fermée** de certains types de MPR d'aluminium⁷⁰. A titre d'exemple, l'entreprise canadienne Eco-melt utilise d'ores et déjà des jantes comme intrants, les broie, puis les vend aux fonderies qui peuvent les fondre directement pour fabriquer de nouvelles jantes. Alors que le processus habituel implique de faire fondre les jantes pour produire des lingots, qui sont ensuite refondus, ce processus optimisé permet donc d'économiser une étape de fusion⁷¹. Selon un expert interviewé, cette tendance entraînerait un changement du métier de fondeur, qui devrait désormais s'assurer que la composition de l'alliage est bonne. En parallèle, l'activité d'affinage serait amenée à décroître (Entretien d'experts).

Des filières de recyclage en boucle fermée pourraient également être mises en place pour les **alliages d'aluminium à très haute valeur ajoutée**, qui n'incorporent pas ou peu de MPR d'aluminium à date. C'est le cas pour les câbles usagés en almélec, qui, aujourd'hui, incorporent intégralement de l'aluminium primaire. Afin de développer le recyclage en boucle fermée, des filières de récupération, de tri et d'incorporation de câbles usagés pourraient être mise en place à travers :

- Des contrats fournisseurs entre les consommateurs finaux et les câbliers, en intégrant une clause de récupération des câbles usagés afin d'incorporer une partie de ces câbles dans la production de câbles neufs ;
- La création de filiales par les consommateurs finaux. Celles-ci auraient la charge de la vente de MPR d'aluminium à des câbliers (Entretien d'experts)⁷².

4.3.4.2. Néanmoins, la hausse de la consommation de MPR d'aluminium ne permettra pas de couvrir tous les besoins des marchés consommateurs d'aluminium

Les MPR d'aluminium disponibles ne seront pas suffisantes pour répondre à l'intégralité de la demande des métallurgistes. Comme précisé ci-dessus, une forte augmentation des volumes d'aluminium produits est attendue d'ici à 2030. Ainsi, malgré l'augmentation des volumes de MPR d'aluminium collectés et triés en 2030 (notamment post-consommation), **l'offre de MPR d'aluminium disponibles ne répondra pas intégralement à la demande des consommateurs d'aluminium.** Les différents acteurs de la chaîne de valeur de l'aluminium estiment que la valorisation et la conservation en France des MPR d'aluminium disponibles sur le territoire sera donc indispensable à l'horizon 2030 (Multiples entretiens d'experts).

⁷⁰ La capacité de passage à l'échelle de ces technologies est néanmoins faible à date, notamment en raison de coûts très élevés et d'une productivité faible (Entretien d'experts), cf. section 4.4.3.

⁷¹ Cette optimisation n'est pas possible chez tous les fondeurs, puisqu'elle nécessite l'utilisation d'un type de four particulier, ainsi que l'accès à des volumes suffisants.

⁷² En comparaison, par exemple, les déchets métalliques de RTE sont aujourd'hui découpés par les prestataires travaux sans tri des types de métaux, et stockés dans des bennes DND avant d'être envoyés chez des préparateurs de MPR métalliques, conformément au Guide Déchets de RTE (Entretien d'experts).

La Figure 39 compare, à un niveau européen, la répartition de l'offre de métal entre MPR et MPV en 2019 (première barre) avec des scénarios réaliste et optimiste⁷³ permettant d'incorporer des volumes plus importants de MPR d'aluminium post-consommation en 2030 (deuxième et troisième barres) et en 2050 (quatrième et cinquième barres). En 2030, dans un scénario optimiste, **l'aluminium de seconde fusion (à partir de déchets pré- et post-consommation) a le potentiel de réaliser environ 56 % de l'approvisionnement de l'Europe en 2030** (contre 36 % en 2019), dont 40 % de déchets post-consommation et 16 % de déchets pré-consommation. (European Aluminium, 2022 B).

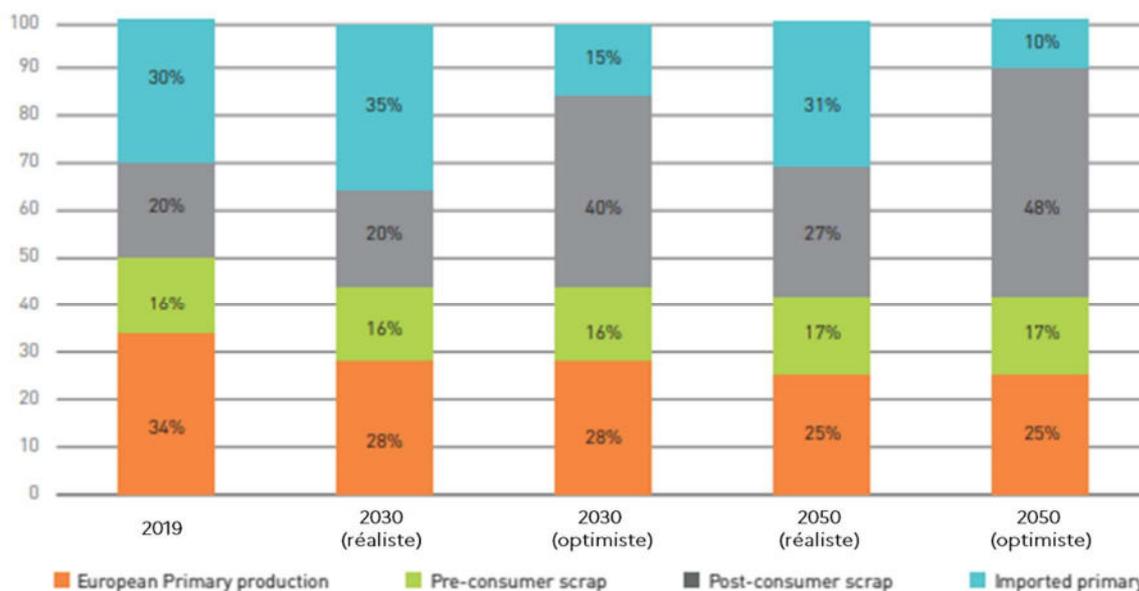


Figure 39 : Répartition de l'offre d'aluminium en Europe en 2019, en 2030 et en 2050 (European Aluminium, 2022 B)

- **Certaines entreprises métallurgistes sécuriseront donc des gisements de MPR d'aluminium pour poursuivre leur décarbonation.**

Afin de répondre à la forte hausse de la demande en MPR d'aluminium attendue, les métallurgistes auront la possibilité de sécuriser des gisements de MPR d'aluminium, sous deux volets majeurs :

- **L'intégration verticale** via le rachat d'entreprises européennes en charge de la collecte et du tri des MPR métalliques ;
- **Le développement de partenariats commerciaux avec des préparateurs de MPR métalliques**, à la manière de la co-entreprise Recycâbles détenue par SUEZ et Nexans.

4.4. Principaux freins au recyclage de l'aluminium

Il existe plusieurs freins au recyclage de l'aluminium en France. Tout d'abord, une partie minoritaire des gisements n'est pas collectée car les coûts de collecte et de préparation des MPR sont plus élevés que leur prix de vente ou car ils sont captés par des filières illégales (4.4.1). L'un des freins majeurs à l'incorporation de MPR d'aluminium tient au fait que les teneurs actuelles en résiduels des MPR, combinées aux exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs d'aluminium, contraignent l'incorporation de MPR (4.4.2). Ces exigences concernent notamment la présence de contaminants métalliques tel que le plomb. Or, les coûts liés au sur-tri des MPR représentent un coût additionnel significatif pour les préparateurs de MPR et les métallurgistes (4.4.3). En parallèle, les MPR d'aluminium sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition

⁷³ Les deux scénarios supposent un recyclage efficace et un taux d'incorporation constant des déchets de pré-consommation. La différence entre les deux scénarios est l'investissement dans des technologies avancées de tri des déchets post-consommation.

géographique de l'offre et de la demande. Le décalage entre la teneur en éléments résiduels des MRP disponibles, et les exigences des cahiers des charges des industries consommatrices en France, La et le consentement à payer plus élevé à l'étranger – notamment en Asie – pour tous types de MRP conduit ainsi à l'export d'une part importante des MRP d'aluminium françaises (4.4.4). Les MPV et les MPR étant des commodités, la structure des marchés de commodités détermine également en partie les volumes de MRP d'aluminium achetées et incorporées en France (4.4.5). Enfin, l'essor du réemploi pourrait contribuer à retarder l'entrée en recyclage des MRP d'aluminium (4.4.6).

A titre liminaire, on rappellera enfin que le recyclage de l'aluminium repose sur un équilibre entre trois paramètres :

- **Disponibilité par rapport à la demande de MPR d'aluminium** : Ce type de Matière Première de Recyclage est-il demandé en France et à l'étranger ? Par quel type d'acteurs métallurgiques ? Est-il disponible en quantités suffisantes par rapport à la demande des métallurgistes ?
- **Prix des MPR d'aluminium** : Quel est le coût de traitement de cette MPR afin qu'elle puisse être réincorporée en France ? Qui porte ce coût de traitement : les préparateurs de MPR métalliques et/ou les incorporateurs ? Est-il plus avantageux d'exporter la matière ou de l'incorporer en France ? A quel prix cette MPR est-elle vendue sur le marché ?
- **Types de MPR d'aluminium** : De quel alliage est constitué cette Matière Première de Recyclage ? Contient-elle des impuretés ? Dans quelles proportions ? Les technologies de tri des préparateurs de MPR permettent-elles d'atteindre les exigences de composition des incorporateurs de MPR ? Dans quelles applications cette MPR peut-elle être réincorporée ?

4.4.1. Une faible part de l'aluminium n'est pas collectée pour des raisons économiques

4.4.1.1. Certains gisements sont non collectés ou non triés en raison de coûts de collecte et de préparation des MPR d'aluminium supérieurs au prix de vente

Une part importante du gisement d'emballages en aluminium (rigides - canettes, aérosols, etc. - et souples - plats, barquettes, capsules, etc. -), **n'est pas collectée aujourd'hui**. En effet, le geste de tri n'est pas systématique, notamment car la consommation du produit contenu dans certains emballages (ex. canettes) est nomade (Multiples entretiens d'experts). La majorité des tonnages d'aluminium recyclés sont issus des mâchefers d'incinération (Citeo et Adelphe, 2022). La section 4.5.2 détaille les gisements d'emballages en aluminium mis en marché, collectés et triés, et valorisés en France.

Des volumes importants d'aluminium sont également non-recyclés car utilisés dans le processus de désoxydation de l'acier⁷⁴. Il est perdu dans le laitier et de ce fait inutilisable pour la filière de recyclage de l'aluminium (Entretien d'experts).

L'hétérogénéité du gisement de MPR métalliques (typologies d'alliages, volumes collectables, etc.) est un frein majeur pour le recyclage des déchets métalliques⁷⁵. Les préparateurs de MPR métalliques n'ont parfois pas d'intérêt économique à déployer des moyens pour collecter et trier des déchets de petite taille ou issus de gisements trop diffus ou des déchets en mélange, notamment présents dans des produits complexes (EEE, véhicules) où la fraction recherchée est mêlée à d'autres matériaux. Par exemple, pour les DEEE, les liaisons entre des matériaux incompatibles pour le recyclage (entre plastique et métaux, entre deux métaux, etc.) dégrade le taux de recyclage des DEEE. Plus un produit est petit, plus les liaisons sont

⁷⁴ Lors de la refusion de l'acier, il est nécessaire de capter et d'enlever l'oxygène. L'aluminium étant un « capteur d'oxygène », il est régulièrement utilisé dans ce processus de désoxydation. Cette utilisation de l'aluminium permet une teneur en résiduels relativement élevée (Aluminium Guide, 2023).

⁷⁵ En Europe, en 2013, on estimait à 31,2 % la part de l'aluminium collecté destiné à l'élimination (sur 4 338 kt d'aluminium collecté, 2 986 kt sont destinées au recyclage et 1 352 kt à l'élimination) (Passerini et al., 2018). Il convient de préciser que les résultats des analyses de flux de matières sont théoriques et qu'il y a toujours une différence entre les quantités estimées et la réalité. Ces estimations reposent notamment sur des hypothèses fortes en matière de durée de vie des produits (Entretien d'experts), non recalculées dans le cadre cette étude.

problématiques. Cela explique que certains DEEE, tels que les écouteurs, soient majoritairement détruits (Entretien d'experts).

4.4.1.2. Il existe un manque de traçabilité de certains flux de produits en fin de vie

Certains produits en fin de vie sont peu traçables, notamment ceux du secteur industrie mécanique (équipements de production, équipements mécaniques, pièces mécaniques de sous-traitance, etc.). En effet, contrairement aux automobiles et aux emballages, ces marchés représentent des applications très diverses avec des durées de vie qui varient d'un produit à l'autre (Multiples entretiens d'experts). Ainsi, il est très difficile de savoir si ces gisements de MPR d'aluminium sont correctement collectés et triés et, in fine, dans quels types d'applications ils sont réincorporés.

4.4.1.3. Des gisements importants d'aluminium sont également collectés, triés et/ou exportés par des filières illégales

L'aluminium est l'un des principaux métaux utilisés dans les véhicules et son usage est croissant. Or, les experts estiment généralement qu'environ 30 % des VHU sont traités par des filières illégales. **Des volumes de plus en plus importants d'aluminium échappent donc à la filière agréée.**⁷⁶ Des volumes d'aluminium traités par les filières illégales sont donc exportés. Ces volumes ne sont pas connus et relèvent uniquement d'estimations. Ce gisement d'intérêt pour améliorer le recyclage de l'aluminium est présenté en section 4.5.1.

4.4.2. Les teneurs actuelles en résiduels des MPR, combinées aux exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs d'aluminium, contraignent l'incorporation de MPR

4.4.2.1. Les exigences techniques des secteurs consommateurs d'aluminium se répercutent dans les cahiers des charges des fabricants de demi-produits en aluminium

- Il existe une large variété d'alliages d'aluminium, ce qui complexifie son recyclage.

La **diversité des typologies d'alliages** (cf. Annexe 8.2.2) est un frein au recyclage en France. Les principales applications incorporant de l'aluminium en France utilisent différents types d'alliages (Figure 40). Ainsi, les recycleurs directs et les affineurs doivent souvent diluer les MPR d'aluminium avec de l'aluminium primaire pour produire des demi-produits correspondant aux alliages souhaités par leurs clients (Entretien d'experts).

Aluminium pur	Canettes	Avions	Bloc moteur
Haute densité	Couvercle :	2% Cu	17% Si
Haute conductivité	2,6% Mg	3% Mg	5% Cu
Résistant à la corrosion	0,25% Cr	6% Zn	0,5% Mg
Mou	Contenant :		1% Zn
	1,2% Mn		
	1% Mg		
Feuille	Cadre de fenêtre	Cadre de vélo	Jantes
>99% Al	0,4% Si	0,6% Si	7% Si
	0,05% Cu	0,25% Cu	0,4% Mg
	0,8 Mg	1,2% Mg	
		0,2% Cr	

⁷⁶ En particulier, une part importante des VHU exportés sont des véhicules « premium », qui sont les véhicules contenant le plus d'aluminium aujourd'hui (Entretien d'experts).

Figure 40 : Alliages d'aluminium utilisés par les différents marchés consommateurs d'aluminium (Material Economics, 2020)

- **Certains de ces alliages ne permettent pas l'incorporation de MPR d'aluminium ou seulement dans une moindre mesure.**

Les secteurs consommateurs d'aluminium (construction, emballages, transports, etc.) ont des exigences techniques variées (résistance mécanique, légèreté, etc.). **Ces exigences se répercutent dans les cahiers des charges des fabricants de produits métalliques** (exigences sur la forme et la composition des alliages) et, in fine, dans les cahiers des charges des préparateurs de MPR d'aluminium.

Les MPR métalliques, du fait de la présence d'éléments résiduels, correspondent rarement aux exigences des incorporateurs de MPR métalliques sans sur-tri et/ou ajout de métal primaire. En particulier, les exigences techniques de certains secteurs consommateurs d'aluminium ne permettent pas d'incorporer des volumes élevés de MPR d'aluminium :

- **Pour les emballages, la teneur en résiduels des tonnages d'aluminium issus des centres de tri n'est pas suffisante** pour qu'ils soient incorporés par des recycleurs directs pour produire de nouveaux emballages de boissons (Multiples entretiens d'experts)⁷⁷ ;
- **Pour le transport d'électricité, les normes internationales de composition des câbles n'ont historiquement pas permis d'incorporer de MPR d'aluminium** lors de la fabrication de câbles en almélec⁷⁸. Une première expérimentation est en cours afin d'évaluer l'impact de l'incorporation de MPR d'aluminium sur la tenue mécanique et sur la conductivité, ainsi que sur l'efficacité des procédés de production des câbles⁷⁹ (Entretien d'experts) ;
- **Pour l'automobile, les alliages de fonderie (ou alliages courants) produits par les affineurs d'aluminium ne correspondent pas aux exigences de certaines applications.** En outre, selon un expert interrogé dans le cadre de l'électrification des véhicules, ils ne seront nécessaires que dans une moindre mesure (carters, casings des batteries, etc.). Une étude pour European Aluminium (2023 C) arrive à la conclusion que les véhicules électriques utiliseront plus d'alliage de fonderies, dans des applications différentes.(Entretien d'experts).

4.4.2.2. Des exigences réglementaires entraînent des coûts additionnels tout au long de la chaîne de valeur du recyclage de l'aluminium

Certaines réglementations visent à réduire les risques des produits contenant des métaux sur la santé et la sécurité des personnes, ainsi que sur l'environnement. Pour ce faire, elles imposent ou devraient imposer des teneurs maximales en éléments contaminants. Par exemple, comme pour l'acier, l'aluminium utilisé pour les emballages est soumis à différentes restrictions : teneur en plomb et en cadmium inférieures à 0,01 %, en arsenic inférieures à 0,03 %, etc. (DGCCRF, 2023). Ces opportunités réglementaires sont néanmoins une contrainte pour le recyclage de l'aluminium, puisqu'elles génèrent des coûts additionnels de « sur-tri » des MPR d'aluminium.

⁷⁷ A noter qu'un appel à projets de CITEO « Amélioration des filières existantes de recyclage des emballages ménagers et papiers graphiques » pour 2023 vise à l'amélioration des filières de recyclage existantes, notamment en améliorant les propriétés du recyclé (ex : aptitude au contact alimentaire) et/ou élargir les débouchés (dont retour emballage).

⁷⁸ Pourtant, les normes internationales sur la composition des alliages précisent la teneur en résiduels et les exigences techniques des métaux, sans préciser la source. L'incorporation de MPR d'aluminium n'est donc pas restreinte de manière réglementaire. L'enjeu d'augmentation de la part de MPR dans l'aluminium consommé par les câbliers est donc plus particulièrement un enjeu de qualification et de performance de tri au préalable, avec les experts techniques et environnementaux (Entretien d'experts).

⁷⁹ En juin 2023, RTE envisageait un taux d'incorporation maximal de MPR d'aluminium autour de 15%. Dans les mois suivants, les bobines de fil machine produites à partir de câbles déposés par RTE seront évaluées par plusieurs câbliers. Ces acteurs tréfileront le fil machine et évalueront la capacité de bobines à s'intégrer dans leurs processus de fabrication, et à satisfaire les spécifications requises (Entretien d'expert).

- **L'ensemble du droit des substances chimiques et, en particulier, l'objectif d'un environnement non toxique (CSS), peut être difficile à concilier avec les contraintes techniques et économiques de l'économie circulaire.**

Les réglementations ci-dessus s'inscrivent notamment dans le cadre de la stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques (CSS – Chemicals Strategy for Sustainability⁸⁰) de la Commission européenne. Sur la question plus spécifique des substances dangereuses, **la CSS propose une nouvelle hiérarchie dans la gestion des produits chimiques** (cf. Figure 25), qui vise à éliminer les substances dangereuses, y compris dans les déchets.

Le recyclage de l'aluminium en France peut être défavorisé pour deux raisons :

- D'une part, **les réglementations produits et déchets sont distinctes**. Si une substance est interdite dans un produit⁸¹, elle ne le sera pas forcément dans le déchet contenant cette substance « héritée ». Or, la dépollution de ce déchet « contaminé » – qui est nécessaire pour le recycler en boucle fermée – est parfois irréalisable d'un point de vue technico-économique. C'est notamment le cas pour la contamination en plomb, qui a été intégré à la liste de restriction de certaines substances dangereuses pour des usages particuliers (Annexe XVI⁸² du Règlement REACH⁸³) et dont la classification à la liste d'autorisation (annexe XIV du même règlement) a été proposée par la Commission européenne, impliquant une interdiction de son utilisation dans les alliages à plus de 0,1% sauf autorisation par la Commission ;
 - D'autre part, **les réglementations produits et déchets sont toutes deux liées à la classification des substances** selon différentes réglementations (REACH, CLP⁸⁴). Lorsqu'un déchet est classifié comme dangereux⁸⁵, alors son recyclage est contraint techniquement et donc financièrement.
- **Ces réglementations pourraient contraindre le recyclage de l'aluminium et entraîner des coûts additionnels tout au long de la chaîne de valeur du recyclage de l'aluminium.**

Il convient également de préciser que **l'offre française de MPR d'aluminium issues des produits en fin de vie correspond aux mises sur le marché d'il y a plusieurs décennies**. Au moment des mises sur le marché, ces exigences réglementaires étaient soit inexistantes, soit moins ambitieuses (Entretien d'experts). Ces gisements de déchets en fin de vie peuvent donc difficilement être recyclés en boucle fermée pour des raisons techniques et financières et sont souvent contraints au recyclage en boucle ouverte en France ou à l'exportation.

⁸⁰ Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques. Vers un environnement exempt de substances toxiques. COM/2020/667 final

⁸¹ Par exemple par la Directive 2011/65/UE du Parlement européen et du Conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (RoHS – Restriction of Hazardous Substances).

⁸² Restrictions applicables à la fabrication, à la mise sur le marché et à l'utilisation de certaines substances dangereuses et de certains mélanges et articles dangereux.

⁸³ Règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) no 793/93 du Conseil et le règlement (CE) no 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission

⁸⁴ Règlement CE 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges (CLP – Classification, Labelling, Packaging).

⁸⁵ Au titre de la liste des déchets européens : Décision de la Commission du 3 mai 2000 remplaçant la décision 94/3/CE établissant une liste de déchets en application de l'article 1er, point a), de la directive 75/442/CEE du Conseil relative aux déchets et la décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux en application de l'article 1er, paragraphe 4, de la directive 91/689/CEE du Conseil relative aux déchets dangereux [notifiée sous le numéro C(2000) 1147] (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) (2000/532/CE)

Ainsi, l'abaissement des teneurs maximales en contaminants pour l'aluminium complexifie souvent sa valorisation (Entretien d'experts). **Ces limites réglementaires peuvent entraîner des coûts additionnels pour les préparateurs de MPR d'aluminium, liés :**

- Au « **sur-tri** » des MPR d'aluminium. Celles-ci doivent alors passer par d'autres étapes de traitement pour correspondre aux cahiers des charges des clients. Ces étapes supplémentaires permettent notamment de retirer une partie du plomb, ce qui s'avère techniquement impossible à partir d'un certain stade⁸⁶ (Entretien d'experts). Comme d'autres métaux, le plomb reste en effet dans le métal après le processus de fusion (cf. Figure 26).
- A l'**augmentation de la consommation de matières premières vierges** pour « diluer » les MPR d'aluminium lorsque les étapes de sur-tri ne permettent toujours pas de respecter les réglementations en vigueur. Dans le cadre de plusieurs entretiens avec différents experts de la chaîne de valeur du recyclage de l'aluminium, **le plomb est ressorti comme un élément problématique**, notamment pour des raisons réglementaires.

4.4.3. Les technologies existantes et en cours de développement ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'exigence dans les conditions actuelles de marché, ce qui entraîne le recyclage en boucle ouverte d'une partie des MPR d'aluminium en France

4.4.3.1. Certaines MPR d'aluminium peuvent difficilement être valorisées via les procédés conventionnels

- **La faible recyclabilité de certains produits contenant des métaux est une contrainte importante à la séparation des différents matériaux.**

En matière d'éco-conception, certains acteurs interviewés estiment que l'appel au *design for recycling* (**conception en vue du recyclage**) n'a pas été pris en compte par de nombreux secteurs consommateurs de métaux. Ce serait notamment le cas de la majorité des constructeurs automobiles pour la conception des véhicules (Multiples entretiens d'experts). Cette faible recyclabilité des véhicules explique que la majorité des éléments en aluminium des VHU sont valorisés par les broyeurs plutôt que par les centres VHU, cf. section 4.5.1. Seule une faible part de ces broyas contenant majoritairement de l'aluminium (le « zorba ») sont incorporés en France.

- **Il existe des contaminants organiques et métalliques, qui contraignent le tri et l'incorporation des MPR d'aluminium.**

Les **contaminants organiques** présents dans les MPR d'aluminium peuvent être problématiques. En effet, les déchets trop mélangés ou combinés avec des matières organiques génèrent des émissions en sortie de cheminée pendant leur traitement chez les affineurs (Entretien d'experts).

Les **contaminants métalliques** ne peuvent pas être, quant à eux, facilement retirés via les procédés conventionnels. La Figure 26 indique ainsi que s'agissant de l'aluminium, certains contaminants – *tramp elements* – métalliques restent dans le métal ciblé. Par exemple, le plomb et le cuivre sont des contaminants des MPR et peuvent limiter leur recyclage dans des usages similaires à ceux du produit d'origine (Entretien d'experts). Le fer est en particulier un contaminant de l'aluminium pour la seconde fusion (Entretien d'experts).

- **La majorité des MPR d'aluminium issues de déchets post-consommation sont réincorporées via l'affinage.**

L'incorporation des MPR d'aluminium de corroyage (*wrought aluminium*) uniquement chez des affineurs pour produire des lingots d'aluminium de fonderie (*cast aluminium*) correspond à un recyclage en boucle ouverte appelé *casting sink*. Il est représenté schématiquement en Figure 41.

⁸⁶ Selon European Aluminium, l'industrie européenne de l'aluminium est aujourd'hui capable d'atteindre des niveaux de plomb de 0,25%, mais ne pourrait réduire la présence de plomb dans les déchets dans les années à venir que dans une moindre mesure (European Aluminium, 2023 B).

Les canettes usagées pourraient théoriquement échapper au *casting sink* et fonctionner en boucle fermée. Cependant, les canettes usagées françaises issues des centres de tri ont des teneurs trop élevées en éléments résiduels pour être réincorporées par les recycleurs directs et sont majoritairement traitées par la filière affinage. Aujourd'hui, selon plusieurs experts, les recycleurs directs français ne seraient en mesure d'incorporer des canettes usagées que dans le cadre de la mise en d'un système de consigne en France, puisque ces gisements séparés à la source présentent des teneurs plus faibles en résiduels (Entretien d'experts).

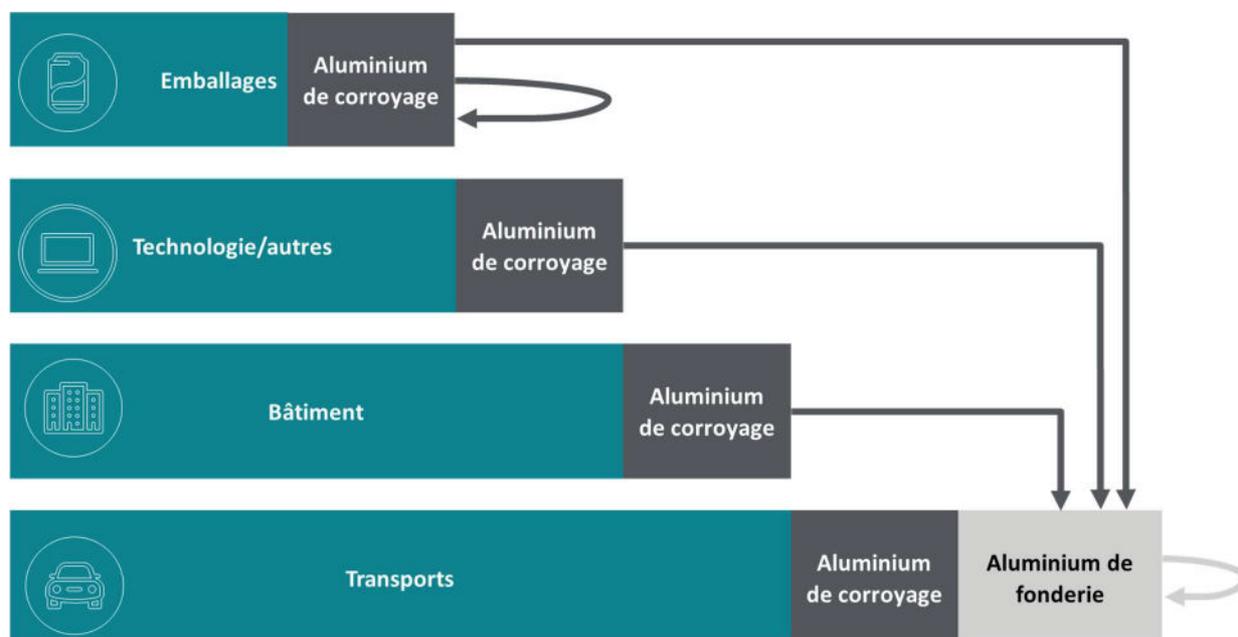


Figure 41 : Représentation visuelle du casting sink pour l'aluminium (Material Economics, 2020)

- **A ces exigences techniques s'ajoutent des exigences de garantie d'un gisement de MPR métalliques stable à long terme.**

Les investissements dans des technologies de recyclage requièrent un gisement stable en volume dans la durée, or il est impossible de garantir un gisement stable de MPR à long terme. En parallèle, les retours sur investissement dans le recyclage peuvent être faibles dans le cas où les produits valorisés sont remplacés par d'autres types de produits. Cela a été le cas pour le recyclage des lampes fluocompactes, pour le recyclage desquelles des investissements importants avaient été financés, avant que celles-ci aient été majoritairement remplacées par des lampes LED (Entretien d'experts).

4.4.3.2. Certaines technologies de pointe de tri sont peu déployées en raison d'une faible productivité et d'un coût élevé

- **Le tri alliage par alliage est essentiel à l'incorporation de MPR d'aluminium par les fabricants de demi-produits .**

Afin que les fabricants de demi-produits en aluminium puissent incorporer une part importante de MPR d' aluminium issus de déchets post-consommation broyés, il est nécessaire que les récupérateurs investissent dans des technologies permettant de **mieux séparer l'aluminium des autres métaux et de mieux séparer les différents alliages d'aluminium**. C'est en particulier le cas pour les VHU, qui contiennent plusieurs types d'alliages d'aluminium : séries 1 xxx, 4 xxx, 5 xxx, 6 xxx, etc.

- **Néanmoins, les technologies de pointe de tri alliage par alliage des déchets métalliques sont peu déployées à une échelle industrielle.**

Des technologies innovantes de tri des déchets aluminium sont en développement, notamment présentées comme « *innovative methods* » dans le Tableau 14. Il s'agit notamment :

- **Du tri par fluorescence des rayons X (XRF) sépare l'aluminium des métaux lourds** (zinc, plomb, etc.) et distinguent les alliages d'aluminium primaires (issus de l'électrolyse) et secondaires (issus du recyclage direct ou par affinage). Les technologies XRF ont été progressivement déployées depuis plusieurs années, avec une productivité allant de 9 t/h à 10 t/h. Néanmoins, cette technologie n'est pas sensible aux distinctions entre les éléments légers, notamment entre l'aluminium, le magnésium et le silicium (très présent dans les alliages de fonderie) ;
- **De la Spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser (LIBS) vise à déterminer les concentrations d'éléments d'alliage dans l'aluminium.** Il s'agit d'une mesure de la composition élémentaire dans laquelle un laser pulsé est dirigé vers la surface d'un échantillon et un plasma est généré (qui incorpore une petite quantité de matériau d'échantillon). Le rayonnement optique du plasma est utilisé pour déterminer les concentrations d'éléments d'alliage dans l'aluminium. La LIBS est une technologie prometteuse pour trier l'aluminium par type d'alliages, une séparation aujourd'hui majoritairement réalisée à la main dans des pays en développement asiatiques (principalement l'Inde, le Pakistan et le Sri Lanka). Néanmoins, un premier écueil est que la productivité de cette technologie est comprise entre 2 t/h et 3 t/h aujourd'hui puisqu'il s'agit d'une analyse pièce par pièce. Un second frein à son déploiement est que la séparation après analyse est binaire⁸⁷, ce qui limite les possibilités de séparation des MPR. En conséquence, **aujourd'hui, aucune ligne de tri dans le monde n'intègre la technologie LIBS à l'état industriel** (Multiples entretiens d'experts).

A noter : Pour la spectrométrie LIBS, des premières innovations industrielles sont en cours de lancement. Par exemple, TOMRA Recycling Sorting a annoncé en juillet 2023 le lancement de la machine AUTOSORT™ PULSE. Selon le constructeur, celle-ci permettrait d'obtenir des taux de pureté supérieurs à 95 % sur les alliages d'aluminium 5xxx (alliage de magnésium) et 6xxx (magnésium-silicium), tout en garantissant « retour sur investissement rapide » (TOMRA Recycling Sorting, 2023).

⁸⁷ Le résultat d'une analyse de classification n'a que deux valeurs possibles : positive ou négative (séparation binaire), ce qui limite les possibilités de séparation. Il existe des prototypes de tri non-binaire, mais, selon un expert, ils ont d'autres contraintes qui ne permettent pas actuellement de lever les limitations sur la productivité (Entretien d'experts, 2023).

A noter Tableau 14 : Méthodes consolidées et innovantes de tri des déchets d'aluminium (Capuzzi et Timelli, 2018)

Méthodes	Type de séparateur	Paramètre physique	Séparation souhaitée	Technologies
Méthodes consolidées	Séparateur magnétique	Susceptibilité magnétique	Fractions ferreuses, alliages Nickel	<ul style="list-style-type: none"> • Tambour magnétique (magnetic drum); • Aimant à bande suspendue (overhead belt magnet)
	Séparateur à air	Masse	Faible densité telle que le papier; plastique mousse	<ul style="list-style-type: none"> • Classificateurs à courant ascendant de type zig-zag (vertical zig-zag); • Table densimétrique (air table); • Couteaux à air (air knives).
	Courants de Foucault	Conductivité	Types non métalliques et métalliques	<ul style="list-style-type: none"> • Séparateur à courants de Foucault; • Système électromagnétique.
	Milieu dense	Densité	Types non métalliques et métalliques	<ul style="list-style-type: none"> • Flottation (soak float – hydrophobicité des surfaces des particules à séparer); • Tamisage par voie humide (wet jig)
	Tri manuel	Aspect	Types métalliques et alliages de corroyage	<ul style="list-style-type: none"> • Opération manuelle
	Séparateur thermique	Point de fusion	Alliages de corroyage	<ul style="list-style-type: none"> • Tri thermique (hot crush)
Méthodes innovantes	Composition élémentaire	Phase vapeur, plasma, énergie des rayons X, énergie des rayons Y	Type d'alliages	<ul style="list-style-type: none"> • Tri par activation de neutrons gamma rapides (PGNAA); • Tri par fluorescence des rayons X (XRF); • Tri par spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser (LIBS).
	Analyse d'image	Couleur et forme	Type d'alliages	<ul style="list-style-type: none"> • Tri de l'aluminium par couleur (color); • Tri de l'aluminium par gravure (etch); • Tri de l'aluminium par forme en 3D (3D shaping).
	Transmissif	Numéro atomique	Type d'alliages	<ul style="list-style-type: none"> • Tri par transmission de rayons X – Analyse de la différence du coefficient d'absorption de masse (XRT)

- **Malgré les investissements des préparateurs de MPR métalliques, ces technologies restent coûteuses.**

Les investissements nécessaires chez les préparateurs de MPR métalliques sont importants et **les coûts supplémentaires liés au déploiement de ces nouvelles technologies peuvent donc être élevés** pour toute la chaîne de valeur de l'aluminium (Multiples entretiens d'experts). Au total, pour la filière MPR métalliques, les investissements des adhérents FEDEREC représentent déjà près de 5% de leur chiffre d'affaires total et plus de la moitié de ces investissements ont pour objectif de moderniser les lignes de tri et de concevoir de nouveaux outils dans un souci d'adaptation au marché et afin de répondre aux catégories de MPR demandées par les consommateurs (installation de lignes de sur-tri, analyseurs XRF overband, etc.).

Les coûts liés au sur-tri des MPR métalliques représentent **un coût additionnel significatif qui pourrait être d'autant plus important pour les acteurs de taille modérée** (PME-ETI – ex. affineurs d'aluminium) qu'ils ne peuvent pas bénéficier des mêmes économies d'échelle que des acteurs mondiaux. Par exemple, pour trier le zorba, des technologies de flottation sont nécessaires. En l'absence de débouchés importants pour la filière affinage, l'investissement dans de nouvelles capacités de tri n'est pas envisageable aujourd'hui. Seule une minorité d'affineurs disposent de ce type de tri (Entretien d'experts).

4.4.4. Les MPR d'aluminium sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et la demande

La section 4.2 détaille les catégories et quantités de MPR d'aluminium exportées par la France, ainsi que les principales destinations des exports français et européens.

- **La demande de MPR d'aluminium et le consentement à payer de certains pays hors-UE peut restreindre le recyclage des MPR en France, à plusieurs égards.**

Tout d'abord, **les volumes d'export sont élevés si les coûts de préparation des MPR d'aluminium sont élevés en France.** Selon un expert, certaines sociétés étrangères « réexportent » des MPR à des pays hors UE car la valorisation matière y est plus efficace via le tri manuel que via le tri mécanique pratiqué en Europe. Bien que les préparateurs de MPR français aient la capacité technique de trier plus finement certaines MPR d'aluminium (ex. lignes de tri du zorba par densimétrie en France), les coûts de traitement et de transport leur imposeraient des marges très faibles. Ces MPR sont donc en partie exportées hors UE par certains acteurs européens. C'est le cas d'une partie du zorba, qui doit être séparé par densimétrie – par exemple par flottation – pour fabriquer du twitch⁸⁸ utilisé par l'industrie automobile (Entretien d'experts).

En particulier, les **coûts de logistique** ont été cités comme un facteur majeur de décision d'export. Pour un collecteur de MPR d'aluminium, il peut être plus intéressant de les exporter :

- Hors UE (au « grand export »), puisque pour des volumes importants, le coût de transport par bateau peut être faible par comparaison avec d'autres coûts de transport⁸⁹ ;
- Vers les pays voisins, si le collecteur de MPR est situé proche d'une frontière (Entretien d'experts).

Ensuite, les volumes d'export sont élevés si le **consentement à payer pour une catégorie donnée** de MPR est plus élevé à l'étranger. Selon un expert de la préparation de MPR métalliques, bien que les qualités des MPR d'aluminium soient équivalentes dans le monde, les prix auxquels ces MPR sont vendues sont très différents. En particulier, la demande asiatique en MPR d'aluminium est très élevée et les consommateurs de MPR d'aluminium asiatiques ont un consentement à payer plus élevé que les consommateurs européens. Pour un même produit, il peut y avoir un écart de prix de vente de 200 à 300 euros par tonne. En Europe, certains recycleurs directs souhaiteraient augmenter leur consommation de MPR d'aluminium mais ont un consentement à payer moins élevé que leurs concurrents asiatiques. En général, les préparateurs français de MPR d'aluminium vendent des MPR en France, en Europe et en Asie, mais lorsque les politiques asiatiques deviennent plus agressives, les exports vers l'Asie peuvent augmenter (Entretien d'experts).

C'est en particulier le cas pour les MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées tel que le zorba. Selon plusieurs experts, **les volumes d'export sont élevés si les pays tiers – et notamment le grand export – peuvent pratiquer le dumping environnemental.** La réglementation française et européenne impose des modalités de collecte, de tri et d'incorporation des MPR exigeantes d'un point de vue environnemental. Certains acteurs industriels interrogés dans le cadre de cette étude estiment que les métaux ne font pas toujours l'objet d'un traitement environnemental comparable à celui réalisé au sein de l'UE (Entretien d'experts).

Les volumes d'export sont également élevés si la consommation de MPR en France est plus faible que dans des pays où les capacités de sur-tri seraient plus développées (ex. Allemagne, Italie). Par exemple, selon deux experts de la filière aluminium, la **demande française lingots d'aluminium d'affinage est de moins en moins importante.** Des volumes importants de déchets d'aluminium post-consommation et

⁸⁸ Le twitch est un type de MPR d'aluminium broyées qui contient généralement plus de 95 % de résidus d'aluminium. Il s'agit du résultat de la séparation par milieu dense (flottation, fluorescence des rayons X – XRF –, etc.) du zorba, qui permet d'éliminer les éléments plus légers et plus lourds que l'aluminium

⁸⁹ A titre d'exemple, selon un expert, affréter un camion coûtera en moyenne 2 000 €, alors que le remplissage d'un conteneur coûtera en moyenne 1 500 € (Entretien d'experts).

de lingots d'affinage sont donc exportés vers d'autres pays. Les affineurs d'aluminium exportent notamment des lingots vers l'Italie, où les constructeurs automobiles ont conservé des fournisseurs de rang 1 (équipementiers qui ont des relations contractuelles directes avec l'entreprise automobile) et de rang 2 (équipements sous-traitants), qui sont plus à même d'incorporer des lingots d'aluminium issus de l'affinage (Multiples entretiens d'experts). Ce frein soulève un enjeu sous-jacent de **disparition des filières de fonderie en France**, notamment automobiles. Bien que Stellantis dispose encore de fonderies dans la région de Sochaux, ce n'est plus le cas pour Renault (Multiples entretiens d'experts).

- **Les exports de MPR d'aluminium en mélange pourraient continuer à croître dans les prochaines années, renforçant ainsi ce frein au recyclage de l'aluminium.**

Cet élément est d'autant plus important qu'à long terme, en Europe, les volumes de déchets d'aluminium contenus dans les VHU seront supérieurs à la demande de pièces moulées en Europe, cf. Figure 42. La demande européenne de déchets post-consommation ne permettrait pas d'incorporer l'intégralité de ces MPR. Les volumes de zorba seraient exportés en dehors des frontières européennes (Inde, Chine, etc.) continueraient alors de croître.

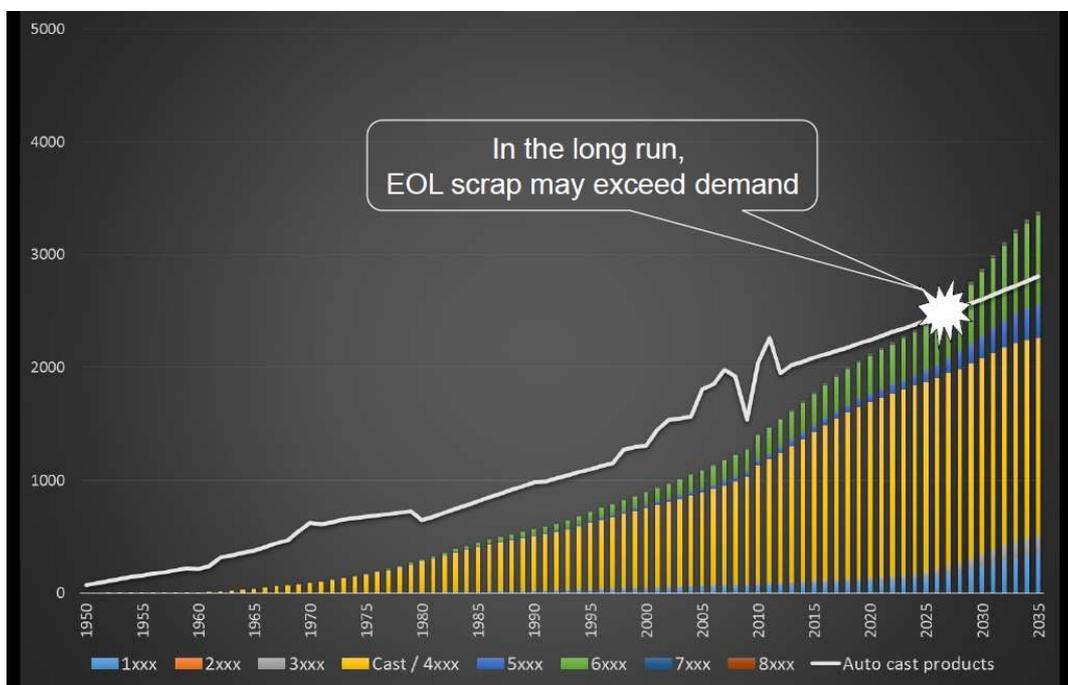


Figure 42 : Évolution des volumes de déchets d'aluminium contenus dans les VHU, classés par familles d'alliages, par rapport à la demande de pièces moulées en Europe – en kt (Constellium, 2019)

4.4.5. Les prix des matières premières et de l'énergie jouent un rôle important et peuvent constituer un frein au recyclage de l'aluminium en France

Cette section récapitule les principaux déterminants des prix, du type de MPR et de la disponibilité des métaux. Il s'agit de généralités communes à tous les métaux de base, qui s'appliquent donc au recyclage de l'aluminium. Les matières premières vierges et les matières premières de recyclage étant des commodités, **l'offre et la demande des agents, ainsi que les défaillances éventuelles des marchés déterminent en partie les volumes de MPR d'aluminium achetés et incorporés en France.**

En particulier, l'évolution des prix des MPV et l'évolution du prix de l'énergie sont déterminants pour inciter à la collecte, à la valorisation et à la réincorporation des métaux en France. On peut estimer que, jusqu'à présent, ces fondamentaux n'ont pas favorisé un plus haut niveau de recyclage en France.

En effet :

- **Historiquement, la fixation des prix des métaux a en partie échappé aux acteurs du marché mondial en raison d'événements politiques majeurs et d'événements propres aux matières premières métalliques.**

L'US Geological Survey souligne que les principaux facteurs historiques qui ont influencé les prix de l'aluminium ont été les **événements internationaux majeurs ayant un impact macro-économique tels que les guerres et les récessions**, les événements nationaux majeurs tels que la dissolution de l'Union soviétique en 1991 et la croissance économique de la Chine, qui a commencé avec la politique de la porte ouverte dans les années 1970 mais n'a pas eu d'impact significatif sur le marché jusqu'au début des années 1990. **Les prix de l'aluminium ont également évolué en fonction d'événements spécifiques aux matières premières**, tels que les modifications des droits de douane, les changements d'utilisation des métaux et les grèves dans les mines (USGS, 2007).

- **Certaines défaillances de marché contraignent l'achat et l'incorporation de MPR d'aluminium.**

Le marché des Matières Premières de Recyclage peut présenter des **défaillances de marché**, c'est-à-dire des situations dans lesquelles le fonctionnement du marché échoue à produire un équilibre économique entre offre et demande de MPR d'aluminium. En outre, **le commerce des MPR – notamment des MPR d'aluminium – peut entraîner des coûts de recherche et de transaction importants**. Les marchés sont souvent diffus ou occasionnels et, dans certains cas, ils comprennent des acteurs ayant peu d'expérience du marché. Dans ces conditions, il peut être difficile pour les acheteurs et les vendeurs de se rencontrer. Lorsqu'ils y parviennent, les efforts déployés pour convenir d'un prix «équitable» peuvent être considérables en raison de la nature hétérogène et incertaine des produits échangés. Bien que ces coûts diminuent avec le temps, ils peuvent constituer des obstacles importants pendant une période longue. Par exemple, les marchés de certains types de déchets de construction et de démolition présentent des coûts de recherche et de transaction élevés (OCDE, 2006).

- **Ces dernières années, le prix des matières premières vierges a augmenté, ce qui rend les MPR d'aluminium plus compétitives.**

Si les prix des matières premières vierges diminuent, les métallurgistes sont moins incités financièrement à incorporer des MPR d'aluminium. A titre indicatif, depuis la pandémie du covid-19, le prix de la tonne d'aluminium a progressivement augmenté, passant de 1704 \$ en 2020 à 2 473 \$ en 2021, puis à 2 705 \$ en 2022. Cette hausse du prix des matières premières vierges a rendu les matières premières de recyclage plus compétitives pour l'industrie de l'aluminium (Banque mondiale, 2023). Néanmoins, une diminution du prix des matières premières vierges aurait pour conséquence de rendre les MPR d'aluminium moins compétitives⁹⁰. Plusieurs éléments déterminent le prix des matières premières vierges :

- **La demande interne chinoise.** La Chine est à la fois un débouché majeur et un producteur important de matières premières. Ainsi, si la demande interne chinoise diminue, les exportations chinoises augmentent et les prix chutent au niveau mondial. C'est notamment le cas pour l'aluminium. Ainsi, une baisse de la demande chinoise de matières premières vierges entraîne une baisse des prix de l'aluminium issu de MPV pour les métallurgistes européens et, indirectement, entraîne une incitation à l'incorporation de matières premières vierges pour les métallurgistes (Jégourel, 2016 A) ;
- **La financiarisation des marchés des matières premières.** Ce phénomène correspond à l'externalisation d'une partie du risque de prix sur les marchés financiers. Des dynamiques spéculatives peuvent alors influencer en partie le prix des matières premières. Comme pour toute matière première, plus la volatilité anticipée des prix des MP métalliques est élevée, plus les acteurs financiers sont réticents à investir dans ces matières premières et plus le prix de ces

⁹⁰ A noter que pour l'aluminium, bien que les prix des MPR soient généralement inférieurs à ceux des MPV, certaines MPR peuvent être parfois coûteuses, à des niveaux similaires au cours du London Metal Exchange. C'est notamment le cas des alliages Aluminium-Magnésium-Silicium (AGS), utilisés par exemple par les producteurs de fenêtres (Entretien d'experts).

matières premières diminue. Ainsi, cette volatilité se répercute indirectement dans l'incorporation de matières premières de recyclage : si les marchés financiers contribuent à diminuer le prix des matières premières vierges, alors leur incorporation par les métallurgistes va augmenter et ceux-ci seront moins incités à incorporer des MPR d'aluminium.

- **En parallèle, les prix de l'énergie ont fortement augmenté ces dernières années⁹¹. En cas de diminution de ceux-ci, les acteurs du marché seraient moins incités à incorporer des MPR.**

L'évolution des prix de l'énergie joue un rôle important et peut constituer un frein au recyclage des métaux en France. La production de matières premières vierges métalliques étant très énergivore, une baisse des prix de l'énergie entraîne une baisse du coût de ces matières et contribue à les rendre plus attractives économiquement que les MPR métalliques. A noter que **l'impact de l'évolution des prix de l'énergie dépend du mix énergétique et des réglementations en vigueur de chaque pays**. Les pays où le coût de l'énergie est plus faible peuvent être avantagés pour le traitement des MPR d'aluminium.

4.4.6. Le développement du réemploi reporte la disponibilité des MPR d'aluminium

Alors que certaines filières ont historiquement favorisé le réemploi pour des raisons économiques, d'autres filières ont toujours privilégié le recyclage. Ces dernières seront néanmoins amenées à développer le réemploi dans les prochaines années dans le cadre des filières REP.

- **Certaines filières favorisent le réemploi, pour des raisons économiques et réglementaires.**

Le réemploi est placé plus haut que le recyclage dans la hiérarchie des modes de gestion des déchets⁹² puisqu'il prolonge la durée de vie des produits, diminue l'utilisation de matières premières et réduit la production des déchets. **Le réemploi retarde donc l'entrée en recyclage des MPR métalliques.**

Certaines filières favorisent historiquement le réemploi par rapport au recyclage, pour des raisons économiques et réglementaires. En particulier, **la pratique du réemploi pour des raisons économiques a été soulignée pour les industries mécaniques**, qui consomment des volumes non négligeables d'aluminium. L'une des particularités des biens d'équipement (machines et travaux publics) est qu'une part importante des pièces est réemployée ou réutilisée. Les parties métalliques ne pouvant pas faire l'objet d'une nouvelle utilisation sont recyclées. Néanmoins, certains équipements en fin de vie échappent à la filière légale de recyclage et sont exportés. Leur devenir (recyclage et réemploi) n'est pas connu (Entretien d'experts).

- **Pour les autres filières, les procédés de valorisation actuels favorisent le recyclage plutôt que le réemploi.**

Pour l'automobile, en 2020, 31 % des centres VHU agréés n'ont pas démonté de pièces de réutilisation. Cela signifie qu'une majorité de centres VHU (69 %) démontraient des pièces sur les VHU qu'ils prennent en charge pour les revendre comme pièces d'occasion. Il reste néanmoins que les volumes extraits sont limités. En moyenne, pour chaque VHU traité, 82,4 kg de pièces ont été démontées pour réutilisation, alors que la masse moyenne d'un VHU était de 1 126 kg (ADEME, 2022 B).

Pour le secteur du bâtiment, il n'existe pas à date de référentiel technique pour réemployer les Produits et Matériaux de Construction du Bâtiment. Pourtant, selon un expert de la déconstruction et de la

⁹¹ A titre indicatif, le prix du gaz naturel en Europe est passé de 3,24 dollars par MMBtu (millions de BTU - British Thermal Units) en 2020 à 16,12 dollars par MMBtu en 2021, puis à 40,34 dollars par MMBtu en 2022, le prix du pétrole brut (moyenne) est passé de 39,3 dollars par baril en 2020 à 69,1 dollars par baril en 2021, puis à 97,1 dollars par baril en 2022 et le prix du charbon australien est passé de 60,8 dollars par tonne en 2020 à 138,1 dollars par tonne en 2021, puis à 344,9 dollars par tonne en 2022 (Banque mondiale, 2023).

⁹² En particulier celle instituée par la Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets.

démolition, la principale piste d'amélioration de la circularité des bâtiments porte sur le réemploi et par conséquent sur l'éco-conception facilitant le réemploi en fin de vie. En revanche, la seconde vie du matériau doit permettre une valorisation économique plus importante que la vente du métal en tant que MPR (risque de « trappe au réemploi ») (Entretien d'experts).

- **A moyen terme, les filières dont la fin de vie des produits est gérée par des filières REP devront progressivement développer le réemploi.**

Certaines filières REP se sont fixées des objectifs de réemploi. C'est le cas de la filière REP PMCB⁹³ et la REP DEEE⁹⁴. S'agissant par exemple de la REP DEEE :

- La mise en œuvre des fonds réemploi et réutilisation vise à développer le réemploi des appareils et des pièces détachées pour allonger la durée de vie des EEE et, in fine, à réduire les tonnages de DEEE à long terme.
- L'arrivée de nouveaux acteurs sur le marché de la réparation des EEE comme la grande distribution, devrait également participer à augmenter le réemploi et la récupération des pièces détachées dans les EEE d'ici à 2030 (Entretien d'experts).

4.5. Principaux gisements potentiels pour l'aluminium

Cette sous-partie présente les deux principaux gisements d'aluminium ayant un potentiel de recyclage élevé :

- **Les Véhicules Hors d'Usage (VHU).** Aujourd'hui, une partie importante de ce gisement d'aluminium est exportée légalement sous la forme de véhicules d'occasion, de carcasses et de pièces. Aujourd'hui, le zorba extrait des carcasses broyées n'est incorporé en France que dans une moindre mesure par la filière affinage. Par ailleurs, une autre partie de ce gisement est traitée en France par la filière illégale ;
- **Les emballages usagés.** Leur taux de recyclage matière était de 58 % en 2021. En amont du tri, la majorité des emballages en aluminium collectés étaient issus des mâchefers d'incinération. En aval du tri, le recyclage des canettes et autres emballages en aluminium est en réalité un recyclage en boucle ouverte puisqu'il est impossible de créer de nouvelles canettes en aluminium à partir des canettes récupérées et valorisées via la filière affinage.

4.5.1. Gisements de Véhicules Hors d'Usage non collectés et exportés

La Figure 43 présente les destinations de l'aluminium contenu dans les VHU en moyenne entre 2017 et 2020 en kt. La méthodologie de quantification de ce gisement est disponible en Annexe 8.4.1.1. Le gisement total d'aluminium dans les VHU s'élève à 139 kt, alors que le gisement valorisé en France par la filière agréée est estimé à 82 kt, soit une différence de **57 kt de MPR** (7,8 % de l'aluminium collecté en 2019).

⁹³ Arrêté du 10 juin 2022 portant cahier des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment.

⁹⁴ Arrêté du 27 octobre 2021 portant cahiers des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques.

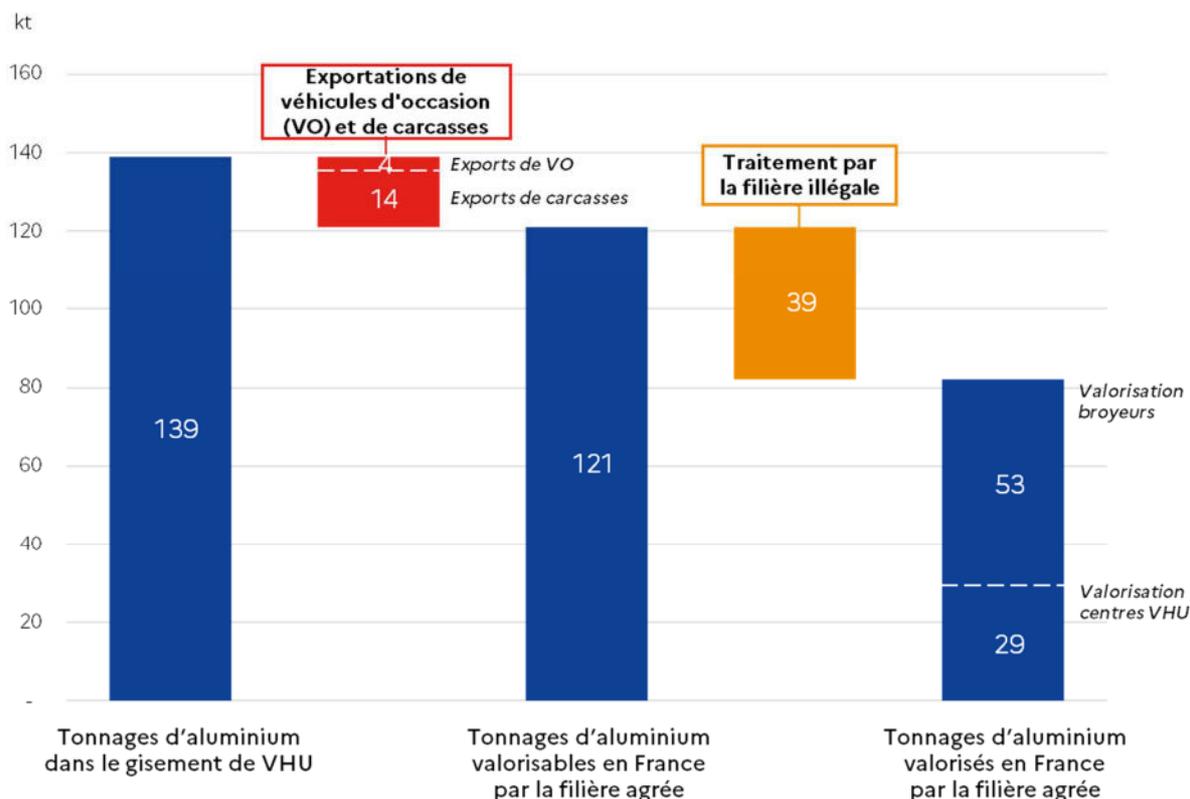


Figure 43 : Destinations de l'aluminium contenu dans les VHU (moyenne annuelle sur la période 2017-2020, en kt) (ADEME, 2022 B et Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).

- **Des gisements d'aluminium sont exportés dans le cadre des exports légaux de Véhicules d'Occasion (VO) et de carcasses.** Des tonnages d'aluminium sont exportés sous la forme de véhicules d'occasion de carcasses : environ 4 kt d'aluminium dans les véhicules d'occasion et 14 kt d'aluminium dans les exports de carcasses (deuxième colonne).
 - Pour les véhicules d'occasion, selon un expert, il s'agit principalement de véhicules haut de gamme achetés en Europe de l'Est ou en Afrique du Nord (Entretien d'experts). Le gisement d'aluminium dans les VO ne prend pas en compte les exports illégaux, inclus dans le traitement par la filière illégale ;
 - Pour les carcasses exportées, celles-ci le sont presque intégralement vers la Belgique et l'Espagne.
- **Des gisements d'aluminium sont traités et/ou exportés par les filières illégales françaises.** On estime que 39 kt du gisement d'aluminium (quatrième colonne) est traité par la filière illégale (environ 28 % du gisement). **La part des VHU traités par la filière illégale est généralement estimée à 30 % du gisement.** Cette filière comprend plusieurs types d'acteurs : particuliers « bricoleurs » ; épavistes ; garagistes ; centres VHU non agréés ; autres. Les centres VHU non agréés peuvent conserver les VHU/carcasses en France ou les exporter. La répartition entre ces deux voies n'est pas connue. Parmi l'aluminium traité par la filière illégale en moyenne entre 2017 et 2020, une part des volumes est donc exportée illégalement.
- **Les MPR produites sont généralement exportées ou réincorporées en France dans des applications aux cahiers des charges moins exigeants.** Les MPR sortantes (ex. zorba, twitch⁹⁵)

⁹⁵ Le twitch est un type de MPR d'aluminium broyéesbroyée qui contient généralement plus de 95 % de résidus d'aluminium. Il s'agit du résultat de la séparation par milieu dense (flottation, fluorescence des rayons X – XRF – , etc.) du zorba, qui permet d'éliminer les éléments plus légers et plus lourds que l'aluminium.

sont estimées à 82 kt, dont 53 kt par les broyeurs et 29 kt par les centres VHU. En particulier, les MPR produites par les broyeurs peuvent être :

- Exportées (entre 20 % et 30 % des flux européens de MPR d'aluminium broyées d'après un entretien d'experts) vers des pays où le secteur automobile est plus dynamique (ex. Italie) ou des pays tiers ;
- Incorporées par les affineurs pour produire des pièces moulées, comme des blocs moteurs (entre 70 % et 80 % des flux européens de MPR d'aluminium broyées d'après un entretien d'experts). Renault ou Stellantis, sont les principaux consommateurs de lingots d'affinage du secteur automobile en France (Entretien d'experts).

4.5.2. Gisements d'emballages usagés non collectés et exportés

La Figure 44 présente les destinations des emballages en aluminium en 2021 en kt. La note méthodologique de la quantification de ce gisement est disponible en Annexe 8.4.2. Pour rappel, gisement d'emballages en aluminium se subdivise entre les emballages rigides (canettes, aérosols, etc.) et les emballages souples (plats, barquettes, capsules, etc.). Aujourd'hui, on estime les tonnages mis sur le marché à 84 kt et les tonnages valorisés en France à 26 kt, soit une différence de **5758 kt de MPR** (7,8 % de l'aluminium collecté en 2019).

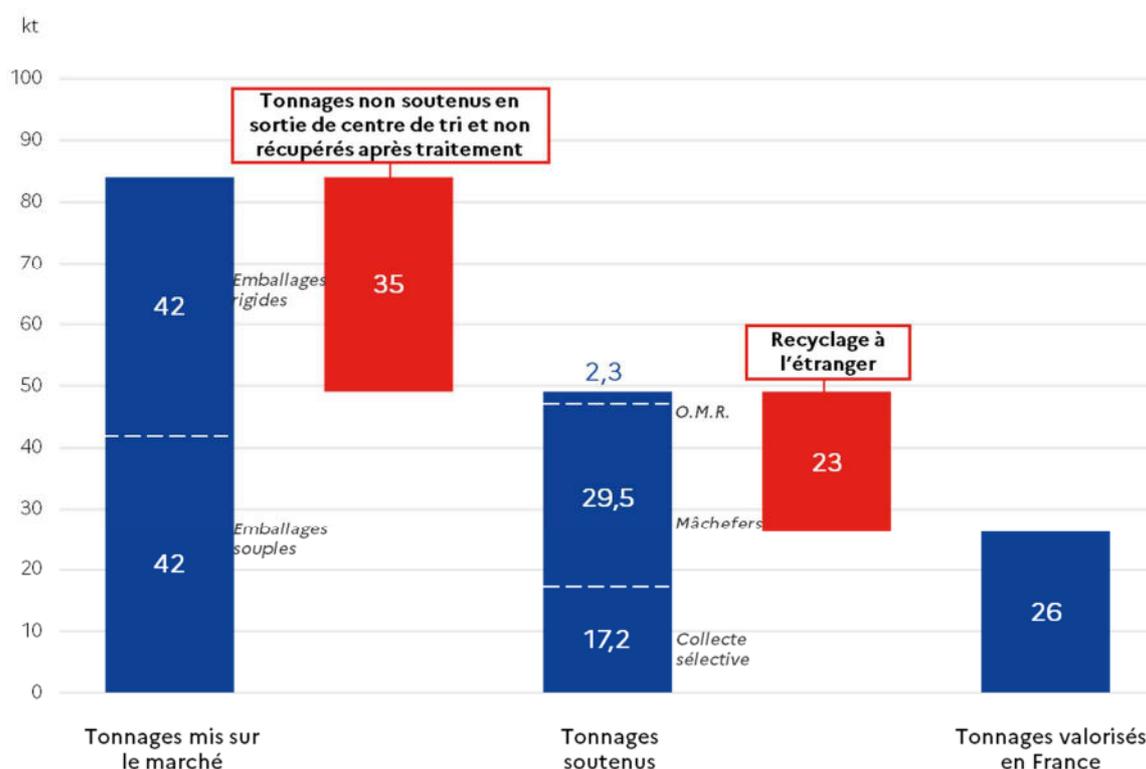


Figure 44 : Destinations des emballages en aluminium en 2021 en kt (Deloitte d'après CITEO, 2022 et CITEO et Adelphe, 2022)

- **Une part importante des tonnages d'aluminium des emballages sont non soutenus en sortie de centre de tri et non récupérés après traitement.**

Pour l'aluminium, le taux de recyclage matière⁹⁶ est de 58 % en 2021, soit un volume de tonnages soutenus d'environ 49 kt (troisième colonne). Une partie des emballages en aluminium n'est donc pas recyclée c'est-à-dire que ces emballages ont été mis en marché mais n'ont pas été collectés ou n'ont pas été

⁹⁶ Le taux de recyclage matière est le rapport entre les tonnages des déchets d' emballages ménagers soutenus en sortie de centre de tri ou récupérés après traitement et le tonnage d' emballages contribuant (Ministère de l' Ecologie, 2016).

récupérés par les centres de tri ou en sortie des mâchefers. En effet, comme précisé plus haut, la consommation nomade de produits contenus dans un emballage en aluminium (ex. canettes) explique qu'une part importante de ces gisements ne soient pas collectée.

Aujourd'hui, **la majorité des emballages en aluminium sont recyclés sous forme de mâchefers d'incinération**⁹⁷. Ils ressortent à la base du four et sont constitués des restes de combustion et des matériaux incombustibles. Le traitement par tri densimétrique (flottation) permet de séparer les nodules d'aluminium des métaux denses (cuivre, laiton, zamak⁹⁸, inox) et des stériles (Derichebourg Environnement, 2023), ce qui représente environ 29,5 kt d'aluminium en 2021.

Les volumes élevés d'aluminium récupérés en sortie d'incinération s'expliquent notamment par le niveau de modernisation des centres de tri. Ces centres de tri ne valorisent en 2021 qu'une faible part de l'aluminium collecté à date (2,3 kt de déchets issus des ordures ménagères résiduelles⁹⁹ et 17,2 kt de déchets issus de la collecte sélective). Ce chiffre devrait augmenter au fil des années. En effet, l'aluminium peut y être extrait manuellement par un opérateur de tri ou mécaniquement par une machine à courant de Foucault (MCF), **l'extraction mécanique permettant de récupérer des volumes plus importants d'aluminium que l'extraction manuelle**. Aujourd'hui, tous les centres de tri sont équipés de MCF qui trient les « gros aluminiums » mais certains centres ne sont pas équipés de MCF qui trient l'aluminium dans les « refus de tri » issus des diverses opérations de tri. Cela explique l'existence du Projet Métal, qui vise à installer des machines à courants de Foucault sur les « refus de tri » pour mieux capter les petits emballages en aluminium¹⁰⁰ (Derichebourg Environnement, 2023). En janvier 2023, 49 centres de tri étaient équipés, soit 30 millions de Français bénéficiaires du Projet Métal (Projet Métal, 2023).

Cette amélioration continue des technologies de tri concerne plus particulièrement les emballages souples. **Les tonnages soutenus d'aluminium souples augmentent fortement** en raison de la modernisation des centres de tri, de l'extraction des petits aluminiums sur les fines¹⁰¹ ainsi que de l'extension des consignes de tri contribuent à cette augmentation (CITEO et Adelphe, 2022). En 2009, l'aluminium faisait partie des matériaux d'emballages les moins bien valorisés avec un taux de recyclage matière de 32 % (Projet Métal, 2023). Ce taux atteint 58 % en 2021.

- **Aujourd'hui, près de la moitié des emballages usagés récupérés ne sont pas conservés en France.**

Avant leur incorporation en fonderie sous forme de lingots ou sous forme liquide, les MPR peuvent être traitées par deux filières :

- **Pour les aluminiums rigides, les centres d'affinage broient et purifient ce type de déchets d'aluminium.** Ces emballages peuvent être traités par certains affineurs français ;
- **Pour les aluminiums souples, les usines utilisant un procédé de pyrolyse chauffent ces aluminiums à 500°C** dans un environnement pauvre en oxygène afin d'en extraire des MPR nettoyés (Citeo, 2022). Cette étape de procédé a majoritairement lieu en Allemagne, dans les usines d'Alunova Recycling et de Pyral, et de manière minoritaire en France, par RVM (Recherche et Valorisation des Métaux).

Au total, environ 26 kt d'aluminium issu des emballages ont été valorisés en France en 2021 (cinquième colonne).

⁹⁷ Résidus qui subsistent après la valorisation énergétique des ordures ménagères

⁹⁸ Alliage à base de zinc, contenant également de l'aluminium, du magnésium et du cuivre

⁹⁹ Par exemple, les centres de traitement mécano-biologique (TMB) extraient des éléments recyclables issus des ordures ménagères résiduelles avant de produire de l'énergie et/ou du compost.

¹⁰⁰ Le Projet Métal est issu de trois ans d'expérimentation menées par le CELAA, qui ont permis d'établir la faisabilité technique, l'intérêt économique et la pertinence environnementale de la récupération de l'aluminium et de l'acier issus des refus dans les centres de tri. Il a été lancé par le CELAA, CITEO, l'AMF et le Fonds de dotation pour le recyclage des petits aluminiums créé par Nespresso (Projet Métal, 2023).

¹⁰¹ En centre de tri, les fines sont les sous-produits du traitement de déchets solides et sont issues des différentes étapes de tri. Elles forment un mélange très hétérogène de matériaux.

En particulier, le recyclage des canettes est en réalité un recyclage en boucle ouverte puisqu'**il est impossible de créer de nouvelles canettes en aluminium à partir des canettes récupérées et valorisées via la filière affinage**. En effet, les centres de tri récupèrent très peu de canettes usagées, la majorité des flux entrants correspondant à des déchets plastiques et papiers-cartons. Au total, l'aluminium ne représentait qu'environ 1,60 % du gisement d'emballages en 2021¹⁰². Par ailleurs, ces centres de tri n'ont pas tous investi dans des technologies permettant une réduction des teneurs en contaminants organiques et métalliques des canettes usagées permettant leur incorporation par des recycleurs directs (Entretien d'experts). Ce sont donc les affineurs qui incorporent les MPR d'aluminium issues de canettes. Ils adressent principalement le marché de l'automobile (Entretien d'experts).

4.6. Synthèse de l'état des lieux du recyclage de l'aluminium en France

Il existe deux filières d'incorporation de MPR d'aluminium en France :

- La filière de recyclage direct (ou seconde fusion) s'approvisionne en déchets pré-consommation et en déchets post-consommation de composition homogène. Cette filière est la principale filière consommatrice de MPR d'aluminium en France ;
- La filière affinage produit des lingots d'aluminium de seconde fusion pour l'industrie automobile à partir de déchets pré- et post-consommation de différents types.

Aujourd'hui, **les volumes de MPR d'aluminium disponibles en France sont nettement supérieurs aux volumes de MPR d'aluminium incorporés par les deux filières de recyclage.**

La France est aujourd'hui le principal exportateur net de MPR d'aluminium parmi 5 pays étudiés. Ce niveau élevé d'exports s'explique notamment par :

- Une inadéquation entre les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs en France et les teneurs en résiduels des MPR d'aluminium disponibles, qui contraint l'incorporation de MPR d'aluminium par l'industrie métallurgique ;
- Un consentement à payer plus élevé en Europe et surtout en Asie pour tous types de MPR d'aluminium. L'aluminium y est systématiquement recyclé grâce à des procédés manuels (pour des MPR à teneurs élevées en résiduels) ou via des procédés technologiques (ex. séparation par densimétrie).

La demande en aluminium est amenée à augmenter d'ici à 2030, notamment sous l'effet de :

- Sa substitution à d'autres métaux pour diverses applications : emballages, automobile, câbles, etc. ;
- Son utilisation croissante dans les technologies de la transition énergétique : véhicules électriques, réseau de transport d'électricité, panneaux photovoltaïques, etc.

Afin de répondre à cette demande additionnelle tout en décarbonant l'industrie de l'aluminium, à l'horizon 2030, **les experts projettent une hausse des volumes de MPR d'aluminium incorporées en métallurgie**, notamment post-consommation. En effet, des exigences internes à l'industrie de l'aluminium – notamment réglementaires – et externes – enjeux de décarbonation des filières aval – incitent l'industrie de l'aluminium française à se transformer. Les stratégies de décarbonation et de sécurisation des gisements des acteurs métallurgiques devront notamment passer par les **politiques d'investissement des recycleurs directs**, en déployant de nouvelles infrastructures de recyclage direct afin d'augmenter la part de déchets de post-consommation dans leurs approvisionnements en aluminium. En amont de la chaîne de valeur, les préparateurs de MPR métalliques devront jouer un rôle essentiel en diffusant de **nouvelles technologies de tri** comme les spectrométries XRF et LIBS, qui permettent un tri alliage par alliage et, in fine, un recyclage en boucle fermée. Les déchets en mélange aujourd'hui exportés seraient donc conservés en France.

Seule une faible part des déchets pré- et post-consommation d'aluminium n'est pas collectée aujourd'hui. C'est notamment le cas d'une partie des emballages. Il existe toutefois plusieurs types de freins au tri et à la réincorporation de l'aluminium en France.

¹⁰² En 2021, le gisement était estimé à 5 263 kt, dont 84 kt d'aluminium

Tout d'abord, **les teneurs actuelles en résiduels des MPR, combinées aux exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs d' aluminium, contraignent l' incorporation de MPR :**

- Les exigences techniques de certains secteurs consommateurs d' aluminium permettent d' incorporer des volumes faibles (emballages, automobile) voire nuls (câbles) de MPR d' aluminium ;
- Les exigences réglementaires génèrent des contraintes techniques et économiques pour les préparateurs de MPR d' aluminium. Par exemple, des teneurs maximales en plomb¹⁰³ leur impose de trier plus finement les déchets d' aluminium pour en retirer le plomb, ce qui s' avère techniquement difficile¹⁰⁴.

En outre, **les technologies existantes et en cours de développement ne permettent pas d' atteindre ce niveau d' exigence dans les conditions actuelles de marché.** Cela entraîne le recyclage en boucle ouverte d' une partie des MPR d' aluminium en France :

- La majorité des MPR d' aluminium issues de déchets post-consommation sont aujourd' hui réincorporées via l' affinage, avec une perte de valeur par rapport aux applications initiales (recyclage en boucle ouverte). Cela correspond au *casting sink* ;
- Des technologies innovantes de tri des déchets aluminium sont en développement (XRF et LIBS). A date, leur productivité serait trop faible et leur coût trop élevé pour qu' elles soient déployées à une échelle industrielle.

Enfin, **les MPR d' aluminium sont des commodités échangées au niveau mondial.** Elles sont donc exportées suivant la répartition géographique de l' offre et la demande :

- Des volumes importants de déchets d' aluminium post-consommation et de lingots d' affinage sont exportés en raison de capacités de sur-tri et d' incorporation de MPR qui seraient plus développées à l' étranger ;
- La demande asiatique en MPR d' aluminium est très élevée et les consommateurs de MPR d' aluminium asiatiques ont un consentement à payer plus élevé que les consommateurs européens ;
- Certains pays ont des politiques environnementales moins exigeantes que celles applicables dans l' UE et sont susceptibles de payer des prix plus élevés pour des déchets d' aluminium ayant des teneurs en résiduels plus élevées ;
- Des tonnages importants de déchets d' aluminium sont traités par des filières illégales. C' est notamment le cas pour le secteur automobile : le traitement et l' export illégaux de tonnages d' aluminium issu des VHU pourraient croître.

¹⁰³ Le plomb n' est pas utilisé dans les alliages d' aluminium (Centre commun de recherche, 2010B.), il est présent comme impureté provenant du recyclage de MPR (European Aluminium, 2023B)

¹⁰⁴ Le plomb n' est pas utilisé dans les alliages d' aluminium (Centre commun de recherche, 2010 B), il est présent comme impureté provenant du recyclage de MPR (European Aluminium, 2023 B)

5. Etat des lieux du recyclage du cuivre en France

Cette partie présente une vision synthétique de la chaîne de valeur de recyclage du cuivre en France (5.1), un benchmark européen des imports-exports et de l'incorporation de MPR de cuivre (5.2), les principaux enjeux à 2030 pour le recyclage du cuivre (5.3), les freins à son recyclage (5.4) et les principaux gisements potentiels recyclables pour le cuivre (5.5).

5.1. Vision synthétique de la chaîne de valeur du recyclage du cuivre en France

Il existe deux filières d'incorporation de MPR de cuivre :

- La **filière affinage** (smelting and refining) incorpore des déchets pré- et post-consommation. Son développement est plutôt faible en France ;
- La **filière recyclage par fusion** (direct melting) correspond à l'incorporation de déchets pré-consommation (chutes internes et déchets de fabrication des filières) par les fabricants de demi-produits. Il s'agit de la principale filière d'incorporation de MPR de cuivre en France (5.1.1).

Les MPR de cuivre sont généralement conservées en Europe, en particulier les MPR de cuivre à faibles teneurs en résiduels. Néanmoins, pour le cas français, en raison du faible développement de la filière d'affinage, une part importante des MPR disponibles est réincorporée à l'étranger, notamment dans d'autres pays européens (5.1.2). Les différences entre les volumes de MPR incorporées par les deux filières se répercutent donc tout au long de la chaîne de valeur du cuivre (5.1.3).

Une vision détaillée de la chaîne de valeur du cuivre est disponible est Annexe 8.3.

5.1.1. Présentation des filières d'incorporation de MPR de cuivre et de la chaîne de valeur du cuivre en France

Aujourd'hui, **la chaîne de valeur du cuivre est européenne** et les acteurs européens se positionnent généralement à plusieurs étapes de la chaîne de valeur (affinage, recyclage par fusion, fabrication de produits semi-finis, etc.) (Entretien d'experts). En particulier, le recyclage du cuivre en France et en Europe repose sur un équilibre de répartition des catégories de MPR entre la filière d'affinage (Smelting and refining) et la filière recyclage par fusion (Direct melting).

- **En amont de la chaîne de valeur, les préparateurs de Matières Premières de Recyclage (MPR) jouent un rôle essentiel**

Ils ont pour objectif de collecter, trier et préparer des MPR de cuivre correspondant aux cahiers des charges des deux filières incorporatrices. Au total, en 2021, pour tous matériaux, les adhérents de la Fédération professionnelle des entreprises du recyclage (FEDEREC) représentaient 1 200 entreprises, 2 450 établissements et 32 600 emplois directs. En particulier, pour le cuivre ces entreprises ont collecté 280 kt de cuivre (ADEME, 2022 A, d'après FEDEREC) et ont vendu environ 306 kt¹⁰⁵ de MPR de cuivre triées en 2019 (Calcul Deloitte d'après FEDEREC, 2020).

Le chiffre d'affaires de la filière Métaux non ferreux de FEDEREC (aluminium, cuivre, plomb, zinc, inox, etc.) a augmenté de 60 % entre 2020 et 2021 en raison de la hausse des tonnages collectés et de l'accroissement lades prix de vente. Celui-ci atteint 3,9 milliards d'euros en 2021 (FEDEREC, 2022).

¹⁰⁵ Hors cuivre de moteurs électriques, cf. Annexe 8.3.2.

Il existe deux filières incorporatrices de MPR de cuivre :

- **1. D'une part, la filière d'affinage produit des cathodes et produits de première transformation en cuivre (ex. lingots) de cuivre à partir de concentrés cuivreux (issus des mines) et une faible part de déchets ayant des teneurs en résiduels plus élevées (fraction peu triée, alliages complexes, etc.).**

L'affinage intervient à la fois en amont et en aval de la chaîne de valeur du cuivre, pour produire du métal et pour incorporer des matières premières de recyclage de cuivre. Ainsi, l'affinage de cuivre permet à la fois de traiter du **cuivre issu de MPV** (matières premières vierges) et d'autre part **du cuivre issu de MPR**.

Il regroupe deux étapes principales :

- **L'affinage (smelting) se réfère généralement à la première étape de purification de concentrés de cuivre** pour éliminer les impuretés majeures présentes dans le minerai de cuivre, telles que le fer et le soufre. Le principal procédé utilisé pour l'affinage est la pyrométallurgie. Cette étape est également appelée « fusion » ;
- **Le raffinage électrolytique (refining) est utilisé pour éliminer les impuretés restantes et produire du cuivre de haute pureté**, généralement supérieure à 99,9 %. Il s'agit d'une étape ultérieure de purification visant à éliminer les impuretés résiduelles à des concentrations plus faibles. Ce procédé vise à récupérer en sortie du cuivre pur, c'est-à-dire supérieur ou égal à 99,9 % (ADEME, 2022 A).

Le recyclage par affinage des déchets de cuivre est effectué à l'étranger, notamment en Allemagne, en Belgique et en Asie. Peu d'entreprises se partagent le marché européen, notamment Umicore (Belgique – 11 565 employés en 2021), Atlantic Copper (Espagne – 752 employés en 2021) et Aurubis (Allemagne – 6 913 employés en 2021). Le cuivre produit est à la fois issu de MPR et de MPV (pour Umicore, 64 % de MPR et 36 % de MPV) (La Tribune, 2021). En France, la filière affinage est peu développée. Deux acteurs émergents, Sanou Koura¹⁰⁶ et WeeeCycling¹⁰⁷ se spécialisent dans la récupération du cuivre dans les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), tous deux lauréats de l'appel à projets « Métaux Critiques » dans le cadre du plan France 2030 (Entretien d'experts).

- **2. D'autre part, la filière recyclage par fusion fabrique des produits de première transformation en cuivre (ex. lingots) et des produits semi-finis principalement à partir de déchets pré-consommation (chutes internes des métallurgistes et déchets de fabrication de leurs filières aval), via un procédé de fusion** (ADEME, 2022 A).

La majorité du recyclage par fusion du cuivre en France est réalisée par les mêmes acteurs que la fabrication de produits semi-finis. Le Tableau 15 présente plusieurs entreprises de la filière recyclage par fusion, recensées d'après la liste des adhérents d'A3M, l'étude Xerfi de 2021 (Xerfi, 2021) et Minéral Info (Minéral Info, 2018).

¹⁰⁶ Sanou Koura, a pour objectif est de recycler jusqu'à 20 000 tonnes de déchets par an et de devenir l'un des premiers producteurs de métaux stratégiques en Europe. D'après ses projections, Sanou Koura pourrait traiter et recycler jusqu'à 3 kt/an de cuivre, c'est-à-dire, prendre en charge plus de la moitié des déchets électroniques estimés en France (Sanou Koura, 2023).

¹⁰⁷ WeeeCycling (70 salariés en mars 2023), prévoit de récupérer 400 tonnes d'or, d'argent, de cuivre et de platinoïdes par an en avril 2030 (France Culture, 2023)

Tableau 15 : Entreprises d'incorporation par fusion de MPR de cuivre présentes en France

Nom de l'entreprise	Nombre d'employés en France	Activité
AFICA	40	Producteur de barres et de lingots d'alliages de cuivre (bronze, laiton), AFICA incorpore plus de 80% des matières premières de recyclage, en provenance de France et aussi de pays frontaliers tels que Belgique, Allemagne, Pays-Bas, Suisse et Italie (AFICA, 2023).
Gindre Duchavany	380	Spécialiste du conducteur cuivre pour équipements électriques, l'entreprise avait par exemple annoncé en 2015 un investissement de 80 000 € pour augmenter de 5 % son utilisation de cuivre recyclé (Gindre Duchavany, 2015).
HME Brass France	326	Fabricant de produits en laiton et en alliages de laiton, les déchets pré-consommation constituent une part importante des matières premières pour la fabrication de nouveaux produits (HME Hailiang Metal Europe, 2022).
KME	27	KME a lancé la gamme TECU® qui sont des tôles et bandes en cuivre fabriqués exclusivement à partir de débris métalliques et de production. Les émissions de CO ₂ de ce produit sont 80 % plus faibles que celles liées à la production à partir de cathodes de cuivre (KME, 2023). KME détient également Tréfinmétaux, qui produisait des tubes en cuivre et qui maintient une activité de fonderie (Profession Recycleur, 2023).
Lebronze Alloys	601	Fabricant de produits semi-finis et finis en alliages techniques de cuivre et de nickel (fils, petites barres, tubes, produits plats laminés, etc.), qui a lancé l'atelier UPCYCLING en 2021 ¹⁰⁸ .
m Lego	100	Fabricant de barres rondes, carrées, hexagonales, rectangulaires et profilées, M Lego a été acquise en 2011 par le groupe AUREA, spécialisé dans la régénération et le recyclage des métaux (AUREA, 2023 A).
Nexans	2 289	Principal fabricant de câbles en France, Nexans a investi dans des solutions d'incorporation des chutes de production et de tri des câbles usagés (voir ci-dessous).
NKG Berylco France	42	Acteur de la transformation de bandes, fils et barres d'alliages de cuivre au béryllium, NKG Berylco France reprend les chutes de production issues des alliages Berylco, dans la mesure où elles répondent à ses exigences (NKG Berylco, 2023).
Poudmet	47	Fabricant de poudres atomisées en alliages cuivreux (bronze, laiton, cupro-phosphore), Poudmet a été acquis par le groupe AUREA et incorpore majoritairement du cuivre recyclé (AUREA, 2023 B).
Prysmian France	2 600	Fabricant de câbles sur 10 sites industriels en France, Prysmian a lancé ECO Cable, une certification qui évalue six critères mesurables et reconnus internationalement, notamment l'incorporation de MPR et l'empreinte carbone « cradle-to-gate » (Prysmian Group, 2023).

Historiquement, les producteurs de câbles ont développé des techniques permettant le tri de déchets pré- et post-consommation. Leurs fonderies sont équipées d'unités de traitement des déchets de cuivre qui le purifient en enlevant les traces de polymères et de métaux lourds. Néanmoins, **les producteurs de câbles incorporent aujourd'hui peu de MPR post-consommation**. Ils incorporent uniquement des déchets pré-consommation, c'est-à-dire leurs chutes internes et les déchets de fabrication de leurs filières aval (ADEME, 2022 A et Entretien d'experts).

¹⁰⁸ En 2021, un atelier spécifique « UPCYCLING » a été construit à Suippes et financé par le plan France Relance. Cet investissement permet à Lebronze Alloys de réincorporer en interne ses MPR de cuivre de fonderie et en externe en effectuant une opération de transformation à froid qui permet d'utiliser directement ces métaux dans les fonderies du Groupe (Lebronze Alloys, 2022).

- **En France, alors que des volumes importants de MPR de cuivre sont collectés, des volumes plus faibles de MPR de cuivre sont incorporés par les fabricants de produits semi-finis.**

La Figure 42 synthétise les tonnages de cuivre produits ou consommés en France, à chaque étape de la chaîne de valeur du recyclage du cuivre de la production de métal (inexistante en France) jusqu'à l'incorporation de cuivre en recyclage par fusion. Le gisement total de MPR de cuivre en France n'étant pas connu, il n'est pas possible de comparer ce gisement à la collecte apparente de MPR indiquée ci-dessous. Bien que les tonnages de cuivre soient plutôt stables d'une année à l'autre, il est important de noter que les données présentées dans cette figure correspondent à des années différentes (2015 pour l'étape 3, 2017 pour l'étape 5 et 2019 pour les étapes 2 et 4). Des informations complémentaires sur chaque donnée sont disponibles en Annexe 8.3.1. Ce graphique montre qu'à première vue, des tonnages élevés de MPR de cuivre sont collectés en France (280 kt en 2019), mais que la majorité de ces MPR n'est pas incorporée par la filière recyclage par fusion et sont donc exportées.

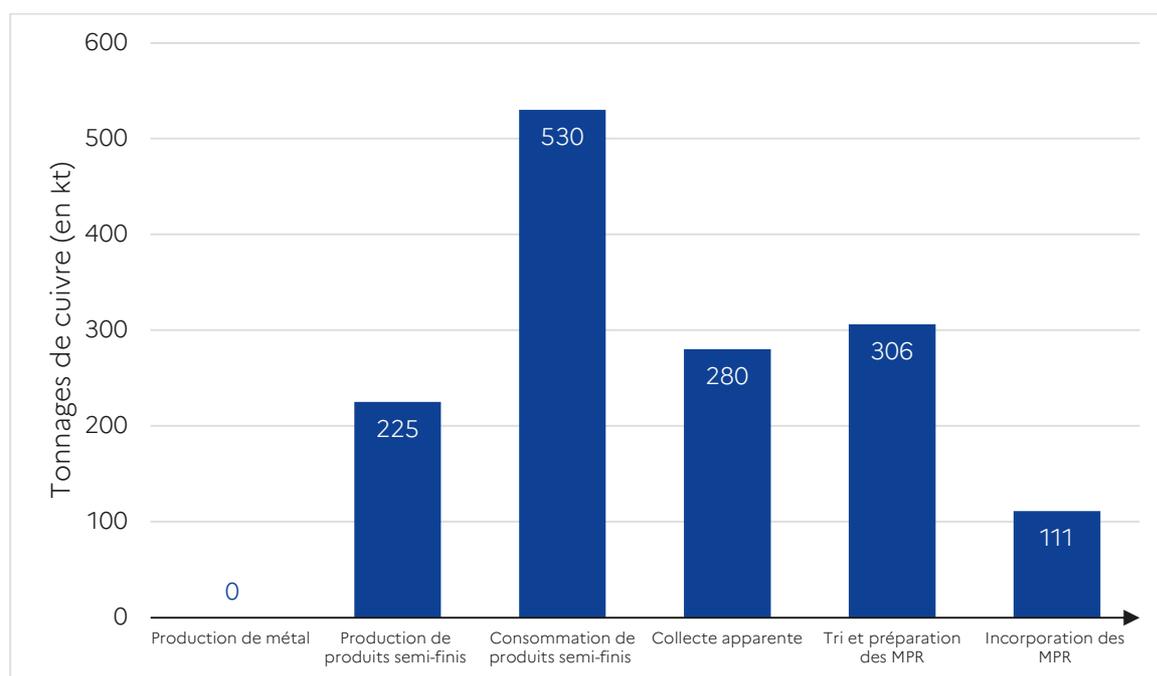


Figure 45 : Synthèse des tonnages de cuivre en France à chaque étape de la chaîne de valeur (en kt).

5.1.2. Comparaison entre les MPR de cuivre disponibles et incorporées aujourd'hui

Pour le cuivre, la teneur en résiduels des MPR disponibles est moins déterminante que pour les autres métaux puisque **l'affinage de cuivre issu de MPR permet de produire des cathodes avec une teneur en Cu de 99,9 %**. En revanche, cette filière est plus coûteuse, plus énergivore et plus émettrice de CO₂ que le recyclage par fusion (Loibl et Tercero-Espinoza, 2021).

La filière affinage est presque inexistante en France, ce qui diminue les possibilités de recyclage du cuivre sur le territoire et engendre une perte de souveraineté pour l'approvisionnement en cuivre. Les MPR de cuivre ne peuvent ainsi qu'être :

- Conservées en France sous la forme d'alliages de cuivre, dans le cadre du recyclage par fusion. Des MPR de cuivre très pur sont notamment incorporées dans le cadre de la fabrication d'applications moins exigeantes en matière de pureté (alliages laitons, bronzes, etc.) ;
- Exportées, notamment vers la Belgique, l'Allemagne ou l'Espagne, qui disposent de filières d'affinage de cuivre issu de MPR développées.

La Figure 46 représente les volumes de MPR de cuivre disponibles¹⁰⁹ en Europe et les volumes incorporés¹¹⁰ en Europe en 2020. **Ainsi, les MPR de cuivre sont généralement conservées en Europe**, en particulier les MPR de cuivre à faibles teneurs en résiduels (Entretien d'experts). Néanmoins, pour le cas français, en raison du faible développement de la filière d'affinage, une part importante des MPR disponibles est réincorporée à l'étranger, dans d'autres pays européens (ex. Allemagne, Belgique et Espagne).

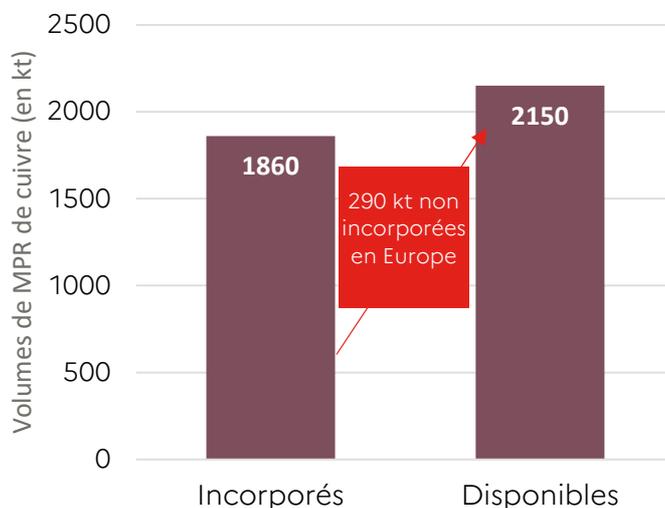


Figure 46 : Volumes incorporés et gisement de MPR de cuivre disponibles dans l'UE- données 2020, en kt (European Copper Institute et Fraunhofer Institute, 2022)

¹⁰⁹ Ces volumes correspondent à la collecte apparente de MPR de cuivre, c'est-à-dire aux MPR incorporées (1860 kt), à laquelle sont ajoutés les volumes de MPR exportées (570 kt) et à laquelle sont soustraits les volumes de MPR importés (280 kt), soit 2150 kt de MPR de cuivre disponibles en Europe (European Copper Institute et Fraunhofer Institute, 2022).

¹¹⁰ Ces volumes correspondent à la somme des volumes de MPR de cuivre incorporées par la filière affinage (830 kt), des volumes incorporées par la filière recyclage par fusion (920 kt) et des stocks de MPR de court terme (110 kt), soit 1860 kt (European Copper Institute et Fraunhofer Institute, 2022).

5.1.3. Récapitulatif des principaux produits semi-finis, produits finis et marchés consommateurs de cuivre en France

La Figure 47 récapitule les principaux produits (semi-finis et finis) en cuivre, ainsi que les marchés consommateurs de cuivre en France. Une vision détaillée de la chaîne de valeur du cuivre est disponible en Annexe 8.3.

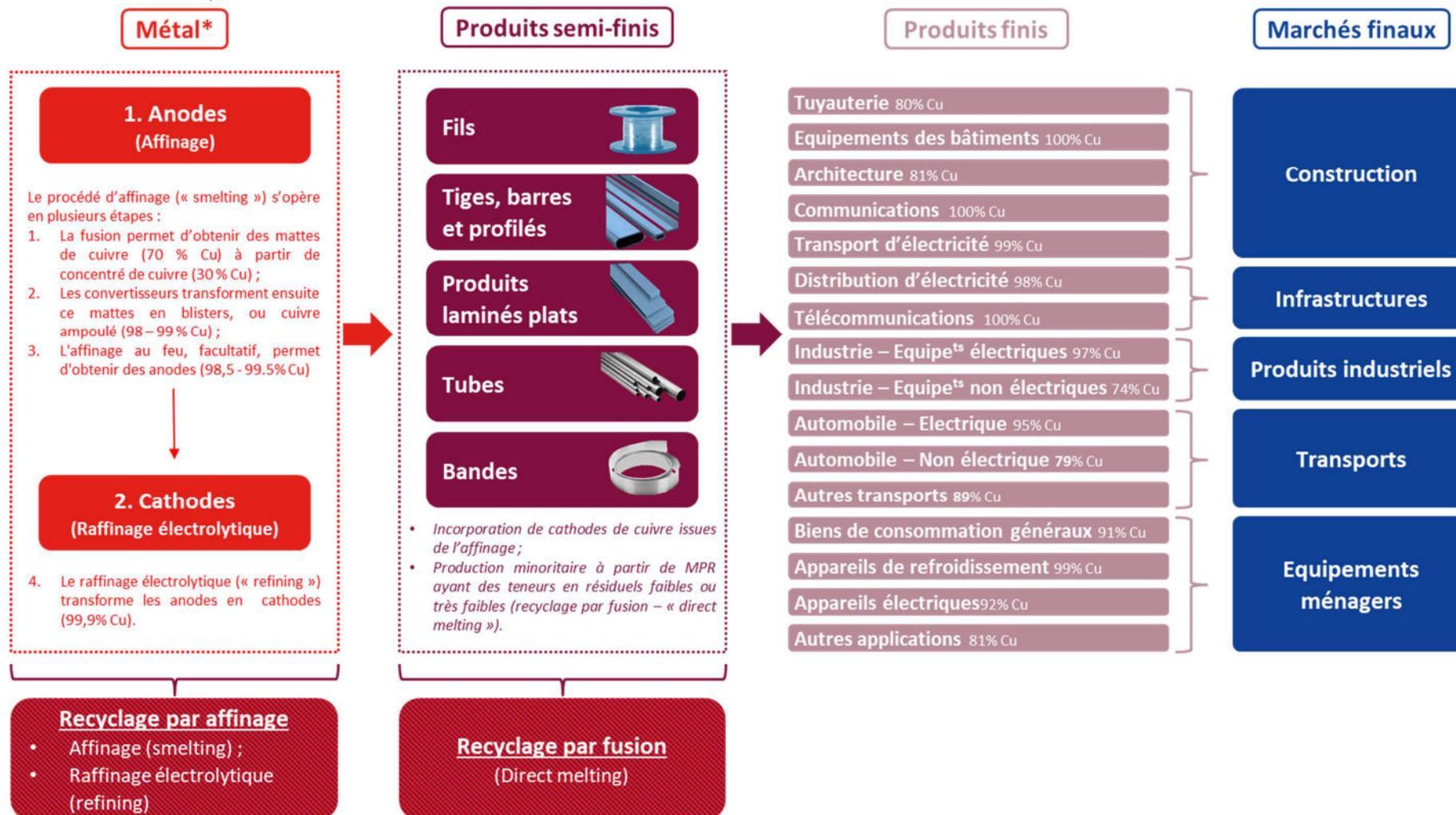


Figure 47 : Représentation simplifiée des principaux produits semi-finis, produits finis et marchés consommateurs de cuivre en France

*Cette représentation simplifiée présente uniquement le procédé pyrométallurgique. Il existe également le procédé hydrométallurgique (ou « solvent extraction and electrowinning (SX-EW) process », qui représentait environ 18% de la production mondiale de cathodes de cuivre en 2021 (ICSG, 2022). Il s'applique aux minerais oxydés (< 0,5 %). Après des traitements minéralurgiques et après lixiviation à l'acide sulfurique, les substances sont soit mis en solution et purifiées, soit extraites par solvant, puis raffinées électrolytiquement (BRGM, 2021). La chaîne de valeur complète de l'affinage du cuivre est présentée Annexe 8.3.2 (étape 1.).

Les produits finis ci-dessus correspondent à des catégories¹¹¹ d'utilisation de cuivre en Europe et sont associés à une teneur moyenne en cuivre¹¹². Les applications non électriques ont une teneur moindre en cuivre, ce qui peut correspondre à l'utilisation d'alliages comme le laiton ou le bronze, alors que les applications électriques ont une teneur en cuivre supérieure à 95%

En 2020, au sein de l'UE, à l'étape d'affinage, les MPR représentaient environ 31 % des matières incorporées (830 kt de MPR contre 1 860 kt de MPV). A l'étape de fabrication de produits semi-finis, les cathodes de cuivre issues de l'affinage représentaient environ 76 % des intrants (2 840 kt) et les MPR de cuivre environ 24 % (920 kt) (European Copper Institute et Fraunhofer Institute, 2022).

A noter : Il n'est pas simple de calculer la part respective des deux voies de recyclage, car les deux voies mélangent leurs flux à un moment donné. De plus, lorsque les produits sont réincorporés après leur fin de vie, il n'est pas possible d'en assurer la traçabilité (Entretien d'experts).

¹¹¹ Ces catégories sont reprises dans l'Annexe 8.3.2, qui présente en détail la chaîne de valeur du cuivre

¹¹² Cette teneur est calculée comme la masse de cuivre contenu dans les produits finis rapportée à la masse totale de ces produits, en 2021 à échelle mondiale (IWCC, 2023)

5.2. Benchmark européen des imports-exports de MPR de cuivre

Cette sous-partie compare la France avec quatre autres pays européens : l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne et l'Italie. Il existe quatre codes douaniers relatifs aux imports-exports de MPR de cuivre (5.2.1).

Pour l'ensemble des MPR de cuivre échangées (5.2.2), **la France est le principal exportateur net de MPR de cuivre**, l'industrie française étant distancée par ses voisins et par certains pays en développement (Chine, Inde, etc.). A l'inverse, la Belgique et l'Allemagne sont les principaux importateurs nets de MPR de cuivre, ce qui s'explique par la présence de la filière affinage, ainsi que les volumes importants de produits semi-finis fabriqués en Allemagne, qui permettent leur recyclage par fusion (5.2.2.1). Les principales exportations françaises de MPR de cuivre sont donc principalement à destination de pays en mesure de les traiter et de les incorporer localement via la filière affinage, tels que l'Espagne (Atlantic Copper), la Belgique (Umicore) et l'Allemagne (Aurubis). Ces pays incorporent les MPR à faibles teneurs en résiduels sur place et réexportent les MPR de cuivre ayant des teneurs en résiduels plus élevées, notamment vers la Chine (5.2.2.2). Bien que la France soit le plus faible contributeur direct au « grand export » parmi les cinq pays étudiés, les quatre principales destinations des exports français (Espagne, Belgique, Allemagne, Italie) sont des acteurs du réexport de MPR de cuivre (5.2.2.3).

Il n'existe pas données relatives au taux d'incorporation de MPR de cuivre par pays. Néanmoins, les données d'imports-exports de MPR de cuivre, ainsi que les analyses d'experts, ont été jugés suffisants pour comparer la France avec les quatre pays étudiés.

5.2.1. Rappels sur les codes douaniers relatifs aux imports-exports de MPR de cuivre

Il existe quatre codes douaniers sur les échanges de MPR de cuivre au sens de nomenclature tarifaire et statistique de l'Union européenne :

- 74040010 : Déchets et débris de cuivre affiné ;
- 74040091 : Déchets et débris d'alliages cuivre-zinc (laiton) ;
- 74040099 : Déchets et débris d'alliages de cuivre ;
- 26203000 : Scories, cendres et résidus, contenant principalement du cuivre.

Les données présentées dans cette section indiquent les volumes de MPR de cuivre en kilotonnes (kt) échangées mais ne montrent pas les volumes de cuivre contenus dans ces MPR. En effet, les teneurs en cuivre des MPR ne sont pas connues pour les cinq pays étudiés. A titre indicatif, pour la France, le Bilan National du Recyclage de 2014 estimait la teneur moyenne en cuivre des MPR de cuivre exportées à 61 % et la teneur en cuivre des MPR importées à 83 %.

5.2.2. Incorporation et imports-exports de MPR de cuivre

5.2.2.1. Imports-exports de MPR de cuivre selon le type de MPR échangées

La Figure 48 présente les volumes d'exports de MPR de cuivre des cinq pays européens étudiés, ainsi que la répartition entre les types de MPR de cuivre indiqués ci-dessus.

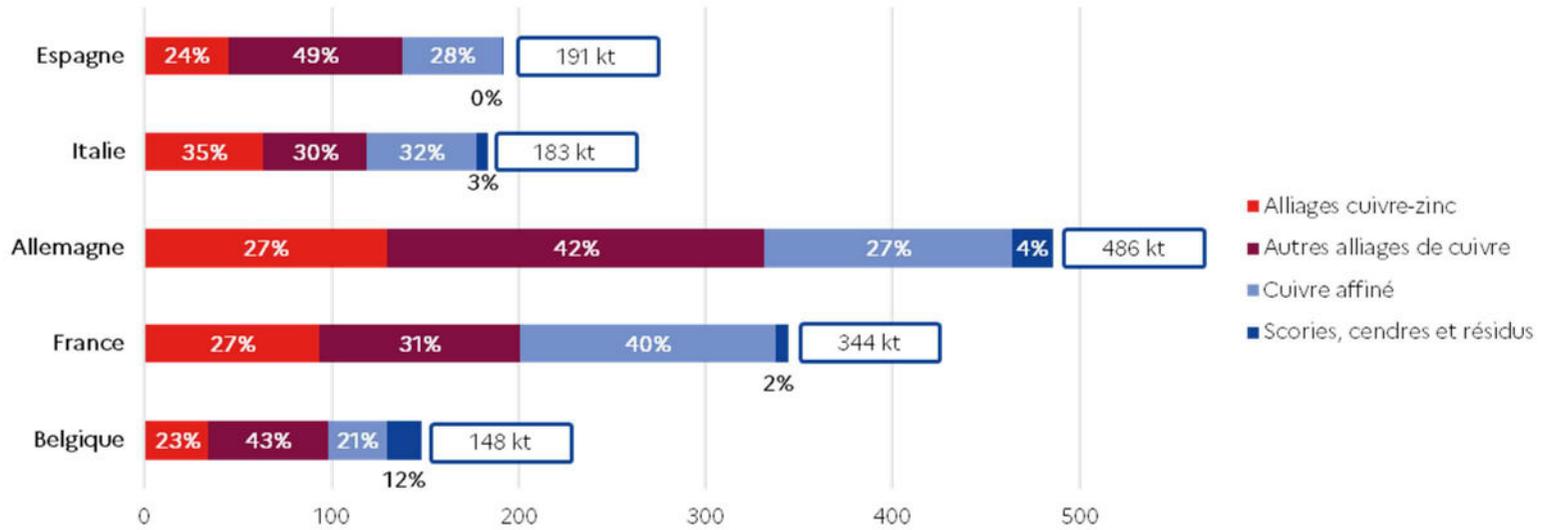


Figure 48 : Répartition des exports de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

La Figure 49 présente les volumes d'imports de MPR de cuivre des cinq pays européens étudiés, ainsi que la répartition entre les types de MPR de cuivre indiqués ci-dessus.

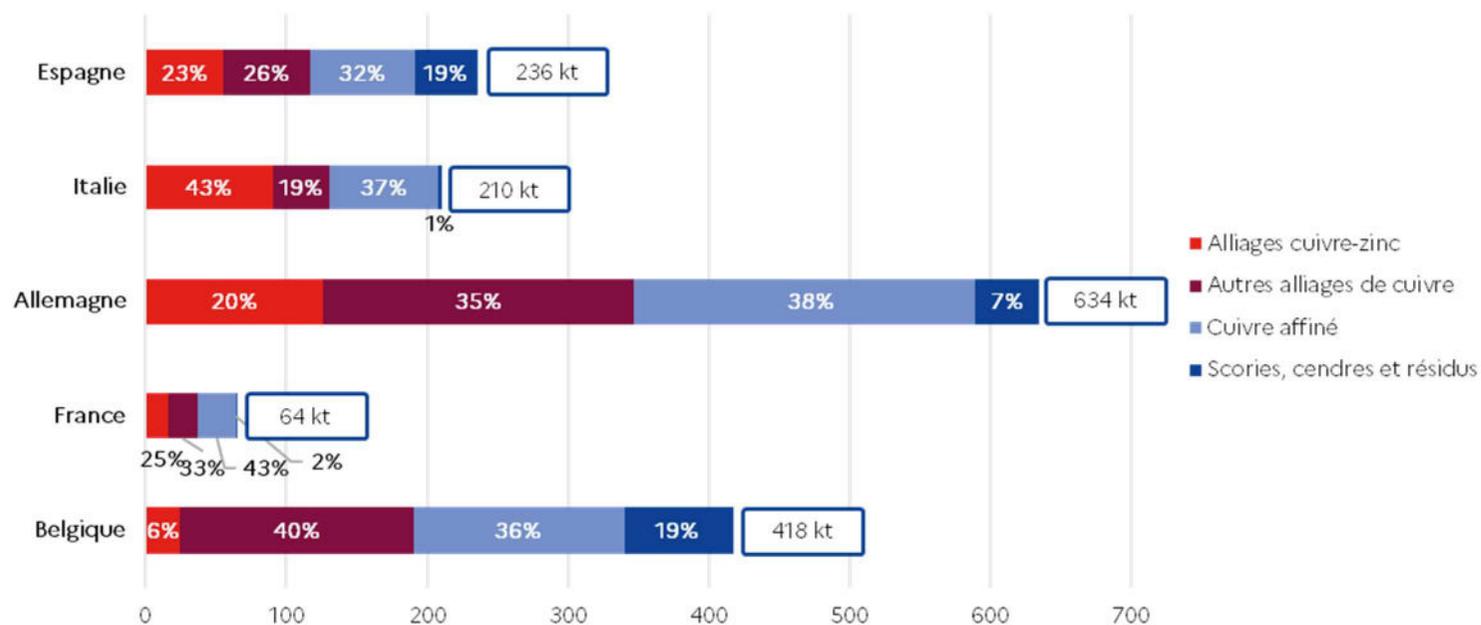


Figure 49 : Répartition des imports de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

Encore plus que pour l'acier et l'aluminium, **le solde exportateur de MPR de cuivre de la France** (+ 280 kt, seul exportateur net parmi les cinq pays) **montre une industrie distancée par ses voisins et par certains pays en développement** (Chine, Inde, etc.). En particulier, la France exporte 136 kt de déchets de cuivre affiné – qui est le type de MPR de cuivre ayant le taux de cuivre le plus élevé – alors qu'elle n'en importe que 27 kt (Eurostat, Données 2021). Selon un câblier français, cela s'explique par le très faible développement d'une filière d'affinage, la France n'ayant historiquement jamais produit de cathodes de cuivre¹¹³ (Entretien d'experts).

La Belgique et l'Allemagne sont les principaux importateurs nets de MPR de cuivre :

- L'Allemagne est un importateur net de 148 kt de MPR de cuivre (664 kt d'imports et 486 kt d'exports). Cela s'explique à la fois par la **valorisation de ces MPR de cuivre par Aurubis (affinage) et la fabrication de produits semi-finis (recyclage par fusion)**, dont les volumes de production atteignaient 1 140 kt en 2020 outre-rhin et positionnaient l'Allemagne comme premier pays européen pour la fabrication de produits semi-finis en cuivre (IWCC, 2022). Comme pour l'acier, le dynamisme de la filière cuivre allemande explique notamment les volumes importants d'exports de MPR de cuivre ;
- La Belgique est un importateur net de 270 kt de MPR de cuivre (418 kt d'imports et 148 kt d'exports). Cela s'explique en partie par la **valorisation de ces MPR de cuivre par Umicore** ;
- L'Espagne et l'Italie sont des importateurs nets de MPR de cuivre : + 45 kt pour l'Espagne (236 kt d'imports et 191 kt d'exports) et + 27 kt pour l'Italie (210 kt d'imports et 183 kt d'exports). En effet, les MPR de cuivre disponibles dans ces pays ne permettant pas de répondre à l'intégralité de leur demande interne, **l'Espagne et l'Italie conservent leurs gisements de MPR à faibles teneurs en résiduels et en importent également** . Ils exportent des gisements de MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées (Entretien d'experts). En particulier, **l'Italie est le deuxième pays européen pour la fabrication de produits semi-finis**, dont les volumes de production atteignaient 970 kt en 2020. Au total, 17 entreprises italiennes de fabrication de produits semi-finis (KME, Carlo Colombo, Trafileries Carlo Gnutti, etc.) seraient en mesure de recycler par fusion des MPR de cuivre (IWCC, 2022).

En France, selon un expert de la chaîne de valeur du cuivre, les entreprises en charge de la récupération et de la préparation des MPR de cuivre issues des déchets post-consommations produisent ou sont en mesure de produire **certaines catégories de MPR qui ne trouvent souvent pas d'acheteurs à proximité**. Il y a donc une inadéquation entre les fournisseurs et les potentiels acheteurs de MPR de cuivre à petite échelle. Ces préparateurs de MPR pourraient potentiellement trouver le bon acheteur qui recherche ces catégories, mais cela serait difficile d'un point de vue logistique et/ou trop coûteux d'expédier des faibles quantités de matériau dans un même pays sur des centaines de kilomètres. Il est donc préférable d'exporter ces MPR (European Copper Institute, 2023) où les volumes demandés sont significatifs .

En France, selon un expert de la chaîne de valeur du cuivre, les entreprises en charge de la récupération et de la préparation des MPR de cuivre issues des déchets post-consommations produisent ou sont en mesure de produire **certaines catégories de MPR qui ne trouvent souvent pas d'acheteurs à proximité**. Il y a donc une inadéquation entre les fournisseurs et les potentiels acheteurs de MPR de cuivre à petite échelle. Ces préparateurs de MPR pourraient potentiellement trouver le bon acheteur qui recherche ces catégories, mais cela serait difficile d'un point de vue logistique et/ou trop coûteux d'expédier des faibles quantités de matériau dans un même pays sur des centaines de kilomètres. Il est donc préférable d'exporter ces MPR (Entretien d'experts).

A noter : De plus en plus de MPR de cuivre sont conservées en France grâce au développement d'activités de recyclage par les fabricants de PCAM/CAM¹¹⁴ et de certains groupes automobiles.

¹¹³ Selon ce même acteur, cela s'explique notamment par une faible connaissance de la filière MPR de cuivre, ainsi que de l'absence de mines de cuivre en France, par opposition, par exemple, à l'Allemagne, où la culture minière est plus importante.

¹¹⁴ Les Precursor Cathode Active Materials (PCAM) sont un matériau intermédiaire transformé en Cathode Active Materials (CAM), le matériau principal de la cathode des batteries Li-ion.

5.2.2.2. Imports-exports de MPR de cuivre selon la provenance et la destination des MPR échangées

Le Tableau 16 et le Tableau 17 indiquent respectivement les destinations des exportations de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 (dont la part vers des pays non-membres de l'UE) et les provenances de leurs importations de MPR de cuivre (dont la part de MPR venant de pays non-membres de l'UE).

La France n'est pas encore en mesure d'incorporer certaines catégories de MPR de cuivre en raison du faible développement de la filière d'affinage de cuivre issu de MPR en France. Cette filière se met néanmoins en place progressivement, notamment pour le traitement des DEEE, avec les entreprises WeeeCycling et Sanou Koura (Entretien d'experts). Cela explique les faibles volumes d'importations de cuivre de la France indiqués en Tableau 17.

Les exportations françaises de MPR de cuivre sont principalement à destination de pays en mesure de les traiter et les incorporer localement, tels que l'Espagne (Atlantic Copper), la Belgique (Umicore) et l'Allemagne (Aurubis), comme l'indique le Tableau 16.. A dire d'expert, ces pays incorporent des MPR de cuivre à faibles teneurs en résiduels, c'est-à-dire dont les teneurs en contaminants sont faibles (ex. MPR issues de câbles usagés) (Entretien d'experts).

Les MPR de cuivre ayant des teneurs en résiduels plus élevées de l'Allemagne, de l'Espagne et de la Belgique sont donc destinées au grand export (Entretien d'experts), notamment vers la Chine. En effet, **les acteurs chinois ont des coûts de traitement des MPR et de production de métal (affinage) très faibles en raison d'exigences sociales et environnementales moindres** : tri effectué par une main-d'œuvre moins chère, pratiques moins respectueuses de l'environnement comme le brûlage des gaines en plastique, etc. (DGE, 2015).

Tableau 16 : Destinations des exportations de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).

Espagne		Italie		Allemagne		France		Belgique	
Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)
1. Chine	48	1. Chine	46	1. Belgique	64	1. Espagne	82	1. Allemagne	27
2. Pakistan	23	2. Allemagne	31	2. Pays-Bas	52	2. Belgique	70	2. France	26
3. Allemagne	21	3. Autriche	17	3. Pologne	49	3. Allemagne	60	3. Pays-Bas	24
4. Portugal	21	4. Hong Kong	14	4. Inde	47	4. Italie	44	4. Espagne	21
5. Belgique	12	5. Espagne	13	5. Chine	46	5. Pays-Bas	31	5. Chine	20
Total	191	Total	183	Total	486	Total	344	Total	148
Part hors EU-27	58 %	Part hors EU-27	48 %	Part hors EU-27	34 %	Part hors EU-27	12 %	Part hors EU-27	28 %

Tableau 17 : Provenances des importations de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021)

Espagne		Italie		Allemagne		France		Belgique	
Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)	Pays	Volume (kt)
1. France	86	1. France	48	1. Pays-Bas	128	1. Belgique	18	1. Allemagne	103
2. Belgique	29	2. Allemagne	39	2. Suisse	55	2. Allemagne	10	2. France	80
3. Portugal	21	3. Slovénie	15	3. France	53	3. UK	7	3. Pays-Bas	58
4. UK	20	4. Pologne	14	4. Autriche	41	4. Italie	7	4. Etats-Unis	39
5. Etats-Unis	18	5. Espagne	13	5. Pologne	36	5. Espagne	6	5. UK	29
Total	236	Total	210	Total	634	Total	64	Total	418
Part hors EU-27	32 %	Part hors EU-27	19 %	Part hors EU-27	25 %	Part hors EU-27	26 %	Part hors EU-27	30 %

5.2.2.3. Focus sur les exports français de MPR de cuivre

La France exporte à la fois des déchets de cuivre affiné et des alliages de cuivre (laiton et autres alliages). Avec seulement 12 % d'exportations françaises de MPR de cuivre destinées à des pays hors UE-27, la France est le plus faible contributeur direct au « grand export » parmi les cinq pays étudiés. Néanmoins, **les principales destinations des exports français sont constituées par des acteurs du réexport de MPR de cuivre** : l'Espagne (Taux d'exportation hors UE 27 : 58 %, notamment vers la Chine et le Pakistan), la Belgique (28 %, notamment vers la Chine), l'Allemagne (34 %, notamment vers l'Inde et la Chine) et l'Italie (48 %, notamment vers la Chine et Hong Kong). A dire d'expert, **les MPR de cuivre à faibles teneurs en résiduels sont généralement conservées en Europe, alors que les MPR de cuivre ayant des teneurs en résiduels plus élevées sont destinées au grand export** (Entretien d'experts).

La Figure 50 est un diagramme de Sankey représentant les types de MPR de cuivre que la France a exportées en 2021 (à gauche), la répartition entre les MPR françaises exportées au sein de l'UE et vers des pays hors UE (au centre) et les principaux pays destinataires des MPR de cuivre françaises (à droite). Ces données sont exprimées en kilotonnes pour 2021.

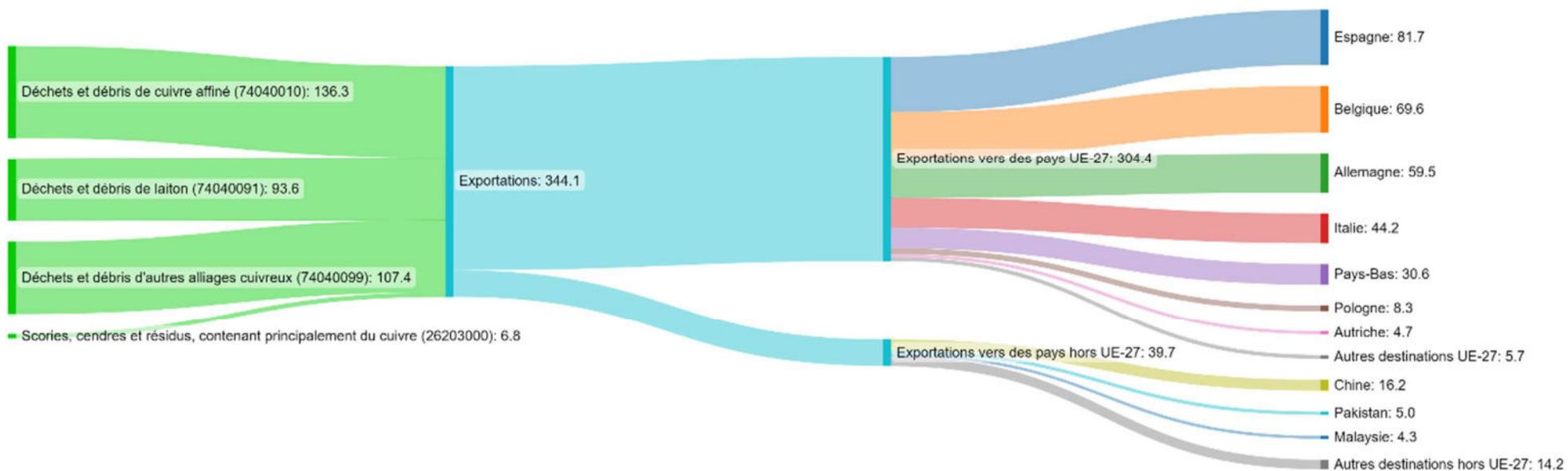


Figure 50 : Représentation des types de flux de déchets de cuivre français et de leurs premières destinations en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).

5.3. Enjeux à 2030 pour la filière cuivre

Cette sous-partie présente les principaux enjeux pour le recyclage du cuivre à l'horizon 2030. Alors que la demande cuivre devrait fortement augmenter d'ici à 2030, portée notamment par les technologies de la transition énergétique (5.3.1). Le contexte réglementaire pourrait augmenter les contraintes en matière d'émissions de CO₂ et de teneurs maximales en impuretés des produits contenant du cuivre (5.3.2). En conséquence, l'industrie du cuivre poursuivra sa transformation afin d'augmenter sa consommation de MPR de cuivre. En particulier, cette transformation sera portée par la hausse du taux d'incorporation de MPR pour la fabrication de produits semi-finis et par le développement de l'affinage de cuivre issu de MPR en France (5.3.3). Bien que des développements technologiques permettent d'améliorer le tri des déchets post-consommation et d'incorporer davantage de MPR de cuivre en France, ceux-ci ne permettront pas de couvrir tous les besoins des marchés consommateurs de cuivre. Les tensions d'approvisionnement en cuivre devraient néanmoins inciter les acteurs français et européens de la chaîne de valeur du cuivre à incorporer des volumes plus importants de MPR (5.3.4).

5.3.1. Tendances de production de cuivre à 2030

5.3.1.1. Une forte augmentation des volumes produits d'ici à 2030...

- **La demande européenne en cuivre sera amenée à croître d'ici à 2030, portée par les technologies de la transition énergétique.**

En 2008, la demande européenne en cuivre avait connu une forte décroissance en raison de la crise financière. Elle n'avait pas augmenté de nouveau entre 2008 et 2018. **A l'horizon 2030, la transition énergétique devrait cependant relancer la croissance du marché européen du cuivre.** La Figure 51 montre que la demande de cuivre pourrait atteindre 5 Mt en 2030, avec un taux de croissance annuel moyen entre 2018 et 2030 estimé à 1,0 % (Eurométaux, 2022). La partie grise représente la demande mondiale de cuivre dans la continuité des politiques actuelles alors que les parties en bleu clair, modérément foncé et foncé représentent les demandes additionnelles de cuivre dues à des politiques environnementales correspondant faiblement, modérément et complètement aux ambitions de neutralité carbone en lien avec la transition énergétique.

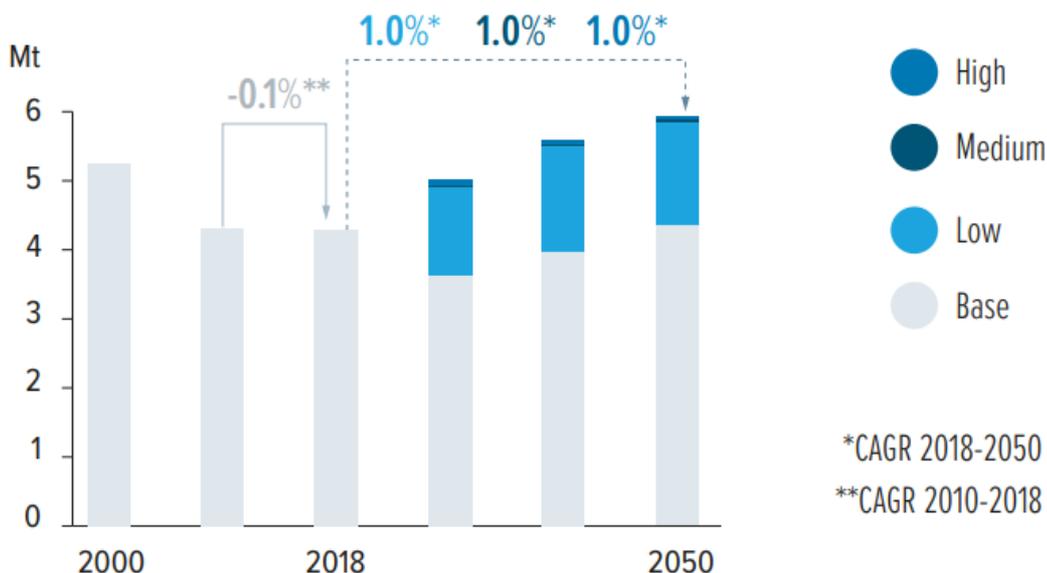


Figure 51 : Demande totale en cuivre en Europe par scénario de transition énergétique (Eurométaux, 2022)



- **Le réseau de transport d'électricité et les transports seront les secteurs qui contribueront le plus à la hausse de la demande de cuivre.**

Au total, en Europe, la transition énergétique à l'horizon 2030 nécessitera 1,25 Mt de cuivre par an, soit près de 30 % de la consommation européenne de cuivre en 2018 (Eurométaux, 2022). En effet, les technologies de la transition énergétique consomment des volumes importants de cuivre. Comme l'indique la Figure 52, au niveau mondial, à l'horizon 2030, la demande en cuivre sera particulièrement forte pour le réseau de transport d'électricité et les véhicules électriques ainsi que, dans une moindre mesure, pour les panneaux solaires et les éoliennes.

Le réseau de transport d'électricité contribuera en grande partie à la hausse de la consommation française et européenne de cuivre. Les câbles en cuivre sont principalement utilisés pour le réseau de transport d'électricité européen et pour les nouvelles infrastructures de transport d'électricité (ex. déploiement de l'énergie éolienne). Dans le cadre du Schéma Décennal Développement de Réseau (SDDR), RTE présente deux stratégies prospectives : une « stratégie minimale, dans la continuité des pratiques existantes », ainsi qu'« une stratégie de référence [...] qui intègre l'ensemble des mesures d'amélioration envisagées permettant ainsi d'optimiser le service rendu, les coûts et les incidences environnementales ». La mise en place de cette stratégie de référence augmente la consommation de cuivre liée au réseau de transport d'électricité, comme l'indique plus haut la Figure 19 (SDDR, 2019). La prochaine SDDR sera publié courant 2024 et révisera ces valeurs à la hausse (Entretien d'experts).

Les véhicules électriques contribueront également en grande partie à la hausse de la consommation française et européenne de cuivre. En moyenne, une voiture à moteur à combustion interne requiert 23 kg de cuivre, une voiture électrique hybride (HEV) 40 kg, une voiture électrique hybride rechargeable (PHEV) 60 kg et une voiture électrique à batterie (BEV) 83 kg (Alliance Internationale du Cuivre, 2017). Ainsi, l'électrification de la flotte de véhicules – en lien avec le projet d'interdiction de la vente de nouveaux véhicules thermiques au sein de l'UE à l'horizon 2035 – devrait augmenter la demande de cuivre du secteur automobile (Entretien d'experts).

Les panneaux solaires et les éoliennes, ainsi que, dans une moindre mesure, les technologies liées à l'énergie hydroélectrique, à l'énergie solaire concentrée, aux bioénergies ou à l'énergie nucléaire, viennent compléter la liste (Eurométaux, 2022, d'après Agence Internationale de l'Energie, 2022)

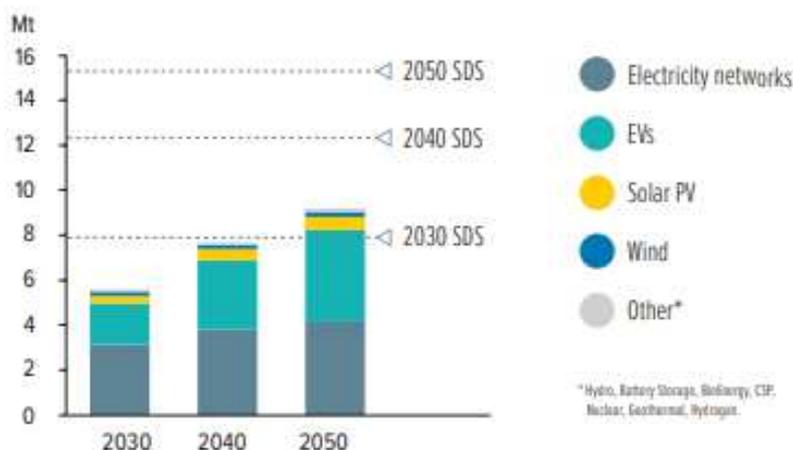


Figure 52 : Demande mondiale de cuivre pour les technologies de la transition énergétique (Eurométaux, 2022)

5.3.1.2. ... et des attentes renforcées en matière d'économie circulaire tout au long de la chaîne de valeur du cuivre

- **L'incorporation de MPR de cuivre par les fabricants de produits semi-finis en cuivre est un levier de décarbonation.**

A l'horizon 2030, pour atteindre leurs objectifs de neutralité carbone, les fabricants de produits semi-finis en cuivre devront décarboner leurs activités au-delà des scopes 1 et 2²³. Ils devront donc inclure l'empreinte carbone totale des produits finis dans leurs politiques de décarbonation. Or, **les émissions « en scope 3 » sont très importantes pour les fabricants de produits semi-finis en cuivre**. Par exemple, en 2022, les émissions du Groupe Nexans – dont les usines métallurgiques sont installées en France, au Canada, au Chili et au Pérou - en scope 3 pour l'achat de biens et services s'élevaient à 4 477 kt eq. CO₂ (Nexans, 2023 B).

Selon un câblé, afin de réduire les émissions de CO₂ en scope 3, l'incorporation de MPR de cuivre a été considérée comme un levier de décarbonation important des approvisionnements en matières premières (Entretien d'experts).

- **D'ici à 2030, certaines filières aval pourraient être amenées à incorporer des volumes plus importants de MPR métalliques.**

Plusieurs secteurs devraient augmenter leurs consommations de MPR métalliques. Par exemple :

- Le **secteur automobile** anticipe une hausse de la consommation de MPR métalliques dans le cadre de la production de véhicules électriques. En effet, le principal enjeu de décarbonation des véhicules électriques au cours de leur cycle de vie porte sur la phase de construction. L'un des leviers d'action sera l'incorporation de MPR métalliques¹¹⁵ (Entretien d'experts) ;
- Les **secteurs consommateurs de câbles en cuivre** pourraient investir en Recherche et Développement afin d'incorporer des volumes plus importants de MPR de cuivre dans les câbles et les recycler ainsi en boucle fermée. Par exemple, afin d'incorporer des MPR dans ses câbles en almélec¹¹⁶ et de réduire sa dépendance matière, RTE pilote une expérimentation de développement d'une filière d'économie circulaire sur la fabrication de câbles aériens à partir des câbles hautes tension déposés (Entretien d'experts). A terme, une expérimentation similaire pourrait être menée sur l'incorporation de MPR de cuivre issues des câbles de liaison souterraine déposés du réseau (Entretien d'experts).

- **De ce fait, il est probable que les différents marchés consommateurs de cuivre entrent dans une dynamique de concurrence pour s'approvisionner en cuivre contenant des matières premières de recyclage.**

Ces marchés pourraient entrer en concurrence dans l'optique d'une obligation d'incorporation de MPR métalliques. Ce type d'obligations a notamment été mis en place pour le PET, avec des conséquences qui peuvent être utilement analysées pour comprendre les impacts potentiels qu'auront ces dispositifs sur d'autres commodités, comme les métaux. L'exemple du PET est détaillé en section 3.3.1.2. A noter : il n'est pas entièrement transposable à la filière cuivre, notamment en raison de l'existence de nombreux alliages de cuivre.

¹¹⁵ Pour le cuivre, l'usage de MPR de cuivre contribue à la décarbonation des filières aval si celles-ci sont incorporées via le recyclage par fusion (direct melting). En effet, son bilan énergétique est inférieur à celui du cuivre issu de l'affinage (smelting et refining) (Loibl et Tercero Espinoza, 2021), notamment car sa demande d'énergie est deux à quatre fois moins importante (Tikana, 2020).

¹¹⁶ Cf. glossaire

5.3.2. Tendances réglementaires en matière de transformation de l'industrie du cuivre

Les tendances présentées précédemment s'inscrivent dans un contexte d'augmentation des ambitions en matière de circularité du cuivre et de teneurs maximales en impuretés des produits contenant du cuivre.

5.3.2.1. La législation européenne sur les matières premières critiques vise à renforcer la circularité du cuivre

La législation sur les matières premières critiques (*critical raw materials*) ou stratégiques (*strategic raw materials* – dont le cuivre) vise à diversifier et à renforcer la résilience des chaînes d'approvisionnement en matières premières critiques ou stratégiques de l'UE, tout en améliorant la capacité de l'UE à atténuer les risques de rupture d'approvisionnement et à renforcer la circularité de ces matières.

Le « Critical Raw Materials Act » propose plusieurs mesures visant à améliorer le recyclage des métaux en Europe et fixe des critères pour les capacités nationales pour le recyclage des matières premières stratégiques à l'horizon 2030. Par exemple, **au moins 25 % de la consommation annuelle de matières premières stratégiques de l'UE devra être issue de matières premières de recyclage.**

Cette législation est présentée synthétiquement en Annexe 8.5.3.

5.3.2.2. Les réglementations européennes sur les substances pourraient contraindre le recyclage du cuivre d'ici à 2030

La mise en place de **réglementations européennes plus contraignantes sur les teneurs en impuretés** (dans le cadre de REACH, RoHS, etc.¹¹⁷) sera déterminante pour le recyclage du cuivre à l'horizon 2030. Les acteurs de l'incorporation et de la préparation des MPR de cuivre indiquent que des contraintes plus élevées sur les teneurs maximales en plomb obligeront les industries incorporant ces MPR de cuivre à consommer plus de matières premières vierges (cathodes de cuivre, dont les coûts économiques et environnementaux seront très élevés) ou à exporter ces MPR de cuivre (Entretien d'experts).

En définitive, d'ici à 2030, les exigences grandissantes des marchés consommateurs de cuivre et des législateurs en matière de décarbonation et de circularité du cuivre imposeront à tous les acteurs la chaîne de valeur du cuivre de poursuivre et d'accélérer leur transformation. En première ligne, les fabricants de produits semi-finis, les préparateurs de MPR métalliques et les nouveaux acteurs de la valorisation des DEEE joueront un rôle essentiel pour augmenter l'incorporation de MPR tout au long de la chaîne de valeur du cuivre.

5.3.3. Une industrie en transformation

5.3.3.1. D'ici à 2030, la filière recyclage par fusion devrait poursuivre son développement dans le cadre de la décarbonation des fabricants de produits semi-finis et de la sécurisation de gisements de cuivre

Les experts envisagent une **hausse du taux d'incorporation de MPR de cuivre pour la fabrication de produits semi-finis** puisqu'il s'agit d'un levier important de sécurisation de gisements de cuivre, qui est une matière première critique. Il s'agirait également d'un levier important de décarbonation pour les

¹¹⁷ REACH : Règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances / ROHS : Directive 2011/65/UE du Parlement européen et du Conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques

fabricants de produits semi-finis puisque le bilan énergétique du cuivre issu du recyclage par fusion (direct melting) est inférieur à celui du cuivre issu de l'affinage (smelting et refining) (Loibl et Tercero Espinoza, 2021). Selon le produit, la demande d'énergie pour fabriquer des produits semi-finis à partir de cuivre de seconde fusion est estimée être deux à quatre fois plus importante par la voie affinage (smelting et refining) que par la voie recyclage par fusion (direct melting) (Tikana, 2020).

C'est le cas de Nexans, dont le fil machine utilisé pour la production de câbles contient aujourd'hui environ 6 % de cuivre recyclé. Le câblier vise à atteindre un taux d'incorporation de 30 % à l'horizon 2025-26. Pour ce faire, le Groupe mise sur :

- L'incorporation de particules fines issus du broyage des câbles dans un nouveau four de fusion. Un nouveau four, mieux dimensionné et moins énergivore, devrait permettre au câblier d'utiliser ce type de MPR ;
- Le pré-traitement avant incorporation (ou sur-tri) du cuivre issu de plusieurs industries. Nexans souhaite retirer plus d'impuretés contenues dans les gisements post-consommation (Entretien d'experts).

5.3.3.2. Le recyclage par fusion pourrait permettre le recyclage en boucle fermée pour les produits finis incorporant du cuivre très pur

Afin d'incorporer des déchets de produits en fin de vie à faibles teneurs en résiduels, **il est nécessaire de structurer des filières de valorisation en boucle fermée**. C'est notamment le cas pour les câbles usagés en cuivre, pour lesquels des filières pourraient être mise en place à travers :

- La création de filiales par les consommateurs finaux. Celles-ci auraient la charge de la vente de MPR de cuivre à des câbliers ;
- Des contrats fournisseurs entre les consommateurs finaux et les câbliers, en intégrant une clause de récupération des câbles usagés afin d'incorporer une partie de ces câbles dans la production de câbles neufs (Entretien d'experts).

A noter que compte tenu de sa valeur en tant que MPR, **le cuivre des câbles usagés est presque systématiquement récupéré** lorsqu'un réseau est fermé, sauf lorsque des contraintes techniques et/ou économiques empêchent le démontage du réseau. Par exemple, dans le cadre du plan de fermeture du réseau de boucle local cuivre d'Orange, « Orange prévoit de démonter le réseau et les équipements sauf pour des configurations qui ne permettraient pas une dépose dans des conditions technique ou économique raisonnables (câbles en pleine terre, certains câbles de distribution en zones très urbaines, distribution privative, ...) » (Arcep, 2022).

Ces boucles fermées sont également envisageables dans le cadre de la fabrication d'équipements en lien avec la transition énergétique. En effet, à dire d'experts, la hausse de la consommation de cuivre liée aux technologies de la transition énergétique n'implique pas d'évolutions majeures pour les alliages utilisés, ce qui pourrait permettre leur recyclage en boucle fermée. Seule la production de panneaux solaires nécessite une couche plus importante d'étain sur le câble utilisé ¹¹⁸(Entretien d'experts).

5.3.3.3. L'affinage de cuivre issu de MPR devrait poursuivre son développement

- **Le développement de l'affinage de cuivre issu de MPR sera porté par les acteurs français pionniers en la matière.**

Comme précisé en introduction, la filière française d'affinage est portée par plusieurs acteurs émergents qui se spécialisent sur la récupération du cuivre dans les DEEE : WeeeCycling et Sanou Koura. Par exemple, le second a pour objectif de recycler jusqu'à 20 000 tonnes de déchets par an et de devenir l'un des premiers producteurs de métaux stratégiques en Europe. D'après ses projections, Sanou Koura pourrait

¹¹⁸ L'étain offre une couche de protection contre la corrosion et l'oxydation, particulièrement dans des environnements humides

être en mesure de traiter et de recycler jusqu'à 3 kt/an, c'est-à-dire, de prendre en charge plus de la moitié des cartes électroniques issues des DEEE estimés en France (Sanou Koura, 2023).

- **De nouveaux acteurs pourront également développer l'affinage de cuivre issu de MPR dans le cadre de la législation sur les matières premières critiques.**

En mars 2023, la Commission européenne a présenté le projet de règlement sur les matières premières critiques (« CRM Act » - cf. Annexe 8.5.3.)¹¹⁹ qui vise à améliorer la capacité de l'UE à atténuer les risques de rupture d'approvisionnement et à renforcer la circularité de ces matières. Le règlement fixe notamment des critères pour les capacités de recyclage en matières premières stratégiques à l'horizon 2030, qui devront fournir **au moins 25 % de la consommation annuelle de l'UE**. Cet objectif devrait amener les Etats membres à renforcer leur soutien vis-à-vis des acteurs permettant le recyclage du cuivre en France, reconnu alors comme matière première stratégique.

5.3.4. Conséquences sur la consommation de MPR de cuivre et enjeux de circularité du cuivre à 2030

5.3.4.1. Des développements technologiques permettront d'améliorer le tri des déchets post-consommation et d'incorporer davantage de MPR de cuivre en France...

Selon un expert de la chaîne de valeur du cuivre, bien que de nombreux produits contiendront davantage de cuivre en raison de l'électrification progressive de l'économie, le cuivre sera utilisé en petites quantités et dans des applications miniaturisées. **Il est donc essentiel d'améliorer le traitement et le tri**, d'autant plus que 80 % du cuivre est utilisé sous une forme pure. Il est donc indispensable de récupérer plus de cuivre dans les déchets post-consommation, puis :

- Soit trouver l'adéquation parfaite entre le type de MPR de cuivre et des acteurs du recyclage par fusion ;
- Soit les préparer par la filière affinage (smelting et refining), avec comme inconvénient le besoin d'énergie supplémentaire pour le raffinage électrolytique (refining) pour séparer le cuivre de certains éléments d'alliages (Entretien d'experts).

Le cuivre est en effet un métal stratégique pour lequel **des progrès importants restent à faire**, notamment la valorisation des MPR de cuivre contenu dans les cartes électroniques. Aujourd'hui, des projets de Recherche & Développement portent, entre autres, sur la récupération de métaux stratégiques dont le cuivre – dans les particules fines issues des broyages de DEEE, en particulier dans les cartes électroniques (Entretien d'experts).

5.3.4.2. ... mais ne permettra pas de couvrir tous les besoins des marchés consommateurs de cuivre

- **Les quantités de déchets pré-consommation de cuivre en France devraient stagner à l'horizon 2030.**

La stagnation des quantités de chutes neuves en Europe pourrait compromettre la circularité du cuivre via la filière de recyclage par fusion d'ici à 2030. Cette situation est due au fait que les processus de fabrication deviennent plus efficaces, mais aussi qu'une grande partie de la fabrication de produits finis a été délocalisée en Chine, où les déchets de fabrication sont recyclés en interne, chez les fabricants de produits finis (Tercero et Espinoza, 2021).

¹¹⁹ Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 et (UE) 2019/1020. COM/2023/160 final

- **Les quantités de déchets post-consommation de cuivre ne seront pas suffisantes pour répondre à la hausse de la demande de cuivre française.**

Les volumes de MPR de cuivre collectés et triés en 2030 ne permettront pas de répondre intégralement à la demande de cuivre estimée :

- D'une part, les applications du bâtiment et des infrastructures, pour lesquelles les taux de recyclage sont les plus élevés, ont des durées de vie élevées. Ces applications immobilisent le cuivre pendant plusieurs décennies, ce qui retarde son entrée en recyclage ;
- D'autre part, les biens de consommation – qui incorporent une part importante de cuivre – ont des durées de vie plus courtes – même si la tendance est à l'allongement de leur durée de vie – mais leur taux de recyclage est moindre (entre 25 % et 40 %) (IFP Energies Nouvelles, 2020 et Entretien d'experts).

- **Enfin, à l'échelle mondiale, même les matières premières vierges pourraient ne pas être disponibles en quantités suffisantes pour répondre à la demande de cuivre**

Avec la forte croissance à prévoir de la demande en cuivre, les travaux de l'IFPEN estiment que 78,3 % et 89,4 % des ressources connues en 2010 seront extraites des mines d'ici 2050 pour les scénarios 4D et 2D¹²⁰. Ce risque géologique soulève deux risques sous-jacents :

- Un **risque économique**, la Chine contrôlant près de 40 % du raffinage électrolytique (refining) mondial de cuivre ;
- Un **risque géostratégique** d'accès aux gisements de cuivre. En effet, la Chine sécurise des ressources de matières premières vierges en Amérique latine, en Asie et en Afrique à travers ses investissements directs à l'étranger (IFP Energies Nouvelles, 2020).

Ces **tensions d'approvisionnement en cuivre neuf** devraient inciter les acteurs français et européens de la chaîne de valeur du cuivre à incorporer des volumes plus importants de MPR de cuivre.

5.4. Principaux freins au recyclage du cuivre

Il existe plusieurs freins au recyclage du cuivre. Tout d'abord, une partie minoritaire des gisements n'est pas collectée car les coûts de collecte et de préparation des MPR sont plus élevés que leur prix de vente ou car ils sont captés par des filières illégales (5.4.1). L'un des freins majeurs à l'incorporation de MPR de cuivre tient au fait que les teneurs actuelles en résiduels des MPR, combinées aux exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs d'aluminium, contraignent l'incorporation de MPR (5.4.2). Ces exigences concernent notamment l'atteinte d'un cuivre de très haute pureté et l'élimination de contaminants métalliques. Or, le sur-tri des MPR représente un coût additionnel significatif pour les préparateurs de MPR et les métallurgistes (5.4.3). En parallèle, les MPR de cuivre sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et de la demande. Une demande élevée en Europe (Allemagne, Belgique, Espagne, Italie) pour des MPR à faibles teneurs en résiduels et une demande élevée hors UE (ex. Chine) pour des MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées conduit ainsi à l'export d'une part importante des MPR de cuivre françaises (5.4.4). Les MPR et les MPV étant des commodités, la structure des marchés détermine également en partie les volumes de MPR de cuivre achetées et incorporées en France (5.4.5). Enfin, l'essor du réemploi ou de l'allongement de la durée de vie des produits pourraient contribuer à retarder l'entrée en recyclage des MPR de cuivre, contraignant un peu plus encore le recyclage (5.4.6).

¹²⁰ L'équipe de recherche a utilisé le modèle TIAM-IFPEN pour évaluer la demande cumulée de cuivre jusqu'en 2050 selon deux scénarios climatiques : un scénario 4°C/4D, qui correspond à une hausse de la température de 4°C par rapport aux niveaux préindustriels et un scénario 2°C/2D plus ambitieux qui limite la hausse de la température à 2°C.

A titre liminaire, on rappellera enfin que le recyclage du cuivre repose sur un équilibre entre trois paramètres :

- **Disponibilité par rapport à la demande de MPR de cuivre :** Ce type de Matière Première de Recyclage est-il demandé en France et à l'étranger ? Par quel type d'acteurs métallurgiques ? Est-il disponible en quantités suffisantes par rapport à la demande des métallurgistes ?
- **Prix des MPR de cuivre :** Quel est le coût de traitement de cette MPR afin qu'elle puisse être réincorporée en France ? Qui porte ce coût de traitement : les préparateurs de MPR métalliques et/ou les incorporateurs ? Est-il plus avantageux d'exporter la matière ou de l'incorporer en France ? A quel prix cette MPR est-elle vendue sur le marché ?
- **Types de MPR de cuivre :** De quel alliage est constitué cette Matière Première de Recyclage ? Contient-elle des impuretés ? Dans quelles proportions ? Les technologies de tri des préparateurs de MPR permettent-elles d'atteindre les exigences de composition des incorporateurs de MPR ? Dans quelles applications cette MPR peut-elle être réincorporée ?

5.4.1. Une faible part du cuivre n'est pas collectée pour des raisons économiques

5.4.1.1. Certains gisements sont non collectés ou non triés en raison de coûts de collecte et de préparation des MPR de cuivre supérieurs au prix de vente

Les gisements de cuivre issus des déchets post-consommation sont presque systématiquement collectés en raison de la valeur élevée des déchets cuivreux par rapport aux autres déchets métalliques. Selon un expert de la chaîne de valeur du cuivre, l'un des seuls gisements non collectés est le cuivre stocké dans les bâtiments correspondant aux anciens câbles en cuivre intégrés dans les murs. Etant donné qu'il est très difficile et coûteux de récupérer ces fils, ceux-ci sont parfois laissés dans les murs (Entretien d'experts). A noter que ce point n'a pas été confirmé par des acteurs français de la filière cuivre et de la filière bâtiment. Selon eux, la peu de métaux collectés ne sont pas valorisés, ce qui est d'autant plus vrai pour le cuivre, dont les MPR ont des prix de vente élevés (Multiples entretiens d'experts).

L'hétérogénéité du gisement de MPR métalliques (typologies d'alliages, volumes collectables, etc.) est un frein pour le recyclage des déchets métalliques, et a fortiori des déchets de cuivre. Les préparateurs de MPR métalliques n'ont parfois pas d'intérêt économique à déployer des moyens pour collecter et trier des déchets de petite taille ou issus de gisements trop diffus ou des déchets en mélange, notamment présents dans des produits complexes (EEE, véhicules) où la fraction recherchée est mêlée à d'autres matériaux. Par exemple, pour les DEEE, les liaisons entre des matériaux incompatibles pour le recyclage (entre plastique et métaux, entre deux métaux, etc.) dégrade le taux de recyclage des DEEE. Plus un produit est petit, plus les liaisons sont problématiques. Cela explique que certains DEEE, tels que les écouteurs, soient majoritairement détruits (Entretien d'experts).

5.4.1.2. Certains gisements de MPR de cuivre sont captés par des filières illégales de collecte

Bien que les gisements de cuivre issus des déchets post-consommation soient tous collectés, **des volumes élevés de cuivre sont collectés par des filières illégales¹²¹**.

¹²¹ L'European Copper Institute et l'Institut Fraunhofer estiment qu'en Europe, en 2020 environ 1090 kt de cuivre n'étaient « pas officiellement collectés en vue du recyclage » (European Copper Institute et Fraunhofer Institute, 2022), soit environ 39 % du gisement total de cuivre contenu dans les déchets post-consommation. Il convient de préciser que les résultats des analyses de flux de matières sont théoriques et qu'il y a toujours une différence entre les quantités estimées et la réalité. Ces estimations reposent notamment sur des hypothèses fortes en matière de durée de vie des produits (Entretien d'experts), non recalculées dans le cadre cette étude.

En particulier, avant même la fin de vie des produits en cuivre, **des vols de cuivre se produisent régulièrement**, dûs à la valeur élevée de ce métal. Certains gisements de cuivre sont plus régulièrement sujets à des vols tels que les composants en cuivre de certains déchets post-consommation (ex. VHU, DEEE) et les télécommunications. A dire d'expert, la manière dont le cuivre disparaît n'est pas bien connue aujourd'hui, mais **il revient partiellement dans les filières agréées de traitement des MPR de cuivre** (Entretien d'experts).

Des volumes de cuivre traités par les filières illégales sont donc exportés. Ces volumes ne sont pas connus et relèvent uniquement d'estimations. Deux gisements d'intérêt sont le cuivre des VHU, présenté en section 5.5.1, et le cuivre des DEEE, présenté en section 5.5.2. Par exemple, pour les DEEE, les matières les plus exportées via des filières illégales sont celles ayant une valeur élevée, en particulier les métaux, comme les compresseurs dépollués en cuivre issus des équipements de froid (Entretien d'experts).

5.4.1.3. Il existe un manque de traçabilité de certains flux de produits en fin de vie

Certains produits en fin de vie sont peu traçables, notamment ceux du secteur de l'industrie mécanique (équipements de production, équipements mécaniques, pièces mécaniques de sous-traitance, etc.). En effet, contrairement aux automobiles et aux emballages, ces marchés représentent des applications très diverses avec des durées de vie qui varient d'un produit à l'autre (Multiples entretiens d'experts). Ainsi, il est très difficile de savoir si ces gisements de MPR de cuivre sont correctement collectés et triés et, in fine, dans quels types d'applications ils sont réincorporés.

5.4.2. Les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs contraignent l'incorporation de MPR de cuivre par l'industrie métallurgique

5.4.2.1. Les exigences techniques des secteurs consommateurs de cuivre se répercutent dans les cahiers des charges des fabricants de produits semi-finis en cuivre

- **Il existe une large variété d'alliages de cuivre, ce qui complexifie son recyclage.**

La composition des alliages de cuivre dépend de marchés consommateurs de cuivre, que la Figure 53 représente schématiquement. **Plus de 400 alliages de cuivre sont produits** par les adhérents de l'International Copper Alliance et de l'International Wrought Copper Council (IWCC) :

- Environ 80 % des tonnages de produits semi-finis fabriqués ont des **teneurs en cuivre très élevées**¹²² ;
- Ensuite, viennent les **bronzes et les laitons**, qui sont les alliages les plus importants en volume ;
- Les **autres alliages de cuivre** représentent une minorité de la production (Entretien d'experts).

La Figure 53 récapitule visuellement les différentes familles d'alliages de cuivre et leur structure d'utilisation : construction, biens de consommation, produits industriels, transports et applications électriques.

¹²² A titre d'exemple, le cuivre côté au London Metal Exchange (LME), « grade A copper », doit avoir une teneur maximale en éléments autres que le cuivre de 0,0065%

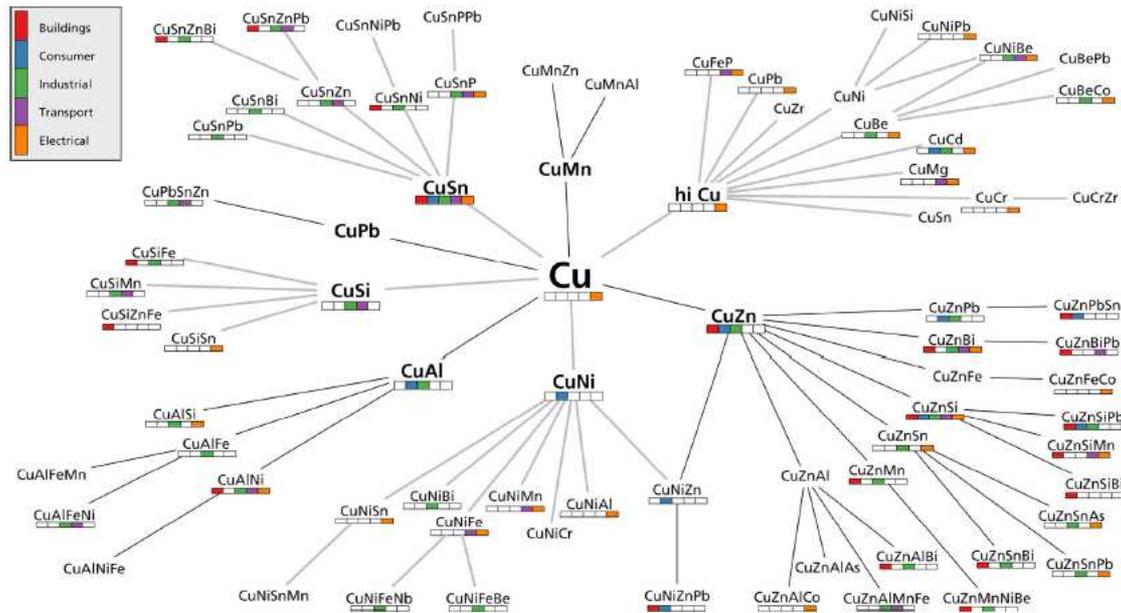


Figure 53 : Familles d'alliages de cuivre et leur structure d'utilisation (Loibl et Tercero Espinoza, 2021)

- Certains de ces alliages ne permettent pas l'incorporation de MPR de cuivre ou seulement dans une moindre mesure.

La fabrication de produits semi-finis de certains alliages n'a historiquement pas permis l'intégration de MPR de cuivre. C'est notamment le cas de la fabrication de fil machine, qui correspond à 63 % des produits semi-finis en cuivre dans le monde (Figure 54). Les normes du marché du câble exigent un cuivre pur à plus de 99,99 % pour les applications électriques, afin d'assurer une conductivité optimale et d'éviter les risques d'échauffement¹²³ (Multiples entretiens d'experts). Ces exigences ne permettent pas à date d'incorporer de MPR. Il existe des conditions opérationnelles qui autorisent une certaine proportion de cuivre dans les câbles provenant de matières premières de recyclage. Toutefois, le sujet a été jugé sensible par plusieurs experts et les fédérations du cuivre ne disposent pas de statistiques nationales sur l'incorporation moyenne de MPR de cuivre par les câbliers (Entretien d'experts).

Par exemple, pour la société Nexans fournissant différents marchés dont la distribution d'énergie ou les infrastructures (par ex. les réseaux ferroviaires), le taux d'incorporation de MPR de cuivre dans les câbles est d'environ 6 %. Il se limite aujourd'hui à

- L'incorporation de chutes internes ;
- L'incorporation de MPR de cuivre en amont de la chaîne de valeur, lors de l'étape d'affinage du cuivre réalisée par ses fournisseurs¹²⁴ (Entretien d'experts). En effet, l'affinage de cuivre (smelting and refining) comprend d'une part l'affinage de cuivre issu de MPV (matières premières vierges) et d'autre part l'affinage de cuivre issu de MPR, ce qui explique que les produits achetés par le Groupe contiennent une faible proportion de MPR.

¹²³ Pourtant, les normes internationales sur la composition des alliages précisent la teneur en résiduels et les exigences techniques des métaux, sans préciser la source. L'incorporation de MPR de cuivre n'est donc pas restreinte de manière réglementaire. L'enjeu d'augmentation de la part de MPR dans le cuivre consommé par les câbliers est donc plus particulièrement un enjeu de qualification et de performance de tri au préalable, avec les experts techniques et environnementaux (Entretien d'experts).

¹²⁴ Par exemple, KGHM Polska Miedź, principal producteur de cuivre européen, incorpore majoritairement des matières premières vierges et, dans une moindre mesure, entre 20 % et 25 % de MPR de cuivre (Entretien d'experts).

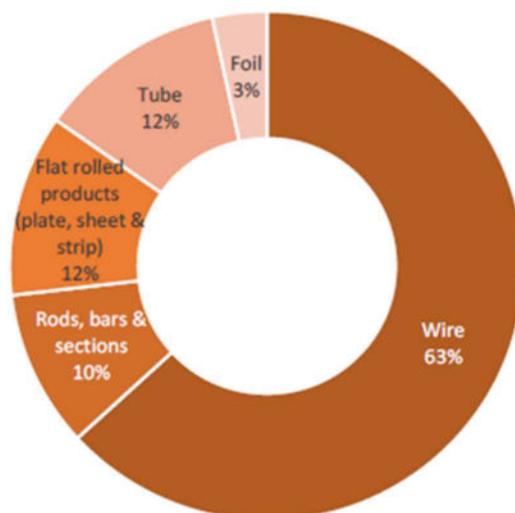


Figure 54 : Répartition des tonnages des produits semi-finis en cuivre dans le monde en 2022 (production de cuivre et d'alliages de cuivre, avec une teneur en cuivre des alliages estimée à 70 %) (ICSG, 2022, d'après l' International Wrought Copper Council et l'Alliance Internationale du Cuivre)

5.4.2.2. Des exigences réglementaires entraînent des coûts additionnels tout au long de la chaîne de valeur du recyclage du cuivre

Certaines réglementations visent à réduire les risques des produits contenant des métaux sur la santé et la sécurité des personnes, ainsi que sur l'environnement. Pour ce faire, elles imposent ou devraient imposer des teneurs maximales en éléments contaminants. Par exemple, les teneurs du cuivre en certains métaux – notamment en plomb – sont limitées dans le laiton¹²⁵, en raison du contact de la tuyauterie et de la robinetterie avec l'eau potable (Fédération des Industries Mécaniques 2023). Ces opportunités réglementaires sont une contrainte pour le recyclage du cuivre, puisqu'elles génèrent des coûts additionnels de « sur-tri » des MPR de cuivre.

- **L'ensemble du droit des substances chimiques et, en particulier, l'objectif d'un environnement non toxique (CSS), peut être difficile à concilier avec les contraintes techniques et économiques de l'économie circulaire.**

Les réglementations ci-dessus s'inscrivent notamment dans le cadre de la stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques (CSS – Chemicals Strategy for Sustainability¹²⁶) de la Commission européenne. Sur la question plus spécifique des substances dangereuses, **la CSS propose une nouvelle hiérarchie dans la gestion des produits chimiques** (cf. Figure 25), qui vise à éliminer les substances dangereuses, y compris dans les déchets.

Le recyclage du cuivre en France peut être défavorisé pour deux raisons :

- D'une part, **les réglementations produits et déchets sont distinctes**. Si une substance est interdite dans un produit¹²⁷, elle ne le sera pas forcément dans le déchet contenant cette

¹²⁵ Au titre de la Directive 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

¹²⁶ Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques. Vers un environnement exempt de substances toxiques. COM/2020/667 final

¹²⁷ Par exemple par la Directive 2011/65/UE du Parlement européen et du Conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (RoHS – Restriction of Hazardous Substances) ;

substance « héritée ». Or, la dépollution de ce déchet « contaminé » – qui est nécessaire pour le recycler en boucle fermée – est parfois irréalisable ou très complexe d'un point de vue technico-économique. C'est notamment le cas pour la contamination en plomb, qui a été intégré à la liste de restriction de certaines substances dangereuses pour certaines applications spécifiques (Annexe XVII¹²⁸ du Règlement REACH¹²⁹) et dont la classification à la liste d'autorisation (annexe XIV du même règlement) a été proposée par la Commission européenne, impliquant une interdiction de son utilisation dans les alliages à plus de 0,1% sauf autorisation par la Commission ;

- D'autre part, **les réglementations produits et déchets sont toutes deux liées à la classification des substances** selon différentes réglementations (REACH, CLP¹³⁰). Lorsqu'un déchet est classifié comme dangereux¹³¹, alors son traitement en déchet dangereux, et donc son recyclage est contraint techniquement et donc financièrement.
- **Ces réglementations pourraient entraîner des coûts additionnels tout au long de la chaîne de valeur du recyclage du cuivre.**

L'offre française de MPR de cuivre issue des produits en fin de vie correspond aux **misés sur le marché d'il y a plusieurs décennies**. Au moment des mises sur le marché, ces exigences réglementaires étaient soit inexistantes, soit moins ambitieuses (Entretien d'experts). Ces gisements de déchets en fin de vie peuvent donc difficilement être recyclés en boucle fermée pour des raisons techniques et financières et sont parfois contraints au recyclage en boucle ouverte en France ou à l'exportation.

Jusqu'à présent, certaines MPR post-consommation contenant une faible proportion de plomb étaient refondues dans de nouveaux produits, notamment pour les industries ne nécessitant pas du cuivre de catégorie 1 (MPR de type électrolytique, pureté en cuivre de 99,9 %). Si la teneur en plomb autorisée pour les nouveaux produits est nettement inférieure à la teneur en plomb des produits en fin de vie, ces MPR devraient alors :

- **Soit être « diluées » avec du cuivre issu de l'affinage** (smelting et refining, qui incorporent majoritairement des MPV) **par la voie recyclage par fusion** (direct melting). Les coûts économiques de la consommation d'énergie liée à la production de « cuivre affiné », ainsi que les coûts environnementaux liés à l'empreinte carbone de ce cuivre, seraient élevés ;
- **Soit être envoyées vers la voie d'affinage**, beaucoup plus énergivore. En effet, on estime que la demande énergétique pour la production de produits semi-finis à partir de cuivre recyclé est deux à quatre fois plus importante par la voie d'affinage (smelting et refining) que par la voie de recyclage par fusion (direct melting) (Loibl et Tercero Espinoza, 2022, Tikana, 2020 et Entretien d'experts).

¹²⁸ Restrictions applicables à la fabrication, à la mise sur le marché et à l'utilisation de certaines substances dangereuses et de certains mélanges et articles dangereux.

¹²⁹ Règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) no 793/93 du Conseil et le règlement (CE) no 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission

¹³⁰ Règlement CE 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges (CLP – Classification, Labelling, Packaging).

¹³¹ Au titre de la liste des déchets européens : Décision de la Commission du 3 mai 2000 remplaçant la décision 94/3/CE établissant une liste de déchets en application de l'article 1 er , point a), de la directive 75/442/CEE du Conseil relative aux déchets et la décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux en application de l'article 1 er , paragraphe 4, de la directive 91/689/CEE du Conseil relative aux déchets dangereux [notifiée sous le numéro C(2000) 1147] (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) (2000/532/CE)

Jusqu'à présent, certaines MPR post-consommation contenant une faible proportion de plomb étaient refondues dans de nouveaux produits, notamment pour les industries ne nécessitant pas du cuivre de catégorie 1 (MPR de type électrolytique, pureté en cuivre de 99,9 %). Si la teneur en plomb autorisée pour les nouveaux produits est nettement inférieure à la teneur en plomb des produits en fin de vie, ces MPR devraient alors :

- **Soit être « diluées » avec du cuivre issu de l'affinage** (smelting et refining, qui incorporent majoritairement des MPV) **par la voie recyclage par fusion** (direct melting). Les coûts économiques de la consommation d'énergie liée à la production de « cuivre affiné », ainsi que les coûts environnementaux liés à l'empreinte carbone de ce cuivre, seraient élevés ;
- **Soit être envoyées vers la voie d'affinage**, beaucoup plus énergivore – cf section 5.3.3.1.

5.4.3. Les technologies actuelles et en cours de développement ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'exigence dans les conditions actuelles de marché, ce qui entraîne le recyclage en boucle ouverte d'une partie des MPR de cuivre en France

5.4.3.1. Certaines MPR de cuivre peuvent difficilement être valorisées via les procédés conventionnels

- **La faible recyclabilité de certains produits contenant du cuivre est une contrainte importante à la séparation des éléments en cuivre et, in fine, à son recyclage en France.**

En matière d'éco-conception, certains acteurs interviewés estiment que l'appel à la **conception en vue du recyclage** n'a pas été pris en compte par de nombreux secteurs consommateurs de cuivre. Ce serait notamment le cas de la majorité des constructeurs automobiles pour la conception des véhicules (Multiples entretiens d'experts). Cette faible recyclabilité des véhicules explique que le cuivre des faisceaux électriques des VHU est majoritairement valorisé par les broyeurs plutôt que par les centres VHU, cf. section 5.5.1. A dire d'expert, après broyage des carcasses, ces fils de cuivre se répartissent, mélangés à d'autres matières non métalliques, environ pour moitié dans les résidus de broyage légers (ou fluff en anglais) et pour l'autre moitié dans les résidus de broyage lourds. La récupération de ces fils dans ces flux de matières mélangées est complexe et peu pratiquée.

- **Il existe des contaminants métalliques qui contraignent le tri et l'incorporation des MPR de cuivre.**

Les contaminants métalliques ne peuvent pas être facilement retirés via les procédés conventionnels.

La Figure 26, présentée plus haut, indique ainsi que s'agissant du cuivre, certains contaminants – *tramp elements* – métalliques restent dans le métal ciblé. Par exemple, le plomb est un contaminant des MPR et peuvent limiter leur recyclage dans des usages similaires à ceux du produit d'origine (Entretien d'experts).

Par exemple, pour les câbles, le fil machine peut être recouvert d'une couche de métal (ex. argent, nickel, étain) ou être allié (ex. laiton). Ces déchets, s'ils ne sont pas retraités par un affineur, ne peuvent pas être réutilisés par les câbliers ; ils sont donc exportés. La séparation densimétrique est la seule disponible aujourd'hui pour séparer les métaux¹³² mais dans le cas des alliages et des revêtements, seuls les procédés d'affinage permettent de séparer/purifier les métaux (Entretien d'experts).

¹³² La technique densimétrique permet de séparer les métaux dans les produits incorporant plusieurs métaux « non liés », typiquement câbles multicouches (ex. conducteur cuivre avec écran en aluminium).

- **Les technologies existantes en France ne permettent généralement pas de recycler le cuivre en boucle fermée.**

Il existe aujourd'hui une **inadéquation entre le format de certaines MPR et les procédés existants des fabricants de produits semi-finis en cuivre**. La filière cuivre est conditionnée par le capital industriel et les modes de production déjà en place. Certains préparateurs de MPR produisent des grenailles¹³³ ayant une teneur en cuivre supérieure à 99,9 %, conformément aux attentes des secteurs tel que le câble. Néanmoins, ce format ne peut pas alimenter les fours de fusion, prévus pour recevoir des cathodes, des tubes ou des plaques. Ces particules fines issues du broyage des câbles sont donc revendues à d'autres industries, comme l'électrotechnique (Entretien d'experts).

La contamination des MPR de cuivre (notamment au plomb), ainsi que l'inadéquation entre les MPR produits et le capital industriel existant, empêchent l'incorporation de MPR de cuivre à très faibles teneurs en résiduels dans certains types d'applications tels que les câbles. La conséquence directe des difficultés de valorisation des MPR de cuivre est **l'incorporation de ces déchets en France dans des applications acceptant des teneurs plus élevées en contaminants** (recyclage en boucle ouverte), ainsi que leur exportation (cf. section 5.4.4) (Entretien d'experts).

- **A ces exigences techniques s'ajoutent des exigences de garantie d'un gisement de MPR métalliques stable à long terme.**

Les investissements dans des technologies de recyclage requièrent un gisement stable en volume dans la durée, ce qui est impossible à garantir avec des MPR. En parallèle, les retours sur investissement des boucles d'économie circulaire peuvent être faibles dans le cas où les produits valorisés sont remplacés par d'autres types de produits. Cela a été le cas pour le recyclage des lampes fluocompactes, pour lesquelles des investissements importants avaient été financés, avant que celles-ci aient été majoritairement remplacées par des lampes LED (Entretien d'experts).

5.4.3.2. Les technologies de pointe de tri sont peu déployées en raison d'une faible productivité et d'un coût élevé

- **Le développement de nouvelles techniques de tri n'est aujourd'hui pas porté par la chaîne de valeur du recyclage du cuivre.**

Tout d'abord, les lignes de découpe des câbles (*wire chopping lines*) sont un procédé permettant d'obtenir du cuivre de haute pureté. Les câbles usagés y sont d'abord découpés (dans un *prechopper*), puis réduits en grenailles (dans un *granulator*), puis le cuivre est isolé dans une table densimétrique¹³⁴ (*air table*), avant de passer sur un tamis vibrant¹³⁵ (*sifter*). Ces étapes successives permettent d'obtenir des grenailles de cuivre de catégorie 1 (ou « MPR de type électrolytique) (Sweed, 2023 et MTB Recycling, 2023). Selon un expert du recyclage du cuivre, bien que ce procédé soit de progressivement déployé dans le cadre des politiques d'investissement des préparateurs de MPR de cuivre et de leurs fournisseurs (fabricants de produits semi-finis), il reste peu déployé en Europe.

En outre, il existe aujourd'hui une technologie permettant de récupérer la majeure partie du cuivre, avec des capteurs et d'autres détecteurs et le traitement mécanique des matériaux et des produits. Toutefois, ces technologies nécessitent des investissements en capital importants. Le cuivre pourrait être un pilote intéressant pour réaliser ces investissements car il serait très rentable pour les préparateurs de MPR de cuivre. (Entretien d'experts).

¹³³ Métal réduit en grains

¹³⁴ Les tables densimétriques permettent une séparation de matériaux granulés de tailles et de formes homogènes ayant une grande différence de densité. La séparation est réalisée grâce à la combinaison d'un lit à air fluidisé et d'une table vibrante inclinée (MTB Recycling, 2023)

¹³⁵ Les tamis sont utilisés pour la séparation finale du produit en fonction de la granulométrie. Ils peuvent être équipés d'une tôle métallique ou d'une tôle perforée dont la maille est déterminée en fonction des produits (MTB Recycling, 2023).

Également, , **plusieurs technologies innovantes pour séparer les différents alliages cuivreux sont à l'étude, telles que les spectrométries XRF et LIBS**. Néanmoins, le développement de ces nouvelles techniques de tri est principalement porté par l'industrie de l'acier et de l'aluminium¹³⁶ (cf. section 4.4.3). Le développement de nouvelles techniques de tri des MPR de cuivre n'est donc pas porté par l'industrie du cuivre, alors même que le tri alliage par alliage pourrait contribuer à l'amélioration du recyclage du cuivre en France et en Europe.

Enfin, **le tri manuel reste une méthode de tri très efficace** mais très coûteuse. Par exemple, l'étape de dépollution et de démantèlement des VHU est jugée très efficace, mais son coût élevé fait qu'elle est généralement rapide et que les éléments en cuivre sont rarement extraits avant le broyage (Entretien d'experts).

- **A cela s'ajoute un grand nombre de procédures à suivre pour les projets d'intérêt national majeur, dont font partie les projets de récupération et de valorisation du cuivre des déchets post-consommation.**

Plusieurs projets innovants cherchent à développer le recyclage des métaux issus des DEEE en boucle courte, dont le cuivre. C'est le cas de WeeeCycling et de Terra Nova Développement (projet Sanou Koura) qui valorisent de mieux en mieux les métaux contenus dans les cartes électroniques en fin de vie (Entretien d'experts). Ces projets ne bénéficient pas à date d'une procédure simplifiée. Selon la loi Industrie Verte (mesure 4), « En raison de la mobilisation de foncier et des investissements nécessaires, les projets industriels d'intérêt national majeur sont soumis à un grand nombre de procédures administratives, dont l'organisation d'un débat public et la mise en compatibilité des documents locaux d'urbanisme et de planification régionale. Ces différentes procédures peuvent rallonger les délais de 24 mois avant que le porteur de projet n'obtienne l'ensemble des autorisations nécessaires [...] occasionnant un déficit de compétitivité pour la France » (Ministère de l'Economie, 2023)¹³⁷.

- **Au-delà du soutien aux projets innovants, certaines infrastructures de recyclage du cuivre n'existent pas en France du fait de l'ampleur des investissements.**

Il s'agit d'un sujet à la fois français et européen. Le potentiel d'incorporation de MPR de cuivre de France pourrait être élevé si une filière d'affinage était mise en place. Néanmoins, le CAPEX de la création d'une filière d'affinage en France est compris entre un et trois milliards d'euros, une dépense d'investissement nettement supérieure aux subventions existantes de BPI France, de l'ADEME et d'autres structures dont pourraient bénéficier les porteurs de projet aujourd'hui (Entretien d'experts).

5.4.4. Les MPR de cuivre sont des commodités échangées au niveau mondial, donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et la demande

La section 5.2 détaille les catégories et quantités de MPR de cuivre exportées par la France, ainsi que les principales destinations des exports français et européens.

¹³⁶ Par exemple, les premières applications industrielles de la technologie LIBS ont été le tri et la séparation des alliages d'aluminium de corroyage et de fonderie ou le *monitoring* du chargement des ferrailles dans les fours à arc électrique (Loibl et Tercero Espinoza, 2022)

¹³⁷ A noter que la loi Industrie Verte vise à accélérer les projets d'intérêt national : « Une procédure spécifique, exceptionnelle et pilotée par l'État est mise en place pour certains projets identifiés par décret du Premier ministre. Elle prévoit une mise en compatibilité plus rapide des documents locaux d'urbanisme [...] et ceux de planification régionale, des procédures de raccordement électrique accélérées, et un permis de construire délivré par l'État » (Ministère de l'Economie, 2023).

- **La demande de MPR de cuivre et le consentement à payer de certains pays hors-UE peut restreindre le recyclage des MPR de cuivre en France, à plusieurs égards.**

Les volumes d'export sont élevés si :

- **Les coûts de préparation des MPR de cuivre sont élevés en France.** Par exemple, les technologies de découpe des câbles (*wire chopping lines*) ou de tri alliage par alliage (ex. spectrométrie LIBS) représentent des coûts très importants pour les préparateurs de MPR, pour une productivité faible à date ;
- **Le consentement à payer pour une catégorie donnée de MPR est plus élevé à l'étranger**, par exemple pour les MPR ayant des teneurs en éléments résiduels trop élevées pour être incorporées via la filière recyclage par fusion en France ;
- **La demande française de MPR de cuivre est limitée** : certains secteurs d'activité sont aujourd'hui peu incités à incorporer des MPR de cuivre, alors qu'ils pourraient représenter des débouchés, par exemple les producteurs de câbles en cuivre ;
- **Les pays tiers – et notamment le grand export – peuvent pratiquer un « dumping environnemental ».** La réglementation environnementale française et européenne impose des modalités de collecte, de tri et d'incorporation des MPR exigeantes. Les acteurs industriels interrogés dans le cadre de cette étude estiment que cette ressource ne fait pas toujours l'objet d'un traitement environnemental comparable à celui réalisé au sein de l'UE (Entretien d'experts), alors que l'affinage du cuivre est un procédé similaire dans le monde entier (Entretien d'experts). Cependant, les exportations de déchets de cuivre en dehors de l'UE représentent des volumes importants, notamment vers la Chine, puisque ce pays achète des MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées à des prix plus élevés que les acteurs européens car le tri y est effectué par une main-d'œuvre moins chère et avec des pratiques moins respectueuses de l'environnement (ex. brûlage des gaines en plastique) (DGE, 2015).

Exemple : les cartes électroniques des DEEE.

D'une part, la demande française en cartes électroniques usagées (qui contiennent une part importante de cuivre) est limitée, par manque d'industries en capacité de les recycler. Les experts constatent que certaines techniques d'extraction disparaissent progressivement. C'est le cas des techniques de pyrométallurgie nécessaires à l'extraction et à l'affinage de certains métaux des cartes électroniques, qui sont considérées comme trop énergivores et polluantes. Ces compétences deviennent rares en France ; seule une à deux entreprises sont encore en mesure d'extraire les métaux par la pyrométallurgie ou l'hydrométallurgie. Leur capacité de traitement est pour l'instant inférieure au gisement de cartes électroniques (Entretien d'experts). En 2020, seules neuf usines dans le monde étaient capables de traiter ces cartes. En effet, adapter une usine de cuivre pour qu'elle assure un tel traitement, demande un grand savoir-faire et des investissements élevés (CAPEX de l'ordre d'au moins 4 000 € par tonne par an). En 2020, la France ne comptait ainsi aucun acteur industriel de taille significative. De ce fait, elle ne peut récupérer qu'une faible part des métaux stratégiques contenus dans ses propres déchets (Thomas, 2020). Toutefois, la demande française en cartes électroniques usagées augmente progressivement, notamment sous l'impulsion de projets innovants tel que WeeeCycling.

D'autre part, la demande de certains pays tiers est plus élevée et ceux-ci peuvent pratiquer le dumping social et environnemental. Par exemple, en Chine, l'un des procédés de tri des composants électroniques consiste à tremper les cartes électroniques dans un bain de plomb en fusion en les secouant. Les composants sont ensuite triés à la main (Thomas, 2016 et Thomas, 2020).

- **Aujourd'hui, il est donc plus simple et plus rentable pour les préparateurs de MPR de cuivre de vendre des MPR triées ou non triées à l'exportation**

D'une part, bien que des acteurs français soient en train de monter en capacité et en technicité sur les métaux critiques dont le cuivre, **l'absence de processus performants de valorisation des déchets avec des coûts moins importants pour les préparateurs de MPR** ou le manque de capacité de traitement sont des incitations directes à l'export (Entretien d'experts). D'autre part, le fait que la France ne dispose

pas d'une filière d'affinage de cuivre développée et n'ait jamais produit de cathodes de cuivre conduit également aux volumes élevés d'exportations de MPR de cuivre (Entretien d'experts).

Aujourd'hui, la quasi-totalité des MPR de cuivre françaises sont valorisées et réincorporées dans un nouveau cycle de production. En revanche, **très peu de MPR sont incorporées en France**. Par exemple, les câbles en cuivre usagés sont généralement :

- Soit triés et broyés en France puis exportés, notamment vers l'Allemagne, la Belgique et la Pologne ;
- Soit exportés avant broyage (environ 30 % des câbles usagés), notamment vers la Pologne (Entretien d'experts).

5.4.5. Les prix des matières premières et de l'énergie jouent un rôle important et peuvent constituer un frein au recyclage du cuivre en France

Cette section récapitule les principaux déterminants des prix, du type de MPR et de la disponibilité des métaux. Il s'agit de généralités communes à tous les métaux de base, qui s'appliquent donc au recyclage du cuivre. Les matières premières vierges et les matières premières de recyclage étant des commodités, **l'offre et la demande des agents, ainsi que les défaillances éventuelles des marchés déterminent en partie les volumes de MPR de cuivre achetés et incorporés en France**.

En particulier, l'évolution des prix des matières premières vierges et l'évolution du prix de l'énergie sont déterminants pour inciter à la collecte, à la valorisation et à la réincorporation des métaux en France. On peut estimer que, jusqu'à présent, ces fondamentaux n'ont pas favorisé un plus haut niveau de recyclage en France. En effet :

- **Historiquement, la fixation des prix des métaux a en partie échappé aux acteurs du marché mondial en raison d'événements politiques majeurs et d'événements propres aux matières premières métalliques.**

L'US Geological Survey souligne que les principaux facteurs historiques qui ont influencé les prix du cuivre ont été les **événements internationaux majeurs ayant un impact macro-économique tels que les guerres et les récessions**, les événements nationaux majeurs tels que la dissolution de l'Union soviétique en 1991 et la croissance économique de la Chine, qui a commencé avec la politique de la porte ouverte dans les années 1970 mais n'a pas eu d'impact significatif sur le marché jusqu'au début des années 1990. **Les prix du cuivre ont également évolué en fonction d'événements spécifiques aux matières premières**, tels que les modifications des droits de douane, les changements d'utilisation des métaux et les grèves dans les mines (USGS, 2007).

- **Certaines défaillances de marché contraignent l'achat et l'incorporation de MPR de cuivre.**

Le marché des Matières Premières de Recyclage peut présenter des **défaillances de marché**, c'est-à-dire des situations dans lesquelles le fonctionnement du marché échoue à produire un équilibre économique entre offre et demande de MPR de cuivre. En outre, **le commerce des MPR – notamment des MPR de cuivre – peut entraîner des coûts de recherche et de transaction importants**. Les marchés sont souvent diffus ou occasionnels et, dans certains cas, ils comprennent des acteurs ayant peu d'expérience du marché. Dans ces conditions, il peut être difficile pour les acheteurs et les vendeurs de se rencontrer. Lorsqu'ils y parviennent, les efforts déployés pour convenir d'un prix « équitable » peuvent être considérables en raison de la nature hétérogène et incertaine des produits échangés. Bien que ces coûts diminuent avec le temps, ils peuvent constituer des obstacles importants pendant une période longue. Par exemple, les marchés de certains types de déchets de construction et de démolition présentent des coûts de recherche et de transaction élevés (OCDE, 2006).

- **Ces dernières années, le prix des matières premières vierges a augmenté, ce qui rend les MPR de cuivre plus compétitives.**

Si les prix des matières premières vierges diminuent, les métallurgistes sont moins incités financièrement à incorporer des MPR de cuivre. A titre indicatif, depuis la pandémie du covid-19, le prix de la tonne de cuivre a très fortement augmenté, passant de 6 174 \$ en 2020 \$ à 9 317 \$ en 2021, avant de légèrement décroître à 8 822 \$ en 2022. Cette hausse du prix des matières premières vierges a rendu les matières premières de recyclage plus compétitives pour l'industrie du cuivre (Banque mondiale, 2023). Néanmoins, une diminution du prix des matières premières vierges aurait pour conséquence de rendre les MPR de cuivre moins compétitives. Plusieurs éléments déterminent le prix des matières premières vierges :

- **La demande interne chinoise.** La Chine est à la fois un débouché majeur et un producteur important de matières premières. Ainsi, si la demande interne chinoise diminue, les exportations chinoises augmentent et les prix chutent au niveau mondial. C'est notamment le cas pour le cuivre. Ainsi, une baisse de la demande chinoise de matières premières vierges entraîne une baisse des prix du cuivre issu de MPV pour les métallurgistes européens et, indirectement, entraîne une incitation à l'incorporation de matières premières vierges pour les métallurgistes (Jégourel, 2016 A) ;
 - **La financiarisation des marchés des matières premières.** Ce phénomène correspond à l'externalisation d'une partie du risque de prix sur les marchés financiers. Des dynamiques spéculatives peuvent alors influencer en partie le prix des matières premières. Comme pour toute matière première, plus la volatilité anticipée des prix des MP métalliques est élevée, plus les acteurs financiers sont réticents à investir dans ces matières premières et plus le prix de ces matières premières diminue. Ainsi, cette volatilité se répercute indirectement dans l'incorporation de matières premières de recyclage : si les marchés financiers contribuent à diminuer le prix des matières premières vierges, alors leur incorporation par les métallurgistes va augmenter et ceux-ci seront moins incités à incorporer des MPR de cuivre.
- **En parallèle, les prix de l'énergie ont fortement augmenté ces dernières années¹³⁸. En cas de diminution de ceux-ci, les acteurs du marché seraient moins incités à incorporer des MPR.**

L'évolution des prix de l'énergie joue un rôle important et peut constituer un frein au recyclage des métaux en France. La production de matières premières vierges métalliques étant très énergivore, une baisse des prix de l'énergie entraîne une baisse du coût de ces matières et contribue à les rendre plus attractives économiquement que les MPR métalliques. A noter que **l'impact de l'évolution des prix de l'énergie dépend du mix énergétique et des réglementations en vigueur de chaque pays**. Les pays où le coût de l'énergie est plus faible peuvent être avantagés pour le traitement des MPR de cuivre.

5.4.6. Le développement du réemploi diminue la disponibilité des MPR de cuivre au recyclage

- **Certaines filières favorisent le réemploi, pour des raisons économiques et réglementaires.**

Le réemploi est placé plus haut que le recyclage dans la hiérarchie des modes de gestion des déchets¹³⁹ puisqu'il prolonge la durée de vie des produits, diminue l'utilisation de matières premières et réduit la production des déchets. **Le réemploi retarde donc l'entrée en recyclage des MPR métalliques.**

¹³⁸ A titre indicatif :

- Le prix du gaz naturel en Europe est passé de 3,24 dollars par MMBtu (millions de BTU - British Thermal Units) en 2020 à 16,12 dollars par MMBtu en 2021, puis à 40,34 dollars par MMBtu en 2022 ;
- Le prix du pétrole brut (moyenne) est passé de 39,3 dollars par baril en 2020 à 69,1 dollars par baril en 2021, puis à 97,1 dollars par baril en 2022 ;
- Le prix du charbon australien est passé de 60,8 dollars par tonne en 2020 à 138,1 dollars par tonne en 2021, puis à 344,9 dollars par tonne en 2022 (Banque mondiale, 2023).

¹³⁹ instituée par la Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets.

Certaines filières favorisent historiquement le réemploi par rapport au recyclage, pour des raisons économiques et réglementaires. En particulier, **la pratique du réemploi pour des raisons économiques a été soulignée pour les industries mécaniques**, qui consomment des volumes non négligeables de cuivre. L'une des particularités des biens d'équipement (machines et travaux publics) est qu'une part importante des pièces est réemployée ou réutilisée. Les parties métalliques ne pouvant pas faire l'objet d'une nouvelle utilisation sont recyclées. Néanmoins, certains équipements en fin de vie échappent à la filière légale de recyclage et sont exportés. Leur devenir (recyclage et réemploi) n'est pas connu (Entretien d'experts).

- **Pour les autres filières, les procédés de valorisation actuels favorisent le recyclage plutôt que le réemploi.**

Pour l'automobile, en 2020, 31 % des centres VHU agréés n'ont pas démonté de pièces de réutilisation. Cela signifie qu'une majorité de centres VHU (69 %) démontraient des pièces sur les VHU qu'ils prennent en charge pour les revendre comme pièces d'occasion. Il reste néanmoins que les volumes extraits sont limités. En moyenne, pour chaque VHU traité, 82,4 kg de pièces ont été démontées pour réutilisation, alors que la masse moyenne d'un VHU était de 1 126 kg (ADEME, 2022 B).

Pour le secteur du bâtiment, il n'existe pas à date de référentiel technique pour réemployer les Produits et Matériaux de Construction du Bâtiment. Pourtant, selon un expert de la déconstruction et de la démolition, la principale piste d'amélioration de la circularité des bâtiments porte sur le réemploi et par conséquent sur l'éco-conception facilitant le réemploi en fin de vie. En revanche, la seconde vie du matériau doit permettre une valorisation économique plus importante que la vente du métal en tant que MPR (risque de « trappe au réemploi ») (Entretien d'experts).

- **A moyen terme, les filières dont la fin de vie des produits est gérée par des filières REP devront progressivement développer le réemploi.**

Certaines filières REP se sont fixées des objectifs de réemploi. C'est le cas de la filière REP PMCB¹⁴⁰ et la REP DEEE¹⁴¹. S'agissant par exemple de la REP DEEE :

- La mise en œuvre des fonds réemploi et réutilisation vise à développer le réemploi des appareils et des pièces détachées pour allonger la durée de vie des EEE et, in fine, à réduire les tonnages de DEEE à long terme.
- L'arrivée de nouveaux acteurs sur le marché de la réparation des EEE comme la grande distribution, devrait également participer à augmenter le réemploi et la récupération des pièces détachées dans les EEE d'ici à 2030 (Entretien d'experts).

5.5. Principaux gisements potentiels pour le cuivre

Cette sous-partie présente les deux principaux gisements de cuivre ayant un potentiel de recyclage élevé :

- **Les Véhicules Hors d'Usage (VHU).** Aujourd'hui, une partie importante de ce gisement de cuivre est exportée légalement sous la forme de véhicules d'occasion, de carcasses et de pièces. Aujourd'hui, les MPR de cuivre extraits des carcasses broyées ne sont généralement pas incorporés en France en raison de leur teneur élevée en contaminants. Par ailleurs, une autre partie de ce gisement est traitée en France par la filière illégale ;
- **Les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE).** Ce gisement est très complexe. D'une part, des volumes de cuivre sont exportés légalement (en tant qu'EEE

¹⁴⁰ Arrêté du 10 juin 2022 portant cahier des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment.

¹⁴¹ Arrêté du 27 octobre 2021 portant cahiers des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques.

d'occasion ou en tant que déchets) et exportés illégalement. D'autre part, parmi les volumes conservés en France, des volumes de cuivre sont collectés par des filières autres que la filière agréée (filière déchets métalliques, autres filières). Au total, le cuivre des DEEE collecté par la filière agréée représente moins de la moitié du gisement total de cuivre de DEEE. Une fois le cuivre récupéré par la filière agréée, des volumes importants de cuivre (MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées) sont finalement exportés hors des frontières françaises et européennes. La tendance est néanmoins à l'augmentation de la conservation de ces gisements en France, notamment grâce à des projets innovants tels que WeeeCycling et Sanou Koura.

5.5.1. Gisements de Véhicules Hors d'Usage non collectés et exportés

La Figure 55 présente les destinations du cuivre contenu dans les VHU en 2020 en kt. La note méthodologique de la quantification de ce gisement est disponible en Annexe 8.4.1.2. Il existe deux types de pièces contenant du cuivre dans les VHU :

- Les faisceaux électriques, qui représentent environ 8 kg de cuivre par VHU ;
- Les induits, c'est-à-dire des pièces ferro-cuivreuses (20 % de cuivre en moyenne) contenues dans les moteurs électriques, qui peuvent être récupérées lors du tri magnétique. La contenance en cuivre liée aux induits s'élève à environ 0,5 kg de cuivre par VHU.

Le gisement total de cuivre dans les VHU s'élève à 20,45 kt, alors que le gisement valorisé en France par la filière agréée est estimé à 12,06 kt, soit une différence de **8,39 kt de MPR** (3,0 % du cuivre collecté en 2019).

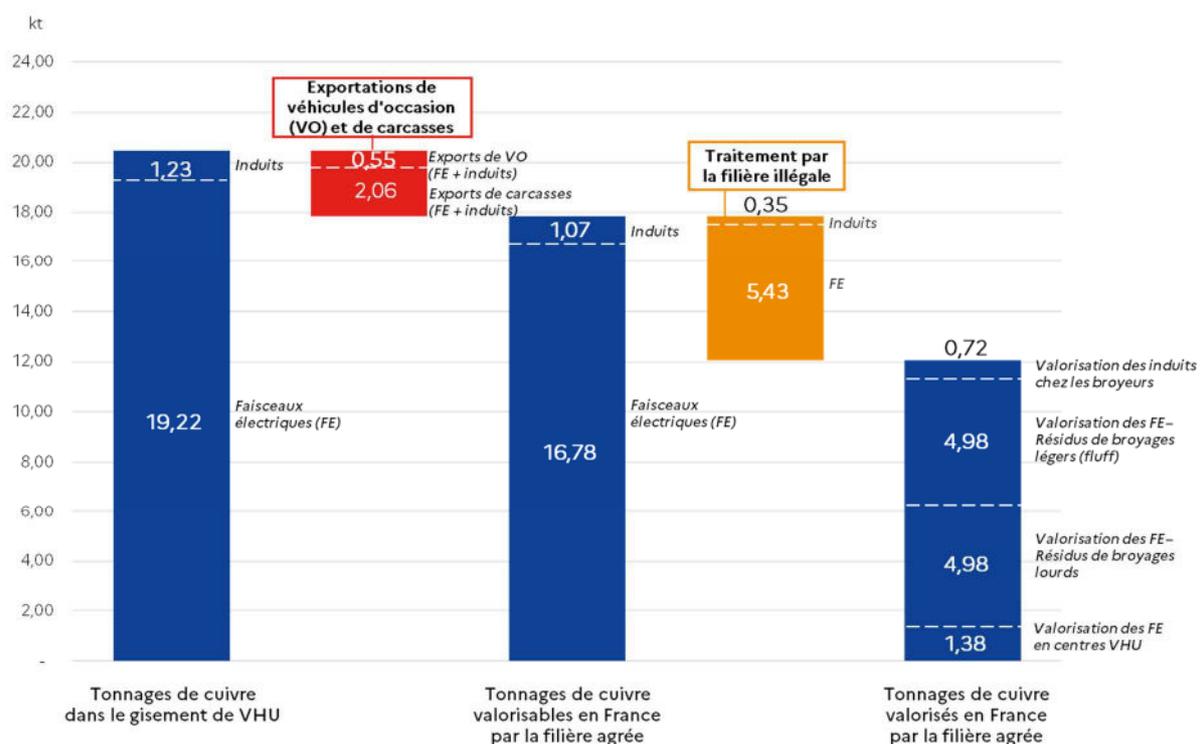


Figure 55 : Destinations du cuivre contenu dans les VHU (moyenne annuelle sur la période 2017-2020, en kt) (ADEME, 2022 B et Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).

- **Des gisements de cuivre sont exportés dans le cadre des exports légaux de Véhicules d'Occasion (VO) et de carcasses.** Comme pour l'acier (métaux ferreux) et l'aluminium, des tonnages de cuivre sont exportés sous la forme de véhicules d'occasion de carcasses : environ 0,55 kt de cuivre dans les véhicules d'occasion et 2,06 kt de cuivre dans les exports de carcasses (deuxième colonne).
 - Pour les véhicules d'occasion, selon un expert, il s'agit principalement de véhicules haut de gamme achetés en Europe de l'Est ou en Afrique du Nord (Entretien d'experts). Le gisement

de cuivre dans les VO ne prend pas en compte les exports illégaux, inclus dans le traitement par la filière illégale ;

- Pour les carcasses, celles-ci sont presque intégralement exportées vers la Belgique et l'Espagne.
- **Des gisements de cuivre sont traités et/ou exportés par les filières illégales françaises.** On estime à 5,78 kt (quatrième colonne) le gisement de cuivre traité par des acteurs de la filière illégale (centres VHU non agréés, épavistes, etc.). Ces tonnages peuvent être conservés en France ou exportés. La répartition entre ces deux voies n'est pas connue.
- **Les MPR produites sont généralement exportées ou réincorporées en France dans des applications aux cahiers des charges moins exigeants.** Le gisement valorisé en France par la filière agréée est estimé à 12,06 kt (cinquième colonne). Les MPR issues de ce processus sont des résidus de broyages automobile (RBA) légers et lourds¹⁴². Selon les professionnels, les RBA sont principalement brûlés en France et en Allemagne dans des installations de combustion. En France, le combustible solide de récupération (CSR) conserve son statut de déchet, et les exigences pour l'incinération sont les mêmes que pour les incinérateurs municipaux de déchets solides (INERIS, 2018).
- **Une part du cuivre broyé est mélangé à des ferrailles et, in fine, « emprisonné » dans l'acier.** Selon certains experts, pour les VHU, la dépollution et le démantèlement sont généralement effectués rapidement car ce processus est manuel donc coûteux. De ce fait, les éléments en cuivre sont rarement extraits avant le broyage. Ainsi, les broyas de cuivre, qui représentent un gisement très minoritaire pour les broyeurs, sont mélangés à des ferrailles, qui est leur gisement majoritaire. Ce constat doit être nuancé car le tri manuel des flux de métaux ferreux séparés par aimantation après le broyage des carcasses de VHU est désormais réalisé presque systématiquement. Cette étape permet de limiter progressivement la teneur en cuivre de la fraction d'acier E40 destinée aux aciéristes et fondeurs.

5.5.2. Gisements de Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques non collectés et exportés

La Figure 56 présente la destination du cuivre contenu dans les DEEE ménagers et professionnels en France en 2019 en kt. La note méthodologique de ce gisement est disponible en Annexe 8.4.3. Ces gisements ont été calculés d'après les résultats de l'étude gisement de l'OCAD3E et d'une teneur moyenne en cuivre des DEEE d'environ 3,18 %. En 2019, en France, le gisement total de cuivre s'élève à 57,6 kt, alors que le gisement valorisé en France par la filière agréée (éco-organismes et systèmes individuels) est estimé à 27,2 kt, soit une différence de **30,4 kt de MPR** (10,9 % du cuivre collecté en 2019).

¹⁴² Les RBA légers (ou fluff léger) sont la fraction générée lors du broyage de la carcasse et séparée en utilisant la classification par aspiration (environ 75% du RBA total) alors que les RBA lourds (ou fluff lourd) sont la fraction restant après la séparation du métal de la fraction lourde déchiquetée (environ 25% du RBA total) (INERIS, 2018).

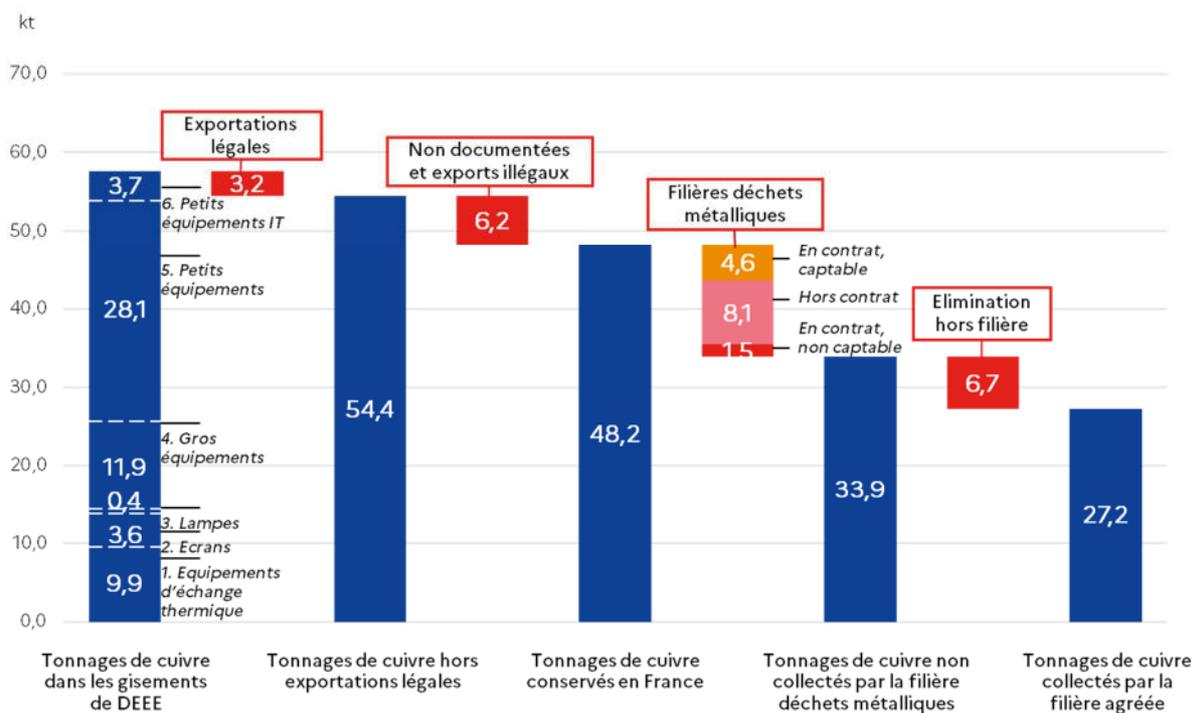


Figure 56 : Destinations du cuivre contenu dans les DEEE ménagers et professionnels en France en 2019 en kt

- **Une part du gisement de cuivre est perdue dans le cadre d'exports légaux de DEEE considérés à l'export comme des Equipements Electriques et Electroniques Usagés (EEEU), c'est-à-dire d'EEE d'occasion** (cf. deuxième colonne). L'étude gisement de l' OCA3DE a permis d'estimer un flux probable d' EEE Usagés en France équivalent à 102 kt, soit environ 3,2 kt de cuivre. Les flux d' EEE usagés sont très majoritairement exportés vers l' Europe puis l' Afrique. **Le Gros Electroménager Froid est le flux le plus susceptible d'être exporté**, avec des flux intra-européens (notamment pour traitement dans les pays voisins) et extra-européens (principalement pour réemploi) (OCAD3E, 2021).
- **Une part importante du gisement de cuivre des DEEE est non documentée et potentiellement exportée de manière illégale.** Environ 6,2 kt des tonnages de cuivre des DEEE pourraient être non documentées et donc correspondre à des exportations illégales (cf. quatrième colonne). En effet, les matières des DEEE les plus exportées via des filières illégales sont celles ayant une valeur élevée, comme les compresseurs dépollués en cuivre issus des équipements de froid (GEM-F) (OCAD3E, 2021).
- **Une part très importante du gisement de cuivre des DEEE est traitée par la filière déchets métalliques, dont la majorité proviennent de sites hors contrat avec la filière agréée.** Plus de 14 kt de cuivre sont collectées par la filière déchets métalliques (cf. sixième colonne) :
 - **4,6 kt de cuivre sont déjà déclarées ou remises à la filière agréée.** Ces gisements font partie de la collecte des éco-organismes ;
 - **8,1 kt de cuivre proviennent de sites hors contrat.** La filière n'a donc aucun moyen de contrôle, ni aucun levier pour tracer et collecter ces DEEE (pas de contrôle ni d'audit) ;
 - **1,5 kt de cuivre sont contenues dans des DEEE non captables par la filière** (DEEE trop abîmés, carcasses, DEEE trop petits pour être triés, etc.). Les flux de DEEE traités par la filière déchets métalliques - ainsi que les exports - semblent notamment être alimentés par les vols en déchèterie (appareils entiers ou cannibalisation¹⁴³), les détournements au niveau de la

¹⁴³ Récupération dans un objet fabriqué hors d'usage de toutes les pièces détachées en bon état pour la réparation d'objets de même type.

distribution (ex. livreurs de GEM), les fuites sur le trottoir (encombrants déposés sur le trottoir, dont une partie importante n'est pas recanalisée vers la filière DEEE) ou encore la mise au rebut de DEEE ménagers par des détenteurs professionnels (OCAD3E, 2021).

- **A cela s'ajoutent des gisements de cuivre éliminés hors filière agréée et hors filière déchets métalliques.** Ces flux représenteraient environ 6,7 kt de cuivre en France en 2019 (cf. huitième colonne). Cela correspond à plusieurs destinations pour le gisement de DEEE : ordures Ménagères Résiduelles ; collecte sélective ; encombrants ; tout-venant en déchèteries (majoritairement des PAM – Petits Appareils Ménagers) (OCAD3E, 2021). Les gisements de cuivre issus de ces gisements sont peu valorisés.
- **Les MPR produites sont généralement exportées ou réincorporées en France dans des applications aux cahiers des charges moins exigeants.** Environ 27,2 kt de cuivre issu des DEEE sont collectées et valorisées en France par les éco-organismes et les systèmes individuels, c'est-à-dire par la filière agréée (cf. neuvième colonne). On estime généralement que les MPR de cuivre à faibles teneurs en résiduels sont généralement conservés en Europe, alors que les MPR ayant des teneurs en résiduels plus élevées sont destinés au grand export (Entretien d'experts). Il est donc probable que des volumes importants du cuivre récupérés par la filière agréée soient finalement exportés hors des frontières françaises, voire européennes. La tendance est néanmoins à l'augmentation des gisements de cuivre issu des DEEE conservés en France, notamment grâce à des projets innovants tels que WeeeCycling ou Sanou Koura.

5.6. Synthèse de l'état des lieux du recyclage du cuivre en France

Il existe deux filières d'incorporation de MPR de cuivre en Europe :

- La filière de recyclage par fusion (direct melting) élabore des produits semi-finis à partir de déchets à très faibles teneurs en résiduels. Il s'agit de la principale modalité d'incorporation de MPR de cuivre en France ;
- La filière d'affinage du cuivre (smelting et refining) produit des cathodes et produits de première transformation en cuivre (ex. lingots) de cuivre à partir de concentrés cuivreux (matières premières vierges issues des mines) et/ou des déchets de différents types (matières premières de recyclage). Cette filière est presque inexistante en France.

Aujourd'hui, **les volumes de MPR de cuivre disponibles en France sont nettement supérieurs aux volumes de MPR de cuivre incorporés** par la filière de recyclage par fusion et par les projets récents d'affinage.

La France est aujourd'hui le principal exportateur net de MPR de cuivre parmi 5 pays étudiés. Ce niveau élevé d'exports s'explique notamment par :

- Le faible développement de la filière d'affinage en France, notamment en comparaison de pays voisins tels que l'Espagne, la Belgique et l'Allemagne qui disposent de filières d'affinage importantes ;
- L'export direct et indirect de MPR de cuivre ayant des teneurs en résiduels plus élevées vers des pays tiers, notamment vers la Chine.

La demande en cuivre est amenée à augmenter d'ici à 2030. Cette hausse est intrinsèquement liée au déploiement de technologies de la transition énergétique telles que les véhicules électriques, le réseau de transport d'électricité et les panneaux photovoltaïques.

Afin de répondre à cette demande additionnelle tout améliorant le recyclage du cuivre en France, à l'horizon 2030, **les experts projettent une hausse des volumes de MPR de cuivre incorporées en métallurgie**, notamment post-consommation. En effet, des exigences internes à l'industrie du cuivre – notamment réglementaires – et externes – enjeux de circularité, de sécurisation des approvisionnements en cuivre et de décarbonation des filières aval – incitent l'industrie du cuivre française à se transformer. Les stratégies de décarbonation et de sécurisation des gisements des acteurs métallurgiques passeront par :

- L'amélioration de la collecte et du tri pour valorisation de nouveaux gisements à exploiter ;
- L'amélioration des fours de fusion et le prétraitement du cuivre issus de ces collectes avant incorporation par les fabricants de produits semi-finis, notamment par les câbliers ;
- La mise en place de nouveaux procédés de récupération du cuivre, notamment dans les cartes électroniques des DEEE par deux acteurs émergents (WeeeCycling et Sanou Koura).

Encore plus que pour l'acier et l'aluminium, **les gisements de cuivre sont presque systématiquement collectés en raison de leur valeur importante**. Un seul gisement non collecté a été identifié : le cuivre contenu dans les murs (anciens réseaux électriques) non récupéré lors de la rénovation de bâtiments. Par ailleurs, une partie du cuivre des DEEE n'est pas collecté par la filière légale, c'est-à-dire une part des gisements traités par les sites hors contrat, les gisements collectables et non collectés, ainsi que les gisements non captables par la filière agréée.

Il existe plusieurs types de freins au recyclage du cuivre en France.

Les exigences techniques et réglementaires des secteurs consommateurs de cuivre contraignent l'incorporation de MPR de cuivre par l'industrie métallurgique :

- Les exigences de composition pour la fabrication de produits semi-finis n'a historiquement pas permis l'intégration de MPR de cuivre dans des quantités importantes. C'est notamment le cas de la fabrication de câbles, qui correspondent à la majorité des produits semi-finis en cuivre ;
- A long terme, certaines réglementations à venir pourraient limiter les teneurs en impuretés issues des MPR de cuivre dans les produits finis, en particulier le plomb. Cela contraindrait le recyclage du cuivre en France.

En outre, **les technologies existantes et en cours de développement ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'exigence dans les conditions actuelles de marché**. Cela entraîne le recyclage en boucle ouverte d'une partie des MPR de cuivre en France :

- La contamination des MPR de cuivre - notamment au plomb - empêche leur incorporation dans certains types d'applications, comme les câbles. Ces MPR sont donc recyclées en boucle ouverte en France ou exportées ;
- Il existe une inadéquation entre les MPR produites et les procédés de mise en forme existants. Certains préparateurs de MPR de cuivre produisent des grenailles de cuivre, un format qui ne peut pas alimenter les fours de fusion aujourd'hui ;
- Des technologies innovantes comme les spectrométries XRF et LIBS sont à l'étude. Néanmoins, leur développement est principalement porté par l'industrie de l'acier et de l'aluminium.

Enfin, **les MPR de cuivre sont des commodités échangées au niveau mondial**. Elles sont donc exportées suivant la répartition géographique de l'offre et la demande :

- Aujourd'hui, toutes les MPR de cuivre françaises sont valorisées et incorporées. En revanche, très peu sont incorporées en France, notamment en raison du faible développement d'une filière d'affinage en France ;
- Certains pays achètent des MPR de cuivre ayant des teneurs en résiduels plus élevées pour des prix élevés et peuvent pratiquer le dumping environnemental (ex. Chine) ;
- Les matières les plus exportées via des filières illégales (ex. DEEE, VHU) sont celles ayant une valeur élevée, en particulier les métaux, dont le cuivre.

Encore plus que pour l'acier et l'aluminium, le gisement de cuivre des VHU illustre bien ces freins :

- Une part du gisement est non collectée. Les éléments en cuivre sont rarement extraits avant le broyage. Ainsi, une part importante de cuivre est perdu car « emprisonné » dans l'acier ;
- Des volumes importants de cuivre sont exportés sous la forme de véhicules d'occasion, de carcasses ou de pièces par les filières agréées et illégales ;
- Les teneurs en résiduels des MPR de cuivre sortantes sont trop élevées pour que ces MPR de cuivre puissent être réincorporées par la filière de recyclage par fusion dans les applications dont elles sont issues.

Le gisement de cuivre des DEEE illustre également ces freins :

- Une part du gisement est non collectée (cf. ci-dessus) ;
- Des volumes importants de cuivre sont exportés sous la forme d'EEE d'occasion ou de composants de DEEE par les filières agréées et illégales ;
- Les MPR de cuivre sortantes (ex. cuivre issu des circuits imprimés) sont essentiellement exportées. Bien que des acteurs français montent progressivement en capacité et en technicité pour valoriser le cuivre des DEEE, leurs capacités d'incorporation de MPR de cuivre sont aujourd'hui moins importantes que le gisement de cuivre issu des DEEE.

6. Recommandations sous la forme d'un plan d'action

Cette partie présente la méthodologie de sélection et d'opérationnalisation de six leviers au recyclage des métaux en France (6.1), détaille six actions prioritaires (6.2) et les synthétise dans un plan d'action pluriannuel (6.3). Ces réglementations sont complémentaires aux principaux projets réglementaires en cours à l'échelle française et à l'échelle européenne disponibles en Annexe 8.5, notamment la proposition de règlement sur l'éco-conception des produits durables, la révision du Règlement relatif aux transferts transfrontaliers de déchets, la législation européenne sur les matières premières critiques, la loi industrie verte, la mise en place de nouvelles filières REP et la révision de la directive Véhicules Hors d'Usage.

6.1. Objectifs et méthodologie du plan d'action

Les leviers au recyclage des métaux en France ont été pré-identifiés à travers une vingtaine d'entretiens avec des experts (préparateurs de MPR métalliques, métallurgistes, fabricants de produits finis, autres experts) et des ressources bibliographiques. La concaténation des leviers issus des entretiens et des recherches bibliographiques a permis de pré-identifier des **leviers à présenter aux parties prenantes**. L'ADEME a ensuite organisé un atelier de réflexion d'une demi-journée visant à **identifier les leviers prioritaires** pour améliorer le recyclage des métaux en France, à partir des leviers pré-identifiés et lors d'une phase d'idéation.

Au total, six actions ont été priorisées par l'ADEME. Les cinq premières actions ont été identifiées et sélectionnées durant l'atelier de réflexion, tandis qu'une sixième action a été ajoutée par l'ADEME pour intégrer une vision à long terme sur le recyclage des métaux.

Chaque recommandation est analysée à l'aune de plusieurs critères :

- Les objectifs adressés ;
- Les freins levés ;
- Les types d'action ;
- L'horizon temporel de mise en place et d'atteinte de résultats ;
- Les acteurs impliqués ;
- Les métaux concernés ;
Le niveau d'impact potentiel (note comprise entre 1 et 4). Il est estimé qualitativement selon la valeur et les volumes des gisements collectables/valorisables, ainsi que les bénéfices directs et indirects attendus pour le recyclage des métaux en France ;
- Le niveau de faisabilité (note comprise entre 1 et 4). Il est estimé qualitativement selon les possibilités de passage à l'échelle industrielle et de répliquabilité de la recommandation, son rapport coûts-bénéfices, ainsi que les difficultés de sa mise en place ;
- Les synergies avec les autres recommandations du plan d'action.

6.2. Principaux résultats – Six actions prioritaires

Les six leviers prioritaires ont été approfondis afin de rédiger les six fiches actions ci-dessous. L'articulation entre les différentes actions a permis d'élaborer le plan d'action pluriannuel présenté en section 6.3.

6.2.1. Action n°1 : Créer une instance de dialogue pérenne entre les représentants des différentes étapes de la chaîne du recyclage des métaux en France

Créer une instance de dialogue pérenne entre les représentants des différentes étapes de la chaîne du recyclage des métaux en France			
Objectifs adressés	Améliorer le type de MPR métalliques ; Augmenter les débouchés en France pour les entreprises préparatrices de MPR métalliques ; Construire des dispositifs de co-construction des solutions entre les différentes parties prenantes.		
Freins levés	Exigence d'un gisement stable à long terme ; Manque d'incitations économiques à l'utilisation de MPR métalliques en France ; Exigences techniques des métallurgistes et fabricants de produits finis.		
Type d'action	Mesure organisationnelle.		
Mise en place et résultats	Court terme.		
Acteurs potentiellement concernés	Acteurs publics ; Comités Stratégiques de Filière (CSF) « Mines et Métallurgies » et « Transformation et Valorisation des Déchets » ; CSF de Fabricants de produits finis contenant des métaux ; Acteurs industriels de la préparation de MPR ; Eco-organismes.		
Métaux concernés	Acier ; Aluminium ; Cuivre.		
Niveau d'impact potentiel	3 / 4	Niveau de faisabilité	4 / 4

Principe de fonctionnement de l'action

Pourquoi ?

La remontée des besoins de financement de projets (action n°2), la mise en place d'une méthodologie de traçabilité partagée entre les acteurs de la chaîne de valeur (action n°4) et d'un label sur le contenu recyclé (action n°5) nécessitent le **partage d'information entre tous les maillons de la chaîne** : collecte, tri et incorporation des MPR, consommation de métaux dans des produits finis. Les informations partagées permettent également d'identifier les meilleures techniques disponibles de tri et d'incorporation ou d'anticiper l'évolution des besoins de l'aval de la chaîne de valeur.

Comment ?

Il existe plusieurs Comités stratégiques de Filières (CSF) au sein du Conseil National de l'Industrie représentant :

- Les collecteurs et préparateurs de MPR : CSF Transformation et valorisation des déchets ;
- Les incorporeurs de MPR : CSF Mines et métallurgie ;

- Les consommateurs de métaux : CSF Automobile, Aéronautique, Industries pour la construction, Ferroviaire, etc.

Certains travaux menés par un seul CSF ont déjà abouti à des résultats sur les freins et leviers au recyclage de MPR métalliques (ex. Comité Stratégique de la Filière Mines et métallurgie (2020)). Toutefois, l'existence d'une section thématique transverse, à laquelle est associée un groupe de travail (GT) inter-CSF – cf. Figure 57 - portant spécifiquement sur l'économie circulaire, pourrait être valorisée pour organiser le dialogue entre les acteurs de la chaîne de valeur. Le contrat de filière du CSF Mines et Métallurgie mentionne d'ailleurs dans son projet structurant 4.1 la création d'une plateforme d'engagement inter-filières, également cité dans le cadre de l'action n°3 ci-dessous (Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2021).

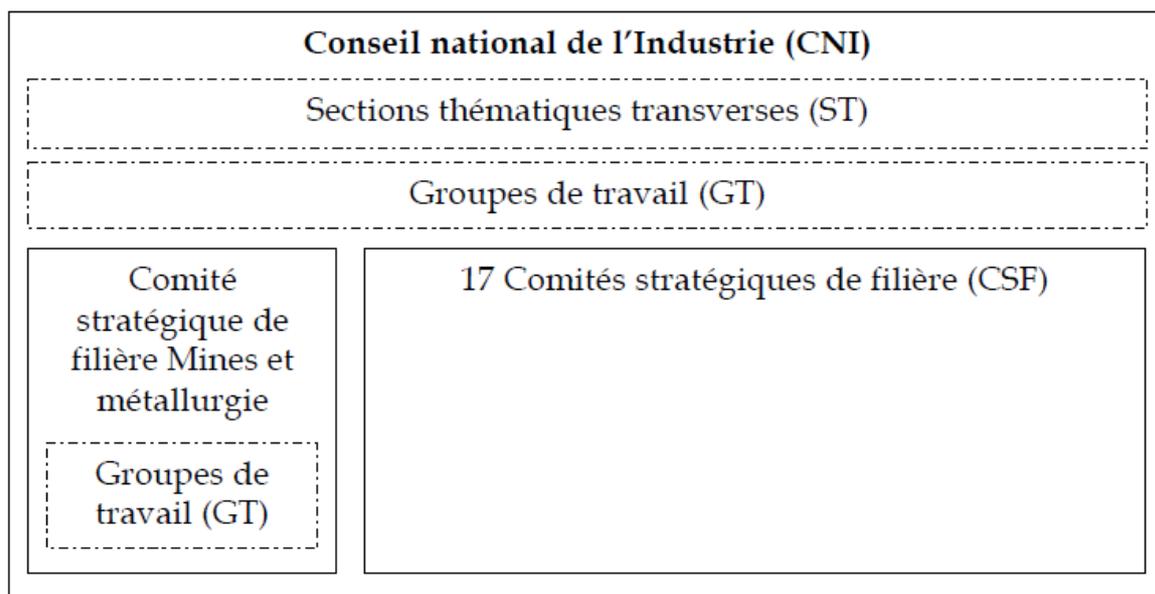


Figure 57 : Architecture du pilotage de la stratégie de filière (Sénat, 2019)

Cette action prendrait la forme de rendez-vous réguliers entre les Comités Stratégiques de Filières « Mines et Métallurgie » et « Transformation et Valorisation des Déchets » sur le recyclage des métaux, en **associant systématiquement les CSF de fabricants de produits finis**.

D'autres types d'acteurs pourraient être associés à ce dialogue.

- D'une part, dans le cas du cuivre, **l'OFREMI** - Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles - pourrait être l'instance d'échange à l'échelle européenne. Les expertises rassemblées au sein de l'OFREMI (BRGM, CEA, IFPEN, ADEME, IFRI, CNAM) seraient complémentaires avec celles des industriels ;
- D'autre part, les **filières REP** couvrant des produits générateurs de déchets à fort contenu métallique (REP VHU, REP PCMB) **pourraient également être associées à ce dialogue**. En effet, comme le montre l'exemple de filière existantes (emballages, EEE), les éco-organismes associés ont une vision à la fois du contenu métallique des produits finis mis sur le marché, et de la gestion des déchets de ces produits. La vision des éco-organismes permettrait de compléter celles des industriels de la chaîne de valeur, plus morcelée entre les différentes étapes.

Evaluation de l'impact potentiel de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau d'impact potentiel élevé (3 / 4)**.

Seuls quelques facteurs pourraient limiter l'impact de cette instance de dialogue :

- **La multiplication des instances** : Le rapport du Sénat sur la filière sidérurgique française note que la multiplication des forums et des instances au sein du CNI, dont un groupe de travail

spécifique au recyclage des MPR métalliques, peut nuire à la lisibilité et à l'efficacité des travaux sur le sujet (Sénat, 2019) ;

- **Les enjeux de concurrence et propriété intellectuelle** : La présente étude a identifié que la récupération d'alliages dans les MPR métalliques constitue un enjeu stratégique pour les entreprises de la chaîne de valeur, et donc un avantage concurrentiel. La portée des travaux d'une telle instance de dialogue pourrait être limitée par ces enjeux concurrentiels entre entreprises d'un même secteur ;
- **L'absence d'un plan d'accompagnement des PME** : Cette instance de dialogue devra systématiquement inclure les fabricants de produits finis et s'adapter aux enjeux de tous les types d'acteurs (grandes entreprises, ETI, TPE-PME). En effet, ce point est notamment relevé par le rapport du Sénat est la prise en compte des PME et ETI qui constituent une part significative de la chaîne de valeur du recyclage des MPR (Sénat, 2019). La présente étude a permis d'identifier certains de ces acteurs :
 - Les entreprises incorporant des MPR en France : les acteurs de la filière sidérurgique électrique, les fondeurs d'alliages cuivreux, ou les affineurs d'aluminium ;
 - Les acteurs de la transformation des produits semi-finis métalliques en produits finis (chaîne de valeur des constructeurs automobiles, industries mécaniques, etc.).

Evaluation de la faisabilité de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau de faisabilité très élevé (4 / 4)**.

En comparaison avec les autres actions, aucun frein majeur n'a été identifié pour la mise en place d'une instance de dialogue, hors la bonne volonté des acteurs de la chaîne de valeur.

Plan d'action : Synergies avec les autres recommandations

La mise en place d'une instance de dialogue est un préalable nécessaire à la remontée des besoins de financement de projets (action n°2), la mise en place d'une méthodologie de traçabilité partagée entre les acteurs de la chaîne de valeur (action n°4) et d'un label sur le contenu recyclé (action n°4).

6.2.2. Action n°2 : Renforcer le soutien à la préparation de MPR métalliques à faibles taux de résiduels

Renforcer le soutien à la préparation de MPR métalliques à faibles taux de résiduels			
Objectifs adressés	Poursuivre l'amélioration du tri des métaux ; Augmenter la production de MPR métalliques à faibles taux de résiduels utilisables en France.		
Freins levés	Exigences techniques des métallurgistes et fabricants de produits finis ; Manque d'incitations à l'utilisation de MPR métalliques.		
Type d'action	Etude d'approfondissement ; Financement de projets.		
Mise en place et résultats	Court terme.		
Acteurs potentiellement concernés	Acteurs publics ; Equipementiers de tri ; Préparateurs des déchets après la collecte et le tri ; Incorporateurs de MPR ; Utilisateurs finaux ; Experts techniques par filière (Centres techniques par ex. CSTB ; Instituts de Recherche Technologique)		
Métaux concernés	Acier ; Aluminium ; Cuivre.		
Niveau d'impact potentiel	3 / 4	Niveau de faisabilité	2 / 4

Principe de fonctionnement de l'action

Ce levier consiste à développer des projets d'amélioration du tri des métaux broyés et mêlés. Il s'agirait de soutenir et d'accompagner le développement de projets pilotes industriels pour améliorer le **tri entre métaux** – aluminium, cuivre, plomb, zinc, etc. – et, pour chaque métal, **alliage par alliage**. Les technologies de tri étant déjà en grande partie développées, mais partiellement portées à l'échelle industrielle (cf. section 4.4.3.2 pour l'aluminium), les expérimentations ainsi financées permettront d'évaluer la faisabilité technico-économique de technologies et pratiques de recyclage en développement. Elles se focaliseront sur les technologies à TRL¹⁴⁴ 6 et plus.

En particulier, ce soutien devra également permettre d'évaluer pour plusieurs produits la **compatibilité d'alliages recyclés avec les cahiers des charges des utilisateurs aval**, et, le cas échéant, permettre de modifier ces cahiers des charges. L'impact des projets financés sera donc maximisé s'il implique **plusieurs porteurs de projets de l'amont à l'aval de la chaîne de valeur du recyclage**. Ce type de projet a déjà été entrepris pour des câbles de réseau de transport d'électricité, dont les cahiers des charges sont très exigeants (Entretien d'experts). Il pourrait être répliqué à d'autres filières et produits, par exemple dans le cas :

- Des composants en aluminium dans les VHU. Cela peut prendre la forme de campagnes de broyage pour vérifier la possibilité de massifier la récupération d'un composant spécifique, et de vérifier la compatibilité avec le cahier des charges des recycleurs directs (IRT M2P, 2021) ;

¹⁴⁴ Technology Readiness Level, échelle de 1 à 9 évaluant le niveau de maturité d'une technologie jusqu'à son industrialisation, 9 étant la validation du système dans un environnement réel.

- De la teneur en cuivre des aciers issus de MPR. Cela peut prendre la forme de tests sur la tolérance au cuivre des produits plats, en changeant les procédés de production ou la composition de l'acier pour surmonter le problème de *hot shortness* (Daehn et al., 2017).

Cette recommandation est notamment alignée avec la proposition de feuille de route de décarbonation de la chaîne de valeur de l'automobile (PFA, 2023), en particulier l'axe 3 : « *Rapprocher les spécifications des metteurs sur le marché avec les capacités d'extraction, de tri et de préparation de la filière VHU afin d'augmenter le taux d'incorporation de matière recyclée dans les véhicules neufs* ».

Selon un expert, les moyens alloués par métaux cible soient arbitrés sainement afin de ne pas induire un éventuel déséquilibre de concurrence entre filières (Entretien d'experts).

Tableau 18 : Appels à projets mis en place par l'ADEME

	AAP	Objectif	Montant financé
ADEME	AAP « Solutions innovantes pour l'amélioration de la recyclabilité, le recyclage et la réincorporation des matériaux (RRR) » (Volet Métaux)	Soutenir l'innovation dans le secteur du recyclage de métaux stratégiques, dont les métaux de base et leurs alliages pour la transition bas carbone	Montant Minimum de 1M€
ADEME	AAP « Objectif Recyclage MATières (ORMAT) »	Développer et adapter les processus de fabrication et d'utilisation de MPR au-delà des obligations réglementaires actuelles	Axe 1 : diagnostic, études, essais : 50k€ à 100k€ Axe 2 - investissement : 1M€ (PME) à 5M€ (GE-Grande Entreprise)

Evaluation de l'impact potentiel de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau d'impact potentiel élevé (3/4)** :

- D'une part, les opportunités de réplcation et de passage à l'échelle de ces solutions sont importantes. La mise en place de projets pilotes permettrait d'identifier les projets les plus en adéquation avec les enjeux techniques et économiques des préparateurs de MPR métalliques, des fabricants de produits finis et des métallurgistes. Ces projets pourraient ensuite être répliqués dans d'autres sites de préparation de MPR métalliques¹⁴⁵ ;
- D'autre part, la préparation de MPR métalliques correspondant aux cahiers des charges des fabricants de produits finis permettrait d'augmenter la demande de MPR de certains métallurgistes. Cela contribuerait ainsi à la décarbonation des métallurgistes et des fabricants de produits finis, ainsi qu'à la sécurisation d'une partie de leurs approvisionnements en matières premières.

Cependant, même si les financements mobilisés au cours de l'étude sont importants, un acteur industriel interviewé au cours de l'étude a précisé que le CAPEX nécessaire à la création d'une filière de smelting en France est compris entre un et trois milliards d'euros, un montant nettement supérieur aux subventions

¹⁴⁵ A noter : A date, ce type de projet repose essentiellement sur des accords bilatéraux, voire en consortium, pour lesquels un équilibrage des intérêts devra se trouver (Entretien d'experts).

existantes dont pourraient bénéficier les porteurs de projet aujourd'hui (Entretien d'experts) (cf. Tableau 18)¹⁴⁶.

Evaluation de la faisabilité de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau de faisabilité modéré (2/4)**. Plusieurs points d'attention ont été soulevés :

- Il est à la fois nécessaire à la fois d'accompagner la Recherche et Développement des nouvelles technologies de tri des métaux en France et de soutenir les préparateurs de MPR métalliques pour les dépenses d'investissement (CAPEX) ;
- Certaines technologies de tri n'ont pas une maturité suffisante leur permettant d'être déployée à une échelle industrielle en France (ex. technologie LIBS).

Plan d'action : Synergies avec les autres recommandations

Le soutien à la préparation de MPR métalliques à faibles taux de résiduels est considéré comme un **levier socle pour agir sur l'offre de MPR métalliques**. Il peut être mis en place rapidement, en parallèle de travaux d'identification des catégories de MPR métalliques en France par spécification commerciale (action n°3), et pourra bénéficier des échanges favorisés par l'action n°1 (« Créer une instance de dialogue pérenne entre les représentants des différentes étapes de la chaîne du recyclage des métaux en France »).

¹⁴⁶ Dans ce cas, des financements européens seraient plus adaptés (Important Projects of Common European Interest – IPCEI) permettent de débloquent plusieurs milliards d'euros d'aides d'Etat.

6.2.3. Action n°3 : Identifier toutes les catégories de MPR métalliques en France par spécification commerciale

Identifier toutes les catégories de MPR métalliques en France par spécification commerciale			
Objectifs adressés	Augmenter les débouchés en France pour les entreprises préparatrices de MPR métalliques ; Conserver les gisements de MPR métalliques exportés vers certains pays tiers aujourd'hui ; Renforcer la compétitivité des préparateurs de MPR métalliques français.		
Freins levés	Exigences techniques des métallurgistes et fabricants de produits finis ; Manque d'incitations économiques à l'utilisation de MPR métalliques en France.		
Type d'action	Etude d'approfondissement ; Communication à destination des secteurs privé et public.		
Mise en place et résultats	Court terme.		
Acteurs potentiellement concernés	Acteurs publics ; Filières REP ; Pôle National des Transferts Transfrontaliers de Déchets (PNTTD) ; Préparateurs de MPR métalliques ; Incorporateurs de MPR métalliques ; Commission européenne.		
Métaux concernés	Acier ; Aluminium ; Cuivre.		
Niveau d'impact potentiel	2 / 4	Niveau de faisabilité	3 / 4

Principe de fonctionnement de l'action

La présente étude – cf annexes 8.1, 8.2 et 8.3 a permis de constater l'existence de différentes normes et catégories associées aux MPR métalliques, utilisées par différents acteurs :

- Les **catégories douanières** (définis dans le Système Harmonisé -SH- au niveau mondial, adaptées dans la Nomenclature Combinée – NC- au niveau UE) ;
- Les **catégories commerciales** :
 - Standardisées dans un référentiel commun : européen (par exemple, la norme EN 12861 pour le cuivre et la Steel Scrap Specification (EFR, 2007)) ou international (standards ISRI pour l'acier, le cuivre et l'aluminium),
 - Standardisées mais non rassemblées dans un référentiel commun utilisé par l'industrie¹⁴⁷, par exemple les différentes sortes d'aluminium,
- Les **autres catégories** employées dans la communication et les publications de certaines organisations, par exemple FEDEREC (FEDEREC, 2022).

Dans un premier temps, le principe de cette action est, pour un acteur public, de **faire l'inventaire de ces catégories de MPR et de leurs spécifications** (composition, forme, etc.), puis d'identifier les correspondances entre elles avec l'avis d'experts de la collecte et de la préparation de MPR. L'objectif sera ainsi d'obtenir une nomenclature harmonisée entre standards existants et codes douaniers.

¹⁴⁷ La norme EN 13920 est très peu utilisée par l'industrie de l'aluminium (Entretien d'experts).

Ce travail serait ensuite partagé par le Pôle National des Transferts Transfrontaliers de Déchets (PNTTD)¹⁴⁸ à l'échelle européenne afin, le cas échéant, de **préciser ou réformer les codes douaniers** pour mieux catégoriser les MPR passant par les frontières nationales. En effet, les codes douaniers sont mis à jour régulièrement, la révision des codes pour les MPR pourra être intégrée dans une prochaine mise à jour.

A plus long terme, la **réforme de l'Union douanière proposée en 2023** par la Commission européenne¹⁴⁹ permettrait d'améliorer la traçabilité des MPR métalliques. Cette proposition de réforme implique la création d'un espace de données européennes dans lequel seraient centralisées l'intégralité des données déclaratives. Cet espace serait supervisé par une autorité douanière européenne dont la création est également prévue.

Cette recommandation est alignée avec celle faite par le Conseil Général de l'environnement et du développement durable (CGDD) et du Conseil général de l'économie (CGE) en 2020 (CGDD, CGE, 2020), qui propose d'« améliorer la maîtrise d'ouvrage de la définition et de la collecte des données statistiques nécessaires au pilotage du recyclage et promouvoir une méthodologie harmonisée de comptabilisation au niveau européen ».

Evaluation de l'impact potentiel de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau d'impact potentiel modéré (2 / 4)**. En effet, bien que cette action soit essentielle pour améliorer le recyclage des métaux en France, il s'agit d'une action facilitante pour d'autres actions à impact plus fort.

L'impact de cette action sera conditionné par la remontée d'information de la part des collecteurs et préparateurs de MPR, mais aussi des incorporateurs de MPR et des fabricants de produits finis, également utilisateurs des standards.

Evaluation de la faisabilité de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau de faisabilité élevé (3 / 4)**. Plusieurs points d'attention ont toutefois été soulevés :

- L'horizon temporel de ce levier dépend du planning des actions de l'acteur devant coordonner sa mise en place ;
- Le Pôle National des Transferts Transfrontaliers de Déchets (PNTTD) pourrait avoir la charge de la présentation de tels résultats à l'échelle européenne. Néanmoins, cette mission ne fait pas partie des principales missions du PNTTD.

Plan d'action : Synergies avec les autres recommandations

Cette action est un préalable nécessaire à la mise en place de l'action n°4 (« Définir une méthode et des outils de traçabilité pour l'incorporation de MPR par les fabricants de produits finis »). Elle pourra s'appuyer sur les échanges au sein de l'instance de dialogue mise en place par l'action n°1.

¹⁴⁸ LE PNTTD, sous l'autorité du ministère de la Transition Ecologique, a la charge de gérer les demandes de transferts de déchets depuis, vers ou transitant par la France. A noter que le PNTTD ne traite que les transferts transfrontaliers de déchets, et non les MPR ayant le statut de produits. Même si la sortie du statut de déchets se fait souvent à l'étape de l'incorporation, une partie des MPR échapperaient donc au PNTTD.

¹⁴⁹ Commission européenne, Réforme douanière de l'UE: une vision fondée sur les données pour une union douanière plus simple, mieux pensée et plus sûre, 2023

6.2.4. Action n°4 : Définir une méthode et des outils de traçabilité pour l'incorporation de MPR par les fabricants de produits finis

Définir une méthode et des outils de traçabilité pour l'incorporation de MPR par les fabricants de produits finis			
Objectifs adressés	Décarboner l'industrie en incorporant davantage de MPR métalliques dans les produits finis ; Gagner en traçabilité sur les MPR métalliques.		
Freins levés	Exigences techniques des métallurgistes et fabricants de produits finis ; Manque d'incitations économiques à l'utilisation de MPR métalliques en France.		
Type d'action	Etude d'approfondissement ; Mesure réglementaire.		
Mise en place et résultats	Court terme.		
Acteurs potentiellement concernés	Acteurs publics ; Comités Stratégiques de Filière de la chaîne de valeur des métaux au sein du CNI ; Experts techniques.		
Métaux concernés	Acier ; Aluminium ; Cuivre.		
Niveau d'impact potentiel	3,5 / 4	Niveau de faisabilité	2,5 / 4

Principe de fonctionnement de l'action

Le principe de ce levier est de tracer les MPR métalliques tout au long des chaînes d'approvisionnement des fabricants de produits finis. Les enjeux diffèrent selon les filières, puisque les métaux peuvent être intégrés dans des produits complexes (véhicules, EEE, etc.) ou plus simples (emballages).

Quelle information ?

D'une part, si le recyclage est défini par la loi (Article L541-1-1 du code de l'environnement), la **définition du contenu recyclé**¹⁵⁰ peut être harmonisée et approfondie pour l'ensemble des produits contenant des MPR métalliques. Plusieurs arbitrages restent à effectuer, par exemple la non-comptabilisation des MPR pré-consommation ou, au sein des MPR pré-consommation, de celles relevant du « matériel circulant » (« *runaround material* » ou « *home scrap* »).

A noter que le travail de définition du contenu recyclé pourra s'appuyer sur :

- Les évolutions réglementaires en cours au niveau français et européen, pouvant intégrer une définition du contenu recyclé. Par exemple dans le cas des produits de construction, le projet d'acte délégué de la taxonomie établit les critères techniques « économie circulaire »¹⁵¹ ;

¹⁵⁰Définition dans la norme ISO 14021:2016, Marquage et déclarations environnementaux — Autodéclarations environnementales (Étiquetage de type II)

¹⁵¹ COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) .../... supplementing Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council by establishing the technical screening criteria for determining the conditions under which an economic activity qualifies as contributing substantially to the sustainable use and protection of water and marine resources, to the transition to a circular economy, to pollution prevention and control or to the protection and restoration of biodiversity and ecosystems and for determining whether that economic activity causes no significant harm to any of the other environmental objectives and amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 and Delegated Regulation (EU) 2021/2178

- Les définitions existantes par catégories de produits adaptant la définition de la norme ISO 14021, par exemple pour les EEE, la norme NF EN 45557 - Méthode générale pour l'évaluation du contenu en matériaux recyclés des produits liés à l'énergie, ou pour les emballages en aluminium¹⁵² : les normes *Federal Trade Commission – "Green Guides"* et *UL 2809 - Environmental Claim Validation Procedure (ECVP) for Recycled Content* ;
- Des définitions normées de MPR distinguant MPR pré-consommation et post-consommation, par exemple pour l'acier, la Steel Scrap Specification de l'EFR (EFR, 2007) – cf. annexe 8.1, 8.2 et 8.3.

D'autre part, le **modèle de chaîne de contrôle** (*Chain of Custody – CoC - model*), défini comme le « Processus par lequel les intrants, les extrants et les informations associées sont transférés, surveillés et contrôlés à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement concernée »¹⁵³ peut être également défini et harmonisé pour l'ensemble des produits contenant des MPR métalliques. Cela permettrait de certifier un contenu recyclé dans le produit final. Les différents modèles de chaîne de contrôle sont présentés en Tableau 19. La définition d'un modèle de chaîne de contrôle pourra également s'appuyer sur des normes existantes, telle que l'Aluminium Stewardship Initiative (ASI) en place pour l'aluminium.

¹⁵² Cf. the Aluminum Association, Can Manufacturer Institute (2021), The Aluminum Can Advantage: Sustainability Key Performance Indicators

¹⁵³ Définition dans la norme ISO 22095:2020, Chaîne de contrôle — Terminologie générale et modèles

Tableau 19 : Présentation des différents modèles de chaîne de contrôle (ISEAL, 2016)

Catégorie	Sous-catégorie	Description
Identity preservation		Un modèle IP garantit que le produit certifié provenant d'un site certifié est séparé des autres sources. S'il est utilisé tout au long de la chaîne d'approvisionnement, il permet de tracer les produits certifiés de manière unique tout au long du processus de production, depuis un site de production et un lot (détenteur du certificat de durabilité) jusqu'au dernier point de transformation ou d'étiquetage d'un produit (ou d'utilisation d'une allégation).
Segregation		Ce modèle garantit que les produits certifiés sont séparés des sources non certifiées à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement, ce qui permet de s'assurer que les ingrédients d'un produit donné proviennent de sources certifiées, même si cela n'est pas toujours le cas.
Mass balance	Batch level mass balance	Ce modèle maintient la ségrégation jusqu'au point final de mélange pour un lot spécifique d'un produit. Le mélange avec des produits non certifiés est contrôlé et enregistré, de sorte que la proportion de contenu certifié dans chaque produit final est connue.
	Site level mass balance	Ce modèle maintient la ségrégation jusqu'à l'étape de fabrication ou de transformation de la chaîne d'approvisionnement, lorsque le produit certifié peut être mélangé à un produit non certifié et que les proportions de produits certifiés et non certifiés au niveau du site sont enregistrées et réconciliées.
	Group level mass balance	Dans ce modèle, le mélange physique ou le rapprochement des volumes de produits certifiés et non certifiés est autorisé à n'importe quel stade du processus de production, à condition que les quantités soient contrôlées dans la documentation. Le volume de produits certifiés achetés par le groupe est contrôlé et un volume équivalent de produits quittant le groupe peut être vendu comme certifié.
Certificate trading (book and claim)		Les produits certifiés et non certifiés circulent librement dans la chaîne d'approvisionnement. Les certificats ou crédits de durabilité sont délivrés au début de la chaîne d'approvisionnement par un organisme émetteur indépendant et peuvent être achetés par les acteurs du marché, généralement via une plateforme d'échange de certificats ou de crédits.

Une méthode commune de traçabilité pourrait permettre également de connaître la **provenance des MPR**, et distinguer les MPR métalliques françaises ou européennes des MPR métalliques hors UE. Cela permettrait de tracer et d'encourager l'incorporation de produits contenant des MPR sur le territoire national.

Comment ?

Dans le cadre de produits finis « simples », il existe des exemples de contenus recyclés calculés annuellement à l'échelle d'un site de production, par exemple les produits du sidérurgiste Nucor – cf. Tableau 20. Le calcul de ce contenu recyclé est par exemple nécessaire pour un des critères de la certification environnementale LEEDv4 pour les bâtiments¹⁵⁴

¹⁵⁴ US Green Building Council, LEED v4 for Building design and construction, 2019

Tableau 20 : Contenu en ferrailles des produits des laminoirs du groupe Nucor en 2021 (Nucor, 2021)

Site de production	Taux d'incorporation de MPR	Contenu recyclé post-consommation	Contenu recyclé pré-consommation
Crawfordsville, IN	76,2 %	11,1 %	65,1 %
Hickman, AR	56,6 %	28,7 %	28,0 %
Berkeley, SC	47,7 %	26,1 %	21,6 %
Decatur, AL	60,9 %	30,6 %	30,2 %
Gallatin, KY	60,8 %	33,2 %	27,6 %

A court terme, dans le cas de produits finis ou de composants « complexes », le calcul du contenu recyclé peut être difficile à effectuer. Aujourd'hui, il peut être réalisé par l'intermédiaire de plateformes Saas¹⁵⁵, permettant au fabricant de produits finis de cartographier l'ensemble de sa chaîne de valeur.

A plus long terme, les données pourraient être communiquées par l'intermédiaire d'un **passport produit** (ensemble de données liées à un produit conservées tout au long de son cycle de vie). Dans le cadre de la proposition de Règlement pour l'Ecoconception des Produits Durables – cf. annexe 8.5.1 – dont la publication est attendue pour 2024, la Commission a pour objectif de mettre en place un passeport produit pour les différents groupes de produits couverts par le règlement¹⁵⁶. Le REPD prévoit d'inclure, d'une part, des informations sur le contenu recyclé dans le passeport produit et, d'autre part, les codes douaniers pertinents. En pratique, les questions relatives à un « passeport produit », qui s'appliqueraient à la traçabilité des MPR métalliques dans les produits finis sont résumées en Tableau 21.

Tableau 21 : Paramètres à déterminer dans la mise en place d'un passeport produit (d'après WBCSD, 2023)

Catégorie	Paramètre	Question associée	Options
Périmètre	Catégorie de produits	Dans quelle catégorie de produits tracer les MPR en priorité	Produits finis de certains secteurs, tous produits finis, produits vendus au consommateur, etc.
	Taille d'entreprise	Quel type d'entreprise viser (PME, ETI, GE) ?	
	Niveau de mise en place	A quel niveau devrait être appliqué le passeport produit ?	Produit individuel, lot, modèle de produit
Technologie	Stockage de données	Comment et par qui les données doivent-elles être stockées et gérées ?	Centralisé/décentralisé, Géré par une autorité publique ou les entreprises
	Format de données	Quel format et support de données doit être choisi ?	QR Code, code barre, puce RFID, filigrane, etc.
	Accès*/sécurité	Comment l'accès aux données doit-il être autorisé ?	Accès complet ou restreint à tout utilisateur, accès différencié selon l'utilisateur de la donnée, etc.
Données	Exigence sur les données	Quelles informations/données seront incluses dans le passeport produit et à quel degré de standardisation ?	Données standardisées pour tous produits contenant des MPR métalliques, données spécifiques par secteur, etc.
	Gouvernance	Qui collecte et met à jour les données ? Comment les données du passeport produit sont-elles vérifiées ?	Certification des données, d'une partie des données, à une fréquence limitée, etc.

* Les outils de traçabilité, permettant d'attester de l'utilisation de MPR, et donc de définir un contenu recyclé, devraient être accessible à un maximum d'acteurs de la chaîne de valeur, de la collecte à l'incorporation dans le produit fini, potentiellement jusqu'au consommateur final. Ils peuvent être fournisseur ou utilisateurs de la donnée sur le contenu recyclé.

¹⁵⁵ Software as a Service, par exemple Transparency One

¹⁵⁶ A noter que la proposition du règlement Batteries prévoit la mise en place d'un passeport produit spécifique, Commission Européenne (2020, B).

Le travail mené dans le cadre de cette action sur la traçabilité pourra s'articuler avec les travaux du CSF « Mines et métallurgie », et notamment le projet structurant « 4.1 : Offrir des services dédiés aux filières (CSF) aval pour garantir un approvisionnement souverain et responsable » (Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2021). Un enjeu de ce projet est en particulier la traçabilité des chaînes de valeur des métaux avec les industries consommatrices (ex. automobile, aéronautique, bâtiment), comprenant notamment un « *impact maîtrisé de l'impact carbone selon une méthodologie partagée et validée par une tierce partie et des standards de traçabilité communs aux filières* » - cf. action n°5.

Evaluation de l'impact potentiel de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau d'impact potentiel très élevé (3,5 / 4)**. Afin de maximiser l'impact potentiel de cette action, celle-ci nécessitera des moyens financiers conséquents et devra être enrichie les travaux en cours sur d'autres métaux (notamment dans le cadre du règlement batterie) et par les filières aval qui ont des réflexions avancées sur le sujet (ex. Plateforme automobile) (Entretien d'experts).

Evaluation de la faisabilité de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau de faisabilité modéré (2,5 / 4)**. Plusieurs points d'attention ont été soulevés :

- La mise en place d'outils de traçabilité de l'incorporation de MPR métalliques nécessite une standardisation des définitions de ces matières. Cela conduirait à aller plus loin que les objectifs actuels, fondés sur une part de MPR incorporées, en distinguant entre les différents types de MPR incorporées ;
- Les outils de traçabilité doivent être accessibles à un maximum d'acteurs de la chaîne de valeur du recyclage des métaux ;
- Les définitions utilisées des différents types de MPR doivent s'appuyer sur celles proposées dans les différentes évolutions réglementaires en cours.

A noter que la traçabilité des MPR et de leurs utilisations pourraient être facilitée par le développement de plateformes numériques comme Mjunction, première plateforme digitale de l'acier au monde, créée par le sidérurgiste Tata Steel. Selon le Rapport du Sénat sur la filière sidérurgique française, cette plateforme permet « d'alimenter l'industrie du recyclage avec des données fiables et transparentes tout au long de la chaîne de valeur » (Sénat, 2019).

Plan d'action : Synergies avec les autres recommandations

L'inventaire des normes définissant les MPR (action n°3) serait indispensable pour définir la matière recyclée et donc définir le contenu recyclé pour les fabricants de produits finis. La correspondance avec des codes douaniers permettrait de définir également la provenance des MPR. L'action n°4 est un préalable à la mise en place d'un label sur le contenu recyclé (action n°5).

6.2.5. Action n°5 : Inciter les fabricants de produits finis à intégrer davantage de MPR métalliques, notamment via un « label contenu recyclé »

Inciter les fabricants de produits finis à intégrer davantage de MPR métalliques, notamment via un « label contenu recyclé »			
Objectifs adressés	Augmenter les débouchés en France pour les entreprises préparatrices de MPR métalliques ; Décarboner l'industrie en incorporant davantage de MPR métalliques dans les produits finis.		
Freins levés	Manque d'incitations économiques à l'utilisation de MPR métalliques en France.		
Type d'action	Etude d'approfondissement ; Mesure réglementaire.		
Mise en place et résultats	Moyen terme.		
Acteurs potentiellement concernés	Acteurs publics français et européens ; Fabricants de produits finis contenant des métaux.		
Métaux concernés	Acier ; Aluminium ; Cuivre.		
Niveau d'impact potentiel	3 / 4	Niveau de faisabilité	3 / 4

Principe de fonctionnement de l'action

Ce levier prendrait la forme d'un label valorisant l'incorporation de MPR métalliques dans les produits, en prévoyant une part de contenu recyclé, et le cas échéant en valorisant dans d'autres labels les émissions de gaz à effet de serre évitées en incorporant des MPR. Le Tableau 22 présente les conditions de création d'un éventuel label justifiant le contenu recyclé d'un produit fini. Ces conditions sont inspirées de la proposition de « Green Claims Directive »¹⁵⁷.

¹⁵⁷ Proposition de DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relative à la justification et à la communication des allégations environnementales explicites (directive sur les allégations écologiques)

Tableau 22 : Conditions de création d'un label sur le contenu recyclé

Paramètre	Conditions de création
Justifier	Utiliser la méthode de traçabilité sélectionnée lors de la mise en place de l'action n°4 pour justifier le contenu recyclé.
	Mettre à jour les informations selon les changements identifiés dans la chaîne de valeur.
Communiquer	S'assurer que tout ou partie des données, hypothèses et méthodes de calcul ayant permis d'obtenir le label sont accessibles publiquement.
	Ne citer que le contenu recyclé sous la forme d'un pourcentage.
Vérifier	Vérifier les allégations environnementales par un tiers vérificateur compétent, indépendant et accrédité.
	Le vérificateur devrait avoir été accrédité par l'ADEME ¹⁵⁸

Le label contenu recyclé pourrait également permettre de moduler les émissions de GES associées à la fabrication des matériaux, utilisées pour estimer l'impact du cycle de vie des produits. **La création d'un label supplémentaire certifiant un « contenu carbone » ne serait pas souhaitable dans une perspective d'harmonisation et de simplification de l'affichage environnemental.** Toutefois, la déclaration d'un contenu recyclé viendrait alimenter les initiatives existantes visant à afficher l'impact environnemental des produits :

- La France a lancé une expérimentation sur l'affichage environnemental des produits dans le cadre de la loi « Climat et Résilience »¹⁵⁹. L'affichage environnemental informe sur l'impact environnemental des biens et services considérés sur l'ensemble de leur cycle de vie, et doit prendre en compte, les émissions de gaz à effet de serre, les atteintes à la biodiversité, la consommation d'eau et d'autres ressources naturelles. Les secteurs couverts par l'affichage environnemental ne sont pas encore déterminés ;
- En France, dans le cadre de la réglementation RE2020 pour les produits de construction : La connaissance d'un contenu recyclé permettrait d'affiner les impacts en termes d'émissions de GES renseignés dans les FDES (Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires des produits), spécifique à chaque produit de construction et utilisée pour évaluer l'impact environnemental des bâtiments, et renseignées dans la base INIES¹⁶⁰ ;
- A l'échelle européenne, la mise en place d'un label indiquant le contenu recyclé des produits permettrait d'anticiper les actes délégués spécifiques aux produits mis en place dans le cadre de l'ESPR (cf. section 8.5.1).

Cette recommandation est en ligne avec celle faite par le Conseil Général de l'environnement et du développement durable (CGDD) et du Conseil général de l'économie (CGE) en 2020 (CGDD, CGE, 2020), qui propose de « *Mettre en place une certification du taux d'incorporation de matière première recyclée dans les produits et développer une signalétique pour permettre au consommateur d'apprécier la facilité de recyclage des produits achetés* ». Le rapport propose également de « *Promouvoir à l'échelon européen, voire adopter dans la réglementation nationale, des taux d'incorporation obligatoires de matière recyclée dans certains produits* ». Ce dernier objectif peut être envisagé, à plus long terme.

¹⁵⁸ Dans le cadre de l'affichage environnemental des produits et des services, l'ADEME a mis en œuvre une Délégation de service public (DSP) pour vérifier la sincérité des notes environnementales affichées.

¹⁵⁹ loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets

¹⁶⁰ A titre d'exemple, ArcelorMittal a intégré dans la base INIES une FDES pour la base

Evaluation de l'impact potentiel de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau d'impact potentiel élevé (3 / 4)**. Un label contenu recyclé, sans avoir l'impact d'une obligation réglementaire de contenu recyclé, permettrait d'identifier les freins à l'évaluation du contenu recyclé dans les produits contenant des métaux, et de trouver des solutions.

A noter : Au-delà de leur contenu en MPR, les métaux de base sont très largement et facilement recyclables, incluant le recyclage en boucle ouverte des MPR post-consommation. Pour accroître l'impact potentiel de cette action, il faudrait la relier à un « taux d'entrée de recyclage en fin de vie » (End-of-Life Recycled Input Rate)¹⁶¹ (Commission européenne, 2023 A et TALENS PEIRO et al., 2018).

Evaluation de la faisabilité de la recommandation

Les participants ont attribué à cette action un **niveau de faisabilité élevé (3 / 4)**. Plusieurs points d'attention ont été soulevés :

- L'atteinte des objectifs d'un label contenu recyclé par les fabricants de produits finis dépend des produits fabriqués et de la disponibilité des MPR métalliques. Il pourrait être pertinent de mettre en place un label lié à l'empreinte carbone de la matière ;
- Les chaînes de valeur des fabricants de produits finis étant mondiales, il est nécessaire de pouvoir évaluer dans quelle mesure les produits importés se conforment aux objectifs de bénéfice écologique ;
- Il sera nécessaire d'anticiper la charge financière et opérationnelle de l'encadrement d'un tel label ;
- Un label fixant une cible contraignante de contenu recyclé s'appliquerait mieux au niveau d'un produit final plutôt que d'un matériau donné. En effet, certains produits ont des contraintes de caractéristiques finales ou de procédés de fabrication qui ne permettent pas – dans les conditions technico-économiques actuelles – d'envisager de dépasser certains seuils de contenus en MPR.

Plan d'action : Synergies avec les autres recommandations

La mise en place d'une méthode et d'outils de traçabilité du contenu recyclé est indispensable (action n°2) et nécessaire pour légitimer l'acquisition d'un label « contenu recyclé ».

¹⁶¹ L'indicateur mesure, pour une matière première donnée, la quantité introduite dans le système de production provenant du recyclage de MPR post-consommation, c'est-à-dire issus de produits en fin de vie. Le « taux d'entrée de recyclage en fin de vie » ne prend pas en compte les MPR pré-consommation provenant de processus de manufacture (Commission européenne, 2023 A).

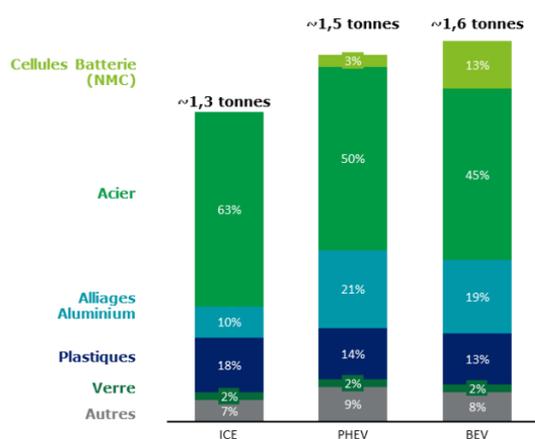
6.2.6. Action n°6 : Mettre en place des obligations réglementaires liées à des seuils d'intensité carbone des matériaux

Mettre en place des obligations réglementaires liées à des seuils d'intensité carbone des matériaux			
Objectifs adressés	Augmenter les débouchés en France pour les entreprises préparatrices de MPR métalliques ; Conserver les gisements de MPR métalliques exportés vers certains pays tiers aujourd'hui ; Décarboner l'industrie en incorporant davantage de MPR métalliques dans les produits finis.		
Freins levés	Exigences techniques des métallurgistes et fabricants de produits finis ; Manque d'incitations économiques à l'utilisation de MPR métalliques en France.		
Type d'action	Mesure réglementaire.		
Mise en place et résultats	Long terme.		
Acteurs potentiellement concernés	Acteurs publics français et européens ; Fabricants de produits finis contenant des métaux.		
Métaux concernés	Acier ; Aluminium ; Cuivre.		
Niveau d'impact potentiel	4 / 4	Niveau de faisabilité	1 / 4

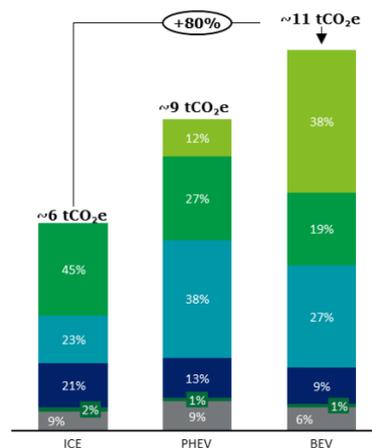
Principe de fonctionnement de l'action

Les secteurs fortement émetteurs de gaz à effet de serre doivent, dans le cadre de l'article 301 de la loi Climat et résilience¹⁵⁹, construire des **feuilles de route de décarbonation**. Elles visent à rassembler les actions mises en œuvre par chacune des parties pour atteindre les objectifs d'émissions de gaz à effet de serre fixés par la Stratégie Nationale Bas Carbone. Ces feuilles de route seront ensuite intégrées à la Stratégie Nationale Bas Carbone n°3 (SNBC3). Pour ces grands secteurs utilisateurs d'acier et d'aluminium, le poids des métaux dans l'impact climatique lié à la fabrication est significatif, par exemple dans le cas du secteur des transports (cf. Figure 58) et dans le cas du secteur de la construction.

Masse moyenne des véhicules Segment C (t)



Empreinte carbone moyenne des véhicules Segment C (tCO₂e)



Estimation moyennée pour des véhicules produits en Europe - Etude Deloitte

Figure 58 : Quantification des émissions moyennes pour des véhicules en Europe production. Répartition des émissions par matériau au regard de l'état actuel des chaînes d'approvisionnement matériaux et composants (dont batterie d'origine asiatique majoritaire) (PFA, 2023).

La proposition de feuille de route de décarbonation du cycle de vie du bâtiment présente une analyse de décomposition des émissions incorporées de GES des produits utilisés par le secteur de la construction en France. Cette analyse a identifié « la sidérurgie de base, les ferro-alliages et leurs produits amont » comme le deuxième poste d'émissions du bâtiment après le poste « ciment, chaux et plâtre » (Ministère de l'Ecologie, 2023 C).

Pour ces secteurs, l'utilisation de métaux incorporant des MPR apparaît être un levier de décarbonation simple et efficace. En effet :

- Les **Plans de Transition Sectoriels** aluminium (ADEME, 2021 A) et acier (ADEME, 2021 B), précisent que le recyclage des métaux est le levier le moins coûteux et dont la mise en place peut se faire le plus rapidement, dans un délai inférieur à 5 ans¹⁶² ;
- La présente étude montre par ailleurs que les MPR métallique, en particulier d'acier et d'aluminium, sont **disponibles mais non incorporées en France** – cf. sections 3 et 4.

La présente action propose d'intégrer dans une réglementation sur l'éco-conception des produits, en particulier à l'échelle européenne à travers le REPD et ses actes délégués, un objectif de contenu recyclé correspondant à un seuil d'intensité carbone (exprimé par exemple en tCO₂ eq./t) pour l'aluminium, le cuivre ou l'acier contenu dans les produits finaux. La réglementation pourrait laisser le choix entre ce contenu recyclé et l'objectif de contenu carbone¹⁶³. Un expert des filières métalliques précise que cette recommandation devrait faire l'objet d'une analyse très fine avant d'être validée (Entretien d'expert).

Le taux de ce contenu recyclé obligatoire prendrait en compte les contenus recyclés anticipés dans les feuilles de route décarbonation, mais aussi les pratiques existantes, certaines applications au sein d'un même secteur incorporant déjà des MPR (par ex. automobile : blocs moteurs en l'aluminium, construction : fer à béton issus de la filière sidérurgique électrique). Par ailleurs, si un effort sur le recyclage de tous les gisements de MPR est nécessaire (pré- et post-consommation), ce contenu recyclé pourrait être restreint à des MPR post-consommation, pour encourager le recyclage de MPR à teneurs plus élevées en résiduels, aujourd'hui recyclées en boucle ouverte ou exportées.

¹⁶² A noter : Les scénarios du PTS acier n'engagent pas les industriels de la filière acier. Il s'agit de pistes de réflexion menées par l'ADEME.

¹⁶³ Les deux critères (« contenu recyclé » et « incidences environnementales, y compris l'empreinte carbone et l'empreinte environnementale ») sont en effet considérés comme des critères d'éco-conception dans le REPD.

Le contenu recyclé obligatoire prendrait également en considération ceux déjà issus de réglementations européennes par type de produit, telle que la proposition de règlement sur les exigences en matière de circularité pour la conception des véhicules et la gestion des véhicules en fin de vie (VHU) :

- Pour l'acier, l'option privilégiée de cette proposition donne à la Commission le pouvoir de fixer un objectif de contenu en acier recyclé dans les véhicules nouvellement approuvés dans les trois ans suivant l'entrée en vigueur du règlement, sur la base d'une étude de faisabilité ;
- L'option de fixer des objectifs de contenu recyclé pour d'autres matériaux tels que l'aluminium et les Matières Premières Critiques (CRM – Critical Raw Materials) sera évaluée ultérieurement, en fonction des évolutions de la conception des véhicules et de la disponibilité des capacités de recyclage¹⁶⁴.

Evaluation de l'impact potentiel de la recommandation

L'équipe projet a attribué à cette action un **niveau d'impact potentiel très élevé (4 / 4)**. La mise en place d'une telle réglementation permettrait de conserver des gisements très importants d'acier, d'aluminium et de cuivre en France.

Evaluation de la faisabilité de la recommandation

L'équipe projet a attribué à cette action un **niveau de faisabilité faible (1 / 4)**. L'un des principaux points d'attention est que l'incorporation directe ou indirecte de MPR métalliques par les fabricants de produits finis nécessite un gisement de MPR métalliques stable, ainsi que la poursuite de la démarche d'investissement des préparateurs de MPR métalliques.

Par ailleurs, selon un expert des filières métalliques, les industriels qui incorporent des MPR font face à des investissements majeurs afin de décarboner leurs industries. Il est donc nécessaire que cette recommandation leur évite tout surplus de contraintes (Entretien d'experts).

Plan d'action : Synergies avec les autres recommandations

Il s'agit d'une action de long terme, qui ne sera implémentable que si les cinq actions ci-dessus ont été mises en place est que l'intensité carbone des métaux réalisée dans les principaux secteurs consommateurs n'est pas conforme à celle anticipée.

¹⁶⁴ Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/64/EC. COM/2023/451 final

6.3. Synthèse des recommandations sous la forme d'un plan d'action

La Figure 59 récapitule les synergies entre les six actions ci-dessus. Certaines actions sont facilitatrices (actions n°1, 3 et 4) alors que d'autres ont un impact direct sur le recyclage des métaux en France (actions n°2, 5 et 6).

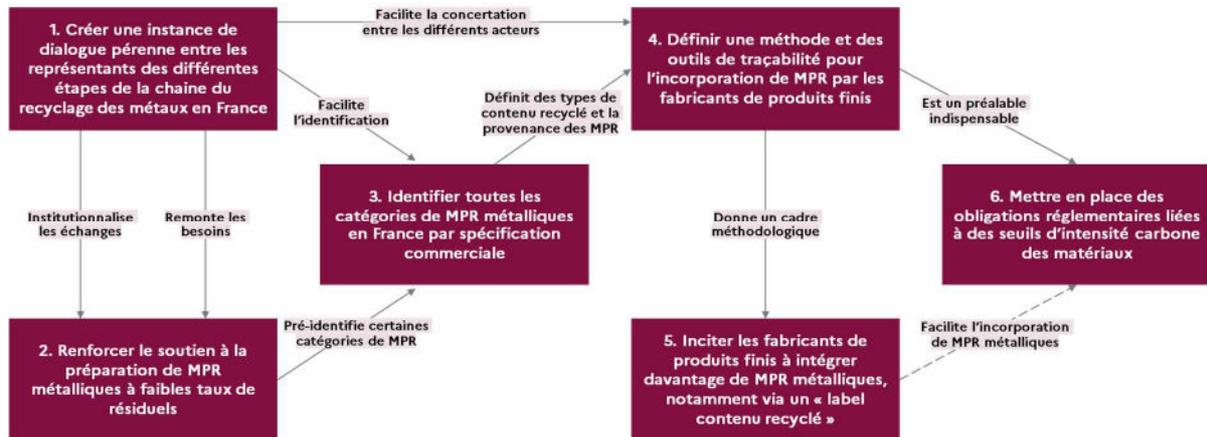


Figure 59 : Synergies entre les différentes recommandations du plan d'action

La Figure 60 récapitule le **plan d'action 2024-2030 proposé dans le cadre de cette étude pour poursuivre l'amélioration du recyclage des métaux en France**. Les actions 1 (« Créer une instance de dialogue pérenne entre les représentants des différentes étapes de la chaîne du recyclage des métaux en France ») et 2 (« Renforcer le soutien à la préparation de MPR métalliques à faibles taux de résiduels ») sont considérées comme des leviers à activer tout au long du plan d'action.

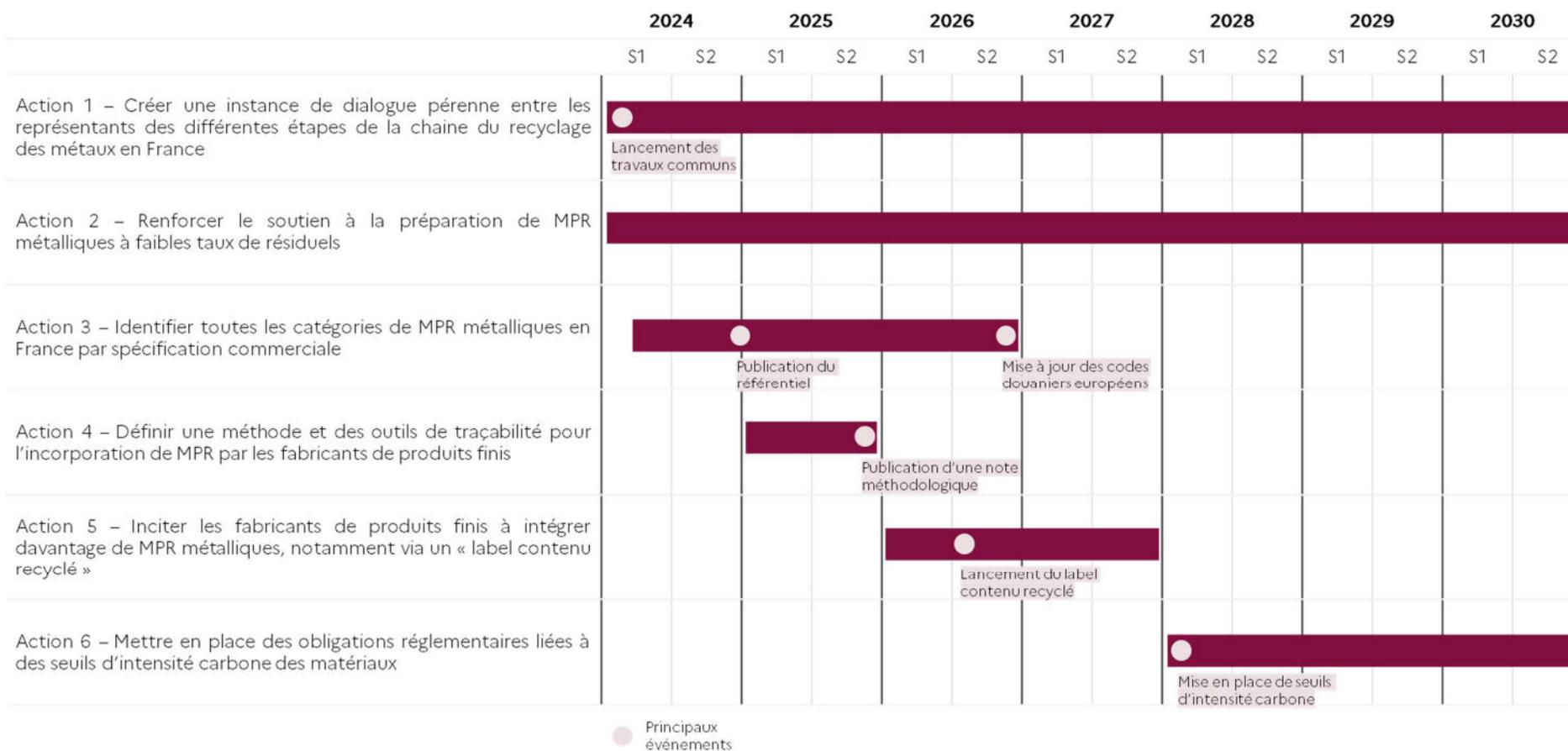


Figure 60 : Plan d'action pluriannuel d'amélioration du recyclage des métaux en France

7. Conclusions

Aujourd'hui, la majorité des métaux issus des produits en fin de vie sont recyclés, c'est-à-dire collectés, préparés et réincorporés dans un nouveau cycle de production. Ceci est notamment dû à leur valeur importante en tant que matières premières de recyclage (MPR).

Ainsi, des filières d'incorporation de MPR métalliques existent pour tous les métaux. En résumé :

- Pour l'acier :
 - La filière sidérurgique électrique – 33,2 % de la production d'acier en France en 2022 – s'approvisionne presque uniquement à partir de ferrailles et incorpore des ferrailles ayant des teneurs plus élevées de contaminants. Cette filière est la principale filière consommatrice de ferrailles en France ;
 - La filière sidérurgique intégrée – 66,8 % de la production d'acier en France en 2022 – consomme peu de ferrailles et se positionne sur des ferrailles à faibles teneurs en résiduels ;
 - La fonderie s'approvisionne majoritairement à partir de ferrailles, dont la teneur en résiduels des pièces à élaborer.
- Pour l'aluminium :
 - La filière de recyclage direct (ou de seconde fusion) s'approvisionne en déchets de fabrication et en déchets post-consommation de composition homogènes. Cette filière est la principale filière consommatrice de MPR d'aluminium en France ;
 - La filière d'affinage produit des lingots d'aluminium de seconde fusion pour l'industrie automobile à partir de déchets pré- et post-consommation de différents types.
- Pour le cuivre :
 - La filière de recyclage par fusion (*direct melting*) fabrique des produits de première transformation et des produits semi-finis à partir de déchets à très faibles teneurs en résiduels. Il s'agit de l'unique modalité d'incorporation de MPR de cuivre en France ;
 - La filière d'affinage du cuivre (*smelting and refining*) produit des cathodes et des produits de première transformation en cuivre (ex. lingots) à partir de concentrés cuivreux (MPV issues des mines) et/ou des déchets de différents types (MPR). Cette filière est presque inexistante en France.

Néanmoins, le recyclage des métaux en France n'est aujourd'hui pas optimal au regard des nouvelles contraintes réglementaires, de souveraineté et de transition écologique :

- **Les technologies actuelles de recyclage des MPR métalliques conduisent souvent au recyclage en boucle ouverte.** Le fonctionnement en boucle fermée – la réincorporation des MPR dans des applications similaires à celles d'où proviennent – n'est pas la norme ;
- **La demande en MPR métalliques des filières métallurgiques est nettement inférieure aux MPR disponibles :**
 - Les cahiers des charges de certains clients finaux et les procédés de production des métaux conduisent à favoriser les matières premières vierges comme intrants principaux des métallurgistes ;
 - La désindustrialisation, en France, réduit les débouchés des MPR métalliques.
- **La préparation et l'incorporation des MPR métalliques ont parfois lieu à l'étranger :**
 - Certains pays hors UE ont une demande plus élevée et un consentement à payer plus fort pour différents types de MPR (teneurs faibles et élevées en résiduels), notamment pour celles dont le recyclage ne serait pas intéressant d'un point de vue technico-économique en France. Ces MPR sont **parfois valorisées dans des conditions sociales et environnementales moins exigeantes** qu'au sein de l'UE mais ce n'est pas la cause déterminante de l'export de ces matières ;
 - Certains pays européens ou asiatiques ont des tissus industriels plus propices à l'incorporation de MPR métalliques (ex. présence de fabricants de produits finis et de leurs fournisseurs).



Les freins au recyclage des métaux de base portent donc essentiellement sur la valorisation et l'incorporation de MPR métalliques ayant des teneurs en résiduels plus élevées en France. Ces MPR métalliques correspondent aux déchets post-consommation en mélange (ex. zorba pour l'aluminium) ou ayant des teneurs élevées en résiduels (ex. teneur en cuivre des ferrailles E40). Ces MPR sont en grande partie recyclées en boucle ouverte en France et exportés vers des pays tiers.

En conséquence, **la France est le principal exportateur net de MPR métalliques par comparaison avec l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne et l'Italie.**

A l'horizon 2030, **les gisements de déchets métalliques devront être conservés en France** afin d'être réincorporés sous la forme de MPR métalliques :

- Soit du fait des enjeux de décarbonation des acteurs métallurgiques, qui les inciteront à incorporer des MPR métalliques ;
- Soit du fait des enjeux de décarbonation de leurs filières aval (ex. automobile, bâtiment, emballages) qui augmenteront la demande en métaux contenant des MPR métalliques ;

L'amélioration des technologies de tri (procédés, mise à l'échelle, etc.) **devrait permettre d'incorporer de nouveaux types de MPR métalliques**, notamment des volumes plus importants de MPR provenant de déchets post-consommation.

S'agissant du cuivre et de l'aluminium, la demande de métaux de base augmentera d'ici à 2030, notamment en raison de l'utilisation grandissante de métaux non ferreux dans les technologies de la transition énergétique. A l'inverse, la demande d'acier devrait rester stable à l'horizon 2030.

Les gisements totaux de déchets métalliques ne permettant pas de répondre à l'intégralité de la demande en métaux en 2030, **il sera essentiel de maximiser le taux d'incorporation de MPR métalliques en optimisant le recyclage de certains gisements clés** comme ceux des DEEE, VHU et emballages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A3M (2022), entretien – 08/12/2022.
- ADEME (2020) A. Aluminium, mémo d'analyse des enjeux de décarbonation du secteur.
- ADEME (2020) B. DEPROUX Alice, GAILLARD Déborah, ROBIN Arthur, LECOINTRE Eric. Automobiles – données 2018.
- ADEME (2020) C. DEVAUZE Chloé, PLANCHON Mariane, KOITE Alima, WELGAN Julien. Bilan National du Recyclage 2008- 2017 – Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois
- ADEME (2020) D. ANDRIEU O., FRANCOIS B., LAURENT H., LE BOULZEC G., LEFEBVRE B., MONFORT D., MULLER C., RODRIGUEZ S., VILLENEUVE J. Inventaires des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique.
- ADEME (2021). Acier, mémo d'analyse des enjeux de décarbonation du secteur.
- ADEME (2022) A. DEVAUZE Chloé, KOITE Alima, CHRETIEN Anaëlle, MONIER Véronique. Bilan National du Recyclage 2010-2019 – Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois.
- ADEME (2022) B. DEPROUW Alice, GAILLARD Déborah, ROBIN Arthur, LECOINTRE Eric. Véhicules – Données 2020.
- ADEME (2022) C. Les filières à Responsabilité élargie des producteurs (REP). <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/filieres-a-responsabilite-elargie-producteurs-rep> [consulté en 2023/06]
- ADEME et FEDEREC (2017). Évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse de cycle de vie.
- AFICA (2023). Les garanties AFICA. <https://afica.fr/les-garanties-afica/> [consulté en 2023/06]
- Agence Internationale de l'Énergie (2020). Iron and Steel Technology Roadmap. Towards more sustainable steelmaking.
- Agence Internationale de l'Énergie (2021). Turkey 2021 Energy Policy Review.
- Agence Internationale de l'Énergie (2022). Iron and Steel. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel> [visité en 2023/05].
- Agence Internationale de l'Énergie (2023). In the transition to clean energy, critical minerals bring new challenges to energy security. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/executive-summary>. [consulté en 2023/03]
- Alliance Internationale du Cuivre (2017). The Electric Vehicle Market and Copper Demand
- Alliance Internationale du Cuivre International Copper Alliance (2023). Cycle de vie du cuivre. <https://copperalliance.org/fr/sustainable-copper/about-copper/copper-life-cycle/> [consulté en 2023/03]
- Aluminium Association (2018). International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys.
- Aluminium France (2022), entretien – 09/12/2022.
- Aluminium France (2023) A. Production et transformation. <https://www.aluminium.fr/production-et-transformation> [consulté en 2023/03]
- Aluminium France (2023) B. Membres et groupements d'Aluminium France. <https://www.aluminium.fr/membres/> [consulté en 2023/03]
- Aluminium Guide (2023), Aluminum grades Terms and Definitions, <https://aluminium-guide.com/en/marki-alyuminiya/> [consulté en 2023/09]
- Aperam (2023), entretien – 12/01/2023.
- ArcelorMittal (2022), entretien – 16/12/2022.
- ArcelorMittal (2023 A). Nos sociétés et nos sites. <https://france.arcelormittal.com/activites/societes-et-sites> [consulté en 2023/05]
- ArcelorMittal (2023 B). Le DRI à hydrogène, pour produire de l'acier sans charbon. <https://france.arcelormittal.com/neutralite-carbone/dri-hydrogene> [consulté en 2023/06]
- Arcep (2022). Plan de fermeture du réseau de boucle locale cuivre d'Orange.
- AUREA (2023) A. m Lego, recyclage d'alliages de cuivre. <https://www.aurea-france.com/fr/presentation-groupe-aurea/metaux-et-alliages/m-lego.html> [consulté en 2023/06]

- AUREA (2023) B. Poudmet, recyclage de poudres métalliques non-ferreuses. <https://www.aurea-france.com/fr/presentation-groupe-aurea/metaux-et-alliages/poudmet.html> [consulté en 2023/06]
- Banque mondiale (2023). World Bank Commodities Price Data (The Pink Sheet). [consulté en 2023/06]
- Belgian Steel Federation (2020). Belgian Steel in 2019. Annual Report.
- BRGM (2021). LEGUERINEL Mathieu. Le marché du cuivre : l'offre. Point sur la production actuelle et les futurs projets.
- Bureau of International Recycling (2017). WILLEKE Rolf. EU-28 Steel Scrap Statistics (for 2016).
- CAPUZZI Stefano, TIMELLI Giulio (2018). Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review
- Carbios (2023). Recyclage enzymatique : lever les contraintes des procédés actuels. <https://www.carbios.com/fr/recyclage-enzymatique/> [consulté en 2023/06]
- CASSETTA Ernesto et al. (2019). The European Union Aluminium Industry: The Impact of trade measures on the competitiveness of downstream activities.
- CEA ISEC (2023), entretien – XX/03/2023 (A confirmer)
- Centre commun de recherche (2010) A. MUCHOVA Lenka, EDER Peter. End-of-waste Criteria for Iron and Steel Scrap: Technical Proposals.
- Centre commun de recherche (2010) B. MUCHOVA Lenka, EDER Peter. End-of-waste Criteria for Aluminium and Aluminium Alloy Scrap: Technical Proposals.
- Centre commun de recherche (2011). MUCHOVA Lenka, EDER Peter, VILLANUEVA Alejandro. End-of-waste Criteria for copper and copper alloy scrap: Technical Proposals
- Centre commun de recherche (2018). PASSARINI Fabrizio, CIACCI Luca, NUSS Philip, MANFREDI, Simone. Material Flow Analysis of Aluminium, Copper, and Iron in the EU-28.
- CGDD, CGE (2020). Les filières de recyclage de déchets en France métropolitaine.
- Citeo (2022). Le point sur le tri et le recyclage des emballages en Aluminium.
- Citeo et Adelphe (2022). Rapport d'activité 2021.
- Comité Stratégique de la Filière Mines et métallurgie (2020). Projet structurant N°6 Recyclage du VHU de demain, Rapport final et recommandations.
- Comité Stratégique de la Filière Mines et métallurgie (2021) A. Panorama et enjeux de la filière « Aciéries électriques ». Conseil National de l'Industrie.
- Comité Stratégique de la Filière Mines et métallurgie (2021) B. Décarbonation de l'industrie – Feuille de route de la filière Mines et Métallurgie.
- Commission Européenne (2017). High Level Group on the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union.
- Commission Européenne (2019). Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions. Le Pacte Vert pour l'Europe.
- Commission Européenne (2020) A. Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions. Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité.
- Commission Européenne (2020) B. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC
- Commission Européenne (2020) C. Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions. Stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques vers un environnement exempt de substances toxiques.
- Commission Européenne (2020) D. Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020). Critical Raw Materials Factsheets (Final).
- Commission Européenne (2023) A. Contribution de matériaux recyclés à la demande de matières premières, taux de recyclage en fin de vie, à l'entrée (EOL-RIR).
- Commission Européenne (2023) B. Ecoconception pour des produits durables. <https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and->

labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products_fr [consulté en 2023/06]

- Commission Européenne (2023 C). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/64/EC. COM/2023/451 final
- Constellium (2019). MARCHANT Edouard, NEEL Olivier. Journey through innovation, partnership and sustainability commitments towards closing the loop in circular economy the Aluminium plant perspective.
- Constellium (2023), entretien – 18/01/2023.
- DAEHN Katrin et al. (2017). How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? Environmental Science & Technology.
- Derichebourg Environnement (2022), entretien – 13/12/2022.
- Derichebourg Environnement (2023). Valorisation des mâchefers. <https://www.Derichebourg-Environnement-environnement.com/fr/accueil/nos-solutions/services-aux-collectivites/valorisation-de-machefers> [consulté en 2023/05]
- DGCCRF (2023). Acier pour emballage (fiche n°3). <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Aciers-pour-emballages> [consulté en 2023/03]
- DGE (2015). Mutations économiques du secteur de l'industrie des métaux non ferreux.
- Drive Aluminium (2020). Survey Reveals Aluminum Remains Fastest Growing Automotive Material, Emerging as a Preferred Metal for Electric Vehicles. <https://drivealuminum.org/news/survey-reveals-aluminum-remains-fastest-growing-automotive-material-emerging-as-a-preferred-metal-for-electric-vehicles/> [consulté en 2023/03]
- DWORAK Sabine, FELLNER J. (2021). Steel scrap generation in the EU-28 since 1946 – Sources and composition.
- Ecosystem (2023), entretien – 06/01/2023.
- EFR (2007). EU-27 Steel Scrap Specification.
- Euractiv (2023). À Trappes, le groupe minier Eramet prépare son virage vers les métaux critiques. <https://www.euractiv.fr/section/energie/news/a-trappes-le-groupe-minier-eramet-prepare-son-virage-vers-les-metaux-critiques/> [consulté en 2023/05]
- EUROFER (2022), European Steel in Figures
- EUROFER (2023), entretien – 13/01/2023.
- EUROFER. (2019). Low Carbon Roadmap, Pathways to a CO2-neutral European Steel Industry.
- Eurometaux (2022). LIESBET Gregoir. Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge
- European Aluminium (2022) B. Plants location in Europe https://public.tableau.com/app/profile/european.aluminium/viz/PlantslocationinEurope/Industry_plants [consulté en 2023/03]
- European Aluminium (2023) A, entretien – 09/02/2023.
- European Aluminium (2023) B. European Aluminium views on the revision of CLP Regulation. Communiqué de presse du 29 mars 2023.
- European Aluminium (2023) C. Aluminum Content in Passenger Vehicles (Europe). Assessment 2022 and Outlook 2026, 2030.
- European Copper Institute (2023), entretien – 13/01/2023.
- European Copper Institute et Fraunhofer Institute (2022). EU28 Copper stocks & flows 2020.
- Eurostat (2017, 2019, 2021). Codes douaniers 7204, 7404, 7602, 262030 et 262040.
- Fédération des Industries Mécaniques (2023), entretien – 27/01/2023.
- Fédération Forge Fonderie (2022), entretien – 16/12/2022.
- Fédération Française de l'Acier (2012). Comment fabrique-t-on l'Acier ?
- FEDEREC (2020). Le marché du recyclage. Chiffres 2019.
- FEDEREC (2021). Le marché du recyclage. Chiffres 2020.
- FEDEREC (2022). Le marché du recyclage. Chiffres 2021.
- FFB, SEDDRé et Union des Métalliers (2023), entretien – 13/02/2023.

- France Culture (2023). 'Weeeycycling' : pour des métaux critiques 100% recyclés, traçables et éthiques. <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/demain-l-eco/weeeycycling-pour-des-metaux-critiques-100-recycles-tracables-et-ethiques-4896360> [consulté en 2023/05]
- Gindre Duchavany (2015). Engagements dans le cadre de la COP21. https://ungc-production.s3.us-west-2.amazonaws.com/attachments/cop_2015/200711/original/COP_2015.pdf?1445878377 [consulté en 2023/05]
- GLENCORE Canada (2023). Métaux et minéraux – Cuivre. <https://www.glencore.ca/fr/what-we-do/metals-and-minerals/copper> [consulté en 2023/06]
- GLÖSER Simon, SOULIER Marcel, and TERCERO ESPINOZA Luis (2013). A dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators & uncertainty evaluation.
- Groupement des affineurs d'aluminium (2023). Qu'est-ce que l'affinage ? <https://recyclagealuminium.fr/le-recyclage-de-laluminium/> [consulté en 2023/03]
- HIRAKI Takehito, TAKEDA Osamu, NAKAJIMA Kenichi, MATSUBAE Kazuyo, NAKAMURA Shinichiro, NAGASAKA Tetsuya (2011). Thermodynamic Criteria for the Removal of Impurities from End-of-Life Magnesium Alloys by Evaporation and Flux Treatment.
- HME Hailing Metal Europe (2023). Présentation LinkedIn du Groupe. https://www.linkedin.com/company/hme-metal-europe/?trk=public_post_share-update_actor-image [consulté en 2023/05]
- ICSG (2022). World Copper Factbook 2022.
- IFP Energies Nouvelles (2020). Le cuivre dans la transition énergétique : un métal essentiel, structurel et géopolitique ! <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cuivre-transition-energetique-metal-essentiel-structurel-et-geopolitique> [consulté en 2023/03]
- INERIS (2018). Revue bibliographique des concentrations en substances réglementées dans les plastiques de Véhicules Hors d'Usage.
- Institute of Scrap Recycling Industries (2009). Scrap Specifications Circular.
- IRT M2P (2023), entretien – 04/01/2023.
- ISEAL (2016). Chain of custody models and definitions. Version 1.0.
- IWCC (2022). The Italian Copper and Copper-Alloy fabricating Industry.
- IWCC (2023), Global Copper Semis End-Use reports, IWCC Statistics and Data Series
- Jégourel Yves (2016) A. Entretien « Matières premières : volatilité des prix » avec le Policy Center for the New South.
- Jégourel Yves (2016) B. Entretien « Produits dérivés et financiarisation des marchés des matières premières » avec le Policy Center for the New South.
- KME. TECU® - Toles et bandes en cuivre pour une architecture orientée vers le futur. <https://www.kme.com/fr/copperdivision/architecture/architecture-durabilite> [consulté en 2023/06]
- La tribune (2021). JOURDAN Nathalie. Weeeycycling, cette pépite française qui fabrique des métaux stratégiques 100 % recyclés. <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/transitions-ecologiques/weeeycycling-cette-pepite-francaise-qui-fabrique-des-metaux-strategiques-100-recycles-895264.html> [consulté en 2023/03]
- Lebronze Alloys (2022). COP 2021. Rapport de Développement Durable.
- Ley, Sansom, et Kwan (2001). Material flow analysis of the UK steel construction sector.
- LOIBL Antonia, TERCERO ESPINOZA Luis (2021). Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America.
- LOIBL Antonia, TERCERO ESPINOZA Luis, ROSTEK Leon, THURID LOTS Meta, WITTIG Sabine, HEBST Andrea (2022). A dynamic material flow model for the European steel cycle
- MARTIN, Madhavi et al. (2018). Calibration curves for commercial copper and aluminum alloys using handheld laser-induced breakdown spectroscopy.
- Material Economics (2020). Preserving value in EU industrial materials – A value perspective on the use of steel, plastics, and aluminium
- Métallerie Chaudronnerie (2023). Quels sont les différents alliages en métal légers ? <https://www.metallerie-chaudronnerie.com/quels-sont-differents-alliages-metal-legers/> [consulté en 2023/07]

- Minéral Info (2018). Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le cuivre.
- Ministère de l'Ecologie (2016). Cahier des charges de la filière REP des emballages ménagers.
- Ministère de l'Ecologie (2022). Véhicules hors d'usage (VHU). <https://www.ecologie.gouv.fr/vehicules-hors-dusage-vhu> [consulté en 2023/06]
- Ministère de l'Ecologie (2023 A). Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF). <https://www.ecologie.gouv.fr/mecanisme-dajustement-carbone-aux-frontieres-macf> [consulté en 2023/09]
- Ministère de l'Ecologie (2023 B). Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment (PMCB). <https://www.ecologie.gouv.fr/produits-et-materiaux-construction-du-secteur-du-batiment-pmcb> [consulté en 2023/06]
- Ministère de l'Ecologie (2023 C). Feuille de route décarbonation du cycle de vie du bâtiment. Les propositions de la filière (PMCB).
- Ministère de l'Economie. Projet de loi industrie verte : découvrir les 15 mesures. <https://www.economie.gouv.fr/industrie-verte-presentation-projet-loi> [consulté en 2023/06]
- MTB Recycling (2022), entretien – 09/12/2022.
- MTB Recycling (2023). Equipements de séparation. <https://www.mtb-recycling.fr/equipements-de-recyclage/equipements-de-separation/>
- NASDAQ (2023). COSKUN Orhan. Turkish energy regulator lowers ceiling prices for electricity.
- Nestlé (2020). Nestlé crée un marché pour les plastiques recyclés destinés à conditionner les aliments. Communiqué de presse du 16 janvier 2020.
- Nexans (2023 A), entretien – 23/02/2023.
- Nexans (2023 B). Document d'Enregistrement Universel 2022.
- NGK Berylco (2023). Notre Politique Recyclage. <https://www.ngk-alloys.com/fr/recycling.html> [consulté en 2023/05]
- Nucor (2022), 2021 Recycled Content Averages for Nucor Steel Mill Products
- Observatoire régional des déchets, ORDIF (2017). Recyclage des déchets métalliques Franciliens – Données 2015.
- OCAD3E (2021). HAARMAN Arthur, HESTIN Mathieu, ROCHAT David, DE FAUTEREAU Boris, COURTOIS Joséphine. Synthèse des études sur le gisement de DEEE ménagers et professionnels
- OCDE (2006). Improving Recycling Markets.
- Oxford Economics (2021). Future of Construction, A Global Forecast for Construction to 2030.
- PANASIUK, Daryna (2019). Dynamic Material Flow Analysis for Estimation of Iron Flows, Stocks and Recycling Indicators in EU-27. Université de Technologie de Troyes.
- Parlement européen (2023). Le système d'échange de quotas d'émission et sa réforme. <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20170213STO62208/le-systeme-d-echange-de-quotas-d-emission-et-sa-reforme> [consulté en 2023/05]
- PELLAN Marin et al. (2022). A holistic perspective on the French building and construction GHG footprint.
- Plateforme Automobile (2023). Proposition de feuille de route de décarbonation de la chaîne de valeur de l'automobile
- PNUE (2019). OBERLE Oberle, BRINGEZU Stefan, HATFIELD-DODDS Steve, HELLWEG Stefanie, SCHANDL Heinz, CLEMENT Jessica. Global Resources Outlook 2019, Natural Resources for the future we want.
- Profession Recycleur (2023). Déchets de cuivre : coupes sombres chez TréfiMétaux à Givet. <https://www.profession-recycleur.fr/dechets-de-cuivre-coupes-sombres-chez-trefimetaux--p2469.html> [consulté en 2023/06]
- Projet Métal (2023). Qui sommes-nous ? <https://www.projetmetal.fr/qui-sommes-nous/> [consulté en 2023/05]
- Prysmian Group (2023). ECO Cable – Green inside. <https://www.prysmiangroup.com/staticres/eco-cable/index.html> [consulté en 2023/06]
- Renault (2023), entretien – 06/01/2023.
- Riva Acier (2023), entretien – 02/03/2023.
- RTE (2019). Schéma Décennal Développement de Réseau Edition 2019.
- RTE (2022). Futurs énergétiques 2050 – Rapport complet. Evaluation approfondie des impacts environnementaux de la transformation du système électrique et de l'électrification des usages

- RTE (2023), entretien – 03/02/2023.
- Sanou Koura (2023). Valorisation des déchets électroniques. <https://www.sanoukoura.com/fr/une-initiative-ecologique/valorisation-des-dechets-electroniques/> [consulté en 2023/05]
- Sénat (2019). Rapport sur les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXIe siècle : opportunité de croissance et de développement
- SOREMO (2023), entretien – 28/02/2023.
- Sweed (2023). Scrap processing solutions – Wire and cable. <https://www.sweed.com/wire-and-cable>
- TALENS PEIRO, Laura et al. (2018). Towards Recycling Indicators based on EU flows and Raw Materials System Analysis data.
- THOMAS Christian (2019). Recyclage des cartes électroniques : un aperçu de l'état de l'art. Annales des Mines – Responsabilité et Environnement.
- THOMAS Christian (2020). Le recyclage des cartes électroniques en France.
- TIKANA, Ladji (2020). Energy demand of semi-finished goods production. Personal communication on an internal ECI study.
- ThyssenKrupp (2023). The selectrify steel battery housing. <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/industries/automotivetricks/e-mobility/battery-housing/> [consulté en 2023/03]
- TOMRA Recycling Sorting (2023). TOMRA lance AUTOSORT™ PULSE, avec la technologie LIBS dynamique.
- TRIMET (2022). Rapport de Développement Durable 2021.
- Urban Mine Platfom (2018). <http://www.urbanmineplatform.eu> [consulté en 2023/03]
- US EPA (2009), Assessing the Management of Lead in Scrap Metal and Electric Arc Furnace Dust, Final report, EPA530-R-09-004
- USGS (2007). PAPP John, et al. Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, and Steel Commodity Price Influences, Version 1.1.
- Veolia France (2021). Veolia s'associe avec le Groupe Renault et Solvay pour recycler en circuit fermé les métaux contenus dans les batteries des véhicules électriques. Communiqué de presse du 18 mars 2021.
- WATARI Takuma, NANSAI Keisuke, NAKAJIMA Kenichi (2021). Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review
- WBCSD (2023). Enabling circularity through transparency: Introducing the EU Digital Product Passport.
- World Stainless (2023). The Global Life cycle of Stainless Steels.
- World Steel Association (2020). World Steel in Figures.
- World Steel Association (2020). World Steel in Figures.
- Xerfi (2021). PECQUEUR Hugo, LEMESLE Olivier. L'industrie des métaux non-ferreux
- Xerfi (2022) A. BERBON Carine, LEMESLE Olivier. La filière sidérurgique en France
- Xerfi (2022) B. BERBON Carine. La fonderie des métaux
- Xerfi (2022) C. BERBON Carine, CESARD Anne. Le marché du recyclage des métaux

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des acteurs interviewés au cours de la présente étude.....	18
Tableau 2 : Volumes et types de ferrailles disponibles en France en 2019	24
Tableau 3 : Volumes et types de ferrailles incorporées en sidérurgie et en fonderie en France en 2019 .	25
Tableau 4 : Destinations des exportations de ferrailles de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).	32
Tableau 5 : Provenances des importations de ferrailles de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).	32
Tableau 6 : Taux d'incorporation et collecte apparente de ferrailles en 2016 (BIR, 2017 - Eurostat, Données 2016).....	35
Tableau 7 : Destinations des exportations de ferrailles d'acier inoxydable de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).....	39
Tableau 8 : Provenances des importations de ferrailles d'acier inoxydable de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).....	39
Tableau 9 : Volumes et types de MPR d'aluminium incorporées par filière de valorisation en France en 2019	72
Tableau 10 : Volumes et types de MPR d'aluminium disponibles en France en 2019.....	72
Tableau 11 : Destinations des exportations de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).	78
Tableau 12 : Provenances des importations de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).	78
Tableau 13 : Taux d'incorporation de MPR d'aluminium post-consommation et collecte apparente de déchets aluminium post-consommation en 2016 (Cassetta et al., 2019 et Eurostat, Données 2017).....	80
Tableau 14 : Méthodes consolidées et innovantes de tri des déchets d'aluminium (Capuzzi et Timelli, 2018)	96
Tableau 15 : Entreprises d'incorporation par fusion de MPR de cuivre présentes en France.....	109
Tableau 16 : Destinations des exportations de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).	118
Tableau 17 : Provenances des importations de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 (Eurostat, Données 2021).....	118
Tableau 18 : Appels à projets mis en place par l'ADEME	152
Tableau 19 : Présentation des différents modèles de chaîne de contrôle (ISEAL, 2016).....	158
Tableau 20 : Contenu en ferrailles des produits des laminoirs du groupe Nucor en 2021 (Nucor, 2021).	159
Tableau 21 : Paramètres à déterminer dans la mise en place d'un passeport produit (d'après WBCSD, 2023).....	159
Tableau 22 : Conditions de création d'un label sur le contenu recyclé.....	162
Tableau 23 : Vision synthétique de la chaîne de valeur de l'acier en France.....	180
Tableau 26 : Cartographie détaillée de la chaîne de valeur de l'acier en France.....	182
Tableau 27 : Principaux types d'aciers inoxydables ferritiques et austénitiques (Entretien d'experts)	188
Tableau 28 : Vision synthétique de la chaîne de valeur de l'aluminium en France en 2019	189
Tableau 29 : Cartographie détaillée de la chaîne de valeur de l'aluminium en France.....	191
Tableau 30 : Typologie IADS des alliages d'aluminium (Aluminium Association, 2018).....	198
Tableau 31 : Vision synthétique de la chaîne de valeur du cuivre en France (données de plusieurs années)	199
Tableau 32 : Cartographie détaillée de la chaîne de valeur du cuivre en France	201

FIGURES

Figure 1 : Evolution de la demande mondiale en fer et en acier (a), en aluminium (b) et en cuivre (c) de 1960 à 2019 ainsi que les estimations de ces demandes d'ici 2100 (Watari, et al., 2021).....	10
Figure 2 : Evolution du prix de métaux de base - indice 100= 2015 (Agence Internationale de l'Energie, 2022).....	10
Figure 3 : Projection de la demande mondiale de cuivre selon les scénarios STEPS (Stated Policies Scenario) et SDS (Sustainable Development Scenario) (Eurométaux, 2022).....	11
Figure 4 : Quantités produites et impacts environnementaux de l'extraction et de la transformation des métaux* de 2000 (Indice base 1) à 2015 (PNUE, 2019) *Sélection de 10 métaux couvrant plus 95 % de l'extraction domestique mondiale de minerais métalliques en 2015.....	13
Figure 5 : Impacts du recyclage des métaux sur le changement climatique en kg équivalent CO2 par kg de métal produit (PNUE, 2019).....	13
Figure 6 : Récapitulatif des gisements de déchets métalliques sélectionnés.....	17
Figure 7 : Synthèse de la consommation de ferrailles et de matières premières vierges en France par les trois filières d'incorporation de ferrailles ¹⁰ (en kt, en 2019).....	21
Figure 8 : Synthèse des tonnages d'acier en France à chaque étape de la chaîne de valeur (en kt, en 2019).	22
Figure 9 : Volumes de déchets d'acier post-consommation en France en 2019 en kt (ADEME, 2022 A., d'après A3M et Eurostat)	23
Figure 10 : Représentation simplifiée des principaux produits semi-finis, produits finis et principaux marchés consommateurs d'acier en France (XERFI, 2022 A et B).	26
Figure 11 : Répartition des exports de ferrailles de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).	28
Figure 12 : Répartition des imports de ferrailles de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).	29
Figure 13 : Représentation des types de MPR d'acier (ferrailles) françaises et de leurs premières destinations en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).....	34
Figure 14 : Répartition des imports-exports de ferrailles d'acier inoxydable de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).	37
Figure 15 : Production mondiale d'acier dans le scénario de neutralité carbone, de 2010 à 2030 (en millions de tonnes) (Agence Internationale de l'Energie, 2022)	41
Figure 16 : Production d'acier de l'Union européenne en 2015, 2030, 2040 et 2050 en millions de tonnes (EUROFER, 2019).....	41
Figure 17 : Production de voitures particulières sur les principaux marchés mondiaux, 2000-2050 (Commission Européenne, 2017).....	42
Figure 18 : Croissance du secteur de la construction sur les principaux marchés mondiaux, 2021-2030 (Oxford Economics, 2021).....	42
Figure 19 : Impact de la mise en œuvre du Schéma Décennal Développement de Réseau (SDDR) sur la consommation de ressources minérales à l'horizon 2035 (PPE, moyenne annuelle sur la période d'étude) (SDDR, 2019).....	43
Figure 20 : Evolution des prix du PET et du rPET en €/t entre 2015 et 2022 (d'après Plastic Information Europe, 2023).....	45
Figure 21 : Demande de ferrailles de la filière intégrée en atteignant la limite thermodynamique (seuil maximal théorique de 25 %) (Deloitte d'après Entretien d'experts)	48
Figure 22 : Evolution des structures de production d'acier de l'Union européenne entre 2010 et 2050 (EUROFER, 2019).....	49
Figure 23 : Volumes de ferrailles disponibles au sein de l'UE 28, 2015-2050 (EUROFER, 2019).....	50
Figure 24 : Concentration maximale de cuivre dans l'acier pour différents produits sidérurgiques en % de cuivre (Material Economics, 2020).....	55
Figure 25 : Nouvelle hiérarchie dans la gestion des produits chimiques dans le cadre de la CSS (Commission européenne, 2020 C)	56
Figure 26 : Cartographie des éléments contaminants pour le recyclage de 6 métaux (Fe, Cu, Zn, Pb, Al et Mg) (Hiraki et al., 2011).....	59
Figure 27 : Analyse du gisement de matières pour les quantités et les types de la demande d'acier brut et des ferrailles disponibles dans l'UE-28 pour les années 1960, 1988, 1994, 2000, 2006 et 2017 en Mt (Dworak & Fellner, 2021)	61
Figure 28 : Destinations des métaux ferreux contenus dans les VHU (moyenne annuelle sur la période 2017-2020, en kt) (ADEME, 2022 B et Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).....	65
Figure 29 : Estimation de la concentration en cuivre de l'acier dans les véhicules par étape de la chaîne de valeur de l'acier (DAEHN et al., 2017).....	66

Figure 30 : Synthèse des tonnages d'aluminium en France à chaque étape de la chaîne de valeur (en kt, en 2019).....	71
Figure 31 : Volumes de MPR incorporés et disponibles en France en 2019 en kt (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France).....	71
Figure 32 : Représentation simplifiée des principaux produits semi-finis et marchés consommateurs d'aluminium en France.....	73
Figure 33 : Répartition des exports de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).	75
Figure 34 : Répartition des imports de MPR d'aluminium de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).	76
Figure 35 : Représentation des types de flux de déchets d'aluminium français et de leurs premières destinations en kt (Eurostat, Données 2021).....	79
Figure 36 : Carte des usines de recyclage de l'aluminium en Europe (European Aluminium, 2022 B).....	81
Figure 37 : Demande totale d'aluminium en Europe par scénario de transition énergétique (Eurométaux, 2022).....	82
Figure 38 : Demande additionnelle d'aluminium par scénario de transition énergétique en 2030, en 2040 et en 2050 en millions de tonnes (Eurométaux, 2022).....	83
Figure 39 : Répartition de l'offre d'aluminium en Europe en 2019, en 2030 et en 2050 (European Aluminium, 2022 B).....	88
Figure 40 : Alliages d'aluminium utilisés par les différents marchés consommateurs d'aluminium (Material Economics, 2020).....	91
Figure 41 : Représentation visuelle du casting sink pour l'aluminium (Material Economics, 2020)	94
Figure 42 : Évolution des volumes de déchets d'aluminium contenus dans les VHU, classés par familles d'alliages, par rapport à la demande de pièces moulées en Europe – en kt (Constellium, 2019)	98
Figure 43 : Destinations de l'aluminium contenu dans les VHU (moyenne annuelle sur la période 2017-2020, en kt) (ADEME, 2022 B et Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).....	102
Figure 44 : Destinations des emballages en aluminium en 2021 en kt (Deloitte d'après CITEO, 2022 et CITEO et Adelphe, 2022).....	103
Figure 45 : Synthèse des tonnages de cuivre en France à chaque étape de la chaîne de valeur (en kt)...	110
Figure 46 : Volumes incorporés et gisement de MPR de cuivre disponibles dans l'UE- données 2020, en kt (European Copper Institute et Fraunhofer Institute, 2022)	111
Figure 47 : Représentation simplifiée des principaux produits semi-finis, produits finis et marchés consommateurs de cuivre en France	112
Figure 48 : Répartition des exports de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).	115
Figure 49 : Répartition des imports de MPR de cuivre de cinq pays européens en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).	116
Figure 50 : Représentation des types de flux de déchets de cuivre français et de leurs premières destinations en 2021 en kt (Eurostat, Données 2021).....	121
Figure 51 : Demande totale en cuivre en Europe par scénario de transition énergétique (Eurométaux, 2022).....	122
Figure 52 : Demande mondiale de cuivre pour les technologies de la transition énergétique (Eurométaux, 2022).....	123
Figure 53 : Familles d'alliages de cuivre et leur structure d'utilisation (Loibl et Tercero Espinoza, 2021) .	131
Figure 54 : Répartition des tonnages des produits semi-finis en cuivre dans le monde ene 2022 (production de cuivre et d'alliages de cuivre, avec une teneur en cuivre des alliages estimée à 70 %) (ICSG, 2022, d'après l'International Wrought Copper Council et l'Alliance Internationale du Cuivre) ...	132
Figure 55 : Destinations du cuivre contenu dans les VHU (moyenne annuelle sur la période 2017-2020, en kt) (ADEME, 2022 B et Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).	141
Figure 56 : Destinations du cuivre contenu dans les DEEE ménagers et professionnels en France en 2019 en kt.....	143
Figure 57 : Architecture du pilotage de la stratégie de filière (Sénat, 2019).....	149
Figure 58 : Quantification des émissions moyennes pour des véhicules en Europe production. Répartition des émissions par matériau au regard de l'état actuel des chaînes d'approvisionnement matériaux et composants (dont batterie d'origine asiatique majoritaire) (PFA, 2023).	165
Figure 59 : Synergies entre les différentes recommandations du plan d'action	167
Figure 60 : Plan d'action pluriannuel d'amélioration du recyclage des métaux en France	168
Figure 62 : Représentation schématique de l'affinage du cuivre (GLENCORE Canada, 2023)	207

8. Annexes

8.1. Cartographie détaillée de la chaîne de valeur de l'acier

8.1.1. Tonnages d'acier en France à chaque étape de la chaîne de valeur

Tableau 23 : Vision synthétique de la chaîne de valeur de l'acier en France en 2019

ETAPE DE LA CHAÎNE DE VALEUR	TONNAGE(S) ASSOCIE(S)	SOURCE(S)	REMARQUES
1. Production de métal	14 400 kt	WorldSteel, 2020, Données 2019.	Cette donnée correspond à la <i>Crude steel production</i> de World Steel. En France, en 2019, 69,6 % de cette production était réalisée par la filière intégrée, contre 30,4 % pour la filière électrique.
2. Fabrication de produits semi-finis	14 000 kt	WorldSteel, 2020, Données 2019.	Cette donnée correspond au <i>Continuously-cast steel output</i> de World Steel.
3. Consommation de produits semi-finis	14 600 kt (ASU*)	WorldSteel, 2020, Données 2019.	*L'Apparent Steel Use est obtenue en additionnant les livraisons (définies comme ce qui sort des installations du producteur d'acier) et les importations directes nettes. La France est un pays importateur net de produits semi-finis.
4. Consommation de produits finis	19 700 kt (TSU**)	WorldSteel, 2020, Données 2019.	**La True Steel Use est obtenue en additionnant les importations indirectes nettes d'acier à l'ASU. La France est un pays importateur net de produits finis contenant de l'acier.
5. Fin de vie des produits finis	<i>Donnée non disponible.</i>		Le Bilan National du Recyclage n'estime pas le gisement de ferrailles issues des produits en fin de vie (ADEME, 2022, A).
6. Collecte des déchets en fin de vie	12 307 kt	FEDEREC, 2021, Données 2019.	Donnée alternative : en 2019, la collecte apparente pour la sidérurgie s'élevait à 11 719 kt. Collecte apparente de ferrailles = Incorporation de ferrailles en sidérurgie + Exportations de ferrailles – Importations de ferrailles
7. Tri et préparation des MPR	10 728 kt dont exports de MPR : 6 595 kt	FEDEREC, 2021, Données 2019. Eurostat, Données 2019 – Code 7204.	En 2019, FEDEREC ne publiait pas de tonnages de MPR produites et vendues. Les données sont issues des Chiffres clés 2020 et du taux de croissance des ventes de ferrailles entre 2019 et 2020.
8. Incorporation de ferrailles en sidérurgie	5 662 kt dont imports de MPR : 1 524 kt	Calcul Deloitte d'après WorldSteel et estimations d'experts. Données 2019 Eurostat, Données 2019 – Code 7204.	Ce chiffre est inférieur aux données du BNR : 6 648 kt (ADEME, 2022 A d'après A3M, Données 2019). Ce chiffre est inférieur aux tonnages de Matières Premières de Recyclage vendues puisque la France est un exportateur net de ferrailles.

8.1.2. Vision détaillée des étapes de la chaîne de valeur de l'acier en France

Le Tableau 23 ci-dessus présente les volumes d'acier produits ou consommés en France à chaque étape de la chaîne de valeur en France en 2019. Il ne présente donc les données d'imports-exports que pour les MPR d'acier (ferrailles).

Le Tableau 24 va plus loin et présente les procédés, les acteurs, les produits et marchés, ainsi que des valeurs quantitatives à chaque étape de la chaîne de valeur de l'acier en France. Lorsqu'elles sont disponibles, les données d'imports-exports à d'autres étapes sont indiquées. La lecture se fait par colonne : les étapes sont successives et les lettres (ex. 1.2.A., 1.2.B.) indiquent que, pour une même étape, plusieurs procédés existent.

La légende du Tableau 24 ci-dessous est la suivante :

			
Technologies et procédés	Acteurs	Produits et marchés	Valeurs quantitatives (production, consommation et imports-exports)

1. Production d'acier en sidérurgie et en fonderie				
	1.1. Exploitation minière	1.2.A. Production d'acier sidérurgique – Filière intégrée	1.2.B. Production d'acier sidérurgique – Filière électrique	1.2.C. Incorporation de ferrailles en fonderie (Affinage)
	Extraction de minerais : minerais de fer, charbon, etc. (FFA, 2012)	1. Homogénéisation du minerai ; passage à un minerai aggloméré ; 2. Extraction du fer de son minerai pour obtenir un mélange liquide à base de fer : la fonte dans le haut-fourneau ; 3. Conversion de la fonte en acier dans un convertisseur. (FFA, 2012)	1. Préparation des MPR pré- et post-consommation ; 2. Fonte de la matière première : Des ferrailles de choix et des additions de métaux divers sont fondues dans un four par des arcs électriques puissants qui jaillissent entre des électrodes (3 en général). (FFA, 2012)	Les métaux ferreux (acier, fonte, etc.) sont chauffés et portés à l'état liquide. (Xerfi, 2022 B)
	Extracteurs de minerais de fer et de charbon à coke, négociants de ferrailles, etc. (Xerfi, 2022 A)	En 2020, il y avait 91 établissements de sidérurgie de base. ArcelorMittal est le leader de la filière sidérurgique intégrée en France et produit deux tiers de l'acier français.	En 2020, il y avait 91 établissements de sidérurgie de base. En France, 18 aciéries électriques opèrent (Aperam, Ascoval, Riva Acier, Celsa, etc.). (Xerfi, 2022 A)	On recense 307 établissements de fonderie en France en 2020, dont 10 % d'acier, soit 32 établissements. Le leader est Saint-Gobain. (Xerfi, 2022 A)
	<ul style="list-style-type: none"> Minerais de fer, combinaisons métalliques et gangues ; Coke : Combustible obtenu par distillation de la houille. (FFA, 2012) 	<p>Acier liquide, allié ou non allié. Les nuances d'acier peuvent être divisées en trois classes :</p> <ul style="list-style-type: none"> Les aciers non alliés (ou faiblement alliés, ou aciers carbone) - 77,5% de la production européenne en 2021; Les aciers inoxydables - 4,6% de la production européenne en 2021. Le Tableau 25 présente les principaux types d'acier inox ; Les autres aciers alliés – 17,9% de la production européenne en 2021 (EUROFER, 2022). <p>En particulier, les deux principales catégories d'acier inoxydable sont les aciers austénitiques (teneur élevée en Chrome et en Nickel) et les aciers ferritiques (teneur élevée en Chrome uniquement). (JRC, 2010 A)</p>		
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Production d'acier brut en France en sidérurgie (World Steel, 2020, Données 2019) : 14 400 kt. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Exports d'acier (World Steel, 2020, Données 2019) : 13 600 kt. 			

2. Production de produits sidérurgiques et de fonderie

	2.A. Production de produits en fonderie	2.B. Production de produits sidérurgiques
	<p>La fonderie est une technique de fabrication de produits en métal fondu et coulé dans des moules. La forme du moule dépend de la fonction de la forme.</p> <p>La fonderie utilise deux outils principaux :</p> <p><u>A/ Le cubilot</u>, un outil dans lequel le métal à fondre (principalement des ferrailles), est en contact direct avec le combustible. Ce contact à haute température entraîne une carburation importante et réserve pour cela le cubilot à la production de fonte.</p> <p>Il existe deux types de cubilot : à vent froid (l'air injecté est à température ambiante) et à vent chaud (l'air injecté est chauffé par les fumées).</p> <p><u>B/ Le four à induction</u>, un outil qui fond les métaux grâce à un champ magnétique. Ce type de fours n'a pas besoin de coke et est beaucoup moins émetteur de CO₂. (Entretien d'experts)</p>	<p>1. <u>Coulée continue</u> (<i>une alternative est la coulée en lingots, moins répandue</i>)</p> <p>L'acier liquide est coulé dans une lingotière, puis le métal commence à former une peau solide dans la lingotière refroidie à l'eau. Tiré vers le bas par un jeu de rouleaux, le produit achève de se solidifier. A la base de l'installation, on extrait une barre solide, qui est découpée en tronçons aux longueurs et largeurs désirées : en général, brames (section rectangulaire), billettes (section carrée < 120 mm) ou blooms (section carrée > 120 mm).</p> <p>Les matières sont réchauffées dans des fours avant de passer à l'étape suivante.</p> <p>2. <u>Laminage à chaud / Extrusion</u></p> <p>Exemple pour le laminage : Ecrasement du métal chaud entre deux cylindres. En répétant plusieurs fois l'opération on obtient un produit de plus en plus mince (ou de section de plus en plus faible) et de plus en plus long, à la forme souhaitée. (FFA, 2012)</p>
	<p>On recense 307 établissements de fonderie en 2020, dont 10 % d'acier, soit 32 établissements.</p> <p>Le leader est Saint-Gobain. (Xerfi, 2022 B)</p>	<p>En 2021, les produits sidérurgiques sont majoritairement produits par la filière intégrée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 66,8 % de la production pour la filière intégrée ; • 33,2 % de la production pour la filière électrique. <p>(World Steel 2022, Données 2021)</p>
	<p>La fonderie de métaux est une activité de sous-traitance industrielle. Le sous-traitant fabrique à la demande, selon les instructions du donneur d'ordres, des pièces ou des produits, qui, le plus souvent, sans avoir subi d'autre transformation, s'intègrent dans le produit fini du donneur d'ordres. (Xerfi, 2022 B)</p>	<p><u>Première étape : Coulée continue</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Brames, billettes et blooms. <p><u>Deuxième étape : Laminage à chaud / Extrusion</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Produits plats (maj. Filière intégrée) : plaques, feuilles, tôles en bobine, feuillard, etc. ; • Produits longs (maj. Filière électrique) : rails, poutrelles, ronds à béton, etc. ; • Aciers spéciaux : degré de pureté plus élevé. Ces aciers représentent une minorité des aciers produits en France. <p>(Xerfi, 2022 A et Comité Stratégique de la Filière Mines et métallurgie, 2021 A)</p>
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production de produits semi-finis – Output de la coulée continue en France (World Steel 2020, Données 2019) : 14 000 kt. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Imports d'acier (World Steel 2020, Données 2019) : 14 500 kt. 	

3. Fabrication de biens contenant de l'acier		4. Consommation de produits finis	5. Fin de vie des produits finis
	2.A. Production de produits en fonderie	2.B. Production de produits sidérurgiques	
	Il s'agit de l'incorporation de produits semi-finis et finis en acier, ainsi que d'autres matériaux pour la fabrication d'un produit (ex. une voiture). Voici la consommation d'acier en France et ses usages : 1. <u>Construction</u> : 43 %. Il s'agit principalement de produits liés à l'usage du béton (fers à béton, treillis soudés), de poutrelles, et d'acier dédié aux enveloppes métalliques ; 2. <u>Transport</u> : 26 %. Il s'agit principalement des industries automobile (carrosserie, moteurs, boîtes de vitesse, châssis, etc.) et ferroviaire (rails, roues, wagons, moteurs, etc.). 3. <u>Mécanique</u> : 16 % ;		N/A
	4. <u>Travail des métaux</u> (réservoirs, générateurs de vapeur, réacteurs nucléaires, canalisations, outils, serrures, etc.): 10 % ; 5. <u>Equipements ménagers</u> : 3 % ; 6. <u>Autres</u> : 2 %.(Sénat, 2019)		Secteurs dont les produits « stockent » de l'acier : construction ; transport ; mécanique ; travail des métaux ; équipements ménagers ; autres. (Sénat, 2019)
	Répartition des facturations de la fonderie d'acier : • Machines, appareils et engins mécaniques : 57,2 % ; • Véhicules routiers : 3,4 % ; • Autres : 17,5 % ; • Données manquantes : 21,9 %. (Xerfi, 2022 B)	Marchés incorporant des produits sidérurgiques : • Associés aux produits plats: voitures, construction navale, électroménager, énergie (plateformes off-shore, tubes pour oléoducs, etc.), emballages, autres biens de consommation ; • Associés aux produits longs : construction (charpente mécanique, fondations, etc.) et industrie mécanique (Xerfi, 2022 A).	Durées de vie pour les principaux marchés consommateurs d'acier : • <u>Construction</u> : 75 ans ; • <u>Transport</u> : 20 ans ; • <u>Mécanique</u> : 30 ans ; • <u>Travail des métaux</u> : 15 ans ; • <u>Equipements ménagers</u> : 15 ans. (Centre Commun de Recherche 2018. Données 2015).
	<u>Données de production</u> : • Apparent Steel Use (World Steel 2022, Données 2019) : 14 600 kt. <u>Données d'imports-exports</u> : • Exports de biens contenant de l'acier (World Steel 2020, Données 2019) : 8 700 kt		<u>Données de consommation</u> : • True Steel Use (World Steel 2022, Données 2019) : 19 700 kt ; • Gisement de ferrailles : Donnée non disponible. <u>Données d'imports-exports</u> : • Exports de biens contenant de l'acier (World Steel 2022, Données 2019) : 13 800 kt.

6. Collecte en vue du recyclage

	6.A. Collecte de déchets pré-consommation (après 3.)	6.B. Collecte de déchets post-consommation (après 5.)
	<p>Les déchets de fabrication (chutes neuves de production qui ne sont réintégrées au même processus de production), sont collectés en tant que déchets d'activités économiques (DAE).</p> <p>Ils peuvent également être récupérés directement par les fabricants de produits semi-finis (ORDIF, 2017).</p>	<p>Modalités de collecte associées aux différents déchets post-consommation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emballages industriels métalliques (fûts) : collecteurs de DAE ; • Métaux de construction et de démolition : collecteurs de DAE ; • VHU et métaux issus de VHU : centres VHU ; • DEEE : collecteurs de DAE et collecteurs de DMA ; • Métaux collectés séparément : collecteurs de DMA (avec potentiellement une étape intermédiaire en déchèterie) ; • Emballages métalliques non dangereux : collecteurs de DMA (ORDIF, 2017).
	<p>1. Derichebourg Environnement. Ce groupe multi-services est présent sur l'ensemble de la chaîne de valeur du recyclage des métaux ferreux et non ferreux, notamment la collecte, à partir de chutes de production, de VHU ou encore de DEEE ;</p> <p>2. Les généralistes des déchets (ex. Paprec) et les groupes de services environnementaux (ex Veolia et Suez) comptent pour leur part parmi les acteurs de second rang du secteur ;</p> <p>3. Une multitude de PME aux profils variés. Ces acteurs peuvent être des filiales de groupes internationaux disposant d'un savoir-faire spécifique ou des acteurs indépendants disposant d'un maillage territorial important au niveau régional (Xerfi, 2022 C).</p>	
	<p>Répartition des tonnages collectés selon la provenance :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Achat au détail (particuliers, artisans et livre de police¹⁶⁵) : 21 % ; • Usines (chutes neuves et tournures) : 19 % ; • Ferrailles issues de VHU : 17 % ; • Démolition industrielle : 8 % ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Collecte provenant des déchèteries : 5 % ; • Ferrailles issues de bennes DND en mélange : 5 % ; • Autres : 25 %. <p>(FEDEREC, 2022, Données 2021).</p>
	<p><u>Données de collecte :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Collecte de déchets de métaux ferreux (FEDEREC 2020, Chiffres 2019) : 12 307 kt. 	

¹⁶⁵ Le livre de police est une obligation qui s'impose aux personnes dont l'activité professionnelle comporte la vente d'objets mobiliers usagés ou acquis à des personnes autres que celles qui les fabriquent ou en font le commerce (article 321-7 du Code pénal).

7. Tri et préparation des ferrailles

	7.A. Depuis la collecte de DAE	7.B. Depuis la collecte de DMA	7.C. Focus sur les DEEE et les VHU	7.D. Focus sur les déchets ultimes
	<ul style="list-style-type: none"> Centres DEEE (voir 7.C.) Installation de tri regroupement transit DAE <ol style="list-style-type: none"> Tri au grappin Presse-cisaille et chalumeau Tri manuel A. Les ferrailles en mélange sont broyées avec les VHU, les DEEE, etc. (7.C.2.) B. Les chutes neuves sont pressées dans une presse à paquets (ORDIF, 2017) 	<p>ITRT DMA</p> <ol style="list-style-type: none"> Tri au grappin 1. Tri manuel, magnétique, optique et par induction et 2. Presse à paquets <p>ITRT DMA-DAE</p> <ol style="list-style-type: none"> Tri au grappin Soit tri manuel (7.A.3.), soit mise en vrac dans le cadre de vieilles ferrailles. (ORDIF, 2017) 	<ol style="list-style-type: none"> Dans un centre DEEE / VHU, dépollution et démantèlement ; Passage au broyeur ; Tri magnétique, manuel et par induction. Obtention de résidus de broyage automobile, de E40 et de broyas fer-cuivre induits (ainsi que de zorba). (ORDIF, 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> UIDND (Unité d'incinération de déchets non dangereux) <ol style="list-style-type: none"> Tri magnétique pour arriver à des mâchefers déferrailés ; Réincorporation des métaux ferreux issus des mâchefers et valorisation des mâchefers déferrailés. ISDND (Installation de stockage des déchets non dangereux) (ORDIF, 2017)
	<p>Une grande partie du gisement est préparé par des acteurs de la collecte et du tri des ferrailles, puis incorporé par les usines sidérurgiques ou les fonderies pour fabriquer de l'acier comme décrit précédemment. Les déchets peuvent également être de nouveau triés sur les sites des usines sidérurgiques et des fonderies (<i>deep cleaning</i>) avant incorporation. Une faible part, celle récupérée auprès des collectivités, et constituée essentiellement par des emballages en acier, est directement vendue par les collectivités aux sidérurgistes équipés de broyeurs, qui les préparent eux-mêmes (Multiples entretiens d'experts).</p>			
	<p>La European Steel Scrap Specification couvre des exigences sur la sécurité, les éléments exclus pour toutes les catégories du point de vue de la propreté, et la tolérance pour les éléments résiduels et autres éléments métalliques. Elle fournit également une description détaillée de ces spécifications par catégorie, qui correspond au type de ferraille. Les grandes catégories sont les vieilles ferrailles (E3 et E1), les chutes neuves bas résiduels, non revêtues (E2, E6 et E8), les broyés (E40), les tournures d'acier (E5H et E5M), les ferrailles à haut résiduels (EHRB et EHRM) et les ferrailles incinérées/broyées (E46). Les ferrailles sont parfois subdivisées en sous-catégories, avec une lettre à la suite du nombre (ex. ferrailles E1C, ferrailles E8C) (EFR, 2007)</p> <p>L'ISRI (Institut of Scrap Recycling Industries) recense également différentes catégories de ferrailles au sein de la Scrap Specifications Circular. Ces catégories (ex. Heavy Metal Steel – HMS) sont très régulièrement utilisées par les acteurs de la chaîne de valeur du recyclage de l'acier (Institute of scrap Recycling Industries, 2009).</p>			
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Matières premières issues du recyclage produites et vendues (Calcul Deloitte d'après FEDEREC 2020, Données 2019) : 10 728 kt. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Exportations de ferrailles (Eurostat, Données 2019) : 6 595 kt. 			

8. Incorporation de ferrailles			
	8.A. Incorporation de ferrailles en sidérurgie – Filière intégrée	8.B. Incorporation de ferrailles en sidérurgie – Filière électrique	8.C. Incorporation de ferrailles en fonderie
	L'acier est élaboré dans un haut-fourneau (réduction) à partir d'aggloméré de minerai de fer et de coke essentiellement, et de 10 à 15 % de ferrailles . (Multiples entretiens)	L'acier est élaboré dans un four à arc électrique, presque uniquement à partir de ferrailles . Les taux de ferrailles incorporées sont compris entre 60 % et 100 %. (Multiples entretiens)	Le secteur de la fonderie de fonte et d'acier utilise beaucoup de ferrailles, à hauteur de 85 % et jusqu'à 100 % (certaines fonderies n'utilisent que des déchets). (Entretien d'experts)
	<i>Voir 2. Production de produits sidérurgiques et de fonderie</i>		
	<p>Le besoin en ferrailles à faibles teneurs en résiduels est prépondérant afin de répondre aux cahiers des charges stricts des clients tels que l'automobile ou l'emballage, nécessitant des aciers à haute valeur ajoutée.</p> <p>Bien que les ferrailles ayant des teneurs en résiduels plus élevées comportent trop d'impuretés résiduelles pour atteindre les aciers attendus sur ces marchés, la forte hausse de la demande en aciers usagés va obliger les sidérurgistes à intégrer davantage ce type de ferrailles.</p> <p>(Multiples entretiens)</p>	<p>La filière électrique incorpore la majeure partie des ferrailles collectées. En effet, les aciéristes voie électrique sont positionnés sur des aciers à destination de secteurs ayant parfois des contraintes plus faibles sur la composition exacte de l'alliage, ce qui leur permet d'incorporer une quantité plus élevée de ferrailles comparé à la filière intégrée.</p> <p>La répartition entre les différents types de ferrailles incorporées varie selon le type d'acier à produire, les ferrailles disponibles et leurs coûts (ex. les chutes neuves sont plus coûteuses).</p> <p>(Multiples entretiens)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lorsque qu'une pièce de fonderie peut incorporer des déchets ayant des teneurs en résiduels plus élevées, les déchets utilisés sont des ferrailles E1C (ferrailles triées grossièrement et avec une présence importante de stériles), des vieilles fontes à faibles teneurs en résiduels, des déchets de sidérurgie à faibles teneurs en résiduels, etc. ; • Lorsque qu'une pièce de fonderie ne peut incorporer que des déchets à faibles teneurs en résiduels (notamment dans le cadre de produits très normalisés), les ferrailles utilisées sont de type E3 (post-consommation, ferrailles de déconstruction de bâtiment à faibles teneurs en résiduels), E8C (pré-consommation emboutissage), etc. <p>(Entretien d'experts)</p>
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Incorporation de ferrailles en sidérurgie (ADEME, 2022 A d'après A3M, Données 2019) : 6 648 kt. La présente étude a estimé les volumes incorporés en 2019 à 5 662 kt. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Importations de ferrailles (Eurostat, Données 2019) : 1 524 kt. 		

Tableau 25 : Principaux types d'aciers inoxydables ferritiques et austénitiques (Entretien d'experts)

Type d'acier inox	Composition	Types d'approvisionnement en ferrailles pour ce type d'acier inox
<p>Aciers austénitiques 304</p> <p>Ces aciers représentent environ 85% du marché des aciers inoxydables en Europe.</p>	<p>Environ 18% chrome et 8% nickel.</p>	<p>Les chutes neuves d'usines représentent environ 50% des approvisionnements en ferrailles inox, suivies par les déchets issus des démolitions industrielles et les « déchets de ramasse », tous deux estimés à 25% des approvisionnements.</p>
<p>Aciers austénitiques 316</p>	<p>Environ 10% de nickel, entre 16% et 18% de chrome et 2% de molybdène.</p>	<p>L'approvisionnement en ferrailles inox pour la production de ces aciers correspond principalement aux déchets issus des démolitions industrielles</p>
<p>Aciers ferritiques F17</p>	<p>Environ 17% de chrome.</p>	<p>n.c.</p>
<p>Aciers ferritiques F13</p>	<p>Environ 13% % de chrome</p>	<p>n.c.</p>



8.2. Cartographie détaillée de la chaîne de valeur de l'aluminium

8.2.1. Tonnages d'aluminium en France à chaque étape de la chaîne de valeur

Tableau 26 : Vision synthétique de la chaîne de valeur de l'aluminium en France en 2019

ETAPE DE LA CHAÎNE DE VALEUR	TONNAGE(S) ASSOCIE(S)	SOURCE(S)	REMARQUES (Deloitte)
1. Production de métal	420 kt (primaire) 473 kt (secondaire)	ADEME, 2022 A d'après Aluminium France.	Au total, 893 kt d'aluminium ont été produits en France en 2019. TRIMET et Aluminium Dunkerque sont les deux producteurs d'aluminium primaire.
2. Fabrication de demi-produits	940 kt	ADEME, 2022 A d'après Aluminium France.	Cette donnée correspond au métal consommé (1 176 kt), auxquels sont soustraits 20 % (chutes de production). Les volumes d'aluminium consommés sont inférieurs à la production française car la France est un importateur net de métal.
3. Fabrication de biens contenant de l'aluminium et 4. Consommation de produits finis	1 443 kt	ADEME, 2022 A d'après Aluminium France.	Cette donnée correspond à la consommation de demi-produits. Elle n'était pas présente dans le BNR et pourrait être retraitée pour prendre en compte les chutes lors de la fabrication de produits finis. La France est importatrice nette de demi-produits.
5. Fin de vie des produits finis	<i>Donnée non disponible.</i>		Le Bilan National du Recyclage n'estime pas le gisement de MPR d'aluminium (ADEME, 2022, A).
6. Collecte apparente	734 kt	ADEME, 2022 A d'après Aluminium France.	FEDEREC recense 495 kt de MPR d'aluminium collectées : toutes les chutes neuves ne transitent pas par les adhérents FEDEREC (existence de contrats de récupération des chutes neuves « en direct »).
7. Tri et préparation des MPR	442 kt	Calcul Deloitte, d'après FEDEREC, 2020. Données 2019.	Ce calcul est détaillé ci-dessous (7. Tri et préparation des MPR d'aluminium).
	Dont exports de MPR : 522 kt	Eurostat, Données 2019 – Code 7602.	
8. Incorporation des MPR	290 kt (Recyclage direct) 183 kt (Filière affinage)	ADEME, 2022 A d'après Aluminium France.	Ces chiffres sont inférieurs aux tonnages de demi-produits puisque la France est un exportateur net de MPR d'aluminium.
	Dont imports de MPR : 254 kt	Eurostat, Données 2019 – Code 7602.	

8.2.2. Vision détaillée des étapes de la chaîne de valeur de l'aluminium en France

Le Tableau 26 ci-dessus présente les volumes d'aluminium produits ou consommés en France à chaque étape de la chaîne de valeur en France en 2019. Il ne présente donc les données d'imports-exports que pour les MPR d'aluminium. Les données présentées ne sont pas issues de sources précisant s'il s'agit de tonnages de métal pur, ou de tonnages d'alliages, sauf dans le cas des données douanières où il s'agit d'alliages d'aluminium.

Le Tableau 27 va plus loin et présente les procédés, les acteurs, les produits et marchés, ainsi que des valeurs quantitatives à chaque étape de la chaîne de valeur de l'aluminium en France. Lorsqu'elles sont disponibles, les données d'imports-exports à d'autres étapes sont indiquées. La lecture se fait par colonne : les étapes sont successives et les lettres (ex. 1.2.A., 1.2.B.) indiquent que, pour une même étape, plusieurs procédés existent.

La légende du Tableau 27 ci-dessous est la suivante :

			
Technologies et procédés	Acteurs	Produits et marchés	Valeurs quantitatives (production, consommation et imports-exports)

1. Production d'aluminium primaire			
	1.1. Exploitation minière	1.2. Production d'alumine métallurgique	1.3. Fabrication d'aluminium primaire et d'alliages
	Extraction de bauxite. (Aluminium France, 2023 A)	1. La bauxite est attaquée à la soude, à haute température et sous forte pression ; 2. La liqueur obtenue, l'aluminate de sodium, est débarrassée de ses impuretés ; 3. Elle est ensuite diluée et refroidie, ce qui provoque la précipitation d'oxyde d'aluminium hydraté ; 4. L'alumine est ensuite récupérée. (Aluminium France, 2023 A)	1. L'alumine est versée dans un bain de cryolite et de divers sels, porté à 960° C, afin d'être dissoute ; 2. La cuve est traversée par un courant électrique de haute intensité. Par ce procédé d'électrolyse, l'aluminium se dépose sur la cathode. L'aluminium liquide se dépose au fond de la cuve. A la sortie de la cuve d'électrolyse, l'aluminium en fusion est envoyé via un siphon dans un four d'attente. Dans ce four d'attente peuvent être ajoutés des métaux d'alliage. (Aluminium France, 2023 A)
	Compagnies minières. Les principaux pays producteurs de bauxite sont l'Australie, la Guinée, la Chine, le Brésil et l'Inde. En particulier, la Guinée correspond à 63 % des approvisionnements de l'UE en bauxite en 2019. (Aluminium France, 2023 A ; Commission Européenne, 2020 D)	La production d'alumine est concentrée autour des zones d'extraction de minerai (Aluminium France, 2023 A)	En France, deux sites produisent de l'aluminium primaire : <ul style="list-style-type: none"> • TRIMET, avec le site de Saint-Jean-de-Maurienne, plus ancienne d'usine d'Europe ; • ALVANCE Aluminium Dunkerque, dernière usine construite en Europe. (Aluminium France, 2023 A)
	L'aluminium constitue 8 % de la masse de l'écorce terrestre, il n'apparaît pas sous forme pure, mais comme minerai composite, la bauxite. (Aluminium France, 2023 A)	Environ 90 % de l'alumine est utilisée pour produire le métal aluminium. Les 10% restants (alumine de spécialité), ont des usages non métallurgiques (verres spéciaux, traitement de l'eau, céramiques, etc.) (Aluminium France, 2023 A)	L'aluminium primaire est peu utilisé à l'état pur. Il est combiné à d'autres métaux et substances pour produire des alliages d'aluminium aux propriétés très différentes. (Material Economics, 2020). Les alliages d'aluminium répondent à la classification de l'International Alloy Designation System (IADS) (code à 4 chiffres), qui désigne huit grandes familles d'alliages, selon l'élément allié majoritaire , comme le précise le Tableau 28. ¹⁶⁶ .
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production d'aluminium primaire (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France, Données 2019) : 420 kt ; • Estimation de production totale d'aluminium (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France, Données 2019) : 894 kt. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Exports d'aluminium (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France, Données 2019) : 262 kt. 		

¹⁶⁶ Les normes européennes pour la composition des alliages d'aluminium sont les suivantes : EN 573-1:2004 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 1: Numerical designation system; EN 573-3:2004 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 2: Chemical symbol based designation system; EN 573-3:2019+A1:2022+A2:2023 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products (second amendment under development); EN 1706 Aluminium and aluminium alloys - Castings - Chemical composition and mechanical properties; EN 573-5:2007 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 5: Codification of standardized wrought products.

2. Fabrication de demi-produits en aluminium

La Figure 32 est une vision synthétique de ce tableau.

	2.1. Transformation du métal	2.2. Transformation en demi-produits ou produits finis en aluminium
	<p>Il existe trois principaux produits, associés aux procédés suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les lingots sont coulés par refroidissement direct vertical ou horizontal (VDC et HDC), principalement à partir d'aluminium secondaire issu de l'affinage, mais également à partir d'aluminium primaire ; • Les billettes sont coulées par VDC ou HDC, principalement à partir d'aluminium secondaire issu du recyclage direct, mais également à partir d'aluminium primaire ; • Les plaques sont coulées par VDC ou HDC, principalement à partir d'aluminium primaire, mais également à partir d'aluminium secondaire issu du recyclage direct. (Aluminium France, 2023 A ; Entretiens d'experts) 	<p>Les demi-produits ou produits finis en aluminium sont fabriqués à partir des produits de première transformation (étape 2.1.). Il existe trois principaux procédés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Laminage des plaques : Processus continu qui consiste à réduire l'épaisseur d'une plaque de métal par passages successifs entre des cylindres, opérations au cours desquelles l'aluminium est à la fois écrasé et étiré (laminage d'ébauche à chaud et laminage de finition à froid.) ; • Filage des billettes : Processus qui consiste à pousser l'aluminium rendu ductile par chauffage à travers une filière. Les sections et formes sont très variées (plein, creux ou semi-creux) ; • Réalisation de pièces de fonderie à partir de lingots : Coulée de l'aluminium ou d'un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition. (Aluminium France, 2023 A)
	<p>Trois types d'acteurs fabriquent ces produits de première transformation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les producteurs d'aluminium primaire (TRIMET et Aluminium Dunkerque) fabriquent des lingots, des billettes et des plaques ; • Les affineurs (AFFIMET, SOREMO, etc.) fabriquent des lingots ; • Les recycleurs directs fabriquent des plaques (ex. Constellium) et des billettes (ex. Hydro). (Entretien d'experts) 	<p>Deux types d'acteurs fabriquent ces produits :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les recycleurs directs sont des fabricants de demi-produits par laminage (ex. Constellium, etc.) ou par filage (ex. Aluminium France Extrusion, Constellium, etc.) ; • Les fonderies (ex. Linamar) (Aluminium France, 2023 B).
	<p>Pour rappel, il exist deux types d'aluminium :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les alliages d'aluminium de corroyage, destinés pour la majorité à être transformés par des techniques e laminage et le filage ; • Les alliages d'aluminium de fonderie (ou « alliages légers »), destinés à être transformés par des techniques de fonderie. <p>Les trois produits de première transformation sont les lingots (alliages de fonderie), les billettes (alliages de corroyage) et les plaques (alliages de corroyage) (Entretien d'experts).</p>	<p>Les trois procédés ci-dessus permettent de fabriquer des produits différents :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le laminage des plaques donne des tôles et des bobines, utilisées par les secteurs automobile, emballage, construction et aéronautique. En France, en 2017, les produits laminés représentaient 59 kt d'aluminium (55 % des produits) ; • Le filage des billettes donne des profilés, utilisées par les secteurs automobile et construction. En France, en 2017, les produits extrudés/filés représentaient 150 kt d'aluminium (14 % des produits) ; • Les fonderies donnent des pièces de fonderie, utilisées principalement par le secteur automobile. En France, en 2017, les pièces de fonderie représentaient 33France'aluminium (31 % des produits) (Entretien d'experts et Cassetta et al., 2019)
	<p><u>Données de production :</u> Estimation de la production de demi-produits (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France, Données 2019) : 940 kt.</p> <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Exports de demi-produits (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France, Données 2019) : 581 kt ; • Imports d'aluminium (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France, Données 2019) : 544 kt. 	

3. Fabrication de biens contenant de l'aluminium

 	<p>Il s'agit de l'incorporation de demi-produits et produits finis en aluminium, ainsi que d'autres matériaux (métaux, plastiques, etc.) pour la fabrication d'un produit (ex. une voiture).</p> <p>Les produits finis contenant de l'aluminium sont très nombreux. Voici ceux qui, proportionnellement, intègrent le plus d'aluminium, par marché – contenu en aluminium :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Transport</u> : Avions (70 % de contenu d'aluminium dans les avions), moteurs à combustion interne hors avions (25 % Al), vélos non motorisés (20 % Al), etc. ; • <u>Bâtiment</u> : Ailettes, pièces de structure et structures en aluminium (90 % Al), équipements de chauffage électrique des locaux (3 % Al), appareils et pièces de chauffage central (2 % Al), lampes et appareils d'éclairage et leurs parties (2 % Al) ; • <u>Machines et équipements industriels</u> : Réservoirs pour le stockage de l'aluminium à usage industriel (80 % Al), Fûts et tambours utilisés pour le transport de l'aluminium (80 % Al), Bouteilles de gaz comprimé en aluminium (80 % Al), Catapultes et engins de lancement d'avions (8 % Al), etc. ; • <u>Biens de consommation durables</u> : Ustensiles domestiques en aluminium (75 % Al), Autres équipements ménagers en métaux communs (6 % Al), etc. ; • <u>Électrotechnique</u> : Fils, câbles, cordages non isolés en aluminium (90 % Al), Fils et câbles isolés (40 % Al), Machines d'énergie électrique (5 % Al), etc. (Centre commun de recherche, 2018)
	<p>Part des débouchés de l'aluminium en France :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <u>Transports</u> : 39 % de la demande en aluminium ; 2. <u>Bâtiments</u> : 18 % de la demande en aluminium ; 3. <u>Emballages</u> : 10 % de la demande en aluminium ; 4. <u>Electricité</u> : 7 % de la demande en aluminium ; 5. <u>Mécanique</u> : 5 % de la demande en aluminium ; 6. <u>Équipements</u> : 4 % de la demande en aluminium ; 7. <u>Métallurgie</u> : 3 % de la demande en aluminium ; 8. <u>Autres</u> : 14 % de la demande en aluminium (Xerfi, 2021)
	<p><u>Données de production</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consommation de demi-produits (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France, Données 2019) : 1 443 kt. <p><u>Données d'imports-exports</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Importations de produits de première transformation (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France, Données 2019) : 793 kt ; • Exports de produits finis : Donnée non disponible.

4. Consommation de produits finis		5. Fin de vie des produits finis	
	N/A		N/A
	Secteurs dont les produits « stockent » de l'aluminium : cf. étape 3 (Xerfi, 2021)		Cf. Etape 6
	Durées de vie par marché consommateur d'aluminium : <ul style="list-style-type: none"> • Transports : 22 ans ; • Bâtiments : 60 ans ; • Emballages : moins d'un an ; • Electricité : 40 ans ; • Mécanique : 40 ans ; • Equipements : 20 ans ; • Métallurgie : n.c.. (Centre Commun de Recherche, 2018. Données 2013)		
	<u>Données de consommation :</u> <ul style="list-style-type: none"> • Gisement de MPR d'aluminium en France : Donnée non disponible. <u>Données d'imports-exports :</u> <ul style="list-style-type: none"> • Imports de produits finis : Donnée non disponible. 		

6. Collecte en vue du recyclage

	6.A. Collecte de déchets pré-consommation (après 3.)	6.B. Collecte de déchets post-consommation (après 5.)
	<p>Les déchets de fabrication (chutes neuves de production qui ne sont réintégrées au même processus de production), sont collectés en tant que déchets d'activités économiques (DAE).</p> <p>Ils peuvent également être récupérés directement par les fabricants de demi-produits. C'est notamment le cas de Constellium, qui récupère des chutes de fabrication de ses clients des secteurs emballages, aéronautique et automobile. (ORDIF, 2017, Multiples entretiens)</p>	<p>Voici les modalités de collecte associées aux différents déchets post-consommation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emballages industriels métalliques : collecteurs de DAE ; • Métaux de construction et de démolition : collecteurs de DAE ; • VHU et métaux issus de VHU : centres VHU ; • DEEE : collecteurs de DAE et collecteurs de DMA ; • Métaux collectés séparément : collecteurs de DMA (avec potentiellement une étape intermédiaire en déchèterie) ; • Emballages métalliques non dangereux : collecteurs de DMA (ORDIF, 2017)
	<p>1. Derichebourg Environnement. Ce groupe multi-services est présent sur l'ensemble de la chaîne de valeur du recyclage des métaux ferreux et non ferreux, notamment la collecte, à partir de chutes de production, de VHU ou encore de DEEE ;</p> <p>2. Les généralistes des déchets (ex. Paprec) et les groupes de services environnementaux (ex Veolia et Suez) comptent pour leur part parmi les acteurs de second rang du secteur ;</p> <p>3. Une multitude de PME aux profils variés. Ces acteurs peuvent être des filiales de groupes internationaux disposant d'un savoir-faire spécifique ou des acteurs indépendants disposant d'un maillage territorial important au niveau régional (Xerfi, 2022 C).</p>	
	<p>La provenance des métaux non ferreux des adhérents FEDEREC en 2021 était répartie de la manière suivante : Achat au détail (particuliers, artisans, livre de police) : 41 % ; Chutes neuves et tournures : 29 % ; Déchèteries : 9 % ; Démolition industrielle et VHU : 7 % ; Métaux non ferreux issus du broyage : 6 % ; Autres : 8 %.</p> <p>L'aluminium (hors câbles) est le métal non ferreux le plus vendu (26 % des métaux non ferreux vendus) et les câbles en aluminium représentent 1 % des métaux vendus (FEDEREC, 2022, Données 2021).</p>	
	<p><u>Données de collecte :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Collecte apparente de déchets d'aluminium (ADEME, 2022 A d' après Aluminium France et Eurostat, Données 2019) : 734 kt 	

7. Tri et préparation des MPR d'aluminium¹⁶⁷

	7.1. Préparation des différents types de déchets avant le tri	7.2. Broyage	7.3. Tri <i>Cf. Tableau 14</i>	7.4. Traitement thermique et retrait du revêtement
	<p>Préparation par type de déchets :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emballages (tri et mise en balle) ; • DAE et DMA (tri, préparation et conditionnement) ; • Chutes neuves d'aluminium (tri, préparation et conditionnement) ; • VHU (en centres VHU agréés : démantèlement et dépollution) ; • DEEE (massification et regroupement puis démantèlement et dépollution). (ADEME et FEDEREC, 2017) 	<p>Le broyage a pour but de réduire l'éparpillement et d'obtenir une distribution appropriée de la taille de la ferraille, d'augmenter la densité apparente et de libérer les composants qui forment les assemblages.</p> <p>De nombreux équipements existent, notamment des cisailles rotatives, des coupeurs rotatifs, des cisailles à translateur (guillotines, alligator) et des broyeurs rotatifs. (Capuzzi et Timelli, 2018)</p>	<p><u>Méthodes consolidées :</u> Séparateur magnétique ; Séparateur à air ; Courant de Foucault ; Séparation densimétrique ; Tri manuel ; Thermique¹⁶⁸.</p> <p><u>Méthodes innovantes :</u> Composition élémentaire ; Analyse d'image (technologies XRF, LIBS et PGNA – cf. glossaire). (Capuzzi et Timelli, 2018)</p>	<p>Cette étape a pour objectif de retirer le revêtement et de réduire l'humidité des MPR (Decoating).</p> <p>Il existe deux procédés : le procédé chimique : bain de décapage complet ; et le procédé thermique : brûlage des matières carbonées sans oxydation : 1/ Scission pour décomposer le revêtement et 2/ Réaction du contenu résiduel de carbone réagit avec l'oxygène. (Capuzzi et Timelli, 2018)</p>
	Même typologie d'acteurs que la partie 6. Collecte en vue du recyclage.			
	<p>Les MPR d'aluminium sont essentiellement classés en fonction de plusieurs propriétés, notamment la composition chimique des métaux, le niveau d'impureté des éléments, la taille et la forme physique et l'homogénéité, c'est-à-dire la variation à l'intérieur d'une spécification donnée. (Centre commun de recherche, 2010 B)</p> <ul style="list-style-type: none"> • La « norme européenne EN 13920 sur les MPR d'aluminium et d'alliages d'aluminium » couvre tous les types de MPR d'aluminium et fournit la norme pour la classification des déchets : limites en termes de matériaux étrangers, dimension des objets, rendement métallique minimal (teneur en aluminium), etc. Ce standard est très peu utilisé aujourd'hui. (Entretien d'experts) ; • L'ISRI (Institute of scrap Recycling Industries) recense les différentes catégories de MPR d'aluminium au sein de la Scrap Specifications Circular. (Institute of scrap Recycling Industries, 2009) <p>Il existe par ailleurs des cotations pour les lingots de seconde fusion, par exemple AS9U3, ou pour différents types de MPR : alu profilé AGS blanc, alu chutes neuves A5/A7, etc.</p>			
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • MPR d'aluminium produites et vendues en 2021 : 442 kt (Calcul Deloitte d'après FEDEREC, 2020)¹⁶⁹. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Exports de déchets aluminium (Eurostat, Données 2019) : 522 kt. 			

¹⁶⁷ Ces étapes sont une représentation schématique du tri et de la préparation à l'incorporation des MPR d'aluminium. Il convient de préciser que toutes les MPR ne passent pas par toutes ces étapes, notamment par les méthodes innovantes dont la Recherche et Développement est en cours.

¹⁶⁸ Le tri thermique (ou « hot crush ») est la séparation thermomécanique des alliages d'aluminium qui exploite la différence entre la température de fusion. En général, les alliages de fonderie contiennent une plus grande quantité d'éléments d'alliage et ont une température de fusion inférieure à celle des alliages de corroyage. Ainsi, un mélange de déchets d'alliages de corroyage et de fonderie est chauffé, puis écrasé. Les alliages de fonderie sont facilement écrasés, tandis que les alliages de corroyage sont simplement déformés.

¹⁶⁹ Les métaux non ferreux vendus par les adhérents FEDEREC atteignaient 1 700 kt en 2021. L'aluminium hors câbles représente 25 % de ce gisement et l'aluminium des câbles 1 %, soit un total de 442 kt. Ce gisement est sous-évalué car FEDEREC recense également 5 % de moteurs électriques parmi les MNF vendus et que ceux-ci contiennent de l'aluminium. (FEDEREC, 2020)

8. Incorporation de MPR d'aluminium

	8.A. Affinage	8.B. Recyclage direct
	<p>La filière affinage produit des lingots d'aluminium de seconde fusion pour l'industrie automobile à partir de déchets pré- et post-consommation de différentes catégories.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Les mélanges de déchets sont sélectionnés après analyse des alliages qui les composent, en vue de leur chargement dans les fours de fusion ; 2. Dans les fours, des flux salins viennent recouvrir le métal en fusion afin d'en extraire les impuretés tout en protégeant le métal de l'oxydation ; 3. Le métal fondu est transféré dans un four d'attente pour un affinage plus poussé : dégazage, réduction de la teneur en magnésium, adjonction d'éléments d'alliage (mise au titre) ; 4. Le métal en fusion est dirigé vers la machine de coulée et est généralement transformé en lingots (Groupement des Affineurs d'aluminium, 2023) 	<p>Le recyclage direct permet d'obtenir des alliages de composition identique à celle des déchets utilisés.</p> <p>Il s'agit généralement de déchets de fabrication ou post-consommation de composition homogène (par exemple des canettes usagées non mélangées avec d'autres MPR d'aluminium). (Entretien d'experts)</p>
	Les affineurs membres d'Aluminium France sont AFFIMET, Affinerie d'Anjou, Derichebourg Environnement, Loiret Affinage, Sadillek et SOREMO. (Aluminium France, 2023 B)	Les acteurs du recyclage direct membres d'Aluminium France sont Constellium, Eurofoil, Flandria et Hydro. (Aluminium France, 2023 B)
	<p><u>Produits :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Les affineurs produisent des alliages de fonderie sous la forme de lingots. Les affineurs ont besoin d'un rapport catégorie - prix des déchets compétitif permettant de produire des lingots en restant sous le cours du DIN 226 (cours européen du lingot d'affinage) et d'absorber sa volatilité. Le principal marché de l'affinage est le secteur de la fonderie automobile qui parfois s'approvisionne à plus de 50 % en aluminium d'affinage en fonction de sa chaîne de fonderie ; • Les recycleurs directs produisent des alliages de corroyage sous la forme de demi-produits (billettes et plaques). Ils se positionnent sur des déchets pré-consommation et des déchets post-consommation de composition homogène qui demande un système de tri plus performant. (Entretien d'experts) <p><u>Marchés et usages (UE, 2019) :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Les transports représentaient 39 % de la demande d'aluminium, dont environ 64 % d'aluminium de seconde fusion et 36 % d'aluminium de première fusion ; • Le bâtiment représentait 24 % de la demande d'aluminium, dont presque 100% d'aluminium de première fusion ; • Les emballages représentaient 17 % de la demande, dont environ 6 % d'aluminium de seconde fusion et 94 % d'aluminium de première fusion ; • Les nouvelles technologies représentaient 13 % de la demande, dont environ 46 % d'aluminium de seconde fusion ; • Les autres marchés représentaient 7 % de la demande, dont environ 29 % d'aluminium de seconde fusion (Material Economics, 2020). <p>La majorité des MPR d'aluminium issues de déchets post-consommation sont réincorporées via l'affinage (<i>casting sink</i>, représenté schématiquement en Figure 41).</p>	
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production d'aluminium de seconde fusion par affinage (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France et Eurostat, Données 2019) : 183 kt ; • Production d'aluminium de seconde fusion par recyclage direct (ADEME, 2022 A d'après Aluminium France et Eurostat, Données 2019) : 290 kt. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Imports de déchets aluminium (Eurostat, Données 2019) : 254 kt. 	

Tableau 28 : Typologie IADS des alliages d'aluminium (Aluminium Association, 2018).

Code AIDS	1xxx	2xxx	3xxx	4xxx	5xxx	6xxx	7xxx	8xxx	9xxx
élément allié majoritaire	Al > 90 %	Cuivre	Manganèse	Silicium	Magnésium	Magnésium et Silicium	Zinc	Autres éléments	Non utilisé



8.3. Cartographie détaillée de la chaîne de valeur du cuivre

8.3.1. Tonnages de cuivre en France à chaque étape de la chaîne de valeur

Tableau 29 : Vision synthétique de la chaîne de valeur du cuivre en France (données de plusieurs années)

ETAPE DE LA CHAÎNE DE VALEUR	TONNAGE(S) ASSOCIE(S)	SOURCE(S)	REMARQUES (Deloitte)
1. Production de métal	N/A	N/A.	Cette section est non applicable puisque la France ne dispose pas d'infrastructures d'affinage (smelting et refining) du cuivre du cuivre issu de MPV en 2019.
2. Fabrication de produits semi-finis en cuivre	225 kt	ADEME, 2022 A, d'après International Copper Study Group, Données 2019.	Puisque la France ne produit pas de cuivre affiné, elle est importatrice nette de cuivre affiné afin de fabriquer des produits semi-finis.
3. Fabrication de biens contenant du cuivre et 4. Consommation de produits finis	530 kt	RTE, 2022, d'après Exiobase, Eurostat et BNR, Données 2015.	Cette donnée correspond à une <i>Apparent Copper Use</i> , c'est-à-dire à la somme des volumes de produits semi-finis fabriqués en France et des importations nettes de produits semi-finis en cuivre.
5. Fin de vie des produits finis	Donnée non disponible.		Le Bilan National du Recyclage n'estime pas le gisement de déchets de cuivre issues des produits en fin de vie (ADEME, 2022, A).
6. Collecte en vue du recyclage	280 kt	ADEME, 2022 A, d'après FEDEREC. Données 2019.	Il s'agit de la collecte de déchets . Les tonnages correspondent à la collecte et non aux ventes de déchets de cuivre.
7. Tri et préparation des MPR	306 kt	Calcul Deloitte d'après FEDEREC, 2020. Données 2019	Ce calcul est détaillé ci-dessous (7. Tri et préparation des MPR de cuivre).
	dont exports de MPR : 206 kt	Eurostat, Données 2019. Codes 7404 et 262030.	Contenu cuivre des MPR exportées – 337 kt : 61 % (hypothèse ADEME 2022A), soit 206 kt (contre 83 % pour les imports – 64 kt – soit 53 kt).
8. Incorporation des MPR	111 kt (Recyclage par fusion) 0 kt (Affinage)	ADEME, 2020 C, d'après International Copper Study Group et Eurostat, Données 2017	Il n'existe pas de données d'incorporation de MPR de cuivre en France. 111 kt de cuivre recyclé avaient été estimés en 2017, par recyclage par fusion puisque la filière affinage en France est presque inexistante.
	dont imports de MPR : 53 kt	Eurostat, Données 2019. Codes 7404 et 262030.	Recyclage apparent du cuivre = Collecte de déchets + Imports de déchets – Exports de déchets (ADEME, 2022A).

8.3.2. Vision détaillée des étapes de la chaîne de valeur du cuivre en France

Le Tableau 30 présente les procédés, les acteurs, les produits et marchés, ainsi que des valeurs quantitatives à chaque étape de la chaîne de valeur du cuivre en France. Lorsqu'elles sont disponibles, les données d'imports-exports à d'autres étapes sont indiquées. La lecture se fait par colonne : les étapes sont successives et les lettres (ex. 1.2.A., 1.2.B.) indiquent que, pour une même étape, plusieurs procédés existent. Les données présentées sont issues de sources ne précisant pas si les tonnages sont donnés en poids brut ou en cuivre contenu, sauf dans le cas des données douanières converties pour obtenir un contenu en cuivre.

La légende du Tableau 30 ci-dessous est la suivante :

			
Technologies et procédés	Acteurs	Produits et marchés	Valeurs quantitatives (production, consommation et imports-exports)

1. Production de métal

	1.1. Exploitation minière	1.2. Traitements métallurgiques	1.3. Fabrication de cuivre Les deux procédés sont représentés schématiquement en Figure 61.	1.4. Fabrication d'alliages par fusion
	Extraction du minerai de cuivre. (BRGM, 2021)	1. Concassage : étape commune aux minerais sulfurés et oxydés 2. Broyage (pour les minerais sulfurés uniquement); 3. Flottation (pour les minerais sulfurés uniquement). (BRGM, 2021)	A. Le procédé pyrométallurgique s'applique aux deux types de minerais : grillage, fusion (ou « smelting » / « affinage »), passage au convertisseur, affinage au feu, raffinage électrolytique (ou « refining »). B. Le procédé hydrométallurgique (SX-EW) s'applique aux minerais oxydés : lixiviation à l'acide sulfurique puis : <ul style="list-style-type: none"> • Soit mise en solution et purification • Soit extraction par solvant, puis raffinage électrolytique (ou « refining ») (BRGM, 2021). 	Il existe une large variété d'alliages de cuivre, qui varient en fonction de leur structure d'utilisation. Ils sont représentés schématiquement en Figure 53. Au total, plus de 400 alliages de cuivre sont produits par les adhérents de l'European Copper Institute et de l'International Wrought Copper Council. Les principaux alliages sont le laiton et le bronze (Entretien d'experts).
	Principaux pays producteurs de minerais de cuivre : Chili, Pérou, Chine, etc. (Xerfi, 2021)	L'industrie française s'approvisionne en cuivre à partir d'imports de cuivre affiné (en majorité sous forme de cathodes ou de sections de cathodes), en provenance du Chili (qui représente 60 % des imports), de la Pologne et de la Belgique.		
	2 types de minerais : <ul style="list-style-type: none"> • Minerais sulfurés (0,5 %-1 % Cu) ; • Minerais oxydés (<0,5 % Cu). (BRGM, 2021)	Les traitements métallurgiques permettent de passer de minerais <1 % Cuivre à un concentré de cuivre à 30 %. (BRGM, 2021)	Procédé pyrométallurgique : La fusion (« smelting ») permet d'atteindre des mattes à 70 % Cu ; le convertisseur des blisters à 98-99 % Cu ; l'affinage au feu des anodes 98,5-99,5 % Cu et le raffinage électrolytique (« refining ») des cathodes 99,9 % Cu. Procédé hydrométallurgique : Il permet d'obtenir des cathodes 99,9 % Cu. (BRGM, 2021)	Cuivre employé en alliage : laiton (cuivre/zinc), bronze (cuivre/étain), cuproaluminium (cuivre/aluminium), maillechort (cuivre/nickel/zinc), etc. (Xerfi, 2021)
	<u>Données de production :</u> <ul style="list-style-type: none"> • Production par affinage en France : N/A. <u>Données d'imports-exports :</u> <ul style="list-style-type: none"> • Exportations de cuivre affiné depuis la France (ADEME, 2022 A, d'après Eurostat, Données 2019) : 18 kt. 			

2. Fabrication de produits semi-finis en cuivre		3. Fabrication de biens contenant du cuivre	
	<p>Le cuivre est livré aux utilisateurs principalement sous forme de cathode, de fil machine (63 % des produits semi-finis en 2022 selon l'ICSG), de billette, de brame ou de lingot. Par extrusion, tréfilage, laminage, matriçage, fusion, électrolyse ou atomisation, les producteurs forment des fils, des tiges, des tubes, des feuilles, des plaques, des bandes, des pièces moulées, des poudres et d'autres formes. Ces produits en cuivre et en alliages de cuivre sont ensuite expédiés pour la fabrication ou la distribution finale.</p> <p>La fabrication de produits semi-finis peut incorporer des matières premières de recyclage (cf. 8. Incorporation de MPR). (Centre commun de recherche, 2011)</p>		<p>Il s'agit de l'utilisation de produits semi-finis et finis en cuivre, ainsi que d'autres matériaux (métaux, plastiques, etc.) pour la fabrication d'un produit (ex. une voiture).</p> <p>En Europe, les produits de première transformation sont ensuite utilisés dans de nombreux secteurs d'activité, à travers des technologies qui leur sont propres, tels que :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La construction qui représente 35 % du marché (réseau électrique, conduites de gaz, plomberie, etc.) ; • Les matériels électriques et électroniques (25,7 %) ; • Les équipements industriels (14,7 %) ; • Le matériel de transport (14,5 %) ; • Les infrastructures (10,0 %) <p>(ADEME, 2022 d'après European Copper Institute)</p>
	<p>La France possède un grand nombre d'industries de fabrication de produits semi-finis en cuivre (fils et câbles, barres, profilés, tubes, laminés) et de ses alliages. Il s'agit en majorité de producteurs de câbles en cuivre, comme Nexans et Prysmian (respectivement 17 et 9 usines en France) (ADEME, 2022 A, d'après A3M)</p>		
	<p>Au cours de la semi-fabrication, le cuivre, ainsi que les déchets propres, sont transformés en semi-produits qui seront utilisés en aval de la chaîne de valeur : Fils ; Tiges, barres et profilés ; Produits laminés plats ; Tubes ; Bandes. (Alliance Internationale du Cuivre, 2023)</p>		<p>Les principales applications du cuivre en France sont les suivantes (voir étape suivante) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Construction</u> : Communications et câbles, tuyauterie, équipements des bâtiments, transport d'électricité, architecture ; • <u>Équipements ménagers (« Matériels électriques et électroniques »)</u> : Biens de consommation généraux, appareils de refroidissement, appareils électriques et autres applications ; • <u>Produits industriels (« Équipements industriels »)</u> : Équipements électrique et équipements non électriques ; • <u>Transport (« Matériel de transport »)</u> : Automobile électrique, automobile non électrique et autres transports ; • <u>Infrastructures</u> : Distribution d'énergie et réseau de télécommunication (Glöser, Soulier et Tercero Espinoza, 2013)
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de produits semi-finis (ADEME, 2022 A, d'après ICSG, Données 2019) : 225 kt. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Exports de produits semi-finis (ADEME, 2022 A, d'après ICSG, Données 2019) : 181 kt ; • Imports de produits semi-finis (ADEME, 2022 A, d'après ICSG, Données 2019) : 185 kt. 		<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Estimation de la consommation française de cuivre dans le cadre de la fabrication de produits finis (RTE, 2022, Données 2015) : 530 kt. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Imports et exports de produits finis : Donnée non disponible.

4. Consommation de produits finis		5. Fin de vie des produits finis	
	N/A		N/A
	Secteurs dont les produits « stockent » du cuivre : <ul style="list-style-type: none"> • Bâtiment et construction ; • Infrastructures ; • Industrie ; • Transport ; • Biens de consommation et électronique. (Glöser, Soulier et Tercero Espinoza, 2013)		N/A
	Durées de vie du cuivre par marché consommateur : <ul style="list-style-type: none"> • <u>Construction</u> : 30 ans pour les communications (câbles de télécommunication), 40 ans pour la tuyauterie (distribution d'eau, chauffage, gaz), 40 ans pour les équipements des bâtiments (climatisation et tubes), 40 ans pour la distribution d'électricité (dispositifs de câblage), 50 ans pour l'architecture (toits, gouttières, etc.) ; • <u>Equipements ménagers (« Matériels électriques et électroniques »)</u> : 8 ans pour les biens de consommation généraux (appareils, instruments, outils), 10 ans pour les appareils de refroidissement (climatisation, réfrigération), 5 ans pour les appareils électriques (électronique industrielle et commerciale, ordinateurs) et 10 ans pour les autres applications (munitions, vêtements, etc.) ; • <u>Produits industriels (« Equipements industriels »)</u> : 15 ans pour les équipements industriels électriques (transformateurs et moteurs industriels, etc.) et 20 ans pour les équipements industriels non électriques (instruments et équipement d'usine) ; • <u>Transport (« Matériel de transport »)</u> : 12 ans pour les équipements automobiles électriques, 15 ans pour les équipements automobiles non électriques et 25 ans pour les autres transports ; • <u>Infrastructures</u> : 30 ans pour le réseau de distribution d'énergie et 30 ans pour le réseau de télécommunication. (Glöser, Soulier et Tercero Espinoza, 2013)		
	<u>Données de consommation</u> : <ul style="list-style-type: none"> • Gisement de déchets de cuivre en France : Donnée non disponible. <u>Données d'imports-exports</u> : <ul style="list-style-type: none"> • Imports de produits finis : Donnée non disponible. 		

6. Collecte en vue du recyclage

	6.A. Collecte de déchets de fabrication (après 3.)	6.B. Collecte de déchets post-consommation (après 5.)
	<p>Les déchets de fabrication (chutes neuves de production qui ne sont réintégrées au même processus de production), sont collectés en tant que Déchets d'activités économiques (DAE).</p> <p>Ils peuvent également être récupérés directement par les fabricants de produits semi-finis (ORDIF, 2017)</p>	<p>Modalités de collecte associées aux différents déchets post-consommation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emballages industriels métalliques (fûts) : collecteurs de DAE ; • Métaux de construction et de démolition : collecteurs de DAE ; • VHU et métaux issus de VHU : centres VHU ; • DEEE : collecteurs de DAE ; • Autres. <p>(ORDIF, 2017)</p>
	<p>1. Derichebourg Environnement. Ce groupe multi-services est présent sur l'ensemble de la chaîne de valeur du recyclage des métaux ferreux et non ferreux, notamment la collecte, à partir de chutes de production, de VHU ou encore de DEEE ;</p> <p>2. Les généralistes des déchets (ex. Paprec) et les groupes de services environnementaux (ex Veolia et Suez) comptent pour leur part parmi les acteurs de second rang du secteur ;</p> <p>3. Une multitude de PME aux profils variés. Ces acteurs peuvent être des filiales de groupes internationaux disposant d'un savoir-faire spécifique ou des acteurs indépendants disposant d'un maillage territorial important au niveau régional. (Xerfi, 2022 C)</p>	
	<p>La provenance des métaux non ferreux en 2021 était répartie de la manière suivante : Achat au détail (particuliers, artisans, livre de police – cf. glossaire) : 41 % ; Chutes neuves et tournures : 29 % ; Déchèteries : 9 % ; Démolition industrielle et VHU : 7 % ; Métaux non ferreux issus du broyage : 6 % ; Autres : 8 %. (FEDEREC, 2022)</p>	
	<p><u>Données de collecte :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Collecte en vue du recyclage et tri des déchets (ADEME, 2022 A, d'après FEDEREC, Données 2019) : 280 kt. 	

7. Tri et préparation des MPR de cuivre

	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'à présent, les techniques couramment utilisées pour trier et séparer les déchets étaient des méthodes directes. Des méthodes telles que le tri par courants magnétiques ou de Foucault, le tri par flottaison et le tri électrostatique utilisent les propriétés des matériaux (par exemple, susceptibilité magnétique, conductivité ou densité) pour créer une force qui éloigne les particules d'un matériau du reste et les sépare ainsi. Les procédures de tri basées sur des capteurs (nouvelles tendances, ex. LIBS), en revanche, sont des méthodes indirectes. La propriété matérielle est détectée par un capteur sans contact, qui envoie un signal à un ordinateur (Loibl et Tercero Espinoza, 2021)
	<p>Même typologie d'acteurs que la partie 6. Collecte en vue du recyclage</p>
	<p>La teneur en cuivre et l'état physique des déchets déterminent d'ordinaire à quel stade du processus de production ces matières seront ajoutées et s'il convient ou non de les prétraiter pour qu'elles puissent être incorporées au processus de production (cf. 6.). Chaque spécification commerciale fixe des limites minimales pour la teneur en cuivre et les pourcentages maximaux des impuretés précises qui peuvent être présentes, de telle sorte que le matériau considéré respecte la spécification et soit propre au recyclage.</p> <p>Les MPR de cuivre doivent correspondre à la norme européenne « EN 12861 : Copper and copper alloys-scrap ». Elle décrit en détail les spécifications de plusieurs déchets de cuivre et d'alliages de cuivre destinés à être utilisés en fusion directe, c'est-à-dire à faibles teneurs en résiduels. Elle s'applique à la fois aux déchets de fabrication et aux déchets post-consommation. Cette norme européenne spécifie les exigences relatives aux caractéristiques, à l'état, à l'humidité, composition, la teneur en métal, le rendement en métal et les procédures de test des Matières Premières de Recyclage pour la fusion directe sous forme de MPR de cuivre et d'alliages de cuivre (Centre commun de recherche, 2011).</p> <p>L'ISRI recense les différentes catégories de MPR de cuivre au sein de la Scrap Specifications Circular (Institute of scrap Recycling Industries, 2009). De nombreux membres de l'ECI et opérateurs de l'UE se réfèrent souvent aux normes ISRI et cette norme semble être largement acceptée au même titre que les normes EN et ISO (Entretien d'experts).</p>
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> MPR de cuivre produites et vendues en 2019 : 306 kt (Calcul Deloitte d'après FEDEREC, 2020. Données 2019)¹⁷⁰. <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Exports de MPR de cuivre (Eurostat, Données 2019) : 337 kt (dont 206 kt de cuivre –Teneur cuivre : 61%).

¹⁷⁰ Les métaux non ferreux vendus par les adhérents FEDEREC atteignaient 1 700 kt en 2021. Le cuivre hors câbles et moteur représente 9 % des MNF vendus, le laiton et alliages 3 %, le bronze et alliages 1 % et les câbles cuivre 5 %, soit un total de 306 kt. Ce gisement est sous-évalué car FEDEREC recense également 5 % de moteurs électriques parmi les MNF vendus et que ceux-ci contiennent du cuivre. A noter : le contenu en cuivre des tonnages FEDEREC n'est pas connu. (FEDEREC, 2020)

8. Incorporation de MPR de cuivre

	8.A. Recyclage par fusion (Etape de refonte possible, voir 1.4.)	8.B. Recyclage par affinage (Etape de refonte possible, voir 1.4.)
	<p>Production de lingots de cuivre et de produits de première transformation à partir de déchets via un procédé de fusion.</p> <p>Une part importante du recyclage du cuivre en France provient de l'incorporation de MPR de cuivre dans la fabrication d'alliages (laiton) dans des fours de refusion. En effet, la fabrication de laiton accepte une proportion plus importante de MPR de cuivre que celle de produits en cuivre (ADEME, 2022 A)</p>	<p>Production de cathodes et produits de première transformation en cuivre (ex. lingots) de cuivre à partir de concentrés cuivreux (issus des mines) et de déchets. Les procédés visent à récupérer en sortie du cuivre pur à au moins 99,9 % (ADEME, 2022 A)</p>
	<p>La majorité du recyclage par fusion du cuivre en France est réalisée par les mêmes acteurs que la fabrication de produits semi-finis.</p> <p>Par exemple, les producteurs de câbles ont développé des techniques permettant l'utilisation de la matière recyclée dans les conducteurs électriques. Ces fonderies sont équipées d'unités de traitement du cuivre recyclé qui le purifient en enlevant les traces de polymères et de métaux lourds. Cette tendance reste minoritaire puisque les producteurs de câbles incorporent peu de MPR aujourd'hui. (ADEME, 2022 A et Entretien d'experts)</p>	<p>Le recyclage par affinage des déchets de cuivre est effectué à l'étranger, notamment en Allemagne, en Belgique et en Asie. Peu d'entreprises se partagent le marché européen, notamment Umicore (Belgique), Atlantic Copper (Espagne) et Aurubis (Allemagne). Les métaux recyclés sont composés de Matières Premières de Recyclage et de minerai brut (pour Umicore, 64 % de MPR et 36 % de minerai).(La Tribune, 2021)</p> <p>La filière affinage est peu développée en France - WeeeCycling et Sanou Koura sont les deux acteurs, uniquement pour les DEEE. (Entretien d'experts)</p>
	<p>Les déchets traités par la filière de Recyclage par fusion sont les MPR MPR à très faibles teneurs en résiduels, qui ont une teneur en cuivre supérieure à 99 % (62 % des MPR de cuivre mondiaux) et une partie des matières à faibles teneurs en résiduels, c'est-à-dire contenant entre 85 % et 98 % de cuivre (31 % des MPR de cuivre mondiaux) (Entretien d'experts)</p>	<p>Les déchets traités par la filière de recyclage par affinage sont l'autre partie des MPR à faibles teneurs en résiduels et les déchets ayant des teneurs en résiduels plus élevées. Ces déchets sont notamment : résidus industriels ; cuivre des cartes à circuit imprimé ; moteurs broyés -shelmo¹⁷¹- ; métaux non-ferreux avec des teneurs élevées en bronze et laiton -zebra¹⁷¹- ; fils de cuivre isolé récupérés -zeyda¹⁷¹- ; autres - 7 % des MPR de cuivre mondiaux) (Entretien d'experts)</p>
	<p><u>Données de production :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Recyclage par fusion (ADEME, 2020 C, d'après A3M et Eurostat, Données 2019) : 111 kt ; Recyclage par affinage : N/A <p><u>Données d'imports-exports :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Imports de MPR de cuivre (Eurostat, Données 2019) : 64 kt (dont 53 kt de cuivre – les experts estiment que le taux de cuivre des MPR importées est de 83 %). 	

¹⁷¹ Selon les catégories de la Scrap Specifications Circular (Institute of scrap Recycling Industries, 2009)

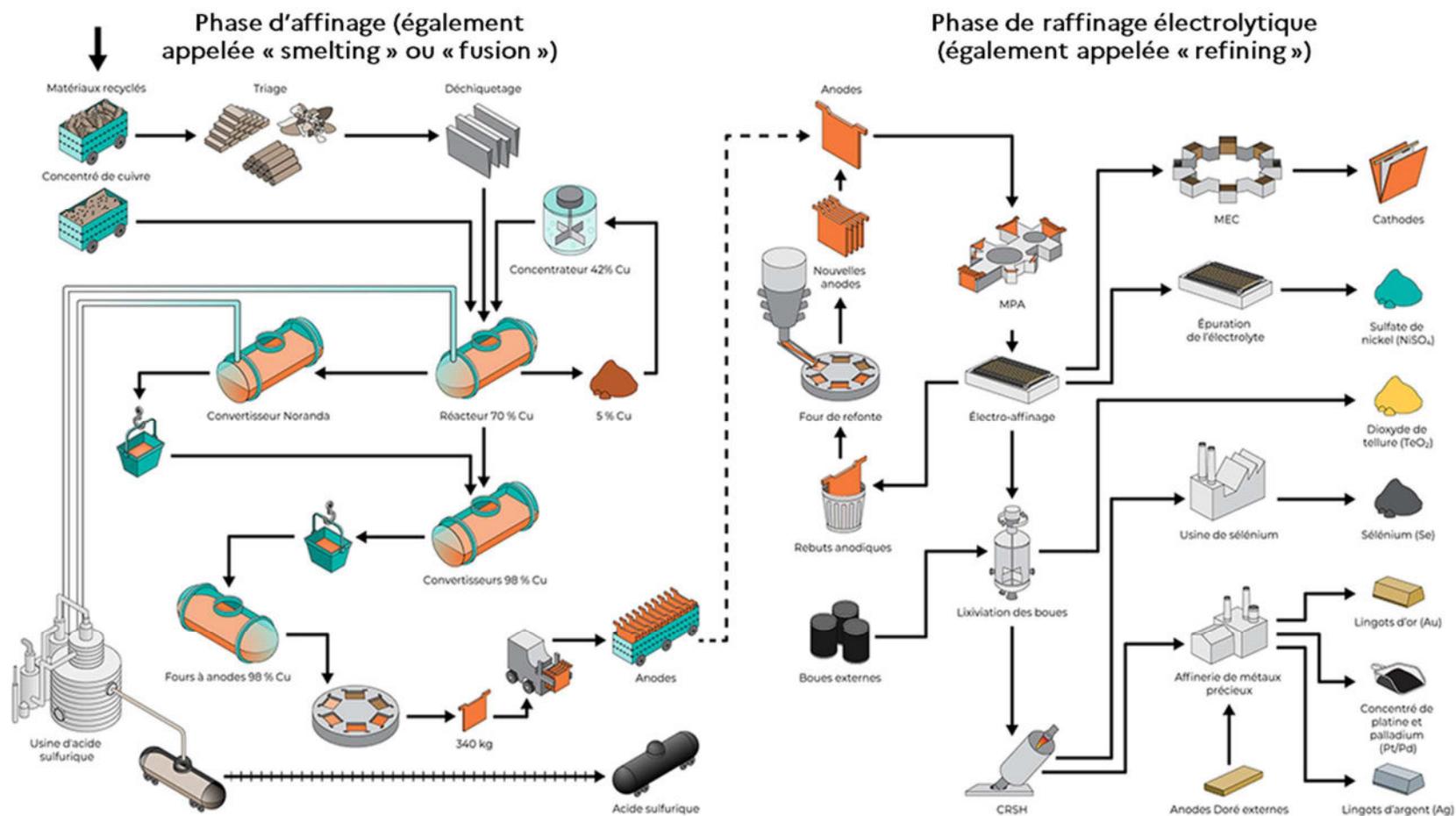


Figure 61 : Représentation schématique de l'affinage du cuivre (GLENCORE Canada, 2023)

8.4. Notes méthodologiques des analyses approfondies de gisements potentiels

8.4.1. Gisement de métaux dans les VHU

8.4.1.1. Gisement d'aluminium et d'acier (métaux ferreux) dans les VHU

Les étapes ci-dessous correspondent au gisement d'aluminium des VHU en France (moyenne pour la période 2017-2020). Des calculs similaires ont été effectués pour l'acier (métaux ferreux).

1. Calcul du gisement de VHU

Le gisement de VHU a été calculé à partir des données du Rapport annuel de l'Observatoire des véhicules hors d'usage pour la période 2017-2020. **Gisement de VHU** = parc circulant au 1er janvier année N (données CCFA) + mises sur le marché en année N (données Observatoire VHU) + imports de véhicules d'occasion en année N (données des douanes) - exports de véhicules d'occasion en année N (données des douanes) - parc circulant au 1er janvier année N+1 (données CCFA) (Calcul Deloitte d'après données ADEME 2017-2020).

2. Calcul du gisement d'aluminium dans les VHU

Le poids moyen en aluminium d'un VHU a été calculé comme le produit du poids moyen des VHU pour la période 2017-2020 (calcul ci-dessus) et de la part d'aluminium dans les VHU (Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).

Le gisement d'aluminium des VHU a été calculé comme le produit du poids moyen d'aluminium et du gisement total.

3. Calcul des principales destinations de l'aluminium (exports, recyclage, etc.)

Les tonnages d'aluminium exportés dans le cadre d'achats de véhicules d'occasion correspondent à la différence entre les exports et les imports de véhicules d'occasion pour la période 2017-2020, multipliée par le poids moyen en aluminium d'un VHU (Calcul Deloitte d'après données ADEME 2017-2020) ; Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).

Les tonnages d'aluminium exportés dans le cadre des envois de carcasses vers des broyeurs autorisés à l'étranger ont été calculés de la manière suivante : Part des carcasses déclarées à la filière agréée envoyées de manière égale aux broyeurs étrangers (Tonnages de carcasses déclarées envoyées aux broyeurs étrangers) x Poids moyen des VHU / Nombre de VHU pris en charge x Tonnages de VHU traités par la filière agréée x Part d'aluminium dans les VHU (Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020 ; Calcul Deloitte d'après données ADEME 2017-2020).

Les tonnages d'aluminium dans les véhicules pris en charge par la filière agréée correspondent au produit du poids moyen en aluminium d'un VHU (Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020) et du nombre de VHU ont été déclarés pris en charge pour la période 2017-2020 par les centres VHU agréés (Calcul Deloitte, d'après données ADEME 2017-2020).

Enfin, **les tonnages d'aluminium récupérés dans le cadre de la filière illégale** correspondent à un delta, c'est-à-dire à la différence entre le gisement d'aluminium dans les VHU et les trois éléments ci-dessus. Les résultats obtenus correspondent à l'estimation de la part du gisement de VHU traités par la filière illégale, estimée à 30 % (Calcul Deloitte, d'après données ADEME 2017-2020 ; Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020).



8.4.1.2. Gisement de cuivre dans les VHU

1. Calcul du gisement de VHU

Comme pour l'aluminium et les métaux ferreux, le gisement de VHU a été calculé à partir des données du Rapport annuel de l'Observatoire des véhicules hors d'usage pour la période 2017-2020. **Gisement de VHU** = parc circulant au 1er janvier année N (données CCFA) + mises sur le marché en année N (données Observatoire VHU) + imports de véhicules d'occasion en année N (données des douanes) - exports de véhicules d'occasion en année N (données des douanes) - parc circulant au 1er janvier année N+1 (données CCFA) (Calcul Deloitte d'après données ADEME 2017-2020).

2. Calcul du gisement de cuivre dans les VHU

Il existe deux types de pièces contenant du cuivre dans les VHU :

- **Les faisceaux électriques.** Le cuivre représenté 60% des 1,2% de faisceaux électriques d'un VHU, soit environ 0,72% du poids d'un VHU (Comité Stratégique de Filière Mines et métallurgie, 2020) ou environ 8 kg de cuivre par VHU (Calcul Deloitte, d'après rapports ADEME) ;
- **Les induits.** Leur flux représente en moyenne 0,3 % de la masse entrante des carcasses de VHU et le taux de cuivre dans les induits est d'environ 20 % (informations complémentaires obtenues par les professionnels). En multipliant ce taux par le ratio entre la masse moyenne d'une carcasse sur 2017-2020 (849 kg, Calcul Deloitte d'après données ADEME 2017-2020) et la masse moyenne d'un VHU sur 2017-2020 (1 108 kg, Calcul Deloitte d'après données ADEME 2017-2020), on obtient environ 0,00046 % du poids d'un VHU en cuivre des induits, soit environ 0,51 kg de cuivre par VHU.

Le gisement de cuivre des VHU a été calculé comme le produit du poids moyen de cuivre et du gisement total de VHU, calculés ci-dessus.

3. Calcul des principales destinations du cuivre hors contamination de l'acier

Les tonnages de cuivre exportés dans le cadre d'achats de véhicules d'occasion, exportés dans le cadre des envois de carcasses vers des broyeurs autorisés à l'étranger et pris en charge par la filière agréée ont été calculé de la même manière que pour l'aluminium et les métaux ferreux.

Enfin, les tonnages de cuivre récupérés dans le cadre de la filière illégale correspondent à un delta, c'est-à-dire à la différence entre le gisement de cuivre dans les VHU et les tonnages de cuivre pris en charge par la filière agréée. Les résultats obtenus correspondent à l'estimation de la part du gisement de VHU traités par la filière illégale (environ 30 %).

En particulier, les faisceaux électriques traités par la filière agréée ont été séparés selon :

1. Leur étape de valorisation : 12,2 % des faisceaux sont extraits des VHU par les centres VHU et 87,8 % ont été envoyés aux broyeurs ;
2. Leur destination à l'issue de l'étape de broyage. Selon les professionnels, après broyage des carcasses, ces fils de cuivre se répartissent, mélangés à d'autres matières non métalliques, environ pour moitié dans les résidus de broyage légers (fluff) et pour l'autre moitié dans les résidus de broyage lourds.

8.4.2. Gisement d'aluminium dans les emballages

1. Tonnages d'emballages mis en marché

Les tonnages mis en marché correspondent aux tonnages contributeurs. Il existe une distinction entre les tonnages correspondant à des emballages rigides et ceux correspondant à des emballages souples (Citeo, 2022).

2. Tonnages d’emballages triés

Les tonnages triés proviennent également de la fiche synthèse publiée par Citeo (Citeo, 2022). D’un point de vue méthodologique, ces volumes correspondent aux déchets d’emballages ménagers « soutenus », c’est-à-dire aux tonnes brutes soutenues en sortie de centre de tri ou récupérées après traitement. On distingue plusieurs origines des tonnages soutenus : collecte sélective, mâchefers et Ordures Ménagères Résiduelles (OMR)¹⁷² (Citeo et Adelphe, 2022).

3. Destinations des tonnages d’emballages valorisés

La répartition entre valorisation en France et à l’étranger est également présentée dans la fiche synthèse publiée par Citeo. En France, la voie majoritaire est l’envoi en centre d’affinage (Broyage et purification de l’aluminium rigide) et la voie minoritaire est l’envoi en usine de pyrolyse (pour l’aluminium souple, chauffé à 500°C dans un environnement pauvre en oxygène, pour produire des fragments de matière nettoyé) (Citeo, 2022).

8.4.3. Gisement de cuivre dans les DEEE

1. Contenance moyenne en cuivre des DEEE

La part de cuivre dans les gisements de DEEE a été calculée comme le produit de la masse de la contenance en cuivre dans les DEEE et de la masse totale des DEEE, qui correspondent à des estimations pour 2019 des produits mis sur le marché, les stocks, la composition et les flux de déchets d’équipements électriques et électroniques (Urban Mine Platform, 2018).

2. Destinations du gisement français de DEEE

Les destinations du gisement de DEEE (Traitement par la filière agréée, élimination hors filière, traitement par filière déchets métalliques, exports, delta) proviennent de l’étude Gisement DEEE menée par SOFIES pour l’OCAD3E (OCA3DE, 2021), notamment la synthèse de l’étude, le rapport de la phase 2 (DEEE ménagers) et le rapport de la phase 3 (DEEE professionnels).

Les destinations du gisement sont les suivantes : Traitement filière agréée (éco-organismes et systèmes individuels) ; Elimination hors filière (OMR, encombrants, tout-venant, DAE, collecte sélective) ; Traitement déchets métalliques - Hors contrat ; Traitement déchets métalliques - En contrat, collectables par la filière agréée ; Traitement déchets métalliques - En contrat, non captables par la filière agréée ; Exports ; Delta.

3. Destinations du cuivre contenu dans les DEEE

Les destinations du cuivre contenu dans les DEEE ont été calculées à partir des informations des deux étapes précédentes, comme le produit du taux de cuivre dans les DEEE et du gisement de DEEE vers chaque destination.

Afin de pouvoir visualiser les flux de cuivre dans les DEEE, une hypothèse a été que la teneur en cuivre est la même selon les destinations de DEEE.

¹⁷² La récupération de l’aluminium dans les OMR est une pratique marginale. Elle est réalisée notamment sur certains sites qui produisent des CSR (Combustible Solides de Récupération) et sont en capacité d’extraire les métaux en amont de la production de CSR.

8.5. Projets réglementaires en cours à l'échelle française et à l'échelle européenne

8.5.1. Proposition de règlement sur l'écoconception pour des produits durables (ou « Ecodesign for Sustainable Products Regulation » - ESPR)

Comme annoncé dans le Pacte vert pour l'Europe¹⁷³, la Commission européenne a publié une proposition de règlement sur l'écoconception pour des produits durables le 30 mars 2022. Cette proposition vise à **garantir que les produits sur le marché de l'UE soient plus durables, réparables et recyclables**, et contribuent ainsi à la transition vers une économie circulaire. Elle s'appuie sur la directive sur l'écoconception en vigueur qui s'applique actuellement uniquement aux produits liés à l'énergie et **étend le cadre existant pour couvrir une gamme et un champ d'application plus large**.

Les quatre ambitions du REPD sont :

- **Concevoir des produits plus durables, plus circulaires et plus performants sur le plan énergétique en** fixant des exigences en matière d'écoconception pour des catégories de produits ;
- **Aider les entreprises et les consommateurs à faire des choix plus éclairés** grâce à la mise en place de passeports numériques pour étiqueter et identifier les produits et pour les lier à des données relatives à leur circularité et leur durabilité ;
- **Réduire la destruction de biens de consommation invendus**. Les grandes entreprises qui se débarrassent des produits invendus devront indiquer et justifier la quantité annuelle de produits jetés ;
- **Promouvoir et acquérir des produits plus durables** en fixant des critères obligatoires applicables à la passation de marchés publics pour ces produits (Commission Européenne, 2023 B).

8.5.2. Révision du Règlement relatif aux transferts de déchets (ou « Waste Shipment Regulation » - WSR)

La Commission européenne a présenté une proposition visant à réviser les règles de l'UE relatives aux transferts de déchets le 17 novembre 2021¹⁷⁴ suite aux engagements pris dans le Pacte vert pour l'Europe. L'objectif de ce réexamen est de veiller à ce que la **politique de l'UE en matière de transferts de déchets favorise le recyclage dans l'UE** afin de soutenir la transition vers l'économie circulaire.

Le règlement proposé vise à :

- **Faciliter les transferts de déchets en vue de leur réutilisation et de leur recyclage dans l'UE**, afin de soutenir la transition vers une économie circulaire. La révision permettrait de faciliter les transferts de déchets en vue de leur réutilisation et de leur recyclage dans l'UE, notamment grâce à la soumission et l'échange électroniques des informations et des documents requis pour le transfert des déchets entre les États membres ;
- **Garantir que les déchets exportés de l'UE sont gérés de manière écologiquement rationnelle** dans les pays de destination. Cela passerait notamment par une interdiction d'exportation de déchets non dangereux vers les pays non-membres de l'OCDE, sauf si ces pays indiquent leur volonté de recevoir ces déchets et démontrent qu'ils ont mis en place et appliquent toutes les mesures nécessaires pour garantir que ces déchets seront gérés d'une manière écologiquement rationnelle ;
- **Lutter contre les transferts illégaux de déchets**. En particulier, une instance de contrôle des transferts de déchets serait chargée de faciliter et d'améliorer la coopération et la coordination entre les États membres afin de prévenir et de détecter les transferts illicites.

¹⁷³ Rapport de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions État de l'union de l'énergie 2021 – Contribuer au pacte vert pour l'Europe et à la relance de l'Union (Conformément au règlement (UE) 2018/1999 sur la gouvernance de l'union de l'énergie et de l'action pour le climat). COM/2021/950 final.

¹⁷⁴ Proposition de Règlement du Parlement Européen et du Conseil relatif aux transferts de déchets et modifiant les règlements (UE) n° 1257/2013 et (UE) 2020/1056. COM/2021/709 final.

8.5.3. Législation européenne sur les matières premières critiques (ou « Critical Raw Materials Act »)

Comme annoncé dans le Green Deal européen, la Commission européenne a présenté le 16 mars 2023, la législation sur les matières premières critiques¹⁷⁵ (critical raw materials – dont la bauxite) ou stratégiques (strategic raw materials – dont le cuivre). Celle-ci vise à diversifier et à renforcer la résilience des chaînes d'approvisionnement en matières premières critiques ou stratégiques de l'UE, tout en améliorant la capacité de l'UE à atténuer les risques de rupture d'approvisionnement et **à renforcer la circularité de ces matières**.

Le Critical Raw Materials Act propose plusieurs mesures visant à améliorer le recyclage des métaux en Europe :

- Des critères clairs pour les capacités nationales en matières premières stratégiques à l'horizon 2030 (exemple : Au moins **25 % de la consommation annuelle de l'UE pour le recyclage**) ;
- Des objectifs de circularité pour les matières premières critiques et stratégiques : les États membres devront adopter des mesures nationales pour **améliorer la collecte des déchets de matières premières critiques** et assurer leur recyclage ainsi que proposer des plans nationaux offrant aux entreprises des incitations financières
- Une réduction des formalités administratives et un renforcement des capacités européennes (**délais d'obtention de soutien financiers plus courts**, désignation d'une autorité unique chargée de coordonner le processus d'octroi des permis pour tous les projets de matières premières critiques et stratégiques...
- Une amélioration de la résilience européenne sur le sujet des matières premières critiques et leur recyclage. En particulier : **audit obligatoire des chaînes d'approvisionnement** des grandes entreprises tous les deux ans, augmentation des ressources de l'UE pour la R&D et les initiatives d'amélioration des compétences.

8.5.4. Loi industrie verte

Le projet de loi national industrie verte¹⁷⁶, présenté le mardi 16 mai 2023 par Bruno Le Maire, a pour ambition de **faire de la France le leader de l'industrie verte en Europe** par :

- La création d'industries qui fournissent des biens et des services permettant la décarbonation de l'économie (« industries vertes ») ;
- L'accompagnement de toutes les industries dans le verdissement de leurs opérations.

Les 15 mesures s'articulent autour de quatre objectifs, dont trois qui contribuent à améliorer le recyclage des métaux en France :

- **Faciliter et accélérer l'implantation de sites industriels** en France, par exemple en favorisant le recyclage des déchets industriels ou en divisant par deux les délais d'implantations industrielles ;
- **Financer l'industrie verte** par la mobilisation des fonds publics et privés (crédit d'impôt dédié, mobilisation de l'épargne privée ;
- **Favoriser les entreprises vertueuses dans toutes les interventions de l'État**, par exemple en identifiant des entreprises vertueuses pour la commande publique ou en conditionnant des aides publiques (Ministère de l'Economie, 2023).

¹⁷⁵ Proposition de Règlement du Parlement Européen et du Conseil établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 et (UE) 2019/1020. COM/2023/160 final.

¹⁷⁶ Projet de loi relatif à l'industrie verte (ECOX2310860L). [Texte](#) n° 607 (2022-2023) de MM. Bruno LE MAIRE, ministre de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, Christophe BÉCHU, ministre de la transition écologique et de la cohésion des territoires et Roland LESCURE, ministre délégué chargé de l'industrie, déposé au Sénat le 16 mai 2023.

8.5.5. Mise en place des filières REP Véhicules Hors d'Usage (VHU) et Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment (PMCB)

La France déploie progressivement le dispositif de Responsabilité Élargie du Producteur (REP), qui a pour objectif d'**agir sur l'ensemble du cycle de vie des produits** : l'écoconception, la prévention des déchets, l'allongement de la durée d'usage, la gestion de fin de vie. Ces filières prennent progressivement de l'ampleur à la fois sur la nature des produits concernés, mais également sur le champ couvert par celle-ci (prévention, réemploi, réparation...). En effet, à la douzaine de filières à REP existantes en France (emballages ménagers piles, bateaux, équipements électriques et électroniques), la loi AGEC a prévu de créer, de 2021 à 2025, une dizaine de filières supplémentaires (emballages industriels et commerciaux, véhicules hors d'usage, etc.).

Reposant sur le **principe « pollueur-payeur »**, ces filières impliquent que les acteurs économiques (fabricants, distributeurs, importateurs) sont responsables de l'ensemble du cycle de vie des produits qu'ils mettent sur le marché. Pour s'acquitter de leurs obligations, les producteurs ont le choix de :

- Former des **structures collectives à but non lucratif (éco-organismes)** : celui-ci endosse alors la responsabilité de ses producteurs adhérents, qui lui versent une écocontribution directement liée au type de produit mis sur le marché et au coût de la gestion du déchet en fin de vie.
- Mettre en place leur propre **système individuel** : le producteur choisit d'assurer lui-même ses obligations, en mettant en place un système individuel de collecte et de traitement. Il se doit d'assurer une reprise sans frais de tous ses propres produits devenus déchets sur tout le territoire (ADEME, 2022 C).

8.5.5.1. Mise en place de la filière REP Véhicules Hors d'Usage (VHU)

Jeudi 1er décembre 2022, est paru au Journal officiel le décret de création de la filière de responsabilité élargie du producteur (REP) pour les véhicules hors d'usage (VHU)¹⁷⁷ : les voitures particulières, les camionnettes, les véhicules à moteur à deux ou trois roues et quadricycles à moteur. La mise en place de ce nouveau cadre réglementaire est en cours d'élaboration en lien avec les parties prenantes concernées par la filière de gestion des véhicules hors d'usage.

Les principaux objectifs du déploiement de cette filière REP sont :

- **Lutter contre la filière illégale de traitement des VHU**. Il est estimé que plusieurs milliers (au moins 500 000) véhicules disparaissent chaque année car traités ou exportés irrégulièrement et dans des conditions présentant des risques pour l'environnement ;
- **Améliorer la qualité et les performances de traitement des VHU** tant en termes de dépollution qu'en termes de valorisation des matières, notamment grâce à la réutilisation des pièces issues du démontage des VHU ;
- **Résorber le nombre très important de véhicules abandonnés** sur la voie publique dans les collectivités territoriales d'outre-mer. Ce nombre était estimé à près de 60 000 véhicules en 2015 (Ministère de l'Écologie, 2022).

8.5.5.2. Mise en place de la filière REP Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment (PMCB)

En janvier 2023, une filière REP pour les déchets issus des produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment (PMCB)¹⁷⁸ a été mise en place en vue de :

- **Réduire les dépôts sauvages** en améliorant la collecte par la reprise sans frais des déchets, la densification du maillage des points de collecte, et l'amélioration de la traçabilité ;

¹⁷⁷ Décret n° 2022-1495 du 24 novembre 2022 relatif à la gestion des véhicules hors d'usage et à la responsabilité élargie des producteurs de voitures particulières, de camionnettes, de véhicules à moteur à deux ou trois roues et quadricycles à moteur, JO du 1er décembre 2022, texte n° 25.

¹⁷⁸ Décret n° 2021-1941 du 31 décembre 2021 relatif à la responsabilité élargie des producteurs pour les produits et les matériaux de construction du secteur du bâtiment.

- **Prévenir la saturation des décharges** par le développement du recyclage matière ainsi que du réemploi et de la réutilisation.

Le périmètre des produits et matériaux concernés, ainsi que la possibilité d'agrément des éco-organismes sont distingués en deux catégories : les PMCB à base de minéraux (sauf le plâtre) et les PCMB à base d'autres matériaux tels que le métal, le bois, le verre et les plastiques. Plusieurs éco-organismes ont été agréés pour cette filière : Ecominero pour la première catégorie, Ecomaison et Valdelia pour la seconde catégorie et Valobat pour les deux catégories (Ministère de l'Ecologie, 2023 B).

8.5.6. Révision de la directive relative aux Véhicules hors d'usage

Le 13 juillet 2023, la Commission européenne a publié une proposition de règlement sur les exigences en matière de circularité pour la conception des véhicules et la gestion des véhicules en fin de vie (VHU)¹⁷⁹. Le règlement proposé vise à **améliorer la circularité des véhicules grâce à des règles qui couvrent l'ensemble du cycle de vie des véhicules**, de la conception et de la production jusqu'au traitement en fin de vie. La proposition sera examinée par le Parlement européen et le Conseil européen dans le cadre d'une procédure législative ordinaire.

En particulier, l'option retenue à date vise l'établissement d'un objectif de contenu en plastiques recyclés de 25 % d'ici 2030, dont 25 % proviennent du traitement en circuit fermé des VHU. Concernant les métaux :

- Pour l'acier, cette option donne le pouvoir à la Commission d'établir un objectif de contenu en acier recyclé dans les véhicules nouvellement approuvés dans les trois ans suivant l'entrée en vigueur du règlement, sur la base d'une étude de faisabilité ;
- Pour d'autres matériaux tels que l'aluminium et les métaux critiques, l'option d'établir des objectifs de contenu recyclé sera évaluée à l'avenir, en fonction des évolutions dans l'écoconception des véhicules et des volumes disponibles issus de la préparation de MPR (Commission européenne, 2023 C).

¹⁷⁹ Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/64/EC. COM/2023/451 final

SIGLES ET ACRONYMES

A3M	Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ASU	Consommation apparente d'acier (<i>Apparent Steel Use</i>)
BNR	Bilan National du Recyclage
BOF	Convertisseur (<i>Basic Oxygen Furnace</i>)
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEA-ISEC	Commissariat à l'énergie atomique et aux Energies Alternatives – Institut des Sciences et technologies pour une Economie circulaire et énergies bas Carbone
DAE	Déchets d'Activités Economiques
DEEE	Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
DGCCRF	Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes
DGE	Direction Générale des Entreprises
DMA	Déchets Ménagers et Assimilés
DREAL	Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DRI	Minerai de fer préréduit (<i>Direct Reduced Iron</i>)
EAF	Four à arc électrique (<i>Electric arc furnace</i>)
EFR	European Ferrous Recovery and Recycling Federation
FEDEREC	Fédération Professionnelle des Entreprises du Recyclage
FFB	Fédération Française du Bâtiment
FIM	Fédération des Industries Mécaniques
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
ICSG	International Copper Study Group
IFPEN	IFP Energies Nouvelles
IRT M2P	Institut de Recherche Technologique Matériaux Métallurgie et Procédés
ISDND	Installation de stockage des déchets non dangereux
ITRT	Installation de tri regroupement transit
IWCC	International Wrought Copper Council
LIBS	Spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser (<i>Laser-Induced Breakdown Spectroscopy</i>)
MACF	Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières
MF/MNF	Métaux ferreux / Métaux non ferreux
MPR	Matières Premières de Recyclage
OMR	Ordures Ménagères Résiduelles
PMCB	Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment
REACH	Regulation for Registration, Evaluation, Autorisation and Restriction of Chemicals
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
RTE	Réseau de Transport d'Electricité
SEDDRe	Syndicat des Entreprises de Déconstruction, Dépollution et Recyclage
TSU	Consommation réelle d'acier (<i>True Steel Use</i>)
UIDND	Unité d'incinération de déchets non dangereux
VHU	Véhicules Hors d'Usage
XRF	Spectrométrie de fluorescence des rayons X (<i>X-Ray Fluorescence</i>)

GLOSSAIRE

Affinage	Procédé consistant à purifier un métal de ses éléments chimiques indésirables. Le terme d'affinage recouvre des procédés très différents d'un métal à un autre, par exemple entre l'affinage d'aluminium et le cuivre.
Almélec	Alliage d'aluminium, de magnésium et de silicium, principalement utilisé pour la réalisation des lignes électriques aériennes.
Chutes internes	Chutes générées lors de la production ou la fabrication d'un produit, directement réincorporées sur site (sans passer par des recycleurs externes) (ADEME, 2022 A).
Collecte apparente de MPR	Collecte apparente en vue du recyclage d'un matériau = Incorporation de MPR dans la production française + Exports de déchets – Imports de déchets (ADEME, 2022 A). Il s'agit d'un flux apparent, c'est-à-dire d'une estimation d'un flux à partir d'un flux amont ou aval en déduisant le commerce extérieur.
Collecte et tri	Regroupe les étapes réalisées par les acteurs de la collecte, du tri et de la préparation des matières premières de recyclage : traitement des déchets et sous-produits, notamment par démantèlement, désassemblage, préparation, dépollution (retrait des substances dangereuses), tri manuel, tri mécanique, tri optique, tri aérouique, compactage, cisailage, attaque acide, broyage, tri post-broyage, séparation densimétrique par flottaison, dans le but d'assurer la préparation de matières premières de recyclage et la commercialisation (ADEME, 2022 A, d'après FEDEREC).
Consommation apparente de MPR	Consommation apparente de MPR d'un matériau = Production nationale de MPR – Exports de MPR + Imports de MPR (ADEME, 2022 A). Il s'agit d'un flux apparent, c'est-à-dire d'une estimation d'un flux à partir d'un flux amont ou aval en déduisant le commerce extérieur.
Déchets	« Toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (source : Article L. 541-1-1 du code de l'environnement). Dans cette étude, et afin de faciliter la lecture, le terme est parfois utilisé pour les déchets métalliques triés et préparés en MPR métalliques (ADEME, 2022 A).
Déchets de fabrication	Déchets générés lors de la production ou la fabrication d'un produit, collectés par des recycleurs externes. Les déchets de fabrication excluent les déchets qui sont recyclés sur le site où ils ont été produits, autrement dit, pour le recyclage interne. (ADEME, 2022 A).
Déchets post-consommation	Matériau généré par les ménages ou les installations commerciales, industrielles et institutionnelles dans leur rôle d'utilisateur final, qui ne peut plus servir à l'usage pour lequel il a été conçu.
Déchets pré-consommation (chutes neuves)	Les chutes neuves couvrent les chutes internes et les déchets de fabrication provenant des usines métallurgiques, des usines de transformation et du secteur de la fonderie. Il n'est pas possible de distinguer ces deux flux, d'où le terme « chutes neuves » (ADEME, 2022 A).
Dumping environnemental	Pratique d'un État pour améliorer la compétitivité des entreprises sur son territoire en réduisant les mesures légales destinées à protéger l'environnement. Le dumping environnemental peut également se référer à l'exportation de déchets des pays développés vers des pays en développement où la législation environnementale est moins stricte ou inexistante.
Ferrailles	Matières premières de recyclage (MPR) d'acier.
Filière REP	Suivant le principe de la responsabilité élargie du producteur (REP), les metteurs sur le marché français de produits (les fabricants nationaux, les importateurs et les distributeurs pour les produits de leurs propres marques) ont l'obligation de contribuer ou de pourvoir à la gestion des déchets issus de leurs produits. (ADEME, 2022 A)

Fonte	La fonte est un alliage fer-carbone avec une teneur en carbone supérieure à 2 %. Elle est obtenue à partir d'un oxyde de fer et de coke. La fonte peut être destinée à l'élaboration de pièces moulées ou être transformée en acier.
Fuite de carbone	Déplacement d'industries émettrices de gaz à effet de serre en dehors de l'UE pour éviter des normes plus strictes.
Gisement	Quantité de produits arrivant en fin de vie chaque année, quel que soit le mode de traitement ultérieur (ADEME, 2022 A). Ces quantités sont difficilement estimables pour les métaux.
Grand export	Pays hors UE 27 vers lesquels sont exportées des MPR métalliques. Ces pays tiers peuvent avoir des considérations éthiques et environnementales moindres (dumping environnemental).
Livre de police	Le livre de police est une obligation qui s'impose aux personnes dont l'activité professionnelle comporte la vente d'objets mobiliers usagés ou acquis à des personnes autres que celles qui les fabriquent ou en font le commerce (article 321-7 du Code pénal).
Matière première de recyclage (MPR)	Matériau répondant à des caractéristiques techniques définies et issu de matériaux ayant déjà servi dans un cycle économique. Le terme de « MPR » est générique et ne préjuge pas de l'étape de la chaîne où a eu lieu le « recyclage » au sens strict. Dans cette étude, ce terme s'oppose à Matière Première Vierge (MPV) ou « matière première primaire », qui correspond à un matériau n'ayant jamais été incorporé dans un cycle économique.
Métaux ferreux	Les métaux ferreux sont des métaux contenant du fer. Ils partagent généralement deux autres propriétés essentielles : le magnétisme et la vulnérabilité à la rouille. Ils sont souvent utilisés dans des applications industrielles (acier inoxydable, fer forgé, fonte, etc.).
Métaux non ferreux	Les métaux non ferreux sont des métaux et alliages qui ne contiennent pas ou très peu de fer. Ils sont moins sujets à la rouille et à la corrosion que les métaux ferreux et sont plus souples et peuvent être façonnés plus facilement. Quelques exemples de métaux non ferreux : aluminium, cuivre, zinc, laiton, etc.
Production / Fabrication	Le terme « Production » fait ici référence à l'étape d'élaboration de matériaux (acier, verre, matières plastiques, pâte à papier, granulats, etc.) entrant dans la composition de produits finis. Le terme « fabrication », fait référence à l'étape de consommation des matériaux produits (ADEME, 2022 A).
Produits semi-finis	Produits parvenus à l'un des stades de leur fabrication, et qui sont destinés à entrer dans une nouvelle phase du processus de production.
Recyclage	« Toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage » (source : Article L. 541-1-1 du code de l'environnement). Le recyclage comprend différentes étapes, depuis la collecte et la préparation des déchets en matières premières de recyclage jusqu'à l'incorporation de ces matières dans la fabrication de nouveaux produits. (ADEME, 2022 A)
Recyclage en boucle fermée	Utilisation de la MPR pour un usage et une destination identiques sans perte fonctionnelle de la matière.
Recyclage en boucle ouverte	Utilisation de la matière de recyclage pour une destination différente, mais en substitution d'une matière première vierge. A noter : Le recyclage en boucle ouverte constitue parfois un « downcycling » (ou « décyclage »), lorsqu'un déchet est transformé en un nouveau matériau ou produit de valeur moins importante que celui dont il est issu.

Stériles	<p>Pour les MPR métalliques, les stériles correspondent aux matériaux sans valeur économique qui ont été mélangés avec les métaux lors du processus de préparation des MPR.</p> <p>A noter : Pour les minerais, les stériles correspondent aux matériaux sans valeur économique qui ont été extraits avec le minerai lors du processus d'extraction.</p>
Sur-tri	<p>Alors que le tri permet d'obtenir des catégories de MPR métalliques conventionnelles (ex. ferrailles E40 pour l'acier), les dispositifs de sur-tri ont pour objectif de réduire la teneur en certains métaux contaminants (ex. cuivre pour l'acier) ou de séparer les alliages des métaux en mélange (ex. zorba pour l'aluminium).</p> <p>Ils peuvent être à la charge des collecteurs et préparateurs de MPR métalliques ou des incorporateurs de MPR métalliques.</p>
Taux d'incorporation	<p>Le taux d'incorporation reflète la part de MPR incorporées dans la production ou fabrication en France.</p> <p>Le mode de calcul du taux d'incorporation varie selon le matériau étudié. Dans tous les cas, il convient de distinguer le taux d'incorporation du taux de recyclage. (ADEME, 2022 A)</p>
Tramp elements	<p>Les contaminants représentent la teneur en métaux « contaminants » contraignent le recyclage des déchets métalliques. Les métaux sont des contaminants entre eux : le fer pour l'aluminium ; le cuivre pour le fer ; etc. Ils ne peuvent pas être retirés facilement via les procédés conventionnels. De plus, les contaminants de chaque métal sont retirés par des procédés spécifiques.</p>
Tri par activation de neutrons gamma rapides (PGNAA)	<p>La technique PGNAA utilise un flux de neutrons thermiques se diffusant dans les déchets, et qui passent à travers un capteur sur un tapis roulant. Certains des neutrons thermiques sont capturés par les noyaux atomiques des éléments d'alliage, produisant un isotope instable. Le processus de capture neutronique s'accompagne de la libération d'un rayon gamma caractéristique de haute énergie.</p> <p>Cette technique fournit une mesure directe des concentrations volumétriques moyennes. Cependant, elle ne peut pas cibler des particules individuelles et est trop lente pour les applications de tri des particules (Capuzzi et Timelli, 2018).</p>
Tri par fluorescence des rayons X (XRF)	<p>Le tri par fluorescence des rayons X (XRF) sépare les métaux légers (aluminium, cuivre, etc.) des métaux lourds (zinc, plomb, etc.). Elle distingue également les différents alliages pour chaque métal.</p> <p>Cette technologie est peu sensible aux distinctions entre les éléments légers, notamment entre l'aluminium et le cuivre.</p>
Tri par spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser (LIBS)	<p>La Spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser (LIBS) vise à déterminer les concentrations d'éléments d'alliage dans un métal. Il s'agit d'une mesure de la composition élémentaire dans laquelle un laser pulsé est dirigé vers la surface d'un échantillon et un plasma est généré (qui incorpore une petite quantité de matériau d'échantillon).</p> <p>Le rayonnement optique du plasma est utilisé pour déterminer les concentrations d'éléments d'alliage du métal.</p>
Usage dispersif	<p>Utilisation des métaux sous des formes qui ne sont pas récupérables.</p> <p>Par exemple, lorsqu'ils sont utilisés sous forme de colorant ou d'additif dans des plastiques, des vêtements ou encore des encres. Par définition, ces particules sont alors irrécupérables.</p>
Valorisation	<p>« Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets » (source : Article L. 541-1-1 du code de l'environnement) (ADEME, 2022 A).</p>
Zorba	<p>Mélange de déchets de métaux non ferreux broyés principalement constitué d'aluminium, mais pouvant contenir d'autres métaux (cuivre, plomb, laiton, zinc, etc.). Ils sont notamment issus des DEEE et des VHU.</p>

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



Etude du potentiel d'amélioration du recyclage des métaux en France

Cette étude analyse le recyclage de trois métaux de base (acier, aluminium, cuivre) en France, aujourd'hui et à l'horizon 2030.

Elle présente tout d'abord, pour chaque métal, un état des lieux du recyclage en France : chaîne de valeur, volumes de Matières Premières de Recyclage (MPR) disponibles et incorporées, imports-exports de MPR par comparaison avec quatre pays européens, enjeux à 2030, principaux freins au recyclage et analyse des principaux gisements recyclables ayant un fort potentiel d'amélioration.

Elle présente ensuite six recommandations pour améliorer le recyclage des métaux de base en France. Ces leviers sont synthétisés dans un plan d'action à 2030.

