



Recyclage

Julie Bureau
Maurice Duval

7 décembre 2017

RECYCLAGE

Auteurs : Julie Bureau et Maurice Duval

1. Introduction

On peut se demander pourquoi il faut investir dans le recyclage l'aluminium, et la réponse est simple. Parce que c'est économique et écologique ! En effet, la production de l'aluminium secondaire requière jusqu'à 95 % moins d'énergie que l'aluminium primaire et permet la réduction des émissions en CO₂ d'au moins 100 Mt par an (évalué, en 2015, sur la base d'une production de 30 Mt d'aluminium secondaire). Parmi les nombreux avantages qu'offrent les propriétés de l'aluminium, l'un d'eux est que l'aluminium peut être recyclé presque indéfiniment sans perte de qualité. Actuellement environ 30% de l'aluminium produit mondialement provient du recyclage et 75 % de l'aluminium produit depuis 1888 est encore en service. La figure 1 présente les taux de collectes estimés d'aluminium en 2015 selon les différents types de produits de consommation récupérés à l'échelle mondiale [1].

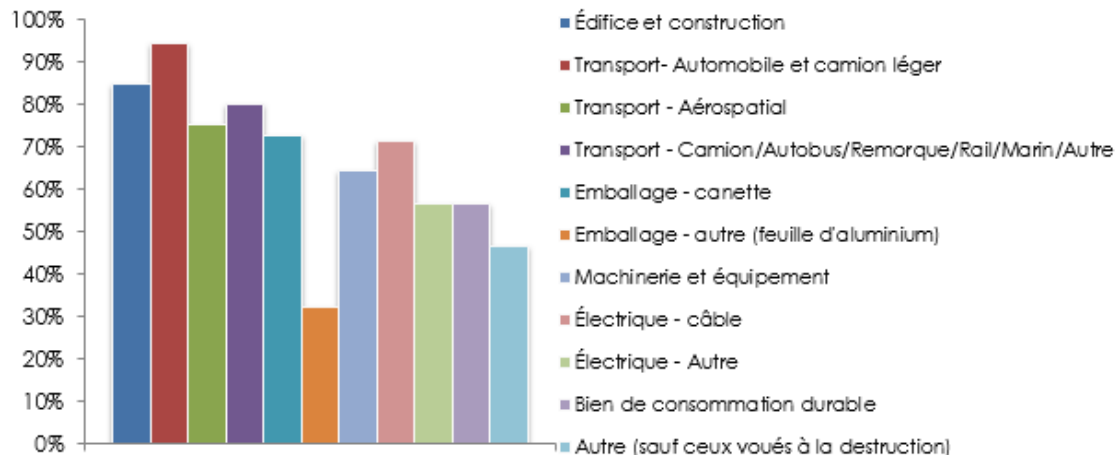


Figure 1. Taux de collecte mondiale estimés d'aluminium selon les différents secteurs (2015) [1].

2. Avantage de l'aluminium

Les nombreuses propriétés de l'aluminium en font un métal de choix dans bien des domaines d'applications. En plus d'être recyclable, l'aluminium possède une masse volumique environ trois fois inférieure à celle de l'acier. L'utilisation de l'aluminium dans la fabrication des véhicules les rend donc plus légers et économes en carburant. Sous forme de film (emballages) et tôle mince (canettes, boîtes) l'aluminium est parfaitement adapté à la conservation des aliments en raison sa stabilité chimique et son effet de barrière protectrice contre l'humidité. L'aluminium est ductile et très malléable, même à basse température, ce qui permet d'en obtenir des formes variées (papier, tôles, extrusions en le déformant mécaniquement). Sous forme de fils, il est utilisé pur pour produire des conducteurs électriques. Ces fils peuvent potentiellement transmettre 50 %

plus d'énergie comparativement au cuivre dans lignes de transmission électrique. L'aluminium est aussi un excellent conducteur thermique d'où son utilisation en chaudronnerie, dans les systèmes d'échange de chaleur et les radiateurs. De surcroît, la capacité naturelle de l'aluminium à former une mince couche d'oxyde à sa surface le protège de la corrosion (navires, toitures). Enfin, lorsqu'il est combiné à d'autres métaux, l'aluminium devient dur et résistant ce qui en fait un matériau de choix pour des applications structurales [1, 2].

3. Portrait mondial

Grâce à ces nombreux avantages, l'aluminium est présent dans plusieurs secteurs de marché (Figure 2). En Amérique du Nord, environ 36 % de l'aluminium produit est utilisé dans le transport, ~ 22 % pour l'emballage, ~ 13 % pour les édifices et ~ 17 % pour les biens d'équipement et les produits électriques. Comme mentionné dans l'introduction, environ 75 % de l'aluminium produit depuis 1888 jusqu'en 2010, soit plus de 700 Mt sont en cours d'utilisation. La figure 3 présente la répartition de l'aluminium mondial produit antérieurement et toujours en cours d'utilisation. Globalement, environ 35 % de l'aluminium produit se retrouve dans les édifices, un peu moins de 30 % dans le transport, près de 30 % pour la machinerie et les applications électriques et tout juste 1 % pour les produits d'emballage. L'écart entre les pourcentages d'aluminium des marchés finaux et en cours d'utilisation s'explique par la durée de la phase d'utilisation de l'aluminium selon les secteurs. À titre d'exemple, il faut environ 60 jours après la collecte du recyclage pour retrouver sur les étalages une canette de liqueur. Tandis que le temps de résidence se situe entre 10 et 20 ans pour les biens de consommation durables, entre 20 et 30 ans pour le transport et potentiellement plus de 50 ans pour les édifices. De sortes, que l'aluminium contenu dans les bâtiments érigés en 1970 est toujours en utilisation et ne sera pas disponible avant quelques années [1].

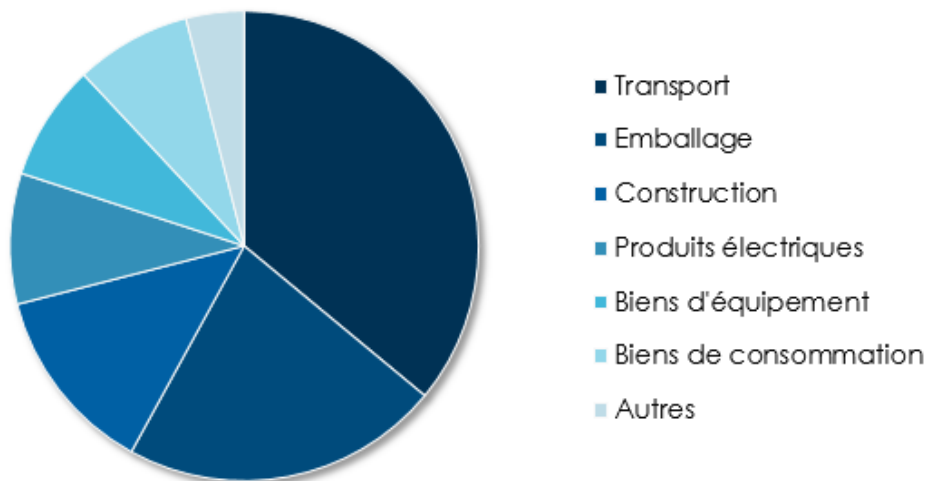


Figure 2. Marchés finaux de l'aluminium en Amérique du Nord (année 2013) [1].

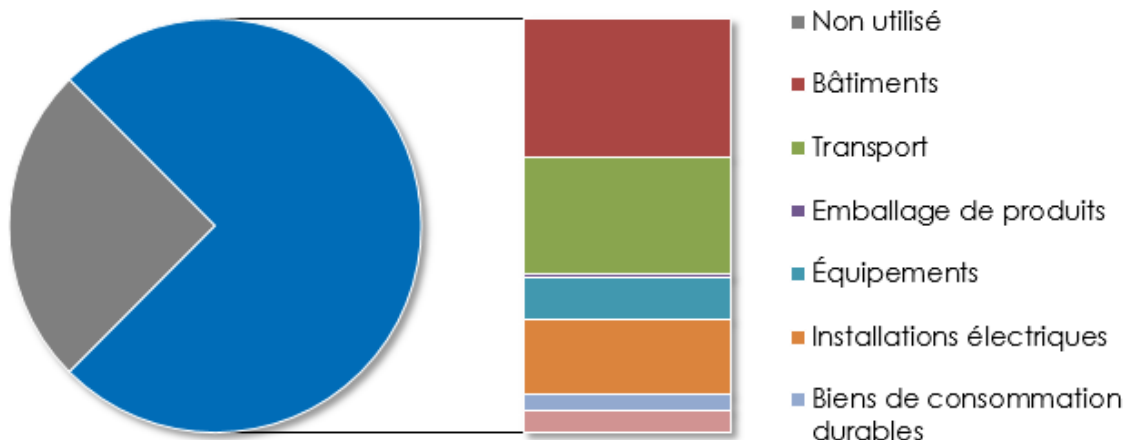


Figure 3. Répartition de l'aluminium produit depuis 1888 jusqu'en 2010 [1].

4. Procédé de recyclage

Le recyclage de l'aluminium débute avec la fin de vie de l'aluminium primaire ou toutes formes de rebuts d'aluminium. La figure 4 présente les différentes étapes des procédés de recyclage de l'aluminium. Le cycle du recyclage de l'aluminium est amorcé par la collecte de la matière première, soit : les rebuts neufs, les vieux rebuts, l'écume et le résidu salé. L'aluminium recueilli est rarement pur, on le retrouve plutôt sous forme d'alliages. La matière première est par la suite triée selon le type d'alliages pour être envoyée soit au procédé de raffinage ou de refonte. Le métal sera ensuite préparé mécaniquement et soumis à différents procédés métallurgiques jusqu'à la transformation en produits semi-finis destinés à la fabrication de produits finis. Une fois les biens de consommation utilisés, ils pourront être réutilisés à un autre usage que celui prévu ou encore être récupérés pour retourner dans le cycle aluminium – produit fini – aluminium [1, 4, 6, 8, 10-13].

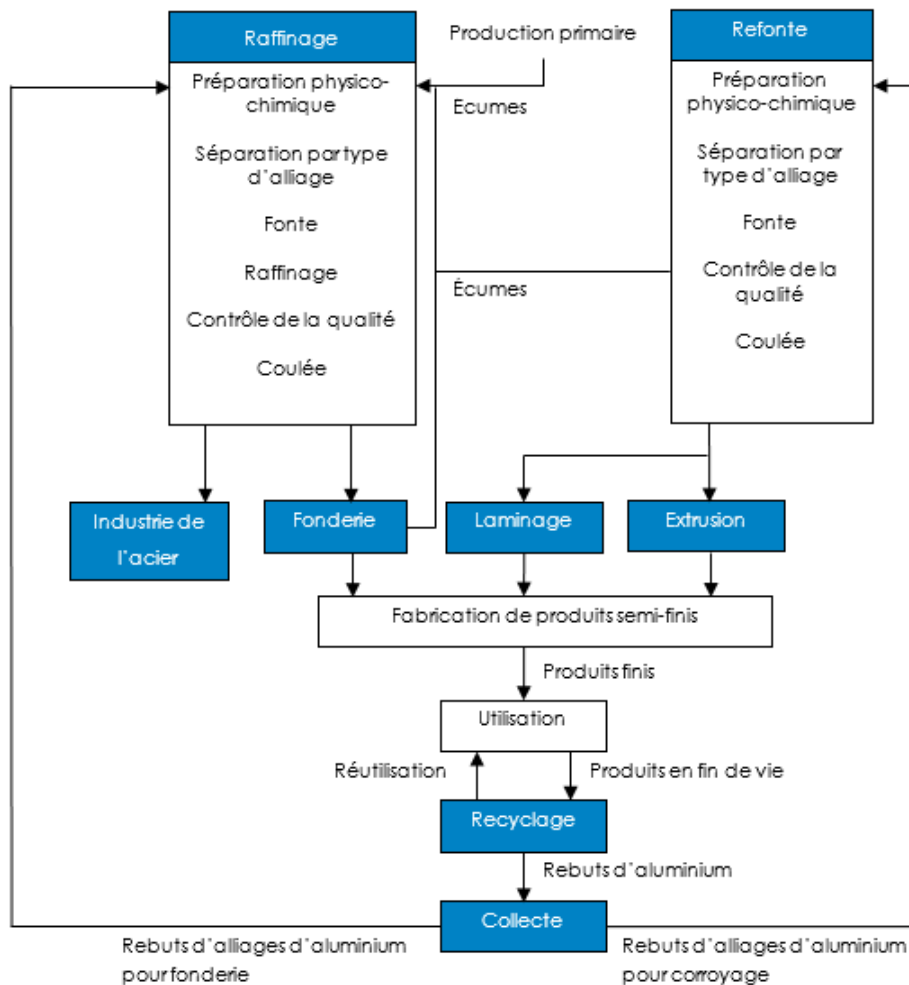


Figure 4. Schéma descriptif des différentes boucles du cycle aluminium – produit fini – aluminium.

5. Collecte

Étant donné que l'aluminium peut être recyclé à l'infini, il s'avère primordial de récupérer efficacement le métal. Une des avenues pour favoriser la récupération est liée au développement d'équipements simples facilitant la collecte et le premier triage de l'aluminium à recycler. L'optimisation de la collecte (trier et espace occupé) permet de diminuer les coûts de transport afin d'acheminer le type d'aluminium récupéré à l'entreprise appropriée le plus simplement et rapidement possible. Le métal recueilli sera ensuite acheminé vers les récupérateurs en fonction de leur provenance et du type d'aluminium. Le métal récupéré constitue la matière première de la transformation secondaire et ne doit pas contenir trop de contaminants. La majorité de l'aluminium récupéré provient des rebuts neufs et vieux. Cependant, la récupération de l'écume et des résidus salés directement en usine est aussi un moyen suffisamment rentable d'augmenter les taux de récupération selon les technologies développées. La

figure 5 illustre la destination d'usage de l'aluminium récupéré selon ses différentes provenances [1, 4, 6, 8, 10].

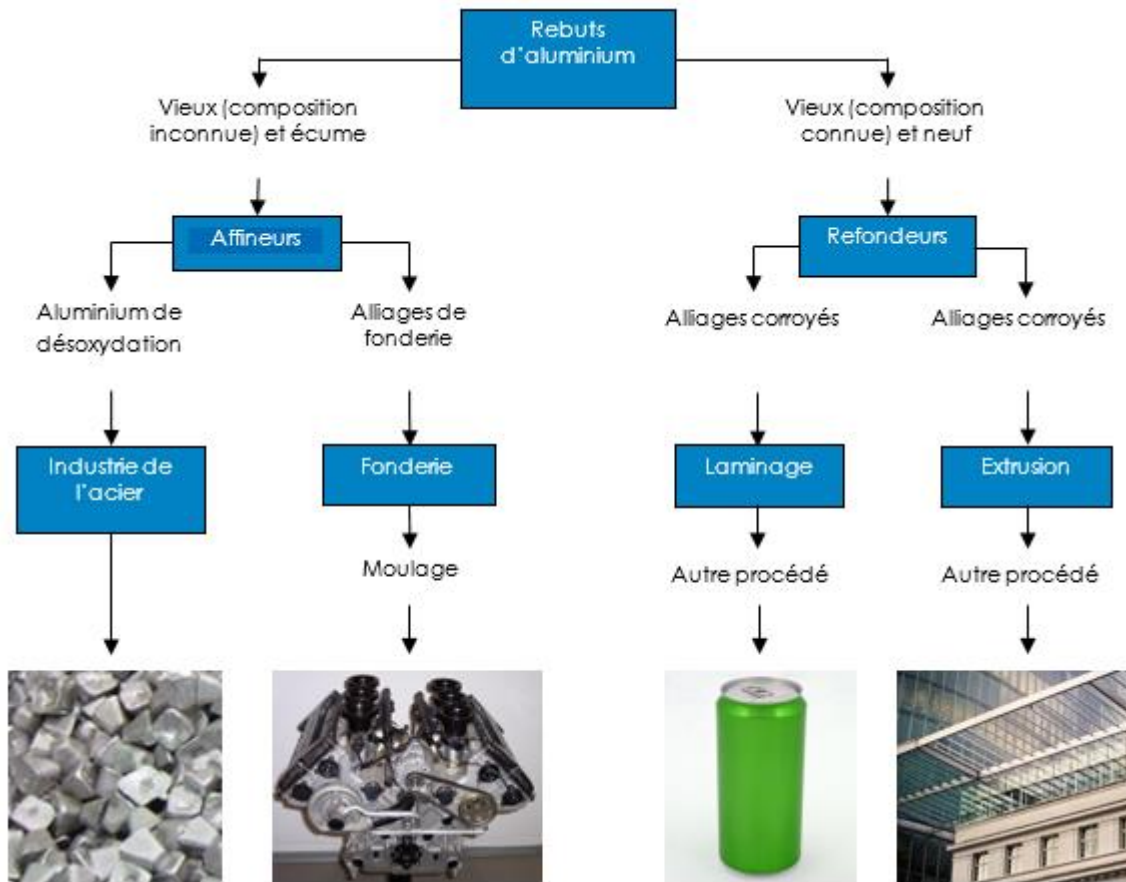


Figure 5. Chaîne de valeur de l'industrie du recyclage de l'aluminium.

Certains produits d'aluminium, principalement les alliages corroyés, tel que les cannettes sont recyclées en boucle fermée. Sachant que l'aluminium est rarement utilisé pur, l'éventail des alliages d'aluminium récupérés est considérable. Lorsqu'un volume important d'une même origine est suffisant, il devient avantageux de le recycler en boucle fermée. Par exemple, les cannettes et leurs rebuts neufs serviront à générer de nouvelles feuilles d'aluminium destinées à la fabrication de nouvelles cannettes. La boucle fermée diminue le nombre de traitements de l'aluminium récupéré ce qui a pour effet de diminuer les coûts de production et la consommation énergétique [1, 8].

Dans le cas des autres rebuts d'aluminium de postconsommation, leur composition n'est pas suffisamment précise. Par conséquent, un raffinage de l'aluminium est nécessaire pour répondre aux standards de qualité des clients. À titre d'exemple, les rebuts d'aluminium de différents alliages issus d'un véhicule sont habituellement destinés aux alliages de fonderie et serviront à la fabrication des moteurs et boîtes de vitesses. Toutefois, avec l'augmentation de pièces provenant d'alliages corroyés de véhicule, il pourrait être rentable de les recycler

en boucle fermée [1, 8]. Enfin, une partie des matières récupérées, dont la teneur en fer est généralement plus élevée que les autres rebuts, est destinée à l'industrie de la fabrication de l'acier, l'aluminium de désoxydation. Les standards de qualité de l'aluminium de désoxydation sont généralement moins élevés que ceux de l'aluminium utilisé dans la fabrication de produits finis. Par conséquent, la composition des lots de rebuts employés à cette fin admet plus de tolérances [1, 6, 10, 13].

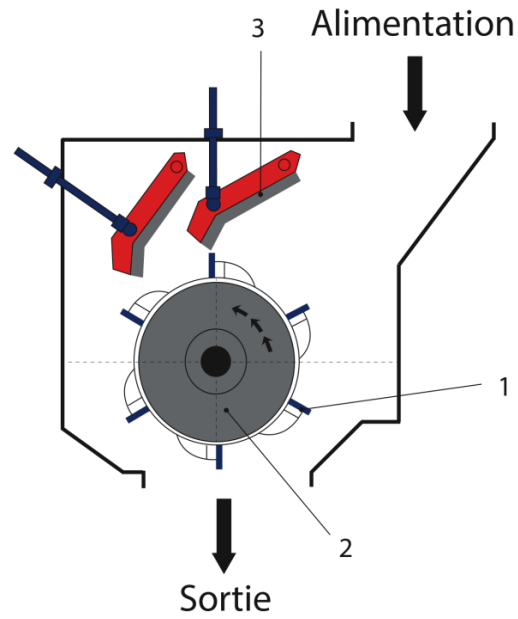
De fait, lorsque le volume n'est pas suffisant pour être rentable, le métal est dirigé vers les affineurs pour être mélangé. Une des tendances actuelles afin d'obtenir un aluminium recyclé à valeur ajoutée est le développement d'alliage dont la composition facilite leur récupération en boucle. En effet, la conception d'alliages destinés à plusieurs usages diminue le nombre d'alliages différents habituellement utilisés. Par conséquent, l'augmentation de la quantité utilisée d'un même alliage facilite sa récupération en boucle, comme dans le cas des cannettes. Essentiellement, la conception de ces alliages implique de resserrer la tolérance des éléments présents dans l'alliage afin que ce dernier soit compatible pour différents usages [10, 14].

6. Procédés de préparation au recyclage (physico-chimiques)

Une fois l'aluminium récupéré, le métal peut subir différentes préparations, telles que : un découpage ou un compactage, un broyage et une classification selon les distributions obtenues, un triage et enfin un traitement pour retirer un revêtement [1, 6, 10, 13].

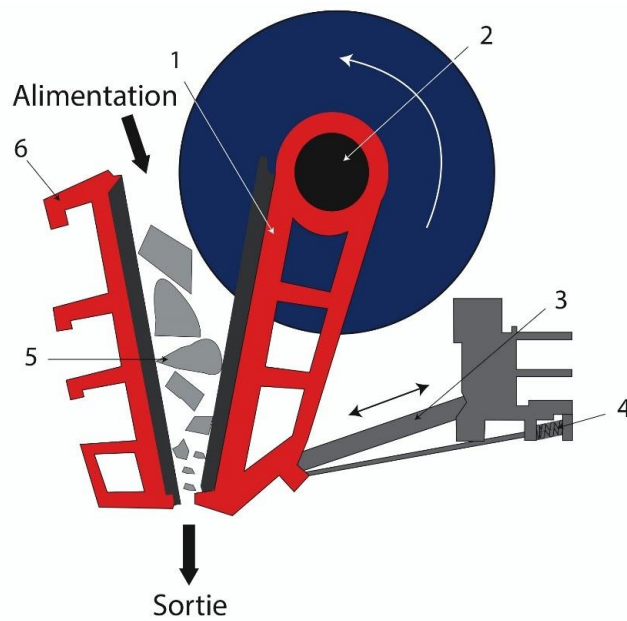
Le découpage ou le compactage sont d'abord utilisés lorsque la taille ou l'espace occupé par les rebuts sont considérés trop volumineux. Cette étape facilite la manutention et le transport des rebuts. Le découpage peut s'effectuer avec des cisailles : à guillotine, alligators ou rotatives. Tandis que le compactage est réalisé avec une presse à balles pour obtenir un ballot ayant la forme d'une boîte [1, 6, 10, 13].

L'étape de broyage est utilisée dans le procédé de récupération de l'écume et ses dérivés, et au aussi dans le processus de récupération des cannettes et des copeaux d'aluminium. Selon la taille des grains à obtenir et le type de matières premières, différents types d'équipement sont privilégiés. Le broyage peut être réalisé avec un concasseur à impact (Figure 6) ou à mâchoires (Figure 7), une déchiqueteuse (Figure 8) ou encore un broyeur à billes ou à marteaux (Figure 9). Les particules pourront ensuite être classées selon les distributions requises à l'aide d'un tamiseur vibrant ou un tambour à criblage (Figure 10) [1, 6, 10, 13].



1- Barre d'impact | 2- Rotor | 3- Plaque d'impact

Figure 6. Représentation schématique d'un concasseur à impact.



1- Mâchoire en mouvement | 2- Arbre excentrique | 3- Ajustement de la pression
4- Ressort | 5- Matière première | 6- Mâchoire fixe

Figure 7. Représentation schématique d'un concasseur à mâchoires.

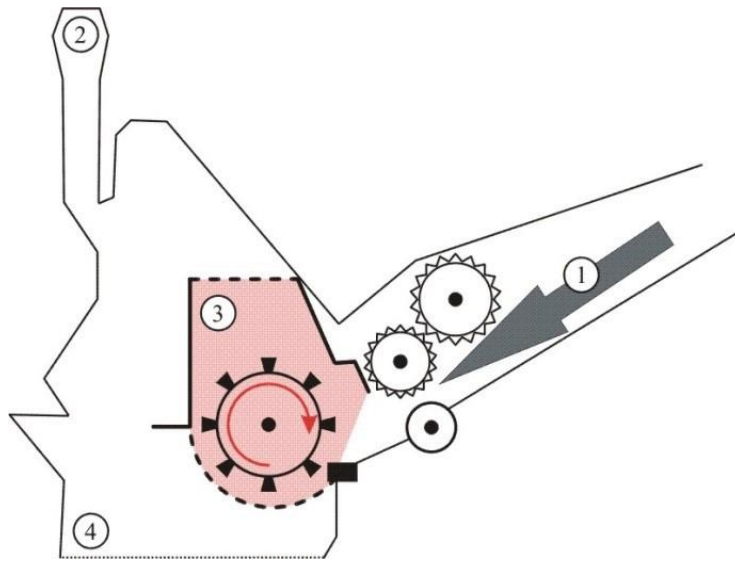
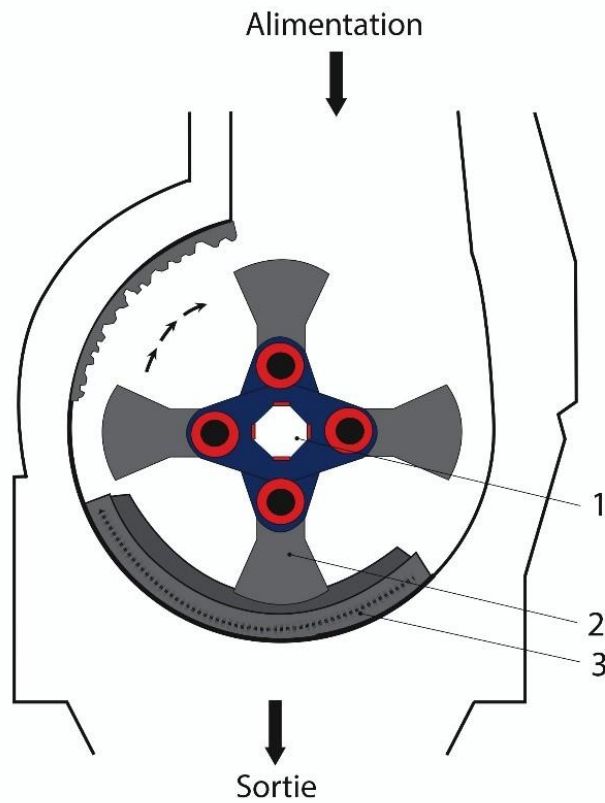


Figure 8. Représentation schématique d'une déchetuse - 1 : zone de chargement, 2 : échappement des poussières, 3 : zone de déchetage mécanique (couleur rouge) et 4 : décharge des particules.



1- Rotor | 2- Marteau | 3- Tamis

Figure 9. Représentation schématique d'un broyeur à marteaux.

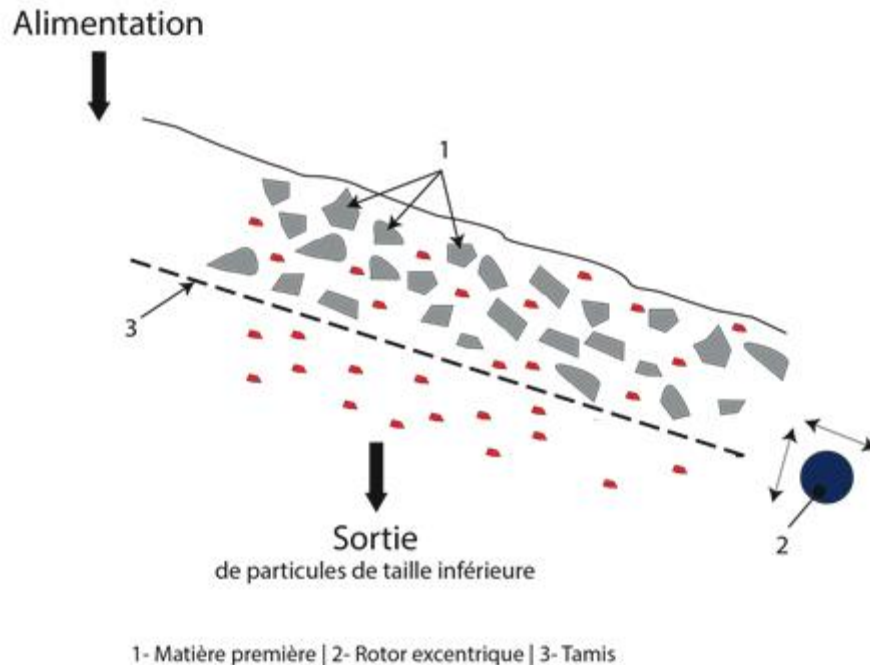
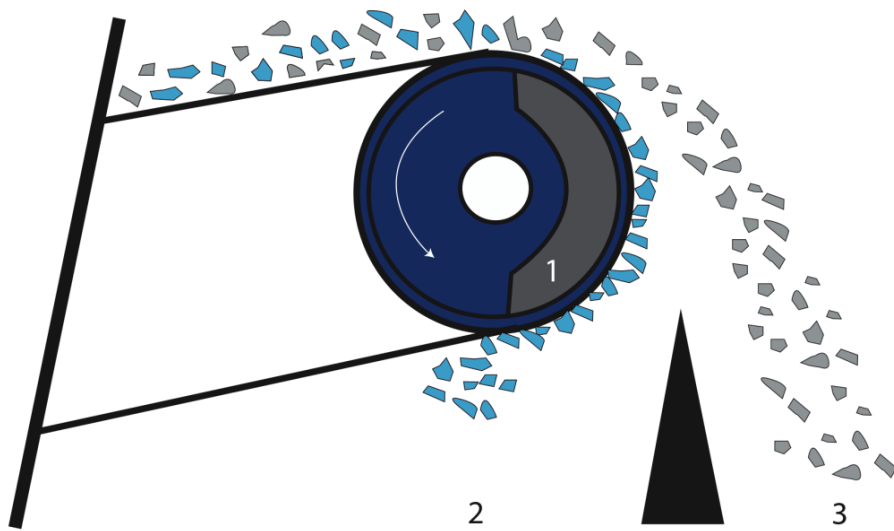


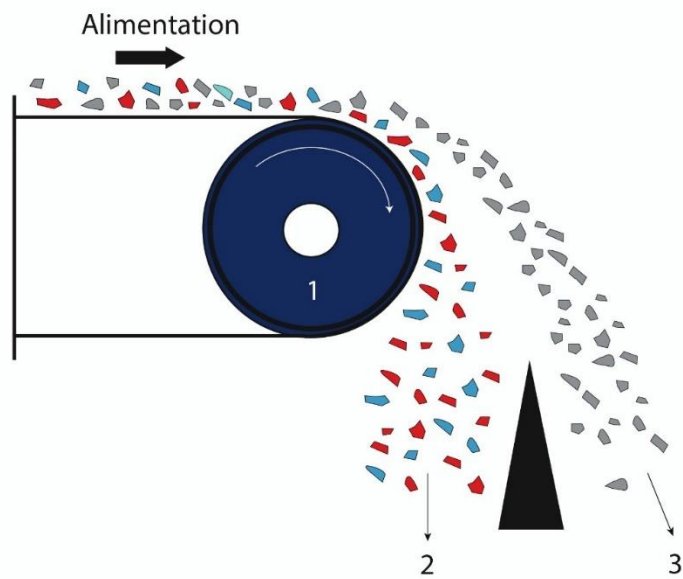
Figure 10. Représentation schématique du principe de tamisage.

Le processus de triage et l'élimination de revêtement permettent d'éliminer, selon les limites des techniques employées, tout ce qui n'est pas de l'aluminium et d'identifier les types d'alliages. Ce processus est tout particulièrement important afin d'obtenir un métal répondant aux standards des clients. De plus, la présence d'impuretés telles que des matières organiques peut nuire au procédé de fusion en diminuant son efficacité. Il est possible de séparer l'aluminium des autres constituants en fonction des propriétés physiques telles que la densité, la conductibilité électrique, le magnétisme ou la couleur (Figures 11, 12, 13, et 14). Voici quelques-uns des équipements utilisant des moyens physiques [1, 6, 10, 13]:

- Convoyeur à courroie combiné à la séparation à la main par des travailleurs ;
- Séparateur magnétique (basé sur le magnétisme) ;
- Séparateur à courant de Foucault (basé sur l'induction d'un magnétisme) ;
- Séparateur à flux d'air (basé sur la densité) ;
- Cyclone (basé sur la densité) ;
- Séparation des médias lourds à l'aide de bassin de flottaison (basé sur la densité) ;
- Séparateur analytique (basé sur la couleur) ;
- Séparateur électrostatique (basé sur la conductibilité électrique).



1- Aimant | 2- Métaux ferreux | 3- Métaux non ferreux
Figure 11. Représentation schématique d'un séparateur magnétique.



1- Rotor à courant de Foucault | 2- Matériel non métallique (Non affecté par le courant et retombe en raison de la gravité) | 3- Métaux non ferreux (repoussés par le courant induit et retombe en raison de la gravité)
Figure 12. Représentation schématique d'un séparateur à courant de Foucault.

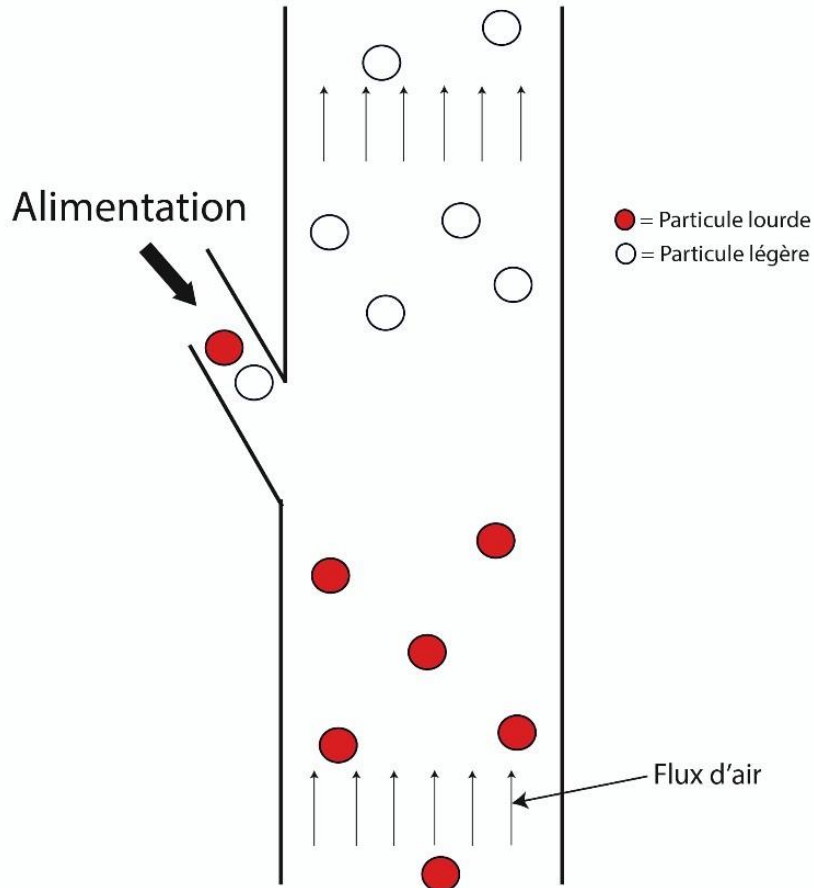


Figure 13. Représentation schématique d'un séparateur à flux d'air.

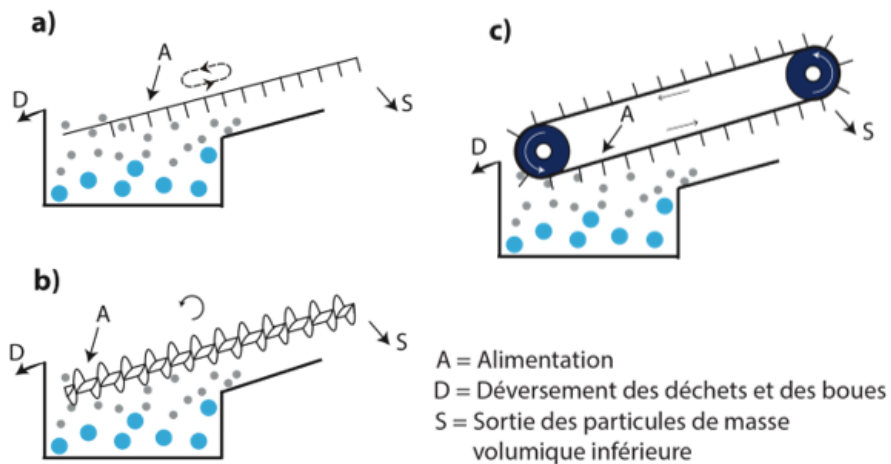


Figure 14. Représentation schématique de séparateurs des médias lourds à l'aide de bassin de flottaison.

Les méthodes de séparation chimique quant à elles évaluent la composition chimique de la matière. D'autres techniques existent telles que : la spectrométrie de fluorescence des rayons X et la spectroscopie à plasma induit par laser.

L'analyse de la composition chimique s'avère particulièrement intéressante afin d'identifier les alliages d'aluminium [1, 6, 10, 13].

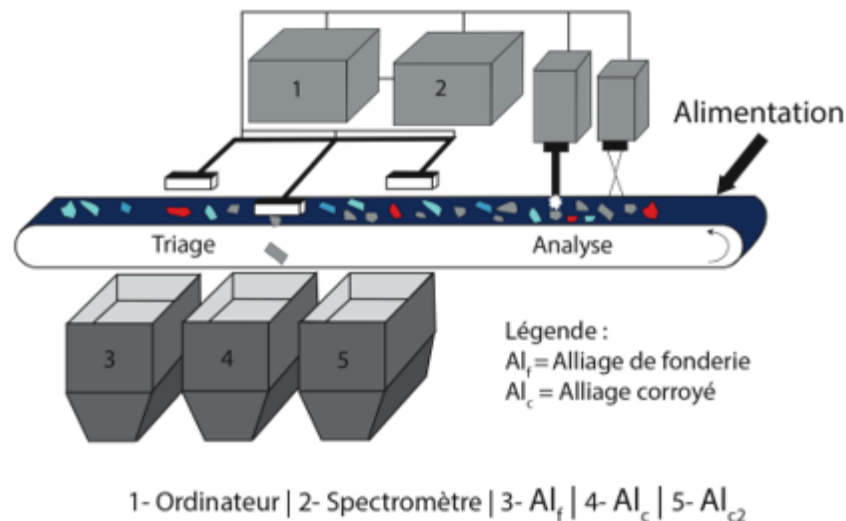


Figure 15. Représentation schématique du triage des alliages par analyse spectrométrique.

Enfin, tout contaminant doit être retiré au maximum pour ne pas nuire au procédé métallurgique ultérieur. La matière organique présente dans certains contaminants et les revêtements tels que les composés organiques de la peinture ou encore les résidus d'huile de coupe des copeaux doit être retirée. Cette matière est retirée par différents procédés de traitement thermique. En se décomposant, la matière organique entraîne la libération de matières organiques volatiles et autres composés pouvant nuire à l'environnement. De plus, le métal exposé à la chaleur et retiré de son revêtement protecteur est sujet à l'oxydation causant une perte de métal. Par ailleurs, la peinture peut contenir de la matière inorganique. Ces composés, en particulier l'oxyde de titane (TiO_2) ne peuvent être retirés par traitement thermique. Un décapage mécanique du métal permet dans une certaine mesure de retirer ces éléments présents [1, 6, 10, 13].

7. Procédé métallurgique

Une fois l'aluminium trié, il est nettoyé puis asséchés. Le métal doit être sec, car non seulement la présence d'eau nuit au procédé, mais elle représente un risque d'explosion lors de la refonte du métal. De plus, la présence d'eau contribue à la perte d'aluminium en formant de l'oxyde d'aluminium et de l'hydrogène [1, 6, 13]. Lorsque la préparation du métal est terminée, il peut être transféré au four de fusion. La quantité de métal chargé dans le four dépendra des besoins du client. Selon leur spécialisation, les recycleurs opteront pour une technologie adaptée à leur procédé parmi les différents fours de fusion existant. Les alliages de corroyage sont produits en utilisant des rebuts d'aluminium en boucle fermée. Les alliages de fonderie sont produits par les affineurs qui sélectionnent les lots d'aluminium récupérés selon les résultats d'analyses afin d'approcher autant que

possible les spécifications du client. L'aluminium est ensuite raffiné afin de correspondre aux standards du client. La composition de l'alliage est ajustée en ajoutant de l'aluminium recyclé provenant d'un autre lot, en ajoutant des éléments purs, des alliages mères ou encore de l'aluminium primaire. Toutefois, dépendant de la quantité d'ajouts autres que les rebuts, il est parfois difficile de rentabiliser certains lots d'aluminium. D'où l'importance de créer des alliages en considérant leur valeur ajoutée en vue de leur recyclage [1, 6, 13].

Au cours du procédé de fusion, l'aluminium fondu est sujet à l'oxydation, plus particulièrement au-dessus de 760-780 °C [6]. Lorsque la surface d'aluminium est exposée à l'air, le métal réagit pour se convertir en oxyde d'aluminium (Al_2O_3) ou nitrure d'aluminium (AlN). Plus les particules d'aluminium sont fines, plus la surface de contact est grande et par conséquent, plus les réactions d'oxydations sont favorisées. En plus, l'aluminium recyclé contient plusieurs autres éléments favorisant la réaction d'oxydation, dont le magnésium. Toutefois, le magnésium possède davantage d'affinité avec l'oxygène que l'aluminium. L'oxyde de magnésium formé se retrouve généralement dans l'écume. Bien que la perte à l'oxydation du magnésium soit parfois avantageuse selon les caractéristiques de l'alliage souhaité, celle de l'aluminium constitue une perte de rendement et donc une diminution des bénéfices [1, 6, 13].

Dans le but de favoriser l'efficacité du procédé de fusion, des additifs peuvent être ajoutés. Ces additifs ont pour objectif de protéger la surface du métal de l'oxydation, de réduire les impuretés et d'obtenir une distribution de grain fin nécessaire dans le cas de certains alliages de corroyage. La présence de gaz à la surface du métal, tel que : l'argon, le chlore, l'azote ou un mélange de ces gaz, contribue également à diminuer les réactions d'oxydation. En pratique les rebuts d'aluminium devraient être chargés aussi rapidement que possible dans le four de fusion afin de diminuer les échanges avec l'air. Les rebuts doivent être aussi nettoyés le mieux possible afin de diminuer la présence d'impuretés nuisant à l'efficacité du procédé. La quantité de carbonates ($CaCO_3$) et de silice (SiO_2) devrait être limitée autant que possible afin de ne pas nuire à l'action des additifs. [1, 6, 13]. Lorsque l'alliage est prêt, il est ensuite transféré au procédé de coulée pour façonner le métal en produit semi-fini. Selon le client et la qualité finale souhaitée, le métal pourra subir préalablement d'autres traitements, tels qu'un dégazage ou une filtration [1, 6, 13].

8. Traitement de l'écume

Le rebut semi-solide retiré à la surface de l'aluminium fondu (primaire et secondaire), nommé écume, contient de l'oxyde d'aluminium et une forte proportion d'aluminium. La récupération de l'aluminium contenu dans l'écume peut s'effectuer à chaud ou à froid [6, 13].

Le traitement à chaud doit s'effectuer immédiatement après avoir retiré l'écume du procédé. L'aluminium est récupéré soit par agitation ou pression. Lorsque l'écume subit une agitation, la couche d'oxyde à la surface de l'aluminium est

rompue permettant la coalescence du métal liquide et ultimement sa récupération. L'aluminium peut aussi être récupéré par pressage en utilisant une presse hydraulique qui permet de sortir le métal liquide de l'écume. Le traitement à chaud de l'écume, immédiatement après ramassage, offre l'avantage d'économiser l'énergie qui serait nécessaire pour réchauffer l'écume si l'aluminium qu'elle contient se solidifie. Si le procédé est effectué sans délai, alors la rapidité de l'intervention diminue l'oxydation, ce qui augmente le taux de récupération du métal. Toutefois, une synchronisation du traitement avec la récupération réalisée aux fours de fusion est essentielle [6, 13].

L'écume résiduelle ($\pm 5\%$) et celle qui n'est pas recyclée immédiatement doivent être refroidies afin de l'entreposer et diminuer l'oxydation de l'aluminium. Le traitement à froid nécessite généralement moins d'investissement de capital et une diminution des coûts en opération comparativement au traitement à chaud. Par contre, il en résulte une diminution du taux de récupération de l'aluminium et une augmentation des émissions nocives dans l'air. Afin de récupérer l'aluminium, l'écume solidifiée doit être préalablement broyée [13]. Plusieurs procédés ont vu le jour en vue de traiter les écumes résiduelles pour en extraire l'aluminium et des sous-produits à valeur ajoutée et respectueux de l'environnement. Un de ces sous-produits, le Noval (98% d'oxydes métalliques, principalement de l'alumine) qui combiné avec du carbonate de calcium pour produire de l'aluminate de calcium peut être utilisé dans l'affinage de l'acier et les ciments réfractaires [18].

9. Cycle de vie

Le cycle de vie de l'aluminium comprend la production de l'aluminium primaire, la transformation de produits semi-finis et finis, la phase de distribution et de commercialisation, l'utilisation et la fin de vie. Le cycle commence par l'extraction de la matière première, la bauxite, qui est par la suite raffinée. Le produit obtenu, l'alumine, est soumis au procédé électrolytique pour former l'aluminium primaire. L'aluminium est par la suite siphonné de la cuve d'électrolyse et transféré dans le four d'attente pour ensuite ajouter des métaux selon les alliages sélectionnés puis coulé en lingots. Le cycle se poursuit avec la transformation en produits semi-finis qui seront employés pour la fabrication de biens de consommation (produits finis). Le cycle est bouclé par la phase de distribution et de commercialisation, l'utilisation et la fin de vie. L'ensemble des intrants et des extrants associés au cycle de vie de l'aluminium primaire se doit d'être considéré dans le calcul des émissions totales directes et indirectes des gaz à effet de serre (GES). Le pointage obtenu correspond à l'empreinte carbone. Cependant, l'aluminium présente un avantage certain puisque ce dernier peut être recyclé pratiquement sans fin. En récupérant l'aluminium, un nouveau cycle de vie débute, celui de l'aluminium secondaire. La matière première est alors constituée de rebuts d'aluminium (neufs ou vieux). Selon le type d'aluminium recueilli, le métal sera attribué en fonction des biens de consommation à fabriquer. La figure 16 illustre le cycle de vie simplifié de l'aluminium [7, 9, 15, 16].

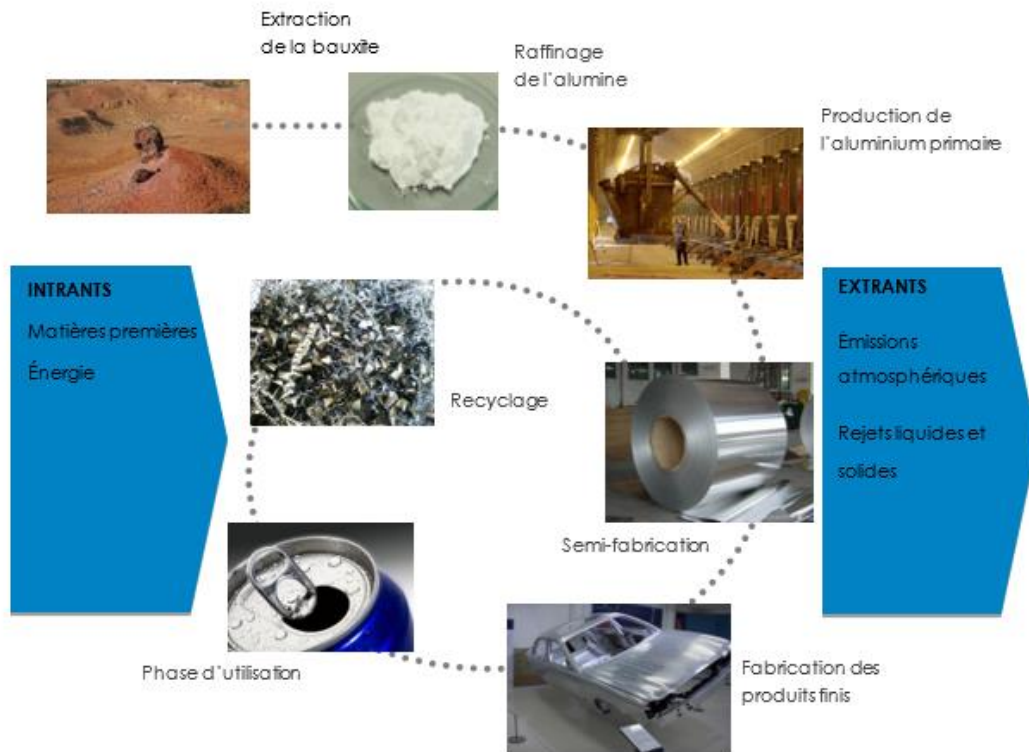


Figure 16. Cycle de vie de l'aluminium.

10. Impacts environnementaux de la production d'aluminium primaire et secondaire

Comme mentionnée dans l'introduction, l'énergie nécessaire à la fabrication de l'aluminium secondaire représente environ 5 % de l'énergie indispensable à la production d'aluminium primaire (figure 17) [1]. En Amérique du Nord, environ 138 GJ/ t. d'Al sont nécessaires à la production de l'aluminium primaire dont plus de 50 % proviennent d'énergie non renouvelable. Le **tableau 1** présente les facteurs d'émissions du cycle de vie de la production d'électricité selon la source d'énergie exploitée afin de générer l'électricité. Les combustibles fossiles, dont le charbon, possèdent les facteurs d'émission les plus élevés. À l'opposé, les énergies renouvelables, dont l'hydroélectricité, bénéficient de facteurs d'émissions nettement inférieurs aux combustibles fossiles [17].

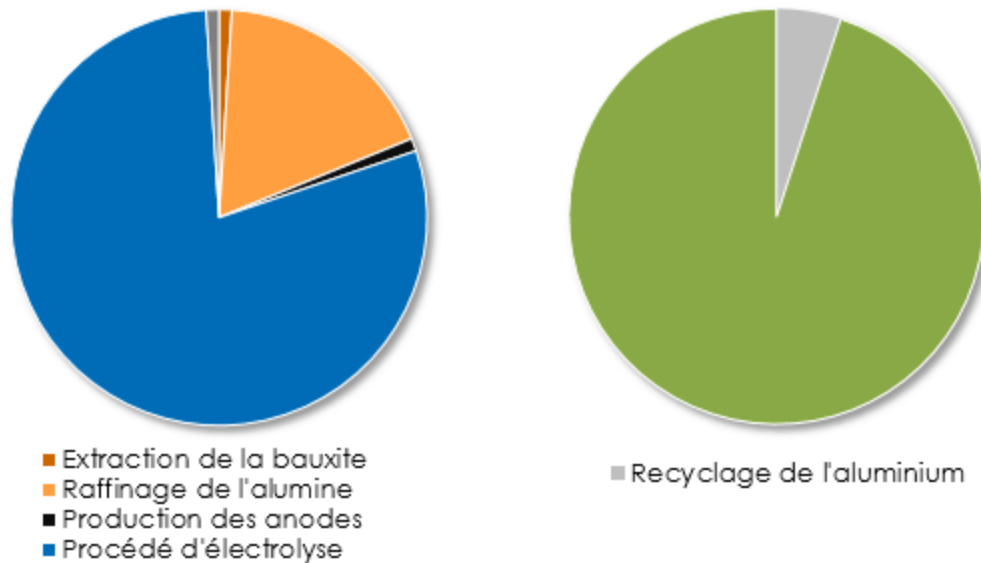


Figure 17. Répartition de l'énergie nécessaire au procédé pour la fabrication de l'aluminium a) primaire et b) secondaire [1].

Tableau 1 - Facteurs d'émission du cycle de vie pour la production d'électricité de différentes technologies [17].

Source d'énergie	CO ₂ -éq (kg/MWh)	NO _x (kg/MWh)	SO ₂ (kg/MWh)
Charbon	660–1050	0,3–3,9	0,03–6,7
Lignite	800–1300	0,2–1,7	0,6–7
Gaz naturel	380–1000	0,2–3,8	0,01–0,32
Essence	530–900	0,5–1,5	0,85–8
Énergie nucléaire	3–35	0,01–0,04	0,003–0,038
Biomasse	8,5–130	0,08–1,7	0,03–0,94
Hydroélectricité	2–20	0,004–0,06	0,001–0,03
Énergie solaire	13–190	0,15–0,40	0,12–0,29
Énergie éolienne	3–41	0,02–0,11	0,02–0,09

Par conséquent, la source d'énergie utilisée afin de produire l'électricité aura une influence directe sur les émissions polluantes et donc sur l'empreinte carbone. Toutefois, contrairement au producteur d'aluminium primaire, l'industrie de l'aluminium secondaire ne produit généralement pas leur énergie électrique. Les producteurs d'aluminium recyclé dépendent bien souvent des fournisseurs d'énergie de leur région [16]. Les figure 18 et 19 illustrent la répartition du potentiel de réchauffement planétaire selon les procédés impliqués dans la fabrication de l'aluminium primaire et secondaire en Amérique du Nord. Les tableau 2, 3 et 4 renferment des informations complémentaires concernant les différents indicateurs environnementaux associés à la production de l'aluminium

primaire et secondaire. En examinant ces données, il est possible de constater que les valeurs des indicateurs environnementaux associées à la production d'aluminium secondaire sont nettement moins importantes comparativement aux valeurs associées à la production d'aluminium primaire. Par conséquent, la fabrication de l'aluminium secondaire possède une meilleure empreinte carbone que celle de l'aluminium primaire et donc plus favorable pour l'environnement. L'avantage certain de l'aluminium secondaire prouve qu'il est essentiel de favoriser la collecte des rebuts d'aluminium et de se donner les moyens de le recycler efficacement.

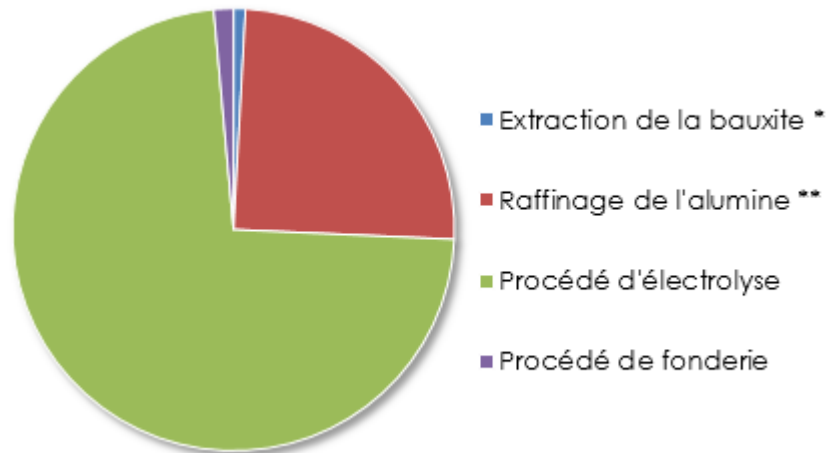


Figure 18. Répartition du potentiel de réchauffement planétaire selon les procédés impliqués dans la fabrication de l'aluminium primaire rapportés en Amérique du Nord (2013) [16].

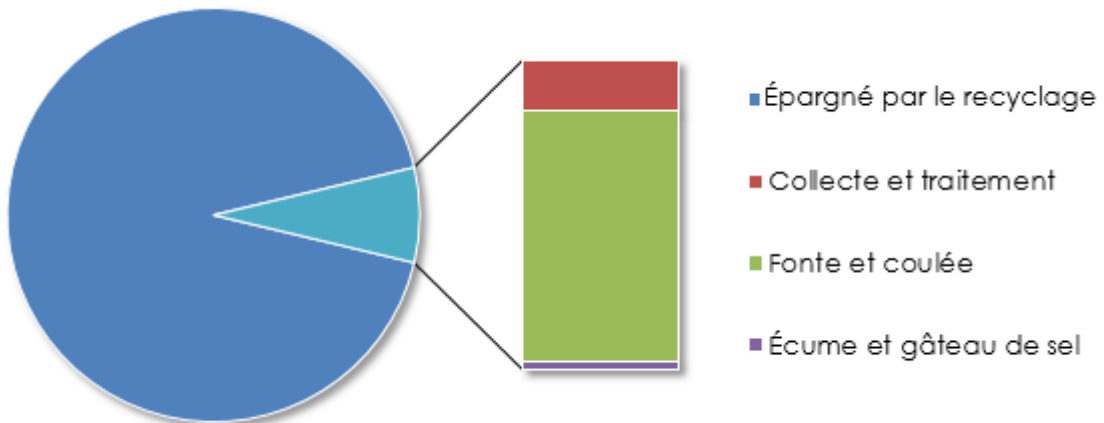


Figure 19. Répartition du potentiel de réchauffement planétaire selon les procédés impliqués dans la fabrication de l'aluminium secondaire rapportés en Amérique du Nord (2013) [16].

Tableau 2 - Indicateurs environnementaux selon les procédés impliqués dans la fabrication de l'aluminium primaire rapportés en Amérique du Nord (2013) [16].

Indicateurs environnementaux	Extraction de la bauxite *	Raffinage de l'alumine **	Procédé d'électrolyse	Procédé de fonderie
Émissions de CO ₂ (kg CO ₂ -éq./kg Al)	0.07	2.01	5.67	0.12
Potentiel d'acidification (kg SO ₂ -éq./kg Al)	0.4	15.2	40.2	0.6
Potentiel d'eutrophisation (kg phosphate-éq./kg Al)	0.009	0.419	0.526	0.015
Potentiel de réchauffement planétaire (100 ans PRP) (kg CO ₂ -éq./kg Al)	0.078	2.219	6.512	0.128
Potentiel de formation de smog (kg O ₃ -éq.)	4	188	247	6

*Produit ailleurs dans le monde

** Produit en partie ailleurs dans le monde

Tableau 3 - Indicateurs environnementaux selon les procédés impliqués dans la fabrication de l'aluminium secondaire rapportés en Amérique du Nord (2013) [16]

Indicateurs environnementaux	Collecte et traitement	Fonte et coulée	Écume et résidus salés	Total
Émissions de CO ₂ (kg CO ₂ -éq./kg Al)	0.11	0.5	0.02	0.63
Potentiel d'acidification (kg SO ₂ -éq./kg Al)	0.305	1.705	0.052	2.063
Potentiel d'eutrophisation (kg phosphate-éq./kg Al)	0.01	0.003	0.055	0.068
Potentiel de réchauffement planétaire (100 ans PRP) (kg CO ₂ -éq./kg Al)	0.11	0.53	0.02	0.67
Potentiel de formation de smog (kg O ₃ -éq.)	3.15	20.92	0.77	24.83

Tableau 4 - Émissions dans l'air associées à la production d'aluminium, primaire et secondaire, rapportées en Amérique du Nord (2013) [16]

Émissions dans l'air (kg/t. Al)	Aluminium	
	Primaire	Secondaire
Dioxyde carbone	7.87E+03	6.34E+02
Monoxyde de carbone	3.60E+00	3.35E-02
Chlore	4.81E-04	2.32E-03
Fluor (F ou F ₂)	5.49E-01	7.72E-03
Chlorure d'hydrogène	4.78E-01	9.69E-02
Fluorure d'hydrogène (HF)	6.08E-01	3.43E-02
Oxydes d'azote	1.78E+01	8.47E-01
Protoxyde d'azote	9.99E-02	6.49E-03
Oxydes de soufre	4.24E+01	1.18E+00
COVs non méthanique	1.20E+00	2.19E-01
Méthane	1.33E+01	1.06E+00
Poussière (PM* 10)	1.80E-04	2.81E-01
Poussière (PM* 2,5)	1.42E+00	4.66E-02

*PM pour matières particulaires d'après l'expression *Particulate Matter*, dont le diamètre est inférieur à la valeur PM attribuée (en µm).

11. Le recyclage au Québec



Société d'état

<https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/plan-strategique-2012-2017.pdf>



sotrem maltech

Revalorisation et recyclage des rebuts de production.

<http://www.sotrem-maltech.com/>



Démolition industriel et tri

<http://www.bourquemetal.com/index.html>



Recyclage de matériaux et équipements industriels

<http://www.alfredboivin.com/fr/>



Tri, traitement et recyclage de l'aluminium

<http://metaldugolfe.com/>



Usine de traitement de l'écume d'aluminium.

www.scepter.com/



Revalorisation des rebuts de production de l'industrie métallurgique.

<http://www.tdmmultitech.ca/index>



Recyclage de rebuts d'aluminium.

<http://www.centrem.ca/>

12. Glossaire

- **Alliages d'aluminium** : Combinaison par fusion de l'aluminium avec au moins un autre élément chimique. L'ajout d'autres éléments permet de modifier les caractéristiques physiques et/ou chimiques de l'aluminium tel que par exemple sa dureté [3, 4].
- **Alliages de corroyage** : Ces alliages sont principalement utilisés pour des produits façonnés à chaud ou à froid dont la teneur en alliage s'élève jusqu'à 10 % environ. Les éléments généralement présents sont : le manganèse, le magnésium, le silicium, le cuivre ou le zinc. Ces alliages servent habituellement à fabriquer des produits laminés ou extrudés. L'aluminium recyclé qui les compose provient typiquement de la refusion de rebuts neufs ou de vieux rebuts dont la composition est connue et bien définie [5].
- **Alliages de fonderie** : Alliages d'aluminium utilisés surtout dans la fabrication de pièces produites par moulage (sous pression, en coquille, en sable, cire perdue, au plâtre). La teneur des éléments (silicium, magnésium ou cuivre) présents dans l'alliage d'aluminium s'élève jusqu'à 20 % environ. Ces alliages sont obtenus à partir des vieux rebuts dont la composition n'est pas bien définie [5].
- **Alliage mère** : Alliage utilisé pour l'élaboration d'autres alliages afin de corriger leur composition [6].
- **Aluminium primaire** : Aluminium fabriqué à partir d'alumine généralement extrait de la bauxite et isolé par procédé électrolytique. Typiquement, la teneur de l'aluminium produit est de 99,7 % [5].
- **Aluminium secondaire** : Aluminium obtenu à partir de rebuts d'aluminium recyclé (vieux et nouveaux) [5].
- **Cycle de vie** : Le cycle de vie d'un produit comprend l'ensemble des étapes suivantes : l'extraction des matières premières; première transformation; production; distribution; stockage; utilisation; gestion de fin de vie [7].
- **Écume (dross)**: Oxyde d'aluminium ou d'alliage formé à partir d'aluminium fondu (primaire ou secondaire) qui a réagi en contact avec l'air ou l'humidité mélangé à de l'aluminium [6, 8]. L'écume contient au moins 30 % d'aluminium pour une moyenne se situant autour de 40 à 50 % [6].
- **Effet de serre** : L'effet de serre est un phénomène naturel influencé par les différents flux thermiques de l'atmosphère. Certains gaz dits « à effet de serre »

peuvent contribuer à l'absorption et la réémission des rayonnements infrarouges terrestres ce qui a pour effet d'emmagasiner la chaleur et influencer la température à la surface de la Terre. Toutefois, les humains peuvent aussi contribuer à une augmentation de l'effet de serre par leurs actions en libérant des gaz normalement stockés dans la matière [7].

- **Empreinte carbone** : Le terme employé pour désigner le total des gaz à effet de serre (GES) libérés au cours des différentes étapes du cycle de vie d'un produit. Plus précisément, l'empreinte carbone constitue l'inventaire GES du cycle de vie d'un produit, de bien ou de service en établissant la somme des flux entrants et sortants qui lui sont associés afin de déterminer son impact potentiel sur les changements climatiques [7].
- **Résidu salé (saltcake)** : Le résidu salé est le dépôt laissé dans un four à sel rotatif après le traitement des écumes. Le résidu salé est composé d'oxydes de flux ou autre et d'impureté provenant du processus de fusion de l'aluminium primaire ou secondaire et contient environ 3 à 4 % d'aluminium [8].
- **Gaz à effet de serre (GES)** : Gaz qui absorbent et réfléchissent des radiations infrarouges émises par la terre. Il a été démontré que l'augmentation de la concentration de GES tel que : le CO₂, le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFCs), les PFCs, l'hexafluorure de soufre (SF₆) peuvent entraîner une augmentation de l'effet de serre [7].
- **Potentiel d'acidification** : Capacité du procédé à causer l'augmentation de l'acidité du milieu pouvant affecter les écosystèmes en entraînant un déséquilibre chimique et biologique. Les principales sources d'émissions dans l'air sont le SO₂, NO_x et HCl [9].
- **Potentiel d'eutrophisation** : Capacité du procédé à provoquer l'accumulation de nutriments phosphorés ou azotés dans l'écosystème pouvant causer une écotoxicité du milieu. L'eutrophisation est accentuée avec l'acidification du milieu [9].
- **Rebut neuf (new scrap)** : Rebut d'aluminium ou d'alliages d'aluminium industriels issus de la fabrication des produits d'aluminium finis ou semi-finis, soit les rebuts de : retailles, copeaux d'usinage, produits défectueux, obsolètes et excédentaires [1, 8].
- **Vieux rebut (old scrap)** : Produit de fin de vie contenant de l'aluminium. L'aluminium récupéré contient généralement plus de contaminants que les rebuts d'aluminium neuf. Ces matériaux de postconsommation proviennent habituellement : de contenants faits d'aluminium, des automobiles, des immeubles, des appareils

domestiques et de bureau, des machineries et équipements, des cannettes ou autres emballages [1, 8].

Références

Lectures suggérées

Livres:

- Green J.A.S., Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability. 2007, Materials Park, Ohio: ASM International. x, 267 p.
- Nijkerk A.A. et Dalmijn W.L., Handbook of Recycling Techniques. 1998: Nijkerk Consultancy.
- Schlesinger M.E., Aluminum recycling. 2007, Boca Raton, Flor.: CRC Press/Taylor & Francis Group. 225 p. : ill.
- Schmitz C., Domagala J., et Haag P., Handbook of aluminium recycling : [fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processing, plant design]. 2006, Essen, Allemagne: Vulkan-Verlag. xvi, 454 p.
- Totten G.E. et Mackenzie D.S., Handbook of aluminum. 2003, New York, Basel: Marcel Dekker, Inc. 2 v.

Liens internet :

- <http://recycling.world-aluminium.org/review/global-metal-flow/>
- <http://recycling.world-aluminium.org/home/>
- <http://www.drivealuminum.org/research-resources/automotive-aluminum-recycling-at-end-of-life-a-grave-to-gate-analysis-2/>
- <http://www.empreintecarbonequebec.org/fr/>
- <http://www.goudsmitmagnets.com/systemes-magnetiques-industriels/recyclage-tri-magnetique/separateurs-courants-de-foucault-non-ferreux>

Vidéo :

- <http://www.thealuminiumstory.com/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=chIFt2A9MRI>
- https://www.youtube.com/watch?v=imp5jLUK_1Q
- <https://www.youtube.com/watch?v=90KJ3bIDDJY>
- <https://www.youtube.com/watch?v=g8IULXLyos4>
- <https://vimeopro.com/user33086088/galmus15/video/138112722>