



HAL
open science

Récupération et recyclage de l'aluminium - Stratégie

Mathilde Laurent-Brocq, Lola Lilensten

► **To cite this version:**

Mathilde Laurent-Brocq, Lola Lilensten. Récupération et recyclage de l'aluminium - Stratégie. Techniques de l'Ingénieur, 2023, 10.51257/a-v2-m2345 . hal-04270047

HAL Id: hal-04270047

<https://hal.science/hal-04270047>

Submitted on 7 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Récupération et recyclage de l'aluminium Stratégie

Recovery and recycling of aluminum: strategies

Mathilde Laurent-Brocq, Institut de Chimie et des Matériaux de Paris Est (ICMPE), UPEC-CNRS, 2 rue Henri Dunant, 94320, Thiais, France

Lola Lilensten, Institut de Recherche de Chimie Paris, Chimie ParisTech, CNRS, PSL Research University, Paris, 75005, France

Résumé :

La production d'aluminium recyclé permet des économies d'énergie considérables par rapport à la production d'aluminium primaire. Les conséquences financières et écologiques de ces économies d'énergie ont donc toujours été un moteur pour recycler les alliages d'aluminium. Cet article propose un état des lieux du cycle de vie actuel de l'aluminium, et des solutions mises en œuvre pour sa récupération, son tri et son recyclage. Les limites et faiblesses du cycle actuel de la matière, menant à des dilutions avec de la matière primaire, ou au sous-cyclage, sont mises en évidence et discutées. Des propositions de développements visant à améliorer le rendement global, diminuer la perte de matière lors du recyclage et limiter les besoins en aluminium sont enfin discutées.

Abstract

Due to the considerable energy savings for producing secondary aluminum, compared to primary aluminum, leading to a reduced financial cost, as well as a lower ecological footprint, there has always been a strong driving force for aluminum alloy recycling. This article summarizes the state-of-the-art related to aluminum recovery, sorting and recycling. Limits and weaknesses to the current material flow cycle, leading today to dilution or downcycling, are highlighted and discussed. Finally, the paper explores possible developments of the techniques to enhance the total yield, lower material loss for aluminum recycling and decrease the total need for aluminum.

Mots-clés: Recyclage, aluminium, refusion

Keywords: Recycling, aluminum, remelting

Table des matières

Introduction.....	3
1. Cartographie du cycle de vie de l'aluminium.....	3
1.1. Production de l'aluminium	4
1.2. Les taux de recyclage	6
1.3. Consommation d'énergie et émissions de CO ₂	8
1.3.1. Pour l'aluminium primaire.....	8
1.3.2. Pour l'aluminium secondaire.....	9
1.4. Scénarios pour la production future d'aluminium	10
2. Les différentes étapes du recyclage	11
2.1. Fin de vie et collecte des déchets.....	12
2.2. Préparation et tri des déchets.....	14
2.3. Refusion.....	15
2.3.1. Aspects techniques.....	16
2.3.2. Difficultés d'affinage de l'aluminium.....	17
3. Opportunités pour le futur.....	19
3.1. Améliorer le recyclage.....	19
3.1.1. Généraliser l'utilisation des meilleures pratiques.....	19
3.1.2. Déployer les techniques validées à l'échelle pilote.....	21
3.1.3. Recherche et développement sur les techniques de recyclage.....	22
3.1.4. Adapter la chimie des alliages au recyclage	24
3.2. Diminuer les besoins en aluminium.....	26
3.2.1. Améliorer les performances des matériaux	26
3.2.2. Diminuer les déchets de fabrication.....	27
3.2.3. Appliquer les principes de l'économie circulaire	28
4. Conclusion.....	29
5. Glossaire.....	29
6. Références bibliographiques	31
7. Annuaire.....	35

Introduction

L'aluminium est le deuxième métal le plus utilisé sur Terre derrière le fer, et connaît une demande croissante. Grâce à sa faible densité, sa grande conductivité et sa bonne résistance à la corrosion, on le retrouve dans des domaines variés, pour des fonctions structurelles (transport 27%, dont 18% pour les véhicules légers, construction 24%, emballage 13% et électroménager 7%) ou comme matériau fonctionnel (applications électriques 13% et thermiques 7%). L'aluminium restant (9%) est utilisé sous forme dispersive, dans les peintures par exemple, ou dans les plaques lithographiques [1]. Le secteur automobile est donc la première force motrice pour l'augmentation de la consommation de l'aluminium, en l'utilisant en remplacement des pièces d'acier dans le châssis, pour des aspects d'allègement des structures, ou dans le moteur thermique ou la batterie [2]. L'aluminium joue également un rôle très important dans la transition énergétique (utilisation dans les domaines du photovoltaïque et de l'éolien terrestre principalement) et numérique. Poussée par ces domaines, la demande en aluminium a augmenté de manière croissante dans les dernières décennies, et les différents scénarii prévoient tous une croissance continue de son utilisation [3].

Si les ressources en minerai d'aluminium, la bauxite, ne sont pas critiques, la production de l'aluminium reste extrêmement énergivore, et les impacts environnementaux et économiques sont donc conséquents.

- (1) Environnement : La bauxite est localisée en surface de la croûte terrestre, et son extraction nécessite donc une destruction des terres conséquente. L'étape de transformation de la bauxite en alumine génère la production de boues rouges, toxiques, et dont le retraitement reste aujourd'hui limité. Enfin, la production de l'aluminium émet également beaucoup de CO₂, principalement pendant l'étape d'électrolyse (les émissions dépendent donc principalement du mix énergétique utilisé, ainsi que des techniques d'anodes).
- (2) Consommation d'énergie : La bauxite est transformée en alumine Al₂O₃ par le procédé Bayer, elle-même transformée en aluminium dit « primaire » (issu de la réduction de l'alumine) par le procédé Hall-Héroult, qui consiste en son électrolyse. L'électrolyse est l'étape la plus consommatrice d'énergie, entre 13 et 14 GWh sont nécessaires pour transformer 2 tonnes d'alumine en 1 tonne d'aluminium [4].
- (3) Souveraineté : les grandes réserves mondiales de bauxite sont localisées en Asie, en Océanie et en Amérique centrale et du sud [5]. Leur accès dépend donc de la situation géopolitique.

Le recyclage de l'aluminium est donc une nécessité, afin de limiter l'impact environnemental de son exploitation et de sa production, de réduire les coûts de production et de conserver les gisements (matériaux en fin de vie et recyclables). Il est, de plus, poussé par le concept de mine urbaine, selon lequel la concentration en métaux des objets en fin de vie est supérieure à la concentration en métaux dans les minerais [6].

Grâce à l'excellente recyclabilité de l'aluminium, cette filière est exploitée depuis longtemps. Cet article explore donc les gains liés au recyclage, puis présente les différentes stratégies et technologies déjà en place, avant de se pencher sur les pistes de développement futurs.

1. Cartographie du cycle de vie de l'aluminium

D'un point de vue chimique, le terme « aluminium » désigne le **métal pur**. Il est le plus souvent allié avec d'autres éléments, présents en petite quantité, pour renforcer les propriétés du métal, on parle alors d'alliages d'aluminium. Ici, de même que dans la filière industrielle, on utilisera le terme « aluminium » à la fois pour le métal pur et pour ses alliages. Quand la distinction entre les deux aura une importance, elle sera précisée.

1.1. Production de l'aluminium

1.1.1. Analyse des flux de matière

Les différentes étapes de la production de l'aluminium et les flux de matière mis en jeu à chaque étape peuvent être représentés par un diagramme de Sankey, comme sur la Figure 1, où l'épaisseur des traits correspond à la quantité de matière.

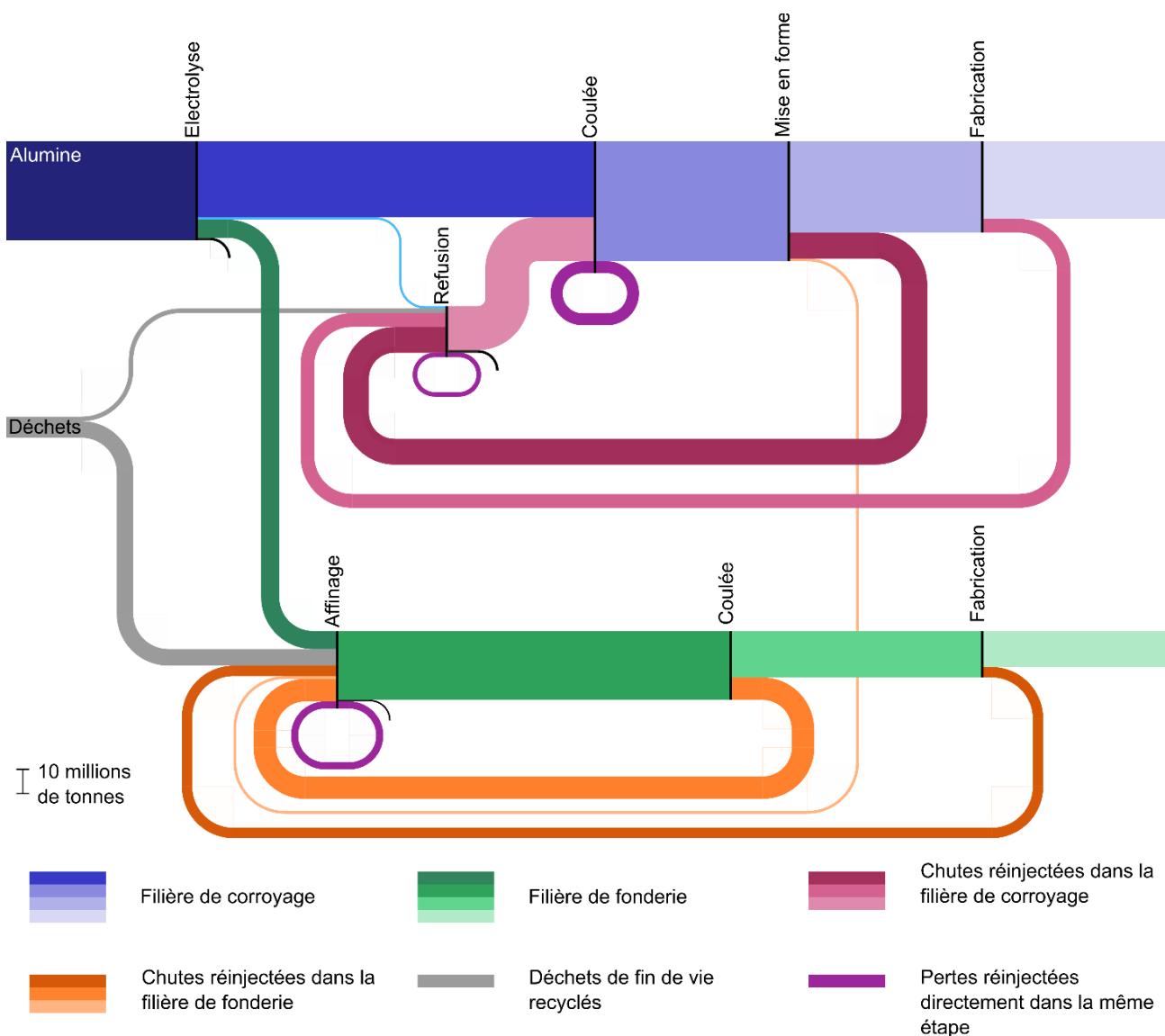


Figure 1: Diagramme de Sankey représentant les flux de matière de l'aluminium au cours de son cycle de vie. L'épaisseur des traits est proportionnelle à la quantité de matière au niveau mondial (données de [7] pour l'année 2007, depuis, les quantités de matière mises en jeu ont augmenté, mais les rapports restent similaires).

L'aluminium est tout d'abord extrait du minerai, il est alors appelé aluminium primaire. Une fois allié avec des éléments également issus de première fusion, un **alliage primaire** est produit. L'alliage est ensuite mis en forme dans deux filières distinctes, que sont la **filière de corroyage** (partie haute en violet dans la Figure 1), et la **filière fonderie** (en bas en vert dans la Figure 1). Au-delà du mode de mise en forme distinct de ces deux filières, elles se distinguent également par leurs gammes de composition, les alliages de fonderie étant plus concentrés en éléments d'alliages que les alliages de corroyage. Plus précisément, les alliages d'aluminium sont classés en seize familles (ie : les séries 1000 à 8000 pour la filière corroyage et les séries

100.0 à 800.0 pour la filière fonderie), comprenant chacune des multitudes de nuances [8,9]. Dans la filière de corroyage, les étapes de mise en forme classiques (extrusion, laminage), suivies de l'usinage et de l'assemblage se succèdent, permettant d'obtenir des produits finaux d'une très grande variété. La fonderie comprend également plusieurs étapes menant jusqu'au produit fini.

Le diagramme met également en évidence les **flux liés au recyclage**, au travers de boucles qui retournent à l'étape de fusion ou de coulée de l'alliage (rouges et grises dans la Figure 1). Les alliages produits par recyclage s'appellent **alliages secondaires**, ils contiennent de la matière recyclée, à laquelle est souvent ajoutée de l'aluminium primaire.

Les matières à recycler proviennent soit de la production, soit de la fin de vie.

- Dans le premier cas, **les déchets de fabrication**, aussi appelés **chutes de production** sont bien identifiées, et facilement réinjectées dans leur filière d'origine (boucles rouge-orangées dans la Figure 1). Au total, 40 % de l'aluminium coulé devient des chutes au cours des étapes de fabrication [7,10]. Si on considère également les chutes lors de la coulée, qui sont souvent recyclées en interne et rarement répertoriées, le taux de chutes monte à 47 %. En 2007, à l'échelle mondiale, ces chutes représentaient 35 millions de tonnes d'aluminium [7].
- Dans le cas des **déchets en fin de vie** (flux gris dans la Figure 1), la situation, détaillée en partie 2.1, est plus complexe, et les alliages sont souvent réinjectés dans la filière fonderie. En effet, cette matière a pu être altérée pour ou durant son utilisation, via l'application de laques et vernis, ou suite à des dégradations liées à l'environnement telles que la corrosion. Les matériaux, à ce stade, ne sont pas toujours facilement identifiables (composition exacte de l'alliage), et peuvent être contenus dans des mélanges de matériaux, qu'il peut être difficile de trier, et qui génèrent une pollution s'ils ne sont pas séparés de l'aluminium. Les taux de récupération et de recyclage pour ces matériaux dépendent beaucoup du contexte réglementaire et des infrastructures mises en place pour la collecte des déchets. Au niveau mondial, les domaines du transport (6,3 millions de tonnes), des emballages (5,3 millions de tonnes) puis de la construction (3,2 millions de tonnes) sont les principales sources de déchets [11].

1.1.2. Stocks de matière

Comme le diagramme de Sankey (Figure 1) le montre également, une partie de l'aluminium n'est pas en production ni en recyclage, mais reste immobilisée dans des **stocks** : cela concerne tous les cas où l'aluminium est encore en utilisation. Les stocks libèreront, à terme, de l'aluminium qui pourra intégrer la filière de recyclage. Environ 75% de l'aluminium produit depuis 1920 est toujours utilisé, ce qui correspond à presque un milliard de tonnes [11,12,13]. Les durées des stocks varient selon les applications : de quelques semaines à un an pour l'emballage, à plusieurs dizaines d'années pour l'automobile ou le bâtiment. Les stocks fluctuent géographiquement, ils atteignaient en moyenne 540kg/personne aux USA en 2013, contre 240kg/personne en France, avec une moyenne mondiale entre 90 et 120 kg/personne [5].

Enfin, une partie de l'aluminium en fin de vie n'est ni dans les stocks, ni dans la boucle de recyclage, et est perdue. Elle peut correspondre à des usages dispersifs de l'aluminium, ou à une absence de collecte et de tri. A l'échelle mondiale, pour l'année 2014, ces pertes étaient estimées à 4.2 ± 3 millions de tonnes, l'Europe comptant pour 1.1 ± 2 millions de tonnes [12].

1.2. Les taux de recyclage

Comme l'aluminium est un matériau relativement coûteux, son recyclage a un intérêt économique et est donc largement mis en œuvre.

Il existe plusieurs indicateurs pour décrire précisément l'efficacité des différentes étapes du cycle de vie circulaire d'un matériau (voir **Encadré 1**). Néanmoins, certains flux sont difficiles à évaluer et, le plus souvent, seuls les taux de recyclage sont donnés, sans qu'il soit systématiquement indiqué par quelle grandeur il est normalisé.

La première étape du cycle de vie circulaire, c'est-à-dire la collecte des déchets, est difficile à quantifier car le gisement de déchets en fin de vie est lui-même complexe à évaluer. En France, le gisement global des déchets d'aluminium en fin de vie n'est pas connu [14]. On sait en revanche que 0,7 millions de tonnes de déchets d'aluminium ont été collectés en France, en 2019 et que cette valeur est en légère augmentation depuis 2010 [14]. Pour les emballages, l'approximation est faite que le gisement de déchets est égal au tonnage mis sur le marché, ce qui est raisonnable étant donné la faible durée de vie de ces produits. Le tonnage pour les emballages d'aluminium a augmenté de 50 % entre 2010 et 2020, contrairement à l'acier qui est stable [15]. Une étude sur la démolition de bâtiments dans six pays européens a relevé des taux de collecte de l'aluminium compris entre 92 et 98 %, bien que l'aluminium représente moins de 1% de la masse totale. Cela s'explique par le fait que l'aluminium est utilisé dans des composants de grande dimension, souvent placés à l'extérieur ou fixés sur d'autres éléments, ce qui facilite le démantèlement [16].

On dispose en revanche de nombreux taux de recyclage. En France, les taux de recyclage pour les déchets de fin de vie sont supérieures à 90 % pour le bâtiment, les transports et l'ingénierie [14]. Le domaine automobile affiche également un taux de recyclage élevé, de 87% en 2019, pour un objectif UE de 85% [17]. Les taux chutent pour le domaine des emballages : toutes matières confondues, un taux de recyclage de 68% seulement a été obtenu en 2020 pour les déchets ménagers, pour un objectif UE de 75% (ce taux concerne les matières collectées puis recyclées). L'aluminium d'emballages, en particulier, n'a un taux de recyclage que de 48%, ce qui est peu par rapport aux papiers et cartons (64%) ou au verre (85%) et par rapport à d'autres pays [15]. Les taux de recyclage sont influencés par les politiques incitatives mises en place par chaque pays.

Le taux d'incorporation est un autre indicateur intéressant et disponible. En 2020, environ 30% du total de la production mondiale d'aluminium provenait du recyclage : aux 64.3 millions de tonnes d'aluminium primaire produites en 2018 s'ajoutent 28 millions de tonnes d'aluminium secondaire [2]. Ceci indique que le recyclage est largement insuffisant pour couvrir les besoins en aluminium et que la production d'aluminium à partir de minerai reste donc très importante.

Pour la France, ce sont 0.9 Mt qui ont été produites en 2018-2019, dont plus de la moitié issue du recyclage (55%) [4]. Ceci est donc en accord avec les objectifs de l'UE de 2025 (50% de recyclage pour l'aluminium), mais doit encore augmenter pour répondre aux objectifs de l'UE de 2030 (60%) [14]. La France est déjà équipée pour le recyclage des alliages d'aluminium : on dénombre 7 usines de recyclage direct et 10 usines d'affinage [14], contre seulement deux sites de production d'aluminium primaire. Ces derniers permettent de produire 0.4 million de tonnes d'aluminium primaire, faisant de la France le 4^{ème} producteur européen. Cette production n'est pas suffisante pour répondre à la croissance, la France importe donc un quart de la demande nationale de métal primaire.

Tout comme le marché de l'aluminium primaire, celui des déchets est international et des volumes importants sont importés et exportés entre les pays. Cette situation s'explique par des raisons économiques (coût de l'énergie, de la main d'œuvre) et techniques (capacité de production, installations adaptées à différentes qualités de déchets). Ainsi, la France exporte pour le moment des déchets d'aluminium, à raison d'environ 500 kt/an, afin de les traiter à l'étranger (principalement des pays européens, mais également l'Inde et la Chine). Elle importe en parallèle certains déchets pour les refondre, cela représentait 263 kt de déchets en 2019 [14] (Figure 2). Il reste donc de la place pour le développement de sites de valorisation des déchets d'aluminium sur le territoire.

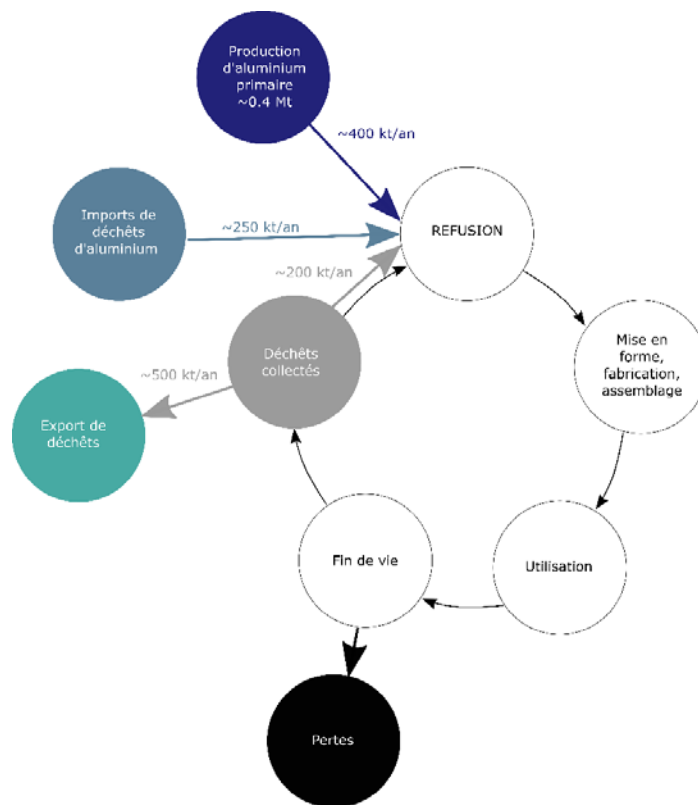


Figure 2: Import et export des flux de déchets d'aluminium en France (données de [14]).

Encadré 1 : les indicateurs du cycle de vie d'un matériau

Le taux de collecte est le ratio entre la quantité de matériau qui est collectée puis qui intègre la chaîne de recyclage, et la quantité en fin de vie. Ce taux augmente quand la collecte est efficace et que peu de produits sont mis en décharge

Le taux de récupération se définit comme la quantité de matière recyclée (disponible à l'emploi pour une nouvelle application, après le procédé de recyclage) sur la quantité de matière collectée. Il permet de tenir compte des pertes, c'est-à-dire des déchets qui ne seront finalement pas recyclés, durant le processus de recyclage

Le taux de recyclage en fin de vie correspond à la quantité de matière recyclée (ou matière secondaire) sur la quantité de métal en fin de vie. Il rend compte de l'efficacité globale du cycle de vie circulaire. On peut de même définir un taux de recyclage pour les déchets de fabrication.

Le taux d'incorporation, également appelée fraction de matière recyclée, est la quantité de matière secondaire par rapport au flux total (primaire + secondaire) dans la production. Elle dépend du taux de recyclage mais aussi de l'évolution du besoin pour le matériau concerné.

1.3. Consommation d'énergie et émissions de CO₂

Les chiffres liés à la consommation d'énergie et aux émissions de CO₂ trouvées dans la littérature présentent des variations. Ceci est lié aux différences de technologies utilisées d'une région du monde à l'autre, au mix énergétique, et aux limites fixées pour le système d'étude. Enfin, selon l'année considérée, les données peuvent également fluctuer légèrement. La partie suivante propose donc une synthèse donnant accès à des ordres de grandeur, mais les valeurs exactes peuvent différer d'une source à l'autre.

1.3.1. Pour l'aluminium primaire

La production de l'aluminium primaire se fait par la transformation de la bauxite, provenant d'une exploitation minière, en alumine, via le procédé Bayer, puis de la transformation suivante de l'alumine Al₂O₃ en aluminium par électrolyse (procédé Hall-Héroult) (Figure 4). L'énergie intrinsèque nécessaire à la production d'aluminium primaire est estimée à 200 à 220 MJ/kg [18], ce qui n'inclut pas les étapes de mise en forme et de recyclage. Cette valeur est très élevée comparée à d'autres familles de matériaux (**Encadré 2**). L'application des meilleures technologies disponibles permet de diminuer cette valeur à 174 MJ/kg [19], où l'électrolyse de l'aluminium continue à représenter la très grande partie de l'énergie totale (85%), le reste comprenant principalement la production de l'alumine. L'électrolyse consomme, avec des sites équipés des meilleures technologies disponibles, 14 kWh/kg. Il faut noter que le rendement d'une centrale thermique de production d'électricité est d'environ 30% et que, par conséquent, l'énergie initiale nécessaire est nettement supérieure (42 kWh/kg, soit 150 MJ/kg). Après la production de l'aluminium, sa coulée consomme environ 12 MJ/kg, et sa mise en forme, de 3 à 7 MJ/kg [18].

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à sa production dépendent du mix énergétique électrique des pays, autrement dit de la source d'énergie (charbon, gaz, nucléaire, renouvelable) utilisée pour produire de l'électricité. En 2020, au niveau mondial, les émissions de GES de la production d'aluminium primaire ont représenté environ 16 tCO₂e/t [20]. L'électrolyse est responsable d'environ 80% de ces émissions, liées presque exclusivement à la production d'électricité pour l'électrolyse de l'alumine, et dans une moindre mesure (3-10%) à la consommation de l'anode en carbone, toujours lors de l'électrolyse [20]. En deuxième place vient la formation de l'alumine à partir de la bauxite, responsable de 10 à 17% des émissions de CO₂e [1,3]. L'étape de coulée ne génère, elle, que 0.6% à 2% des émissions de GES [2].

Des améliorations des procédés sont possibles, afin de réduire ces émissions [2]. La mise en place systématique des meilleures technologies disponibles aux différentes étapes de la chaîne de production et l'utilisation d'une électricité décarbonée permettrait de faire baisser ces émissions à 3.5 tCO₂e/t. Dans ce scénario, la production de l'alumine à partir de la bauxite deviendrait l'étape la plus émettrice de GES.

Enfin, il faut noter que la production d'aluminium primaire est consommatrice d'eau, entre 495 et 1490 l/kg [18].

Encadré 2 : comparaison avec les autres familles de matériaux

En 2021, 67 millions de tonnes d'aluminium primaire ont été produites. En termes de quantité produite, l'aluminium vient après le béton (4.4 milliards de tonnes prévues pour 2021, 4.2 milliards de tonnes en 2020 [21]), l'acier (1.9 milliards de tonnes pour 2021 [22]), le papier et le carton (408 millions de tonnes en 2021 [23]) les plastiques (367 millions de tonnes pour 2020, sans compter les plastiques recyclés [24]). Mais leur

énergie intrinsèque n'est pas équivalente : il faut compter environ 1 à 5 GJ/t pour le béton, entre 15 et 35 pour l'acier selon le type d'acier (jusqu'à 80-90 pour l'acier inoxydable) [25], 70 à 90 pour le plastique, 20 à 50 pour le papier, et plus de 200 pour l'aluminium (valeurs calculées pour la production du matériau) [1,25]. Les émissions de CO₂ sont également différentes selon le matériau : 0.1 à 1 tCO₂/t pour le béton, 0.9 pour le papier, 1.5 à 2 pour l'acier [25], 3 à 4 pour le plastique, et plus de 10 pour l'aluminium [1,25].

Tous les matériaux ne sont pas recyclables de manière égale. Cependant, dans le domaine des aciers, dont le recyclage est similaire à celui des alliages d'aluminium, la fabrication d'acier secondaire permet de réduire d'environ 65 à 88% l'énergie liée à la fabrication d'acier primaire [26,27].

1.3.2. Pour l'aluminium secondaire

La production d'aluminium secondaire permet de s'affranchir des étapes de mine, du procédé Bayer, et du procédé Hall-Héroult et ne garde que la fusion de la matière à recycler. L'énergie nécessaire pour fondre de l'aluminium, en le passant de la température ambiante (25°C) à sa température de fusion (660°C) est 0.39 kWh/kg, ou 1.4 MJ/kg, ce qui représente le minimum théorique d'énergie, soit moins de 1% de l'énergie nécessaire à la production d'aluminium primaire. Cependant, l'efficacité thermique des méthodes de fusion actuelles ne permet pas d'atteindre de telles valeurs, et on obtient plutôt entre 3.5 et 14 MJ/Kg pour des fours électriques à induction ou des fours alimentés par des énergies fossiles, respectivement, soit 2 à 8% de l'énergie nécessaire à la production d'aluminium primaire [19,28]. Il faut noter que ces pourcentages ne tiennent pas compte d'éventuelles pertes de matière lors du recyclage.

Ces économies d'énergie se répercutent sur les émissions de CO₂. Si on ne considère que la partie coulée de la filière de production de l'aluminium primaire, et en utilisant les meilleures technologies disponibles, la production d'une tonne d'aluminium secondaire émet donc 0.3 tCO₂e, soit 2% des émissions liées à la production d'aluminium primaire. Dans des scénarios plus courants, on peut compter 0.8 à 0.9 tCO₂e/t pour l'étape de refusion [18]. La production d'aluminium secondaire, c'est-à-dire le recyclage, permet donc une diminution drastique de la consommation d'énergie et des émissions de GES induites par rapport à la production d'aluminium primaire et par rapport à d'autres familles de matériaux (**Encadré 2**). Enfin, cette diminution des émissions de GES pour le recyclage rend la part relative du transport de matières significative, ce qui est donc une incitation supplémentaire à une gestion locale des déchets (Encadré 3).

Encadré 3 : part du transport dans les émissions de GES

Actuellement, la production et le recyclage de l'aluminium constituent un marché mondial, ce qui implique un transport de matière sur de très longues distances. La part du transport dans l'empreinte carbone d'aluminium primaire est très faible. En effet, le fret maritime sur une distance de 15 000 km (environ la distance France – Australie) induit des émissions de 0,2 tCO₂e/t d'Al, soit 1% des émissions totales pour produire 1 tonne d'aluminium primaire.

En revanche, pour l'aluminium secondaire, comme les émissions totales diminuent fortement, la part du transport devient plus significative. Le fret routier pour une distance de 1500 km (environ la distance France – Espagne) induit des émissions de 0,18 tCO₂e /t d'Al, soit 21 % des émissions totales pour produire 1 tonne d'aluminium secondaire. Une relocalisation du recyclage est donc pertinente.

1.4. Scénarios pour la production future d'aluminium

Les scénarios de l'évolution de la demande en aluminium dépendent de nombreuses hypothèses comme l'évolution de la population, du produit intérieur brut (PIB), des technologies et réglementations, et globalement des choix socio-économiques. Cependant, une augmentation continue de la production a été observée depuis les années 50 (l'aluminium était quasiment inexistant avant les années 1920, du fait de l'absence de technologies d'extraction efficaces) [5]. Les prévisions pour les années à venir, issues de l'International Aluminium Institute, suggèrent une augmentation continue de la production d'aluminium. Comme l'indiquent les courbes dans la Figure 3, la part d'aluminium secondaire dans cette production totale serait amenée à augmenter. Cependant, ceci ne suffira pas à répondre à la demande, et une croissance de la production d'aluminium primaire est aussi prévue.

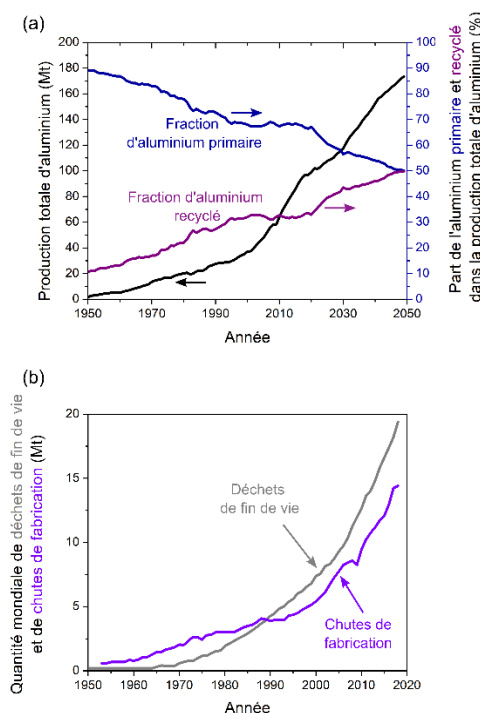


Figure 3: (a) Evolution de la production d'aluminium de 1950 à 2050 (projections) et (b) quantité d'aluminium secondaire (déchets de fin de vie et chutes de fabrication) disponible entre 1950 et 2020 (données de [3])

La part d'aluminium recyclé comprend les chutes de production et les déchets de fin de vie. Comme indiqué dans la Figure 3, si les chutes de production étaient majoritaires jusqu'aux années 1990, elles sont maintenant inférieures en volume aux gisements de matériaux en fin de vie. Ceci s'explique par l'augmentation de l'utilisation de biens faits à partir d'aluminium et donc de leur récupération en fin de vie, mais également de la mise à disposition de stocks jusqu'ici immobilisés dans leurs applications. Les prévisions, selon l'International Aluminium Institute suggèrent que la quantité de stocks disponible devraient augmenter jusqu'à atteindre un pic en 2100, suivi par une diminution [5].

Bien que les scénarios soient difficiles à établir, et que les données disponibles soient très sensibles aux hypothèses effectuées, ainsi qu'aux choix de société désirés, les données disponibles aujourd'hui suggèrent toutes une augmentation de la production d'aluminium, et de la part d'aluminium secondaire dans ce total. Considérant la future prépondérance de la filière secondaire sur la primaire, il est important de faire l'état des lieux de cette dernière, ce qui pourra aussi permettre d'anticiper les investissements et développements. Les étapes du cycle de vie jusqu'à la collecte et les techniques de recyclage actuelles seront présentées, puis des pistes seront proposées pour l'amélioration et la simplification de cette filière.

À retenir

- Les déchets de fabrication sont réinjectés dans leur filière initiale (corroyage ou fonderie) tandis que les déchets en fin de vie, bien que composés d'alliages de corroyage et de fonderie, sont principalement réinjectés dans la filière fonderie.
- Les taux de recyclage de l'aluminium sont élevés mais néanmoins variables selon les secteurs et les pays.
- Le recyclage de l'aluminium permet de diminuer drastiquement la consommation d'énergie et les émissions de CO₂, par rapport à la production d'aluminium primaire.
- Les scénarii prévoient une quantité croissante de déchets d'aluminium à recycler et une augmentation de la part d'aluminium secondaire dans la production totale d'aluminium.

2. Les différentes étapes du recyclage

Le cycle de vie de l'aluminium commence par l'extraction du minerai, c'est-à-dire la bauxite, qui est ensuite transformée en alumine par le procédé Bayer puis en aluminium par électrolyse, appelé également procédé Hall-Héroult (Figure 4). Ce dernier est mis sous forme liquide par fusion. A partir de cette étape, le cycle de vie se ramifie, les flux de matière correspondant sont plus faibles et le chemin suivi dépend de l'application finale [1]. Cette ramification s'accompagne également d'une diversification des compositions (on n'a plus un métal pur mais une très grande variété d'alliages) et des formes des produits (tôles, tubes, pièces massives ...).

Pour recycler l'aluminium, et ainsi transformer un cycle de vie linéaire en un cycle circulaire, les déchets doivent être collectés, triés puis ré-intégrés dans le procédé à l'étape de la fusion. Les principales difficultés du recyclage résident dans :

- La variété des déchets en termes de produits et d'alliages
- La réorganisation des flux que l'on doit faire converger d'une multitude de produits vers l'unique étape de fusion, assurée par un nombre limité de producteurs.

Ces difficultés ne sont pas spécifiques au recyclage de l'aluminium et s'observent également pour d'autres familles de matériaux, en particulier pour l'acier [29].

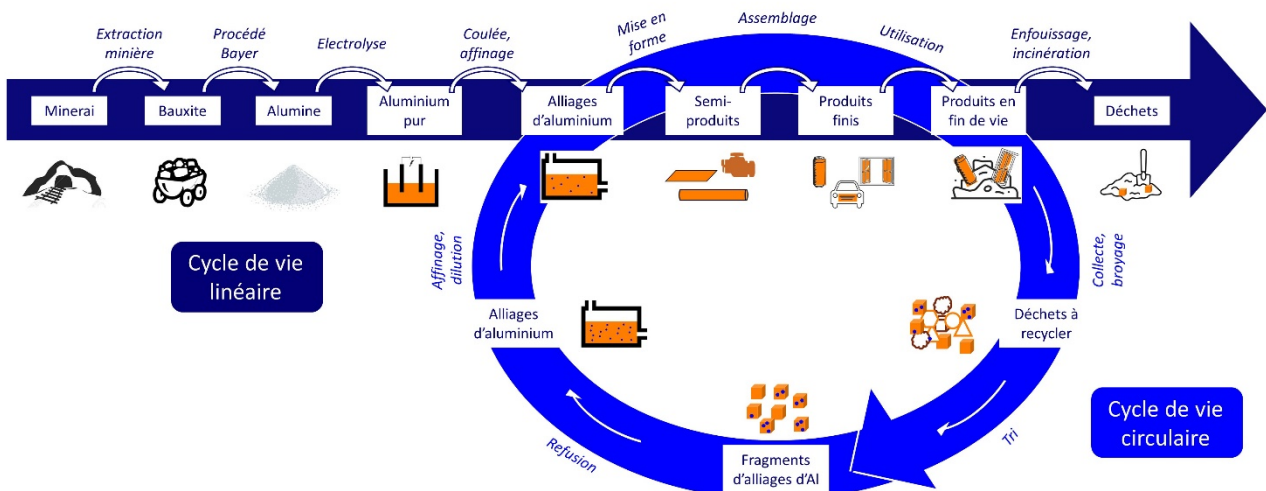


Figure 4 : cycles de vie linéaire (bleu) et circulaire (vert) des alliages d'aluminium.

2.1. Gestion des chutes, fin de vie et collecte des déchets

Chaque étape du cycle de vie entre la fusion et le produit final génère des déchets. Les chutes lors de la coulée sont souvent recyclées en interne et donc rarement répertoriées. Pour l'extrusion, les extrémités du profilé sont systématiquement coupés et mis au rebus afin d'enlever la zone de soudure entre deux billettes. Cela induit 25 % de chutes. L'usinage génère de nombreux copeaux, d'autant plus que les formes visées sont complexes.

Ces déchets de fabrication sont plus simples à recycler que les déchets en fin de vie. En effet, les produits semi-finis n'ont pas encore été assemblés avec d'autres familles de matériaux. De plus, en général, un site industriel travaille sur un nombre limité de compositions d'alliages d'aluminium. Il est donc possible de connaître précisément la composition des déchets et d'établir des filières de collecte et de recyclage courtes. Ainsi, de nombreuses usines de fabrication envoient leurs chutes chez un recycleur, qui leur fournira ensuite le métal sous forme de billettes, de lingots ou de brames.

L'aluminium étant utilisé pour des applications très variées, les déchets de fin de vie et les circuits de collecte le sont également (Figure 5). En France, ils sont collectés via les circuits des VHU (véhicules hors d'usage), des emballages ménagers, des DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques), des DMA (déchets ménagers et assimilés) et des DAE (déchets d'activités économiques). La collecte permet de concentrer les flux de matière. En parallèle, le nombre d'acteurs diminue. En France, il existe 624 sites de collecte et tri des déchets pour 17 entreprises de recyclage [14].

Déchets de fin de vie hétérogènes

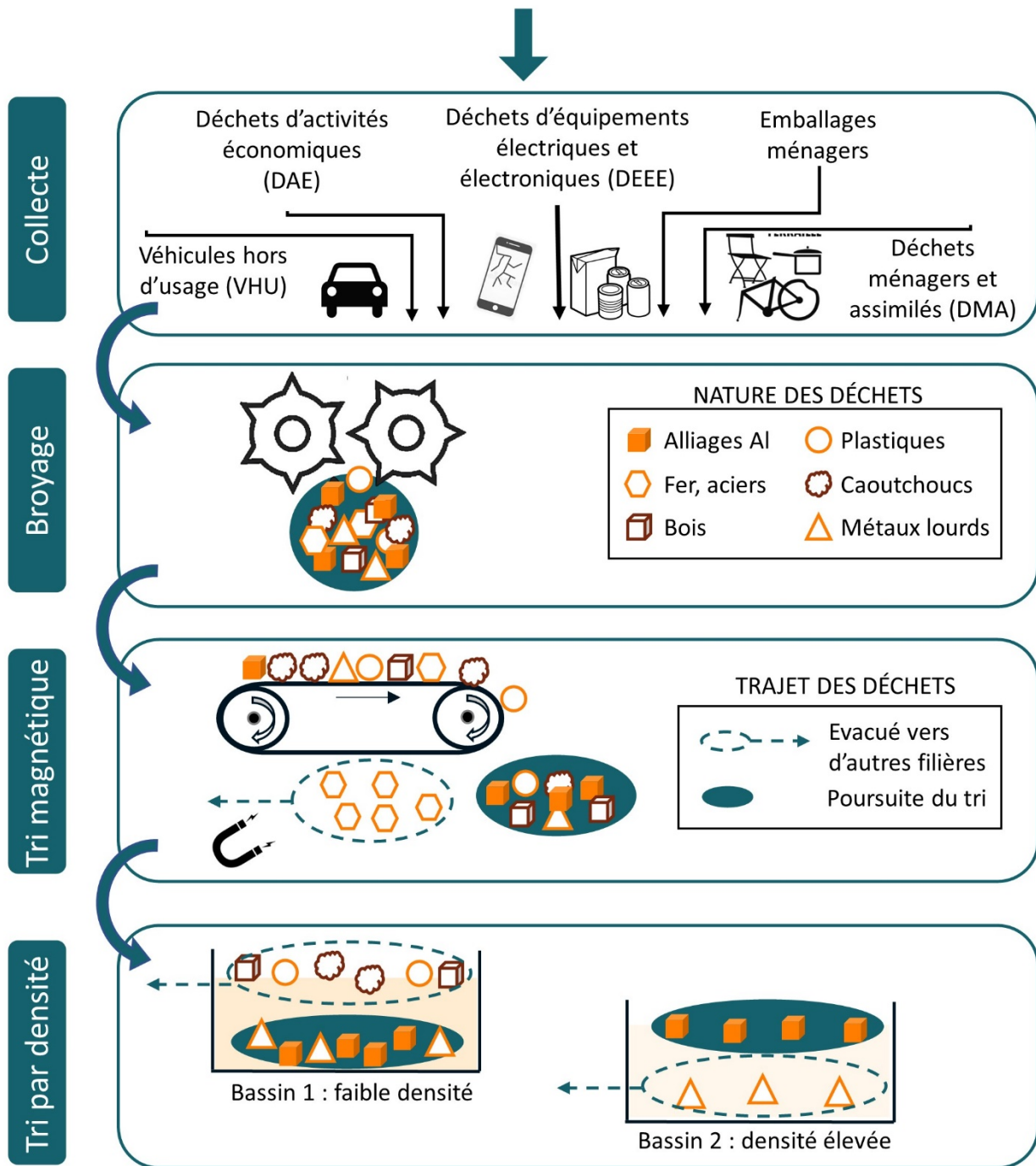


Figure 5 : les étapes de collecte et tri des déchets permettant de transformer des déchets de fin de vie hétérogènes en un lot d'alliages d'aluminium adapté à la refusion.

2.2. Préparation et tri des déchets

Les objectifs de cette étape du cycle de vie sont : (i) augmenter la densité globale, (ii) enlever les déchets qui ne contiennent pas d'aluminium, (iii) diminuer les taux d'impuretés. On va ainsi influencer la quantité de métal disponible et d'impuretés, qui varient fortement selon la source des déchets collectés.

Pour cela, plusieurs sous-étapes se succèdent (Figure 5). Le broyage permet de séparer des composants assemblés constitués de matériaux différents ainsi que de diminuer et homogénéiser la dimension des déchets, afin qu'elle soit appropriée pour les sous-étapes suivantes. Une gamme d'outils, avec des technologies et des puissances variables, permet de s'adapter aux différents types de déchets. Ainsi, les déchiqueteurs à marteaux, d'une puissance supérieure ou égale à 1000 kW, permettent de réduire un véhicule hors d'usage en morceaux d'une dizaine de centimètres, en moins d'une minute [30]. Il existe également des broyeurs à boulets, des concasseurs à percussion [31]. Ces outils comportent souvent des grilles de sortie permettant de contrôler la granulométrie.

Viennent ensuite les sous-étapes de tri [31,32,33]. L'aluminium est un métal non-magnétique de faible densité ($2,7 \text{ g.cm}^{-3}$). Ces caractéristiques permettent de le séparer efficacement des autres matériaux. Le tri magnétique permet de séparer les métaux ferreux, qui sont ferromagnétiques, du flux de déchets. Concrètement, les déchets sont convoyés sur un premier tapis vers une zone équipée d'un aimant, vers laquelle les matériaux ferromagnétiques (principalement le fer et les aciers) sont attirés tandis que le reste tombe dans une autre benne de collecte. Le tri par courants de Foucault permet ensuite de séparer les métaux du flux de déchets. Cette fois-ci, l'aimant est en rotation, afin de faire alterner ses pôles nord et sud et d'induire un courant électrique alternatif et donc un champ magnétique dans les métaux. Ainsi, à l'approche de l'aimant, les matériaux conducteurs (c'est-à-dire les métaux) sont expulsés. La distance d'expulsion dépend de la conductivité du matériau et de la vitesse de rotation de l'aimant. Il faut noter que les câbles ou les feuilles métalliques génèrent des courants électriques trop faibles et ne sont donc pas correctement triés. Le tri par densité consiste à plonger le flux de déchets dans un liquide de densité contrôlée. Il est souvent réalisé en plusieurs étapes. Par exemple, le premier bassin peut avoir une densité de 1.7 g.cm^{-3} . Les plastiques, les caoutchoucs, le magnésium, le bois vont flotter tandis que l'aluminium, l'acier et les métaux lourds vont couler. Le deuxième bassin aura alors une densité de 3.1 g.cm^{-3} et cette fois-ci, l'aluminium va flotter, contrairement aux autres métaux. Les différences de densité entre matériaux peuvent également être exploitées dans des installations à flux d'air. Le tri manuel est également utilisé, dans les pays où le coût de la main d'œuvre est peu élevé mais aussi dans les pays industrialisés.

D'autres techniques, basées sur la spectroscopie, permettent de distinguer les compositions d'alliages mais elles en sont encore au stade de développement (voir 3.1.2). Actuellement, les différentes familles d'alliages d'aluminium ne sont pas triées et sont donc recyclées ensemble, à l'exception des cas où la distinction est faite lors de la collecte.

Les sous-étapes de délaquage et de séchage consistent en des traitements thermiques, à des températures inférieures à la température de fusion de l'aluminium [31,32]. L'objectif est d'éliminer une contamination de surface (par de l'eau, de l'huile de coupe) ou un revêtement (peinture, colle, dépôts biologiques). On les applique en particulier pour les emballages usagés et les tournures.

Selon les installations et les flux de déchets, le nombre et l'ordre de ces sous-étapes varient. Ainsi, pour les déchets de fabrication, très peu voire aucune étape de préparation et de tri ne sont nécessaires, contrairement aux VHU ou aux déchets ménagers. Même à l'issue des étapes de préparation et de tri, il reste donc une variabilité selon les lots de déchets. Les critères pertinents pour les classer sont les suivants :

- Le rendement métal, autrement dit le pourcentage d'aluminium qui est contenu, qui varie entre 80 et 95 % (à l'exception de deux catégories)
- Les concentrations maximales en éléments d'alliages et en impuretés, tels que Si, Fe, Cu, Mg, Zn.

- La forme, telles que câbles, tournures, matériaux issus du broyage

La norme européenne EN-13920 définit ainsi 15 catégories de déchets. La norme ISO 14021 permet, elle, de définir les déchets de fabrication et les déchets de fin de vie. Il existe également des classifications internationales, nationales ou même bilatérales entre entreprises de tri et affineurs. En effet, à l'issue de la préparation et du tri, de nouveaux acteurs interviennent dans le cycle de vie. Les lots de déchets sont donc vendus. Le tarif dépend de la qualité du lot (**Encadré 4**). Enfin, il faut souligner que le tri n'est pas efficace à 100 %. Autrement dit, une partie de l'aluminium qui entre en centre de tri ne sera pas détecté et ne pourra donc pas être recyclé.

Encadré 4: aspects économiques

Le prix du lot de déchets d'aluminium à l'issue du tri varie fortement selon sa qualité, qui dépend de la quantité d'aluminium dans le lot, ainsi que de la nature et de la diversité des alliages présents. Pour évaluer son intérêt économique, il est comparé au prix d'une tonne d'aluminium primaire, qui est coté par le London Metal Exchange (LME) et qui évolue au cours du temps. Ainsi, un lot contenant un seul alliage de corroyage peut valoir 70 % du prix LME de l'aluminium primaire alors qu'un lot de cannettes usagées n'en vaudra que 45 % [32].

2.3. Refusion

La refusion est une étape très importante du cycle de vie circulaire de l'aluminium. En effet, à l'issue de cette étape, les déchets réintègrent le cycle de vie linéaire et, après les étapes de transformation, ils deviendront à nouveau un produit. On peut dire qu'ils cessent d'être des déchets ou, pour le formuler autrement, qu'ils viennent de concrétiser leur potentiel de « déchet recyclable » en étant effectivement recyclé. De plus, la refusion est la dernière étape au cours de laquelle le contrôle de la composition est possible et est donc déterminante pour les performances de l'alliage recyclé. Enfin, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie du cycle de vie circulaire.

Il y a deux catégories de refusion [11,14] (Figure 6):

- Le recyclage direct, qui concerne les déchets homogènes en composition, principalement les déchets de fabrication ou de fin de vie très bien triés. Peu d'ajustement de composition est nécessaire. Cette filière produit principalement les alliages de corroyage.
- L'affinage, qui concerne tous les autres déchets d'aluminium. Des ajustements importants de la composition peuvent être réalisés. L'alliage, et donc l'application, après refusion peut être très différent de celle du déchet. Cette filière produit principalement des alliages de fonderie.

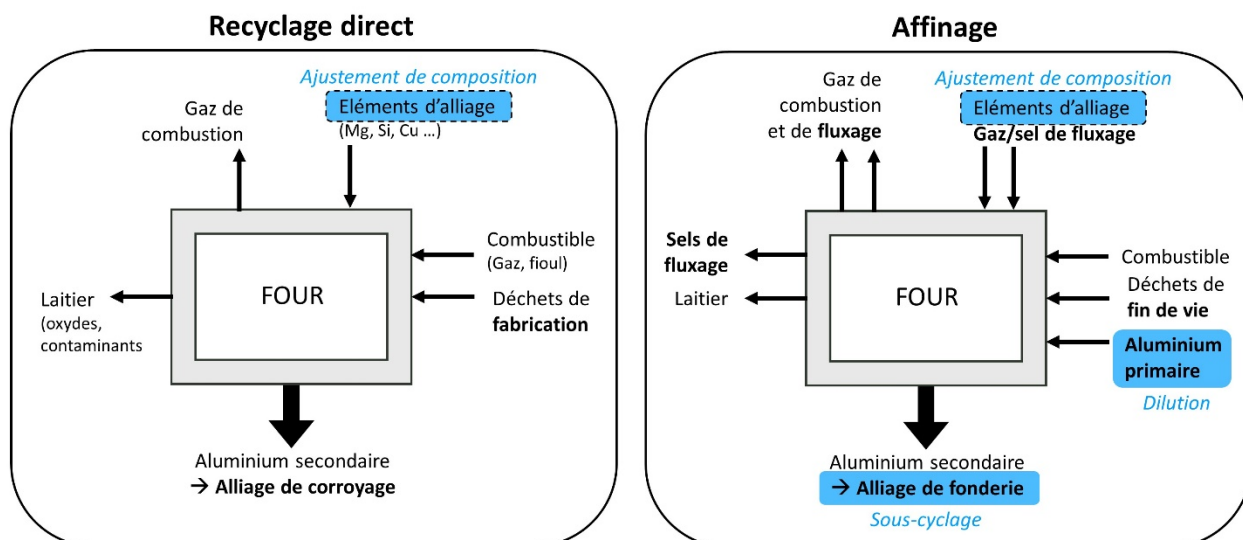


Figure 6 : Flux entrants et sortants lors de la refusion d'alliages d'aluminium en recyclage direct et en affinage. Les flux encadrés en traits interrompus sont ajoutés le plus souvent dans le four de maintien. Les différences entre le recyclage direct et l'affinage sont indiquées en gras. Les stratégies de contrôle de la composition sont encadrées en bleu

2.3.1. Aspects techniques

A l'arrivée de chaque chargement de déchets sur un site de refusion, un échantillon est prélevé, fondu et analysé par spectrométrie afin de déterminer la composition chimique moyenne. Le rendement métal, c'est-à-dire le pourcentage d'aluminium récupérable, est ainsi déterminé. Les pertes sont dues à :

- La présence initiale de contaminants, oxydes ou revêtements dans le lot,
- L'oxydation de l'aluminium pendant la refusion,
- Des pertes supplémentaires induites par les traitements réalisés pendant la refusion.

Ces deux derniers types de pertes sont en général plus importants dans le four industriel que lors de la fusion d'essai. Le rendement métal industriel est donc généralement plus faible. Cette connaissance du rendement métal mais également de la concentration en éléments métalliques autres que l'aluminium détermine la qualité du lot, et donc son prix (**Encadré 4**). Ensuite, afin de correspondre au mieux à la composition finale visée, on choisit la meilleure manière de combiner les différents lots puis on établit la quantité d'aluminium primaire nécessaire, les éléments d'alliages à ajouter ainsi que les éventuels traitements à mettre en œuvre lors de la refusion [30,34].

Les lots de déchets sont ensuite chargés dans le four. La première fonction du four est d'élever la température afin que chaque morceau d'aluminium passe à l'état liquide puis qu'un bain de métal liquide soit formé. Il en existe plusieurs types que l'on peut classer en fonction de leur conception [35] : les fours à creuset, à sole (appelés aussi four à bassin), tournants, réverbères. Ils varient par leur capacité de production (importante par exemple pour les fours à sole), leur performance de purification (importante pour les fours tournants) et l'oxydation induite pendant la fusion (limitée pour les fours électriques) [32]. En affinage, les fours tournants et réverbères sont les plus utilisés, les fours à sole sont également fréquents. En recyclage direct, les fours réverbères sont préférés, les fours à creuset peuvent être utilisés [36]. On peut également classer les fours en fonction de leur source d'énergie : électrique ou fossile (le plus souvent gaz, mais également fioul). Ce choix est fait principalement en fonction du coût et de la puissance énergétique requise, ce qui est pour le moment un frein à l'utilisation de l'électricité.

La deuxième fonction du four est la mise en œuvre des traitements du métal liquide. En surface du métal liquide se forme une couche visqueuse, appelée le laitier, qui contient les oxydes résiduels qui n'ont pas

fondu ainsi que les oxydes, en particulier d'aluminium, qui se forment pendant la fusion. Ce laitier est systématiquement retiré, plus ou moins manuellement, par un racloir [37]. Il peut ensuite être retraité afin d'en extraire les métaux qu'il contient. Un laitier est également généré lors de la fusion primaire mais ce dernier est plus concentré en métal et donc plus facilement valorisable [37].

En supplément, la technique du fluxage peut être mise en œuvre. Elle consiste à ajouter des sels, tels que des chlorures de sodium et de potassium ou encore des fluorures comme la cryolite, ou des gaz. Leur rôle est de limiter l'oxydation du métal liquide, de favoriser l'évacuation de l'hydrogène et de l'azote gazeux piégés dans le bain et d'éliminer certaines impuretés en catalysant ou induisant des réactions chimiques [33]. Par exemple, l'ajout d' AlCl_3 induit la réaction chimique suivante : $\text{Mg} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{MgCl}_2$. Le produit de la réaction étant moins dense que l'aluminium liquide, il va migrer dans le laitier et sera ainsi évacué. Il faut souligner que le fluxage présente deux inconvénients significatifs : les quantités de sel nécessaires sont importantes et des gaz toxiques peuvent être émis [33].

Enfin, des éléments d'alliage, tels que le silicium, le manganèse, le cuivre, peuvent être ajoutés afin d'ajuster la composition. Un ou plusieurs de ces traitements (fluxage, ajout d'éléments) peut être réalisé dans le four de maintien, dans lequel le métal liquide est transféré avant d'être coulé. L'efficacité des traitements de fluxage dépend des propriétés physiques et thermodynamiques du métal et, malheureusement, elle est limitée pour l'aluminium.

2.3.2. Difficultés d'affinage de l'aluminium

L'idée générale des traitements du métal liquide est d'induire des réactions physiques ou chimiques faisant passer les éléments non-voulus de la phase liquide (le bain de métal) à la phase solide (le laitier) ou gazeuse (l'atmosphère du four), ces deux dernières étant ensuite évacuées. Mais ces réactions ne doivent pas impliquer l'aluminium, afin qu'il reste en phase liquide. L'oxydation est la réaction la plus simple à mettre en œuvre. L'équilibre de la réaction dépend de la stabilité thermodynamique relative de chaque élément dans les trois phases présentes (ie : liquide, solide ou gazeuse). Il a été calculé pour 45 éléments présents dans les alliages d'aluminium en fonction de la température et de la pression partielle en oxygène [38]. Il s'avère que seuls Hg, Cd, Zn, Mg, Ca et Be peuvent être extraits de l'aluminium liquide par cette approche (Figure 7). Ainsi, des éléments d'alliage fréquents tels que Fe, Si, Cu ou Mn, resteront inévitablement dans la phase liquide. La situation est moins critique pour les alliages de fer ou de cuivre pour lesquels respectivement 19 et 18 éléments peuvent être extraits, permettant donc un meilleur contrôle de la composition lors du recyclage. La situation de l'aluminium est principalement due à sa très forte affinité pour l'oxygène. En effet, un diagramme d'Ellingham montre que l'aluminium s'oxyde plus facilement que la plupart des métaux [33]. Autrement dit, si on augmente la température et/ou la pression partielle d'oxygène pour favoriser l'oxydation et donc le passage en phase solide d'un élément non voulu, on va également induire une oxydation de l'aluminium.

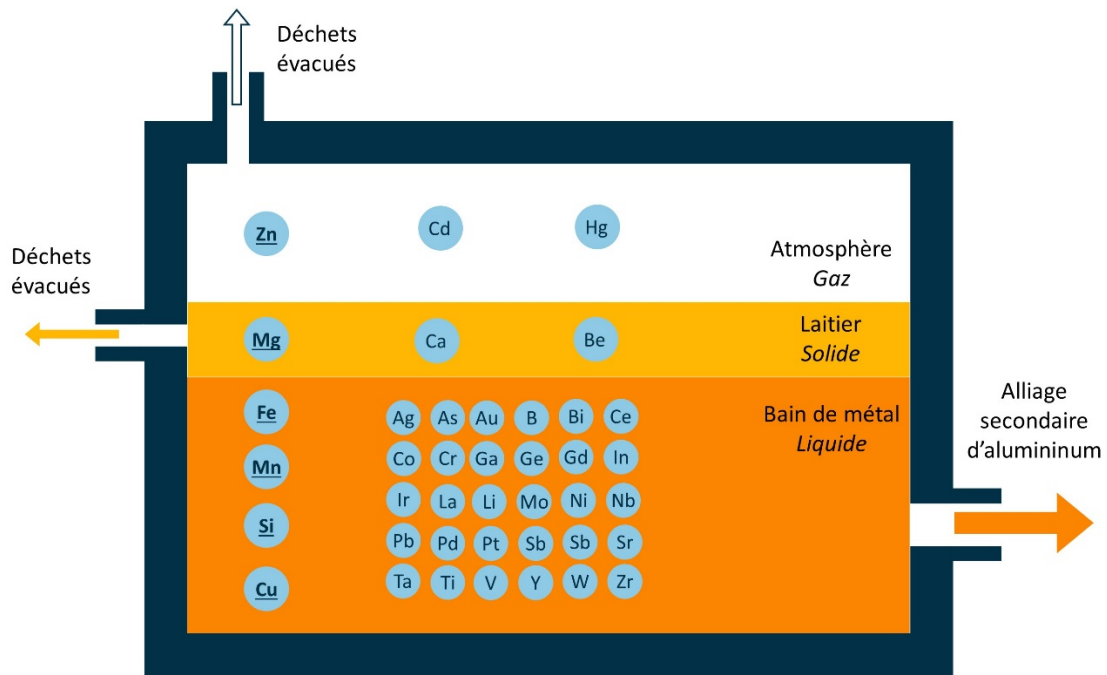


Figure 7 : distribution des éléments chimiques entre le bain de métal, le laitier et l'atmosphère pendant la refusion des alliages d'aluminium, à l'équilibre thermodynamique (adapté de [38]). Les éléments sont évacués avec la phase dans laquelle ils se trouvent. La grande majorité des éléments restent donc dans l'alliage secondaire, qu'ils soient souhaités ou subis. Les éléments chimiques les plus fréquents dans les alliages d'aluminium sont soulignés.

En métallurgie du métal liquide, des réactifs solides ou gazeux sont fréquemment ajoutés pour induire d'autres réactions chimiques que l'oxydation. Mais l'aluminium a également une affinité importante pour le chlore, qui ne peut donc pas être utilisé. Enfin, la faible température de fusion de l'aluminium limite également les possibilités de chauffage et le choix des sels, qui doivent être à l'état fondu [38].

En conclusion, il y a très peu de possibilités de retirer les éléments chimiques non désirés à l'étape de refusion. Si certains éléments sont en excès, il existe deux possibilités largement utilisées pour le recyclage de l'aluminium :

- Diluer en ajoutant de l'aluminium primaire
- Sous-cycler, autrement dit produire un alliage plus tolérant aux impuretés et/ou moins exigeant en termes de propriétés, mais avec une valeur ajoutée plus faible.

A cause de la dilution, une fraction de matière recyclée à 100 % est pour le moment impossible pour la filière de l'aluminium, même si elle peut être atteinte pour certaines coulées. Par ailleurs, les alliages de corroyage ayant des concentrations en éléments d'alliages plus faibles que les alliages de fonderie, le sous-cyclage consiste donc à produire principalement des alliages de fonderie en refusion.

Il faut souligner que, dans les deux cas, on limite l'effet néfaste de l'élément en excès mais on perd en même temps l'intérêt qu'il aurait pu avoir en étant utilisé à bon escient. Quand les éléments d'alliage sont pris en compte dans une analyse du cycle de vie, l'impact environnemental est deux fois plus important que si l'on fait l'hypothèse que l'on recycle de l'aluminium pur [39]. Dans le secteur de l'automobile, au niveau mondial, ce sont environ 35 000 tonnes de métaux critiques utilisés dans la production des alliages d'aluminium, dont 50% de Mg, et le reste de Mn, Cr, Ti, Zn et V, qui, sans amélioration des filières de tri, seront perdus chaque année [40]. De plus, on risque, dans un futur proche, d'aboutir à un surplus de déchets, qui aura été collecté mais ne pourra être recyclé (voir **Encadré 5**).

Encadré 5 : le risque de surplus de déchets

Quand la quantité de déchets collectés est supérieure à la capacité d'absorption en aluminium secondaire des alliages de corroyage et de fonderie, il y a ce que l'on appelle un surplus de déchets. En s'appuyant sur des analyses de flux de matières au niveau mondial, il est estimé qu'en 2030, le surplus pourrait s'élever à plus de 10 % des déchets collectés et représenter plus de 5 millions de tonnes [41]. Ce surplus n'est pas dû à une diminution de la demande globale en alliages d'aluminium mais aux stratégies de dilution et sous-cyclage actuellement adoptées, qui limite l'utilisation des déchets d'aluminium. Un meilleur tri des déchets d'aluminium en fonction de leur composition limiterait ce problème.

À retenir

- Il y a deux voies de recyclage : le recyclage direct, pour les déchets homogènes en composition, et l'affinage, pour lequel des ajustements importants de composition sont réalisés.
- Le tri des déchets de fin de vie permet de séparer l'aluminium des autres familles de matériaux mais les différents alliages restent mélangés.
- Les déchets sont fondus dans un four de refusion puis suivent les étapes classiques du procédé.
- Pendant la refusion, il est impossible d'enlever la plupart des impuretés du bain de métal liquide.
- Deux stratégies d'ajustement de composition sont utilisées : la dilution, par ajout de métal primaire, et le sous-cyclage.

3. Opportunités pour le futur

3.1. Améliorer le recyclage

Afin d'optimiser le recyclage, des leviers peuvent être mis en place (Tableau 1). Dans la suite, ils sont détaillés en partant de la fin de la chaîne d'utilisation de l'aluminium, où des solutions techniques existent et peuvent déjà être déployées. Puis, des propositions correspondant à des niveaux de maturité industrielle plus bas seront détaillées.

3.1.1. Généraliser l'utilisation des meilleures pratiques

Des études ont révélé que le principal verrou à faire sauter à court terme, et nécessitant un investissement moindre, concerne l'amélioration des taux de collecte et de tri [4]. Actuellement, parmi les différents domaines d'utilisation de l'aluminium, ce sont les emballages pour lesquels les taux de recyclage sont les plus faibles (voir 1.2). Il faut souligner que la situation s'améliore : le taux de recyclage était de 33 % en 2010 et a atteint 48 % en 2020 [15]. Or le taux de recyclage dépend fortement de la qualité de la collecte et du tri. Pour poursuivre cette progression, il faut continuer à déployer les meilleures pratiques.

Des actions relatives à la collecte et au tri qui ont déjà été mises en place et qui pourraient être généralisées seront donc détaillées pour l'application des emballages. Certaines propositions peuvent néanmoins être étendues à d'autres domaines.

3.1.1.1. Taux de collecte

L'amélioration de la communication sur le type de poubelle adéquate ou le point de collecte pour un déchet peut tout d'abord être mis en place. Des pictogrammes existent déjà mais des propositions d'amélioration

ont été faites, par exemple aux Etats-Unis et au Canada avec le programme « how2recycle » [42]. Cependant, les filières de tri étant spécifiques aux pays, et même aux régions, ces logos ne peuvent être mis en place que pour des emballages pour lesquelles les consignes de tri sont identiques sur un territoire.

Les taux de collecte peuvent ensuite être améliorés via la mise en place de stratégies comme la simplification du tri : déjà déployée pour 2/3 des français, cette démarche permet aux citoyens de recycler dans un seul contenant tous les déchets en papier, plastiques et métal, et a permis, dans les régions où elle a été déployée, d'augmenter le taux de collecte [43]. D'autres modèles, fondés sur le financement de la collecte et du recyclage par une taxe environnementale à l'achat, sur la mise en place de consignes, ou sur un retour du produit usagé au producteur en fin de vie peuvent être envisagés. Enfin, des labels pourraient être proposés afin de certifier l'incorporation de matière recyclée [44].

Si les initiatives listées précédemment peuvent permettre d'améliorer la collecte, elles résultent souvent en un mélange des différents flux de matériaux, pour simplifier le tri fait par les usagers. Afin de favoriser un recyclage en boucle fermée, ne nécessitant pas de tri post-collecte, des initiatives d'acteurs privés peuvent permettre d'améliorer la collecte pour certains produits. C'est le cas de la campagne « every can counts » initiée au Royaume Uni en 2009, qui a permis d'inciter les citoyens à trier leurs cannettes de boisson usagées dans des poubelles de tri spécifiques, installées sur des sites stratégiques (événements, lieux de vacances...) [45]. Ce programme est maintenant déployé dans plusieurs pays de l'Union Européenne. En France, cette initiative a permis de collecter plus de 116 millions de cannettes depuis 2022.

3.1.1.2. Qualité du tri

Une fois les déchets collectés, leur tri est effectué, avec des améliorations possibles. En France, la plupart des déchets ménagers recyclables sont récupérés dans une unique poubelle, sans tri préalable par le citoyen des différents matériaux (plastiques, aluminium, papier). La séparation de ces différentes matières dans les centrales de tri est donc à optimiser. Des améliorations ont été observées suite à la mise en place du « projet métal » lancé en 2014, qui a permis de mieux équiper des centres de tri pilotes, les faisant augmenter de 65% leur quantité de métal recyclé, pour un total de 338 tonnes de petits emballages recyclés en 2016 [46].

Les technologies déployées sur les chaînes de tri permettant ces améliorations consistent en des aimants « overband » permettant le retrait des ferrailles magnétiques, et des machines à courant de Foucault, permettant de trier les métaux non ferreux des matériaux non métalliques, qui ont donc fait leurs preuves [46]. L'équipement systématique des centres de tri avec ces machines peut ainsi être recommandé. L'adaptation des méthodes de captage devra cependant correspondre aux granulométries considérées, puisque, par exemple, le nombre de pôles d'une machine à courants de Foucault permettra de capter uniquement certaines tailles de déchets.

3.1.1.3. Déploiement de sites de pyrolyse

Dans de nombreuses applications, l'aluminium est utilisé de manière massive, et est donc relativement facile à collecter puis trier, pour être ensuite refondu (voir 2). Cependant, particulièrement dans le domaine de l'emballage, l'aluminium peut être utilisé sous forme de matériau multicouches, contenant également des plastiques, papiers, encres, vernis, représentant entre 2 et 90% de la masse totale des produits [11]. Bien que cela ne concerne que 25% des emballages, et que les emballages comptent pour 13% de la production d'aluminium, des débouchés pour traiter ces déchets doivent être proposés, afin d'augmenter les taux de récupération. Aujourd'hui, il n'y a pas de filière spécifique en France pour ces déchets qui sont soit enfouis ou incinérés, l'aluminium étant alors perdu dans les mâchefers, soit triés et exportés pour traitement. Récupérer l'aluminium peut se faire par le procédé de pyrolyse : les matières organiques brûlées sont valorisées sous forme de chaleur ou d'électricité, et l'aluminium est récupéré. Deux usines de pyrolyse en

Allemagne sont capables de traiter 90 000 tonnes par an. La multiplication de sites de pyrolyse pourra donc valoriser un gisement jusqu'ici abandonné.

3.1.2. Déployer les techniques validées à l'échelle pilote

La mise en place des meilleures pratiques discutées ci-dessus ne permettra, dans le meilleur des cas, que de séparer les alliages d'aluminium d'autres matériaux. Les déchets d'aluminium, peu importe leur composition exacte, sont ensuite refondus, induisant une perte de qualité et ne permettant pas de faire du recyclage en boucle fermée (section 2.3.2). Afin de pallier ce problème, la mise en place de technologies de tri plus poussées peut être proposée.

Outre un tri visuel des pièces composées d'alliage de fonderie ou de corroyage, une des techniques possibles pour trier ces deux grandes familles, est celle du « hot crush ». Via un traitement thermique à environ 550°C et une action mécanique, les alliages de fonderie se désagrègent en grains, à la suite de la fragilisation des joints de grains par ségrégation du silicium. Ainsi, les alliages de corroyage restent sous forme de pièces larges, quand les alliages de fonderie sont récupérés sous forme de grains fins. Des taux de pureté de 96% peuvent être obtenus par cette méthode [33]. De plus, cette technique peut être couplée à une étape de pyrolyse.

Les familles d'alliages peuvent ensuite être triées par couleur. En effet, selon l'élément d'alliage, la couleur du matériau pourra être plutôt grise (fortes teneurs en Si et Mn), ou plus sombre (Zn, Cu). Une étape supplémentaire d'attaque chimique permet en outre de séparer les familles 2xxx, 3xxx et 7xxx des autres alliages d'aluminium, et les 5xxx des 6xxx [47]. Cependant, les alliages ne sont triés à ce stade que par famille, et non par compositions appartenant à la même famille. Le couplage de l'analyse colorimétrique avec des analyses de morphologie de copeaux par imagerie 3D, peut permettre d'affiner le tri.

Deux techniques, enfin, permettent de trier les alliages composition par composition.

Le LIBS, ou « Laser Induced Breakdown Spectroscopy » repose sur l'interaction d'un laser avec la surface du métal, qui crée un plasma local d'atomes et d'ions dans un état excité. Leur désexcitation émet des photons d'énergie caractéristique des éléments, qui sont collectés sur un détecteur et analysés, afin de déterminer la composition du matériau. La composition identifiée, le copeau concerné est alors collecté mécaniquement, via une soufflerie ou un bras articulé. Cette technologie, introduite au « Düsseldorf's aluminium trade fair 2016 », permet de tenir des cadences élevées, et a montré son efficacité pour séparer les alliages d'aluminium de fonderie et de corroyage, ainsi que les différentes familles d'alliage. Plusieurs prototypes sont à l'essai. Les limites de la technique sont liées au fait que seule la surface du matériau est analysée, des artefacts sont donc possibles si une couche de peinture, d'oxyde ou de lubrifiant est présente [33].

La spectrométrie par fluorescence des rayons X (SFX) est également capable de séparer les alliages par famille, via l'émission secondaire de rayons X par les matériaux bombardés aux rayons X. Les spectres sont caractéristiques des éléments contenus dans l'alliage [33]. De manière similaire au tri LIBS, une fois leur composition identifiée, les copeaux sont séparés par une action mécanique ou une soufflerie. Cette technique a été déployée sur une chaîne de tri pilote appelée « Multipick », et devrait permettre de trier 20 000 tonnes de déchets métalliques par an [48]. Créé pour trier les pièces des VHU après broyage, ce type de ligne de tri pourrait également être mise en place pour d'autres types de déchets.

D'autres techniques existent, comme la PGNAA (Prompt Gamma ray Neutron Activation Analysis), basée sur une irradiation aux neutrons des copeaux, qui, en retour, émettent des rayons gamma, caractéristiques des éléments de l'alliage et de leur concentration, dont l'analyse permet de remonter à la composition de l'alliage. Bien que cette technique permette de s'affranchir des effets de surface, elle ne permet pas pour le moment de cibler les copeaux un à un, et a un débit trop lent [32].

En conclusion, de nombreuses solutions pourront permettre d'améliorer la collecte et le tri des alliages d'aluminium. Cependant, malgré les promesses qu'elles portent, les techniques avancées de tri restent coûteuses et lourdes à mettre en place. Une réflexion sur l'écoconception pour la fin de vie, ou conception pour la circularité, favorisant le démantèlement, doit également être menée (section 3.1.4).

3.1.3. Recherche et développement sur les techniques de recyclage

1. Développement du tri élémentaire à l'état liquide

Une fois les alliages d'aluminium séparés des autres matériaux, ils sont refondus, et les stratégies de dilution ou de sous-cyclage sont souvent utilisées pour gérer la composition chimique (section 2.3.2). Ces approches présentent des limites et développer des méthodes visant à extraire les éléments en excès est donc très pertinent. Malheureusement, pour l'aluminium, le fluxage est peu performant pour extraire les éléments d'alliages du bain liquide. D'autres approches sont donc en développement, à des stades plus ou moins industriels.

Le procédé de Hoopes repose sur l'électrolyse du bain de métal liquide, via une électrode trois-couches : un alliage Cu-Al sert d'anode, et est séparé de la cathode (pur Al liquide) par l'électrolyte. Les chutes ou déchets à recycler sont ajoutés à l'anode, et l'aluminium pur se déplace vers la cathode. Bien qu'il permette d'atteindre de très grandes puretés (> 99.97%), ce procédé est très consommateur d'énergie (17-18 kWh/kg, similaire à l'électrolyse de l'alumine), et nécessite de travailler à haute température (700-900°C), il n'est donc pas déployable à grande échelle [33]. L'apport de cette technique, par rapport à la production d'aluminium primaire, réside donc dans l'économie de l'étape d'extraction du minerai, et de la production de déchets lors de la production d'alumine. Si une pureté un peu moins grande est acceptable (>99%, jusqu'à 99.89%), l'électrolyse à basse température (100-200°C), moins coûteuse en énergie (environ 3kWh/kg) peut être envisagée [49,50]. Dans cette seconde technique, l'aluminium à purifier est l'anode, et se dissout dans un liquide ionique, avant de se déposer à la cathode. Ces deux techniques peuvent être mises en place pour régénérer de l'aluminium pur à partir d'un mélange d'alliages.

D'autres approches reposent sur la ségrégation d'éléments dans un état solide ou liquide : il s'agit de la fusion de zone et de la cristallisation fractionnée. La première consiste à fondre localement une barre, et sous l'effet d'un déplacement lent, de déplacer les impuretés vers l'extrémité de la barre qui peut être chutée. La seconde utilise les eutectiques présents dans les systèmes étudiés entre l'aluminium et les éléments d'alliage : au-dessus de cette température eutectique, le liquide est enrichi en éléments d'alliages. La technique consiste donc à faire précipiter rapidement des cristaux d'aluminium à la surface du bain de fusion, qui tombent ensuite au fond du bain. Ces cristaux d'aluminium peuvent atteindre des puretés très levées (>99.97%). La technique, particulièrement efficace pour Sn, Fe ou Ni, ne permettra pas, en revanche, d'extraire Cr, V, Zr ou Ti [33].

Lorsque les impuretés sont obtenues sous forme d'inclusions (intermétalliques, carbures ou oxydes), elles peuvent être enlevées par sédimentation au fond du bain, ou par filtration. La sédimentation est cependant peu efficace pour les très petites inclusions, qui nécessitent un long maintien du bain à l'état liquide – coûteux énergétiquement - pour leur permettre de se déposer. La filtration est efficace, et a par exemple permis

d'enlever des précipités intermétalliques riches en fer. Cependant, les conditions expérimentales à appliquer (température, paramètres de filtration) sont à déterminer systématiquement en fonction de la composition de l'alliage pour une efficacité optimale [51].

Ces différentes pistes ne sont, pour le moment, pas mises en place à grande échelle. Leur possible industrialisation est fortement dépendante de la valeur de l'aluminium, de sa disponibilité et de celle des éléments d'alliages. De plus, elles impliquent une étape de traitement supplémentaire, qui a forcément un coût énergétique et en émissions de GES. Grâce à une amélioration du tri préalable des différents alliages par familles, leur utilisation ne sera requise que dans des cas restreints.

2. Recyclage par voie solide

Les méthodes actuelles de recyclage passent systématiquement par une étape de refusion, que ce soit en recyclage direct ou en affinage. Une autre approche, appelée recyclage par voie solide, consiste à s'affranchir de cette étape, en compactant directement les copeaux afin de reformer un lingot [52]. Historiquement, le procédé le plus utilisé est l'extrusion à chaud. L'avantage du recyclage par voie solide par rapport au recyclage classique est de diminuer son impact environnemental. Dans le cas de l'extrusion à chaud, on estime qu'elle permet d'économiser environ 30% de l'énergie par rapport à de la refusion [53], ou une division par 3 à 4 en termes d'impact environnemental [54]. Ce gain est dû à la consommation d'énergie moindre de l'extrusion par rapport au four de fusion mais également à une baisse de la perte de matière qui a lieu pendant la refusion (section 2.3.1) ainsi qu'aux émissions de gaz toxiques évitées. Le deuxième avantage est de s'appuyer sur une technique, l'extrusion, déjà utilisée lors de la mise en forme des alliages de corroyage (25% des alliages de corroyage sont extrudés). On peut donc s'appuyer sur des équipements existants, capables de produire des volumes importants. En revanche, contrairement à la refusion, le recyclage par voie solide ne permet aucun ajustement de compositions et nécessite donc que les matières premières soient déjà triées. Aujourd'hui, cette approche peut être appliquée aux chutes d'usinage (déchets de fabrication), dont la composition est déjà bien identifiée et qui constitue un gisement important (section 1.1). L'autre enjeu du recyclage par voie solide est la soudabilité des copeaux : sans un bon soudage des copeaux, l'intégrité physique du matériau est menacée.

Le principe du recyclage par voie solide par extrusion à chaud repose sur une déformation plastique sévère, et un fort cisaillement. La combinaison de ces deux effets permet le soudage des copeaux, formant ainsi un matériau consolidé. L'application d'une déformation permet, en outre, d'induire de l'écrouissage ou de générer la recristallisation de grains fins, renforçant les propriétés mécaniques du matériau. Les grandes étapes de cette technique sont la formation des copeaux (si les pièces sont trop grosses), leur nettoyage, leur pré-compaction et leur extrusion. L'optimisation des paramètres de procédé, et la modélisation du soudage des copeaux ont permis d'atteindre des profilés de bonne qualité, aux propriétés mécaniques prometteuses [55,56], et des plaques peuvent même ensuite être produites, par un couplage de l'extrusion à chaud et du laminage [57].

D'autres variantes de cette technique ont été proposées, comme l'extrusion à température ambiante couplée au laminage à froid [58]. Des approches intégrées couplant extrusion et une autre technique peuvent également améliorer encore le soudage des copeaux, : on peut ainsi coupler l'extrusion à chaud avec de l'ECAP (Equal channel angular pressing) [59], avec de la compression (et un cyclage extrusion-compression) [60], avec de la friction malaxage, permettant de produire des fils [61,62]. Enfin, l'alimentation en copeaux via une vis lors de l'extrusion, qui permet de réduire la force de compression nécessaire, autorise de travailler avec un apport continu de copeaux, et diminue ainsi d'une étape (compaction des copeaux) la procédure totale [63].

Deux autres approches ne mettant pas en jeu l'extrusion, sont également étudiées. Des lingots ont été produits à partir de copeaux par le « high pressure torsion » qui utilise une pression de plusieurs gigapascals couplée à une torsion [64]. S'inspirant des approches de consolidation des poudres, la consolidation de copeaux précompactés à la température ambiante par Spark Plasma Sintering (SPS) peut être faite, produisant un matériau dense, où les anciens joints de copeaux restent néanmoins visibles [65]. Ces deux approches, contrairement à l'extrusion, ne sont pour le moment pas déployées industriellement et ne permettent pas de produire des volumes importants.

3.1.4. Adapter la chimie des alliages au recyclage

Une des limites rencontrées lors du recyclage est l'accumulation d'impuretés dans le matériau au cours des cycles. La présence de certains éléments indésirables au-delà d'une concentration critique peut disqualifier le matériau, qui ne répond alors plus aux cahiers des charges.

Afin d'éviter le sous-cyclage, des approches pour gérer la présence du fer, un élément problématique dans les alliages d'aluminium, ont été développées. En effet, la formation de la phase β -AlFeSi, avec une morphologie en plaquettes, peut fragiliser l'alliage, en se comportant comme des sites de propagation de fissures ou des sites préférentiels pour la corrosion. Or, grâce à des traitements thermiques adaptés, cette phase peut être transformée en phase α -AlFeSi, que la morphologie rend moins dommageable pour les propriétés de l'alliage [66]. L'ajout de Mn est également une stratégie reconnue pour changer la morphologie des précipités [67]. Développer ces approches permettant la gestion des impuretés par les procédés ou par l'ajout d'éléments neutralisants, pourrait repousser le sous-cyclage. Cependant, l'ajout d'éléments complexifie de nouveau la composition, limitant potentiellement du même coup son recyclage.

Face aux difficultés liées à la gestion des compositions lors du recyclage, de nouvelles stratégies de conception d'alliages (choix des compositions) prenant en compte la fin de vie du matériau peuvent être proposées.

Tout d'abord, intensifier les études thermodynamiques et cinétiques sur les alliages multi-composants pourra aider à préciser l'influence de l'accumulation d'impuretés dans les alliages lors des cycles de recyclage sur les propriétés. On pourra ensuite adapter à la fois la conception et les possibles utilisations d'alliages pollués. Ainsi, de nouvelles compositions qui auraient une faible tenue au recyclage, à cause d'une grande sensibilité aux impuretés, pourraient être délaissées au profit de compositions plus tolérantes.

Afin d'éviter la perte des éléments d'alliages lors du recyclage (section 2.3.2), en plus des approches d'amélioration du tri des alliages, des lignes directrices de conception d'alliage pourraient être proposées, de manière à limiter l'utilisation d'éléments d'alliage qui ne peuvent pas être récupérés par des méthodes extractives avant un éventuel recyclage en boucle ouverte [68].

Une réduction du nombre de compositions existantes pourrait également être envisagée. En effet, plus de 250 alliages d'aluminium sont commercialisés, dont 65 qui sont couramment utilisés [69]. Le secteur automobile utilise à lui seul plus de 35 alliages d'aluminium de corroyage, auxquels s'ajoutent des alliages de fonderie [40]. Limiter le nombre de compositions utilisées faciliterait donc leur tri, et un éventuel recyclage en boucle fermée, via la diminution du nombre de lignes de refusion des alliages pour leur recyclage.

Une proposition pour faire baisser la quantité d'alliages industriels est de proposer des « uni-alliages », également appelés alliages « inter-familles ». Définis par une composition recouvrant deux- ou plus - familles d'alliages d'aluminium, ces alliages « multi-usages » peuvent de fait remplacer l'utilisation de plusieurs compositions en une seule, tout en présentant les avantages de chaque famille. Par exemple, les alliages AlMg(Mn) (famille 5xxx) sont performants pour la mise en forme mais ont une dureté relativement faible, à cause de l'impossibilité d'obtenir du durcissement par précipitation, tandis que les alliages AlZnMg(Cu)

(famille 7xxx) ou AlCuMg (famille 2xxx) sont d'excellents candidats pour atteindre une grande résistance mécanique. La conception d'alliages à mi-chemin entre les deux familles 5xxx/2xxx ou 5xxx/7xxx a donc permis de proposer des compositions combinant la formabilité et la résistance mécanique [70]. Cette stratégie a également été mise en place industriellement, avec la conception d'un uni-alliage 6xxx/7xxx pour le secteur automobile [71]. Cependant, pour certaines applications comme la cannette de boisson, aujourd'hui composée d'un alliage 5xxx pour le couvercle et d'un alliage 3xxx pour le corps, le remplacement de deux compositions par une seule ne se traduit pas par des gains environnementaux [45]. Ainsi, la stratégie des « uni-alliages » ne sera bénéfique que si 1) elle n'introduit pas de nouvelles compositions venant s'ajouter au catalogue existant, mais remplace plusieurs compositions existantes par une seule, et 2) l'étude totale des gains environnementaux confirme une amélioration. Ce second point doit prendre en compte une grande quantité de paramètres, comme les méthodes de tri actuelles, qui peuvent être révisées en fonction des améliorations technologiques.

Les stratégies développées ci-dessus reposent sur l'optimisation de la composition. Une dernière pourrait donc être de jouer plutôt sur l'optimisation microstructurale, afin de proposer des alliages aux propriétés ajustables : une unique composition pourrait avoir, grâce à des traitements thermo-mécaniques, de nombreuses microstructures, menant à des propriétés multiples [11]. Ces stratégies sont particulièrement efficaces pour l'optimisation des propriétés mécaniques [11], et ont l'avantage de pouvoir refondre tous les alliages aux microstructures optimisées ensemble, car ils ne correspondent qu'à une seule composition.

Tableau 1 : liste des pistes proposées pour limiter l'impact environnemental de la production d'alliages d'aluminium.

Objectif	Mesures	Levier d'action
AMÉLIORER LE RECYCLAGE		
Augmenter le taux de collecte des déchets	<ul style="list-style-type: none"> - Simplifier les consignes - Communication 	Evolution socio-économique
Améliorer le tri des familles de matériaux	<ul style="list-style-type: none"> - Généraliser l'utilisation des meilleures techniques (pyrolyse, overband) 	Investissement financier
Trier les différentes familles d'alliages d'Al	<ul style="list-style-type: none"> - Déployer les nouvelles techniques de tri (LIBS, SFX) 	Investissement financier
Diminuer le taux d'impuretés	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser de nouvelles techniques de traitement du métal liquide 	R & D
Diminuer la consommation d'énergie du recyclage	<ul style="list-style-type: none"> - Optimiser les fours de refusion - Développer le recyclage par voie solide 	Investissement financier R&D
Limiter le sous-cyclage et la dilution	<ul style="list-style-type: none"> - Concevoir des nuances plus tolérantes aux impuretés - Réduire le nombre de nuances d'alliages utilisées 	R&D Evolution socio-économique
DIMINUER LES BESOINS EN ALLIAGES D'ALUMINIUM		
Améliorer les performances des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> - Optimiser les paramètres des procédés - Nouveaux procédés 	R & D
Diminuer les déchets de fabrication	<ul style="list-style-type: none"> - Simplifier les formes des pièces - Nouveaux procédés 	R & D
Appliquer les principes de l'économie circulaire	<ul style="list-style-type: none"> - Ré-utiliser, réparer - Eco-conception des produits 	Evolution socio-économique R&D

R&D : recherche et développement ; Evolution socio-économique : évolution des modes de consommation, du modèle économique, de la législation

3.2. Diminuer les besoins en aluminium

On a vu qu'actuellement, le recyclage de l'aluminium présentait des limites techniques (gestion complexe des éléments d'alliages) et économiques (méthodes de tri avancées coûteuses). Des voies d'amélioration ont été proposées (section 3.1). Mais même si toutes ces améliorations étaient mises en œuvre et que l'on atteignait un taux de recyclage de 100 % (ce qui semble peu réaliste), tant que les besoins en aluminium seront croissants, il sera nécessaire de produire de l'aluminium primaire et ce, de manière croissante [72]. C'est la limite structurelle du recyclage. Restreindre les besoins en aluminium et, plus globalement, en matériaux est donc indispensable. Dans cette optique, plusieurs approches sont proposées.

3.2.1. Améliorer les performances des matériaux

La première approche consiste à poursuivre l'amélioration des performances des alliages d'aluminium. Par exemple, en augmentant la résistance à la corrosion, la durée de vie du matériau sera augmentée. En augmentant les propriétés mécaniques spécifiques, c'est-à-dire rapportées à la densité, la masse de matériau nécessaire pour résister à une contrainte mécanique donnée est diminuée. Dans les deux cas, le besoin en

matériau est diminué. Au début du 20^{ème} siècle, le durcissement structural par vieillissement est découvert dans les alliages d'aluminium et donne lieu à un premier alliage industriel, le Duralumin [73]. Depuis, l'amélioration des performances se poursuit grâce au contrôle du procédé, en particulier les traitements thermiques, et de la composition chimique. Cela a mené, entre autres, à une augmentation du nombre et de la concentration des solutés. Ainsi, les alliages Al-Li de 3^{ème} génération en contiennent plus d'une dizaine [74]. Un contrôle plus strict des impuretés dans les alliages de la série 2000 est également préconisé pour limiter la quantité d'intermétalliques et améliorer la ténacité [74]. Par ailleurs, pour s'adapter au plus près du cahier des charges de chaque composant, un très grand nombre d'alliages, de composition différente, a été développé. Cette augmentation de la complexité chimique est très efficace pour améliorer les performances mais limite la recyclabilité (sections 2.3.2 et 3.1.4).

Pour surmonter ce conflit, les efforts doivent se concentrer sur la maîtrise du procédé et limiter les modifications de composition. Pour cela, on peut affiner encore le contrôle des traitements thermiques et la compréhension des modifications de la microstructure qu'ils induisent. Ainsi récemment, un traitement de mise en solution à plusieurs étapes a été proposé pour les alliages de la famille 7000 [75]. Par ailleurs, dernièrement, l'utilisation de techniques de caractérisation de pointe telles que la sonde atomique tomographique, a éclairé les étapes de dissolution et re-précipitation lors des traitements RRA (Retrogression and Re-Ageing) [76]. De manière plus exploratoire, des procédés innovants sont également testés. Ainsi l'ECAP (Equal Channel Angular Pressing) ou le HPT (High Pressure Torsion) induisent une déformation plastique et une nanostructuration du matériau, avec en particulier une forte diminution de la taille de grains. La résistance mécanique mais également la conductivité électrique et la résistance à la corrosion peuvent ainsi être améliorées [77]. Ces techniques sont pour le moment coûteuses et limitées aux produits de faible dimension.

Enfin, il faut souligner que l'impact in fine de l'amélioration des performances d'un matériau sur la consommation totale de ce matériau peut être limité ou annulé par l'effet rebond, comme cela a été le cas dans l'industrie automobile (voir encadré).

Encadré 6 : l'effet rebond dans l'industrie automobile

La notion d'effet rebond a d'abord été introduite dans le domaine de la consommation d'énergie [78] pour décrire l'augmentation inattendue de la consommation totale d'énergie suite à des améliorations de l'efficacité énergétique. Ce phénomène peut être observé dans d'autres domaines. Ainsi, dans le domaine de l'automobile, de nombreux programmes de R&D ont permis d'améliorer les performances des matériaux, en particulier de structure, mais aussi le design avec pour objectif de diminuer le poids des véhicules. Néanmoins, le poids moyen d'une voiture neuve française était de 950 kg en 1990 et a atteint 1300 kg en 2007 pour ensuite se stabiliser [79]. Ces progrès technologiques réels ont été contrebalancés par des évolutions de fonctionnalité des véhicules (capacité, confort, sécurité, marketing intense ...) [80].

3.2.2. Diminuer les déchets de fabrication

Plus de 40 % de l'aluminium liquide produit n'est jamais intégré dans un produit final mais devient, à une des étapes du procédé, un déchet de fabrication [10] (section 1.1). Ces déchets sont largement recyclés mais si toutes ces pertes étaient évitées, les émissions de GES dues à la production d'aluminium seraient diminuées de 7 %, ce qui est considérable. La transformation du produit intermédiaire (lingot, feuille) dans la forme finale souhaitée, par exemple par emboutissage ou usinage, est une des étapes générant beaucoup de déchets, et ce d'autant plus que cette forme finale est complexe. Ainsi le taux de déchets de fabrication est supérieur à 90 % pour les panneaux en aluminium des ailes d'avion [10].

La première piste d'amélioration consiste à améliorer la tessellation, autrement dit la manière de décomposer le produit intermédiaire en parties découpées. Pour cela, il faut intégrer cette contrainte dès la conception du produit final et éventuellement simplifier les formes de certains composants. Néanmoins, une forme complexe peut être le résultat d'une optimisation pour minimiser la masse nécessaire pour supporter des contraintes. Selon les situations, un compromis sera donc à trouver entre minimisation de la masse du produit final et des déchets de fabrication. La deuxième piste consiste à couler le métal liquide dans une forme plus proche du produit final. Pour cela, des procédés innovants tels que la coulée directe dans un moule ou la fabrication additive, sont nécessaires [1]. La fabrication additive est déjà appliquée avec succès aux alliages Al-Si mais les alliages d'aluminium à haute résistance mécanique obtenus par fabrication additive présentent une ductilité encore trop faible [81]. Pour le moment, un compromis est donc à trouver entre les performances moindres obtenues avec ces nouveaux procédés et la diminution des déchets de fabrication. Des analyses de cycle de vie complètes permettraient d'identifier les situations dans lesquelles il est pertinent de choisir ces procédés [82]. Enfin, il faut souligner que ces procédés sont encore peu matures et présentent donc des coûts plus élevés et des rythmes de production plus faibles que les procédés existants [1].

3.2.3. Appliquer les principes de l'économie circulaire

Un des principes de l'économie circulaire est d'optimiser le rendement des ressources. Pour les produits manufacturés, il faut pour cela (1) les réparer et prolonger leur durée de vie, (2) les ré-utiliser et redistribuer, (3) les rénover/réuser et, en dernier lieu, (4) les recycler [83]. En appliquant plus largement les points (1) à (3), les besoins en aluminium primaire et secondaire seront nettement diminués. Un alliage d'aluminium est défectueux, en tant que matériau, s'il a rompu ou s'il est corrodé ou encore si sa conductivité électrique a diminué. Or, environ 40 % des produits contenant de l'aluminium sont jetés parce que leurs propriétés sont inférieures par rapport aux nouveaux produits ou parce qu'ils ne sont plus désirés ou adaptés [1]. Pour les 60 % qui sont jetés parce que le produit est défectueux, plusieurs composants sont souvent encore fonctionnels et même si le composant contenant l'aluminium est défectueux l'alliage d'aluminium lui-même ne l'est pas toujours. Autrement dit, dans de nombreux cas, le matériau est toujours fonctionnel et pourrait être ré-utilisé sans être recyclé.

De manière générale, la transition d'une économie linéaire vers une économie circulaire nécessite des changements importants au niveau de la conception des produits pour favoriser la réparation et le démontage, du choix des matériaux et en particulier de leur durabilité pour permettre de les ré-utiliser mais aussi du modèle économique et de la législation.

À retenir

- Pour faire face à l'augmentation de la production totale d'aluminium et de la part du recyclage, il sera primordial d'améliorer le recyclage
- Il existe des solutions basées sur des évolutions socio-économiques, des investissements financiers ou de la R&D
- La R&D permettra de développer le traitement du métal liquide, le recyclage par voie solide et la conception d'alliages tolérants aux impuretés.
- Le recyclage ne suffira pas et il est également important de diminuer les besoins globaux en aluminium.

4. Conclusion

Le recyclage de l'aluminium a un impact environnemental drastiquement plus faible que la production à partir de minerai. En effet, l'énergie consommée et les gaz à effet de serre émis par la production d'aluminium recyclé représente seulement 10 % et 5 % de ceux induits par la production de l'aluminium primaire.

Les taux de recyclage de l'aluminium, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de matière recyclée et celle de déchets, sont élevés mais néanmoins variables selon les secteurs et les pays. Par exemple, en France, le taux de recyclage est supérieur à 90 % dans le bâtiment mais inférieur à 50 % pour les emballages. Le taux d'incorporation de l'aluminium, c'est-à-dire la quantité de matière recyclée par rapport au flux total produit, est de 30 % au niveau mondial. Cela indique que la production d'aluminium à partir de minerai reste très importante, autrement dit les besoins globaux en aluminium sont plus importants que la quantité recyclée disponible.

Après la collecte, le tri des déchets de fin de vie permet de séparer l'aluminium des autres familles de matériaux (acier, plastiques, verre ...). Néanmoins, les très nombreux alliages d'aluminium, de compositions différentes, restent mélangés. Ils sont recyclés ensemble dans un four de refusion. A cause des propriétés physico-chimiques de l'aluminium, il est quasiment impossible d'enlever les impuretés du bain d'aluminium fondu, ce qui rend le contrôle de la composition des alliages recyclés problématique. Deux stratégies sont donc utilisées : (1) la dilution qui consiste à ajouter de l'aluminium pur, issu du minerai, (2) le sous-cyclage qui consiste à tolérer les impuretés et à utiliser l'alliage recyclé pour une application moins exigeante.

Les scénarios pour le futur suggèrent une augmentation de la production totale d'aluminium ainsi qu'une part de plus en plus importante du recyclage. Il sera donc primordial d'améliorer le recyclage. De nombreuses voies existent. Certaines nécessitent des évolutions socio-économiques (réduction du nombre de nuances d'alliages). D'autres reposent sur un investissement financier (généralisation des meilleures pratiques, déploiement de nouvelles techniques de tri). La R&D pourra développer le traitement du métal liquide, le recyclage par voie solide et la conception d'alliages tolérants aux impuretés. Mais tant que les besoins en aluminium seront croissants, le recyclage ne suffira pas et la production d'aluminium issu du minerai sera nécessaire. Il est donc également important de diminuer les besoins globaux en aluminium.

5. Glossaire

Affinage (refining) : il concerne tous les autres déchets. Lors de la refusion, des ajustements importants de la composition sont parfois réalisés.

Alliage d'aluminium (aluminum alloy) : mélange du métal pur (ie : l'aluminium) avec d'autres éléments, ajoutés en petite quantité pour renforcer les propriétés

Aluminium primaire et secondaire (primary and secondary aluminum) : l'aluminium primaire est produit à partir de minerai tandis que l'aluminium secondaire est issu du recyclage.

Alliage de corroyage ou de fonderie (wrought or cast alloy) : les alliages de corroyages sont mis en forme par des procédés d'extrusion, de laminage ou encore de tréfilage tandis que les alliages de fonderie son mis en forme par coulée dans un moule. Les alliages de fonderie sont plus concentrés en éléments d'alliages que ceux de corroyage.

CO₂, e : CO₂ équivalent, permet de prendre en compte les autres gaz à effet de serre, ainsi que leur pouvoir réchauffant, converti en « équivalent CO₂ ».

Déchets de fabrication et de fin de vie (pre-consumer and post-consumer scrap) : les déchets de fabrication sont générés à toutes les étapes de la production du matériau. Ils n'ont donc jamais été utilisés en tant que produits. Les déchets de fin de vie sont issus des produits qui ont été jetés, après utilisation.

Gaz à effet de serre (GES) (greenhouse gas (GHG)) : gaz, tels que CO₂ ou CH₄, qui absorbe et réémet une partie du rayonnement émis par la surface de la terre. Ces gaz contribuent ainsi au réchauffement de l'atmosphère.

Recyclage direct (remelting) : il consiste à refondre des déchets de composition homogène et nécessite très peu d'ajustement de composition.

Recyclage par voie solide (solid state recycling) : cette méthode évite l'étape de refusion et compacte les copeaux en restant en phase solide et en appliquant une déformation plastique importante, par exemple par extrusion à chaud.

Sous-cyclage (downcycling or downgrading) : produire un matériau recyclé avec des propriétés et donc une valeur plus faible que celles des déchets dont il est issu.

Récupération et recyclage de l'aluminium. Stratégie

Mathilde Laurent-Brocq, Institut de Chimie et des Matériaux de Paris Est (ICMPE), UPEC-CNRS, 2 rue Henri Dunant, 94320, Thiais, France

Lola Liliensten, Institut de Recherche de Chimie Paris, Chimie ParisTech, CNRS, PSL Research University, Paris, 75005, France

6. Références bibliographiques

- [1] ALLWOOD (J. M.) et CULLEN (J. M.) – *Sustainable materials: with both eyes open* – UIT Cambridge (2012)
- [2] SAEVARSDOTTIR (G.), KVANDE (H.) et WELCH (B. J.) – *Aluminum Production in the Times of Climate Change: The Global Challenge to Reduce the Carbon Footprint and Prevent Carbon Leakage* – In JOM – p. 296-308 (2020) – 10.1007/s11837-019-03918-6
- [3] *International Aluminum Institute* – [s.d.].
- [4] ADEME – *Plans de transition sectoriels - Aluminium* – (2021)
- [5] SVERDRUP (H. U.), RAGNARSDOTTIR (K. V.) et KOCA (D.) – *Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves* – In Resources, Conservation and Recycling – p. 139-154 (2015) – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.008>
- [6] JOHNSON (J.), HARPER (E. M.), LIFSET (R.) et GRAEDEL (T. E.) – *Dining at the Periodic Table: Metals Concentrations as They Relate to Recycling* – In Environmental Science & Technology – American Chemical Society p. 1759-1765 (2007) – 10.1021/es060736h
- [7] CULLEN (J. M.) et ALLWOOD (J. M.) – *Mapping the Global Flow of Aluminum: From Liquid Aluminum to End-Use Goods* – In Environmental Science & Technology – American Chemical Society p. 3057-3064 (2013) – 10.1021/es304256s
- [8] DORLOT (J.-M.) et BAÏLON (J.-P.) – *Des matériaux* – Presses internationales Polytechnique (2002)
- [9] CHRISTIAN (V.) – *Métallurgie de l'aluminium* – In Techniques de l'ingénieur Métaux et alliages non ferreux – Editions T.I. (2010) – <https://doi.org/10.51257/a-v1-m4663>
- [10] MILFORD (R. L.), ALLWOOD (J. M.) et CULLEN (J. M.) – *Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO2 abatement in the steel and aluminium sectors* – In Resources, Conservation and Recycling – p. 1185-1195 (2011) – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.021>
- [11] RAABE (D.), PONGE (D.), UGGOWITZER (P. J.), ROSCHER (M.), PAOLANTONIO (M.), LIU (C.), ANTREKOWITSCH (H.), et al. – *Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of « dirty » alloys* – In Progress in Materials Science – p. 100947 (2022) – <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>
- [12] BERTRAM (M.), RAMKUMAR (S.), RECHBERGER (H.), ROMBACH (G.), BAYLISS (C.), MARTCHEK (K. J.), MÜLLER (D. B.), et al. – *A regionally-linked, dynamic material flow modelling tool for rolled, extruded and cast aluminium products* – In Resources, Conservation and Recycling – p. 48-69 (2017) – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.05.014>
- [13] *International Aluminium* – [s.d.].
- [14] ADEME, DEVAUZE (C.), KOITE (A.), CHRETIEN (A.) et MONIER (V.) – *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.* – (2021)
- [15] ADEME – *Emballages ménagers : données 2020 (infographie)* – (2020)
- [16] BOIN (U.) – *Collection of aluminium from buildings in Europe* – (2004)
- [17] ADEME – *Automobiles : données 2019 - infographie* – (2019)
- [18] ASHBY (M. F.) – *Materials and the Environment Eco-informed Material Choice* – Elsevier (2012) –

<https://doi.org/10.1016/C2010-0-66554-0>

- [19] GUPTA (R. C.) – *Chapter 4.2 - Energy Resources, Its Role and Use in Metallurgical Industries* – Elsevier – p. 1425-1458 (2014) – <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00034-1>
- [20] <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-intensity-primary-aluminium/> – [s.d.].
- [21] *Statista* – [s.d.].
- [22] *Worldsteel* – [s.d.].
- [23] *statista* – [s.d.].
- [24] *Plastics Europe* – [s.d.].
- [25] CUSHMAN-ROISIN (B.) et CREMONINI (B.) – *Data, statistics, and useful numbers for environmental sustainability - Bringing the numbers to life* – Elsevier (2021)
- [26] GUTOWSKI (T. G.), ALLWOOD (J. M.), HERRMANN (C.) et SAHNI (S.) – *A Global Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling* – In *Annual Review of Environment and Resources* – Annual Reviews p. 81-106 (2013) – 10.1146/annurev-environ-041112-110510
- [27] ADEME – *Plan de transition sectoriel - Acier* – (2021)
- [28] <https://recycling.world-aluminium.org/home/> – [s.d.].
- [29] GROS (B.) – *Recyclage des biens d'équipement contenant du fer Aspects généraux* – In *Techniques de l'ingénieur Élaboration et recyclage des métaux* – Editions T.I. (2016) – <https://doi.org/10.51257/a-v2-m7059>
- [30] *Discussion personnelle avec H. Rabotin, directeur général de Derichebourg Environnement, mars 2022* – [s.d.].
- [31] HERBULOT (F.) – *Récupération et recyclage de l'aluminium. Matières premières* – In *Techniques de l'ingénieur Élaboration et recyclage des métaux* – Editions T.I. (2001) – <https://doi.org/10.51257/a-v1-m2346>
- [32] CAPUZZI (S.) et TIMELLI (G.) – *Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review* – (2018) – 10.3390/met8040249
- [33] GAUSTAD (G.), OLIVETTI (E.) et KIRCHAIN (R.) – *Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies* – In *Resources, Conservation and Recycling* – p. 79-87 (2012) – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>
- [34] *Visite de la fonderie d'Hydro (Lucé, France), mai 2022. Discussion personnelle avec S. Kret, responsable de la production* – [s.d.].
- [35] HERBULOT (F.) – *Récupération et recyclage de l'aluminium. Fusion et mise en forme* – In *Techniques de l'ingénieur Élaboration et recyclage des métaux* – Editions T.I. (2001) – <https://doi.org/10.51257/a-v1-m2347>
- [36] SCHMITZ (C.) – *Handbook of aluminium recycling: Fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processing, plant design* – Vulkan-Verlag (2006)
- [37] MAHINROOSTA (M.) et ALLAHVERDI (A.) – *Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review* – In *Journal of Environmental Management* – p. 452-468 (2018) – <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.068>
- [38] NAKAJIMA (K.), TAKEDA (O.), MIKI (T.), MATSUBAE (K.), NAKAMURA (S.) et NAGASAKA (T.) – *Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling* – In *Environmental Science & Technology* – American Chemical Society p. 5594-5600 (2010) – 10.1021/es9038769
- [39] NIERO (M.) et OLSEN (S. I.) – *Circular economy: To be or not to be in a closed product loop? A Life Cycle Assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements* – In *Resources, Conservation and Recycling* – p. 18-31 (2016) – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.023>
- [40] AROWOSOLA (A.) et GAUSTAD (G.) – *Estimating increasing diversity and dissipative loss of critical metals in the aluminum automotive sector* – In *Resources, Conservation and Recycling* – p. 104382

- (2019) – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.016>
- [41] VAN DEN EYNDE (S.), BRACQUENÉ (E.), DIAZ-ROMERO (D.), ZAPLANA (I.), ENGELEN (B.), DUFLOU (J. R.) et PEETERS (J. R.) – *Forecasting global aluminium flows to demonstrate the need for improved sorting and recycling methods* – In Waste Management – p. 231-240 (2022) – <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.019>
- [42] *How2recycle - labels* – [s.d.].
- [43] *Citeo - simplification du tri* – [s.d.].
- [44] AUJOLLET (Y.), DOUARD (P.), GIRARDOT (P.-E.) et LEGAIT (B.) – *Les filières de recyclage de déchets en France métropolitaine* – (2020)
- [45] STOTZ (P. M.), NIERO (M.), BEY (N.) et PARASKEVAS (D.) – *Environmental screening of novel technologies to increase material circularity: A case study on aluminium cans* – In Resources, Conservation and Recycling – p. 96-106 (2017) – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.013>
- [46] COMBE (M.) – *Une nouvelle filière de recyclage pour les petits aluminiums* – In Techniques de l'ingénieur – (2017)
- [47] SCHULTZ (P. B.) et WYSS (R. K.) – *Color sorting aluminum alloys for recycling-Part II* – In Plating and surface finishing – [Winter Park, Fl., etc., American Electroplaters' Society] p. 62-65 (2000)
- [48] *Intelligent robots that sort metal waste* – [s.d.].
- [49] KAMAVARAM (V.), MANTHA (D.) et REDDY (R. G.) – *Electrorefining of aluminum alloy in ionic liquids at low temperatures* – In Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy – p. 43-58 (2003) – 10.2298/JMMB0302043K
- [50] HUAN (S.), WANG (Y.), PENG (J.), DI (Y.), LI (B.) et ZHANG (L.) – *Recovery of aluminum from waste aluminum alloy by low-temperature molten salt electrolysis* – In Minerals Engineering – p. 106386 (2020) – <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106386>
- [51] GNATKO (M.), LI (C.), ARNOLD (A.) et FRIEDRICH (B.) – *Purification of Aluminium Cast Alloy Melts through Precipitation of Fe-Containing Intermetallic Compounds* – (2018) – 10.3390/met8100796
- [52] WAN (B.), CHEN (W.), LU (T.), LIU (F.), JIANG (Z.) et MAO (M.) – *Review of solid state recycling of aluminum chips* – In Resources, Conservation and Recycling – p. 37-47 (2017) – <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.004>
- [53] GRONOSTAJSKI (J.), MARCINIAK (H.) et MATUSZAK (A.) – *New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling* – In Journal of Materials Processing Technology – p. 34-39 (2000) – [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00634-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00634-8)
- [54] DUFLOU (J. R.), TEKKAYA (A. E.), HAASE (M.), WELO (T.), VANMEENSEL (K.), KELLENS (K.), DEWULF (W.), et al. – *Environmental assessment of solid state recycling routes for aluminium alloys: Can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling?* – In CIRP Annals – p. 37-40 (2015) – <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.051>
- [55] KOLPAK (F.), SCHULZE (A.), DAHNKE (C.) et TEKKAYA (A. E.) – *Predicting weld-quality in direct hot extrusion of aluminium chips* – In Journal of Materials Processing Technology – p. 116294 (2019) – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116294>
- [56] GÜLEY (V.), GÜZEL (A.), JÄGER (A.), BEN KHALIFA (N.), TEKKAYA (A. E.) et MISIOLEK (W. Z.) – *Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion* – In Materials Science and Engineering: A – p. 163-175 (2013) – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.010>
- [57] SCHULZE (A.), HERING (O.) et TEKKAYA (A. E.) – *Production and Subsequent Forming of Chip-Based Aluminium Sheets Without Remelting* – In International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology – p. 1035-1048 (2022) – 10.1007/s40684-021-00395-8
- [58] CHIBA (R.), NAKAMURA (T.) et KURODA (M.) – *Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling* – In Journal of Materials Processing Technology – p. 1878-1887 (2011) – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.06.010>
- [59] HAASE (M.), BEN KHALIFA (N.), TEKKAYA (A. E.) et MISIOLEK (W. Z.) – *Improving mechanical properties of chip-based aluminum extrudates by integrated extrusion and equal channel angular pressing*

- (iECAP) – In Materials Science and Engineering: A – p. 194-204 (2012) – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.081>
- [60] CUI (J. R.), GUO (W.), ROVEN (H. J.), WANG (Q. D.), CHEN (Y. J.) et PENG (T.) – *Recycling of Aluminum Scrap by Severe Plastic Deformation* – In Materials Science Forum – Trans Tech Publications Ltd p. 1177-1182 (2011) – 10.4028/www.scientific.net/MSF.667-669.1177
- [61] HOSSEINI (A.), AZARSA (E.), DAVOODI (B.) et ARDAHANI (Y.) – *Effect of process parameters on the physical properties of wires produced by friction extrusion method* – In International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJAET) – p. 592-597 (2012)
- [62] TANG (W.) et REYNOLDS (A. P.) – *Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips* – In Journal of Materials Processing Technology – p. 2231-2237 (2010) – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.010>
- [63] WIDERØE (F.), WELO (T.) et VESTØL (H.) – *A new testing machine to determine the behaviour of aluminium granulate under combined pressure and shear* – In International Journal of Material Forming – p. 199-208 (2013) – 10.1007/s12289-011-1070-7
- [64] ABDEL AAL (M. I.), YOO YOON (E.) et SEOP KIM (H.) – *Recycling of AlSi8Cu3 alloy chips via high pressure torsion* – In Materials Science and Engineering: A – p. 121-128 (2013) – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.045>
- [65] PARASKEVAS (D.), VANMEENSEL (K.), VLEUGELS (J.), DEWULF (W.), DENG (Y.) et DUFLOU (J. R.) – *Spark Plasma Sintering As a Solid-State Recycling Technique: The Case of Aluminum Alloy Scrap Consolidation* – p. 5664-5687 (2014) – 10.3390/ma7085664
- [66] WANG (Y.), DENG (Y.), ZHANG (J.), ZHAO (J.) et ZHANG (Y.) – *Eliminating microstructural defects and improving the mechanical and fatigue properties of an Al–Mg–Si alloy extrusion by optimising homogenisation* – In Materials Science and Engineering: A – p. 138188 (2019) – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138188>
- [67] ZHANG (L.), GAO (J.), DAMOAH (L. N. W.) et ROBERTSON (D. G.) – *Removal of Iron From Aluminum: A Review* – In Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review – Taylor & Francis p. 99-157 (2012) – 10.1080/08827508.2010.542211
- [68] LILENSTEN (L.) et LAURENT-BROCQ (M.) – *Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages métalliques* – In Les matériaux au coeur des enjeux stratégiques post covid - Livre blanc – (2021)
- [69] RAABE (D.), TASAN (C. C.) et OLIVETTI (E. A.) – *Strategies for improving the sustainability of structural metals* – In Nature – p. 64-74 (2019) – 10.1038/s41586-019-1702-5
- [70] STEMPER (L.), TUNES (M. A.), TOSONE (R.), UGGOWITZER (P. J.) et POGATSCHER (S.) – *On the potential of aluminum crossover alloys* – In Progress in Materials Science – p. 100873 (2022) – <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100873>
- [71] *Hydro launches high strength alloy that will help carmakers improve safety and sustainability* – [s.d.]
- [72] GROSSE (F.) – *Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières* – In Annales des Mines - Responsabilité et environnement – ESKA p. 58-63 (2014) – 10.3917/re.076.0058
- [73] DUBOST (B.) et SAINFORT (P.) – *Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium* – In Techniques de l'ingénieur Étude et propriétés des métaux – Editions T.I. (1991) – <https://doi.org/10.51257/a-v1-m240>
- [74] DURSUN (T.) et SOUTIS (C.) – *Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys* – In Materials & Design (1980-2015) – p. 862-871 (2014) – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>
- [75] ROMETSCH (P. A.), ZHANG (Y.) et KNIGHT (S.) – *Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys—Some recent developments* – In Transactions of Nonferrous Metals Society of China – p. 2003-2017 (2014) – [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63306-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63306-9)
- [76] MARLAUD (T.), DESCHAMPS (A.), BLEY (F.), LEFEBVRE (W.) et BAROUX (B.) – *Evolution of precipitate microstructures during the retrogression and re-ageing heat treatment of an Al–Zn–Mg–Cu alloy* – In Acta Materialia – p. 4814-4826 (2010) – <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.05.017>
- [77] SABIROV (I.), MURASHKIN (M. Y.) et VALIEV (R. Z.) – *Nanostructured aluminium alloys produced by*

- severe plastic deformation: New horizons in development* – In Materials Science and Engineering: A – p. 1-24 (2013) – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.020>
- [78] HERTWICH (E. G.) – *Consumption and the Rebound Effect: An Industrial Ecology Perspective* – In Journal of Industrial Ecology – John Wiley & Sons, Ltd p. 85-98 (2005) – <https://doi.org/10.1162/1088198054084635>
- [79] <https://carlabelling.ademe.fr/chiffrescles/r/evolutionMasseMoyenne> – [s.d.].
- [80] MACKENZIE (D.), ZOEPF (S.) et HEYWOOD (J.) – *Determinants of US passenger car weight* – In International Journal of Vehicle Design – Inderscience Publishers p. 73-93 (2014) – 10.1504/IJVD.2014.060066
- [81] ABULKHAIR (N. T.), SIMONELLI (M.), PARRY (L.), ASHCROFT (I.), TUCK (C.) et HAGUE (R.) – *3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting* – In Progress in Materials Science – p. 100578 (2019) – <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>
- [82] FRAZIER (W. E.) – *Metal Additive Manufacturing: A Review* – In Journal of Materials Engineering and Performance – p. 1917-1928 (2014) – 10.1007/s11665-014-0958-z
- [83] <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/fr/economie-circulaire/ressources> – [s.d.].

7. À lire également dans nos bases

BARGEL (C.) - *Métallurgie de l'aluminium*. [M 4663 V1]. (2010)

GROS (B.) - *Recyclage des biens d'équipement contenant du fer - Aspects généraux*. [M7059 v2] (2016).

HERBULOT (F.) - *Récupération et recyclage de l'aluminium. Matières premières*. [M2346 v1] (2001)

HERBULOT (F.) - *Récupération et recyclage de l'aluminium. Fusion et mise en forme*. [M2347 v1] (2001)

DUBOST (B.) et SAINFORT (P.) - *Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium*. [M 240] (1991).

8. Annuaire

8.1. Acteurs industriels français du cycle de vie de l'aluminium (liste non exhaustive)

Constellium – transformation et recyclage : sites de production (63 502 Issoire, 49 460 Montreuil-Juigné, 68600 Biesheim et 21 702 Nuits-Saint-Georges) ; centre de R&D (38 341 Voreppe).

Hydro – transformation et recyclage : sites de production (81 450 Albi, 36 000 Châteauroux, 28 112 Lucé, 83 480 Puget sur Argens)

Derichebourg environnement – collecte, tri et affinage de déchets (dont aluminium) : sites de collecte et tri répartis sur toute la France ; sites d'affinage (59 465 Lomme, 14 700 Falaise, 55 190 Pagny sur Meuse, 58700 Premery)

Suez recyclage et valorisation des déchets – collecte et tri des déchets (dont aluminium) : sites de collecte et tri répartis sur toute la France.

Affimet – recyclage affinage : 60204 Compiègne

Baudelet environnement – collecte et tri

Soremo – recyclage affinage : 52000 Chaumont

Loiret Affinage – recyclage affinage : 45210 Fontenay sur Loing

Affinerie d'Anjou – recyclage affinage : 49490 Linières-Bouton

Sadillek – recyclage affinage : 03390 Montmarault

Aluminium France - Fédération professionnelle française <https://www.aluminium.fr/> , Espace Hamelin, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75116 PARIS

8.2. Laboratoires académiques français étudiant le recyclage de l'aluminium

Institut de Chimie et des Matériaux de Paris-Est, Université Paris Est Créteil – CNRS (UMR 7182), 2-8, rue Henri-Dunant, F-94320 Thiais.

Institut de Recherche de Chimie Paris, Chimie ParisTech, CNRS, PSL Research University (UMR 8247), Paris, 75005, France

France

Centre des Matériaux, Mines ParisTech -CNRS (UMR 7633), F-91003 Evry, France

SIMAP, Grenoble IMP – UGA (UMR 5266) - CNRS, 38402 Saint-Martin d'Hères