

PROJET ENAC

Étude sur le recyclage de l'aluminium – classification des déchets et possible réutilisations



Seguin Paul
Lamzouri Aymen
Bernath Lara
Kathari Gabriel

EPFL

Superviseurs : Samuel Cotture & Anders Meibom

Motivations :	3
Recherches sur les métaux :	3
La collecte des métaux en Suisse :	5
Évolution des mentalités et de la logistique	5
Organisation actuelle de la collecte :	8
Comparaison avec son voisin français	8
Les facteurs qui peuvent être améliorés :	9
Procédés de séparation :	10
Séparation par flottaison :	10
Séparation à courant de Foucault :	11
Sélection des alliages par spectrométrie :	11
Recyclage de l'aluminium :	12
Réutilisation de l'aluminium :	13
La tôle d'aluminium	16
La gourde en aluminium	18
Limites du recyclage de l'aluminium	21
ALUMNI-HOME	22
Références	22

Motivations

Les métaux sont utilisés dans pleins de domaines pour leurs propriétés. Parmi ces propriétés, les plus importantes sont leur résistance à la fracture, leur conductivité thermique et électrique ainsi que leur haute performance à des hautes températures. Les métaux sont devenus indispensables dans de nombreux domaines tels que la machinerie, l'énergie, le transport, la construction et pleins d'autres. Étant donné que les métaux sont présents dans tous ces domaines et que leurs propriétés sont très intéressantes, nous avons voulu étudier la chaîne du tri des métaux en suisse afin de pouvoir en faire un état des lieux et définir si des améliorations sont possibles et quelles réutilisations innovantes sont envisageable avec la technique actuelle.

Recherches sur les métaux

Les métaux peuvent être séparés en quatre catégories :

1. Les métaux ferreux sont composés de fer et de carbone et parmi lesquels on peut citer la fonte, le fer forgé, les alliages d'acier et l'acier de carbone.
2. Les métaux non ferreux ne contiennent pas de fer et ne possèdent pas de propriété magnétique. Cette catégorie inclut l'aluminium, le cuivre, le zinc ainsi que l'étain.
3. Les métaux précieux incluent l'or, le platine ainsi que l'argent principalement.
4. Les métaux spéciaux incluent le lithium, le beryllium, le bore etc.

La répartition des différents métaux dans le tableau périodique est la suivante :

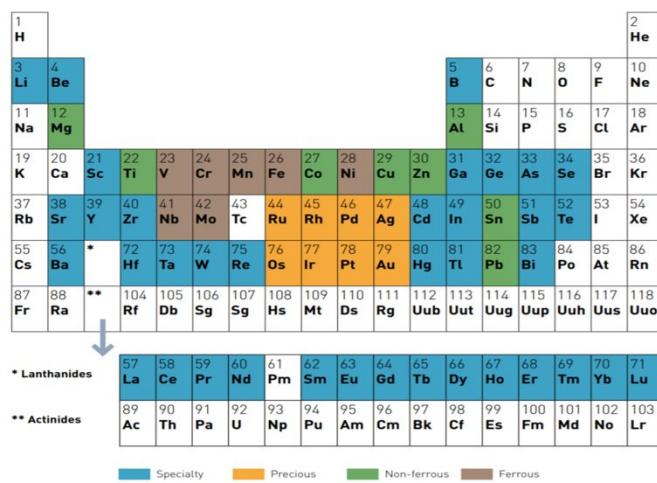


Figure 1 : Classifications des différentes catégories de métaux dans le tableau périodique

Les métaux ont la faculté de pouvoir effectuer des combinaisons avec d'autres métaux ou d'autres éléments du tableau périodique. Cette combinaison est appelée un alliage. La liaison entre les différents éléments d'un alliage s'effectue par le biais d'une liaison métallique.

Les alliages sont plus résistants que les métaux purs car ils sont constitués d'atomes de tailles différentes, ce qui rend les couches stables et donc moins malléables. Les principaux groupes

d'alliages sont les alliages d'acier, les superalliages, les alliages d'aluminium, les alliages de cuivre ainsi que les alliages d'étain.

Chaque groupe inclus une grande variété d'alliage de différente composition comme présenté dans la table suivante :

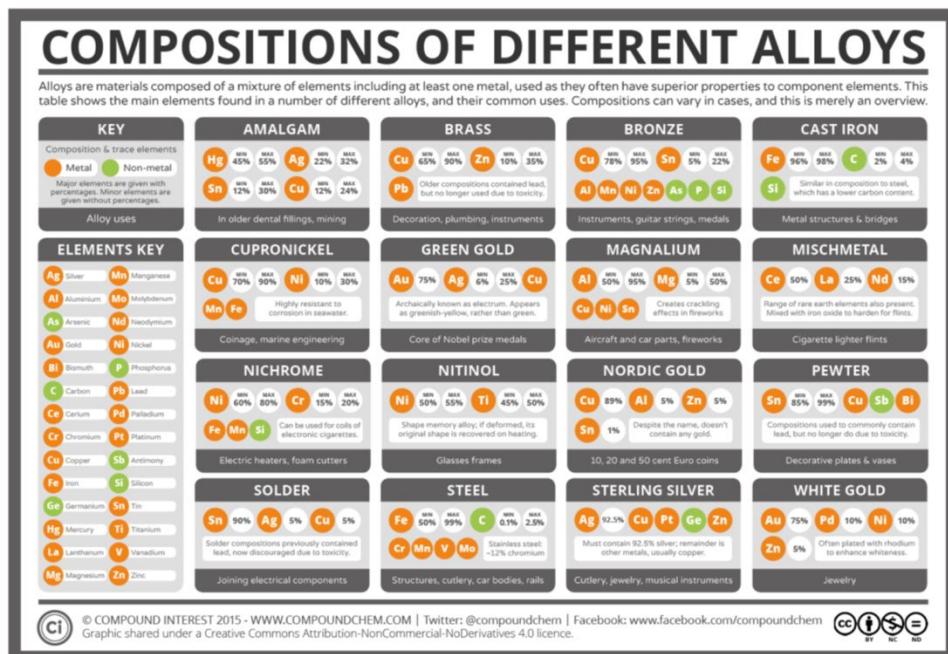


Figure 2 : Compositions de différents alliages de métaux

Pourquoi l'aluminium ?

Compte tenu du résultat de nos recherches sur les métaux, nous avons donc concentrer notre étude sur le cycle du tri de l'aluminium en Suisse. En effet, l'aluminium est beaucoup utilisé au sein de l'EPFL, que ce soit pour le matériel utilisé dans les laboratoires, mais aussi pour la restauration et le stockage. De plus une question simple nous a fortement intrigué : *Pourquoi n'y a-t-il pas de poubelles à aluminium aux pieds des habitations au même titre que l'aluminium ?** Nous y répondrons plus tard (voir fin de partie).

Il nous semble nécessaire d'avoir un maximum de point de collecte pour atteindre un taux de recyclage optimal. Le plus évident serait de permettre à tous consommateurs d'avoir un accès rapide à un conteneur de recyclage car souvent le facteur limitant est le manque motivation de se rendre à un éco-point.

Ceci nous a poussé à déterminer quelles sont les méthodes permettant d'optimiser le recyclage de l'aluminium mais aussi à trouver un ou plusieurs objets très utiles que nous pourrions créer à partir de l'aluminium recyclé.

La collecte des métaux en Suisse

Évolution des mentalités et de la logistique

La collecte de l'aluminium et la première étape, après la vente, du cycle de recyclage. C'est pourquoi cette étape est très importante. C'est à ce moment que la quantité d'aluminium qui peut être recyclée se décide. Cependant l'aluminium est aussi associé à d'autres matériaux pour réaliser des emballages ou des contenants commerciaux. Cette portion d'aluminium ne peut souvent pas être recyclée car il est soit impossible de la délier des autres polymères plastiques par exemple, soit trop compliqué à faire à grande échelle et donc non rentable.

C'est pourquoi nous avons recensé dans la table ci-dessous la plupart des objets recyclables ou non. Souvent cela n'est pas très clair pour les ménages car les communes circulent un minimum d'informations. [18]

Objets recyclés :	Objets non-recyclés:
Canettes de toutes sorte	Emballages composites (brique de lait)
Tubes alimentaires	Bombes aérosols
Couvercles de pot de yogourt	Pièces lourdes (tringle de rideaux)
Barquettes de plats cuisinés	
Aluminium de cuisine	
Capsules en aluminium*	

Tableau 1 : Classification des objets en fonction de leur prise en charge dans le circuit du tri

*Les capsules de café en aluminium sont récoltées séparément. Elles ont leurs propres conteneurs de tris dans les centres de tris communaux.

Le devenir actuel des éléments non récupérés est diverses. Les emballages composites sont le plus souvent incinérés avec le reste des déchets ménagers non-réutilisables. C'est le cas des briques de lait ayant une fine couche d'aluminium à l'intérieur. Les bombes aérosols sont des déchets auxquels il faut porter une attention particulière. Si elle porte un ou plusieurs logo de danger il faut la ramener au magasin ou à une déchetterie. Autrement c'est un déchet métallique ordinaire, mais certaines communes ne font pas confiance au comportement public qui pourrait faire une erreur de jugement. C'est pourquoi en Suisse on préfère toujours les jeter dans les conteneurs à déchets spéciaux situés aux points d'achats. Elles subiront un traitement spécial d'élimination. Les pièces lourdes peuvent être récupérées par des groupes spécialisés en recyclage tel que BAREC qui s'occupent de leur traitement afin de les remettre en vente.

Le graphique suivant permet de se rendre compte de l'évolution de la production d'aluminium des canettes de 1996 à 2017 en Suisse. [18]

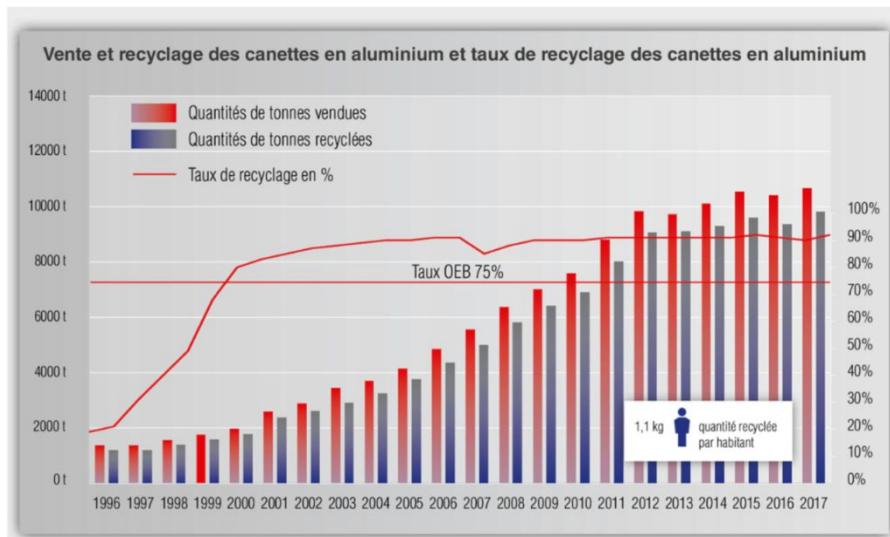


Figure 3 : Production et recyclage de canettes en aluminium en Suisse au fil des années

Au fil des années les quantités utilisées ont excessivement augmenté, ce qui montre l’importance de l’aluminium dans le commerce. Cependant, on peut voir que l’écart entre la la quantité de tonnes recyclées (bleue) et de tonnes vendues (rouge) s’est agrandie alors qu’il est spécifié que le taux de recyclage est passé de 19% à 91%. Ce graphique se contredit et n'est pas très clair. Après une recherche sur le site de la Confédération Suisse nous avons appris que le taux de recyclage se calcule comme la portion collectée (bleue) sur la portion vendue (rouge) [4] :

Calcul du taux de recyclage

Le taux de recyclage est le rapport entre la quantité recyclée de cannettes en aluminium et la vente totale de canettes en aluminium.

Données relatives aux canettes en aluminium 2011, en tonnes	
Ventes	8 800
Collecte	8 000
Taux de recyclage %	91 %

Figure 4 : Table de calcul du taux de recyclage

Ceci nous montre que le taux de recyclage, bien que très haut, a finalement diminué depuis le début des années 2000. Ce n'est pas une surprise car l'utilisation de l'aluminium s'est plus vite développé que son recyclage en parallèle. C'est pourquoi il est nécessaire de comprendre les défauts de la chaîne de collecte qui forme la 1ère étape du cycle de recyclage afin d'améliorer le taux de recyclage.

Les points de collectes pour les canettes en aluminium en suisse sont en perpétuelle croissance afin d'optimiser la collecte des matériaux recyclables et de répondre à la demande pour s'approcher au maximum de 100 % de canettes recyclées comme le montre le graphique suivant :

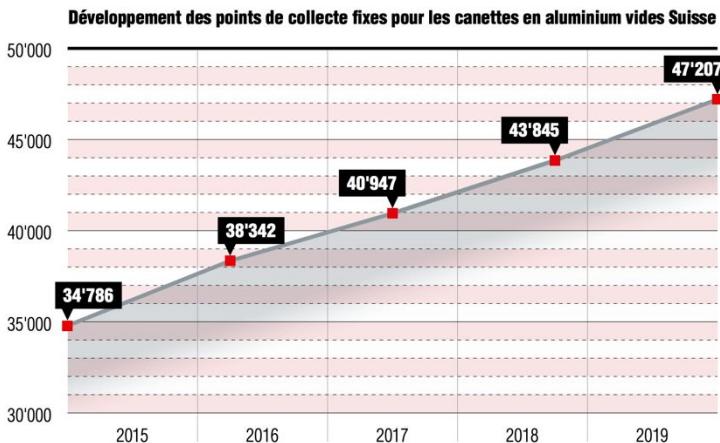


Figure 5 : Développement des points de collecte fixes pour les canettes en aluminium vides en Suisse

Il y a donc un effort de la part des communes pour améliorer ce taux de recyclage. Mais augmenter le nombre de points de collecte est-il la seule chose à faire ? Nous allons voir ce qui est mis en place aujourd’hui et ce qui pourrait être amélioré. [18]

Organisation actuelle de la collecte

En Suisse, c'est la société IGORA qui gère la récupération des déchets en aluminium depuis 1989. Grâce à sa coopération avec les grandes enseignes et les industries elle encourage la collecte et le recyclage des emballages vides d'aluminium en Suisse. Elle n'est pas la seule entreprise à le recycler mais à la part la plus importante.

Différentes possibilités s'offrent au citoyen suisse pour recycler ses emballages en aluminium. Premièrement, des conteneurs de collecte IGORA ainsi que des sacs de collecte IGORA sont disposés dans de nombreux lieux de travail afin de permettre de concentrer les déchets des entreprises dans ces conteneurs pour simplifier la récupération de ces derniers. Deuxièmement, les communes mettent à disposition des éco-points sur divers emplacements stratégiques afin de permettre aux ménages de déposer leurs déchets proches de leur domicile. Les déchèteries communales permettent, quant à elles, de se débarrasser de gros volumes ainsi que de déchets spéciaux dont le tri n'est pas possible dans les éco-points.

Afin que les ménages soient au courant de la fréquence du tri ainsi que des différentes options qui se proposent à eux, un calendrier de ramassage est délivré à tous les ménages en décembre pour l'année suivante.

De plus, une carte interactive est disponible en ligne pour s'informer sur les différentes options de tri d'une région sélectionnée : www.recycling-map.ch

Une autre option a été développé par la start-up valaisanne FoxDrop en début 2019. Le concept est simple, les habitants et les entreprises des communes partenaires peuvent souscrire à un abonnement gratuit sur leur site internet. Ils reçoivent alors des sacs à remplir avec tous les déchets recyclables possibles (dont l'aluminium) qui seront récupérés directement sur place, selon des horaires et dates envoyées par sms, par les équipes FoxDrop. Cette initiative permet aux consommateurs de ne pas avoir à se rendre aux points de collecte

et augmente les chances de récupérer une portion d'aluminium qui aurait pu être jeter dans les incinérables. [13]

Comparaison avec son voisin français

Nous avons vu ce qu'il se passait en Suisse pour le recyclage de l'aluminium. Qu'en est-il de l'autre côté des frontières, chez son voisin français ?

C'est en 1990 que l'on met en place le tri sélectif en France : les déchets sont séparés par classe. L'organisation des déchets à collecter et la façon de s'y prendre est choisi selon les communes. Le choix est large : une collecte sélective en porte-à-porte ou un apport volontaire dans des conteneurs regroupés dans des éco-points, une poubelle unique pour les déchets recyclables (poubelle jaune), plusieurs tournées de ramassages, un apport dans les déchetteries. La fréquence de collecte est très variable. Globalement en France 38% de la population est collecté une fois par semaine, 34% deux fois par semaine, 19% trois fois par semaine, 8% plus de trois fois par semaine et moins de 1% moins le sont une fois par semaine. Celle-ci est dépendant des capacités financières de la commune et le type de territoire couvert. [5]

En Île-de-France on utilise une poubelle jaune comme dépôt singulier de ces ordures recyclables. Les ménages ne font donc pas le tri entre les recyclables, ceux-ci sont récupérés ensemble par les camions-poubelles. Voici un schéma de tous ce que l'on peut retrouver dans ce type de poubelle. [6]



Figure 9 : La poubelle jaune et ses déchets

Pour avoir un comparatif avec la Suisse, où on rappelle le taux de recyclage de l'aluminium est à 91%, il ne dépasse les 49% en France. Ceci prends en compte les déchets ménagers et industriels. Si on ne considère que les déchets ménagers, la valeur tombe à 32%. Un autre chiffre intéressant est que 80% des pièces de voiture en aluminium sont recyclés, ce qui prouvent que les industriels sont bien plus efficaces que les ménages.

Cette différence est en partie due au manque d'équipements dans les centres de tris et de recyclage. Pour cause des faibles fonds économiques : le recyclage est important mais n'est pas une priorité. De plus, seuls les grands emballages en aluminium sont recyclés, ceux d'une taille inférieure à celle d'un pot de yaourt sont incinérés car considérés comme non rentables. On observe également peu de prise de conscience de l'importance de recycler l'aluminium par le grand public. Les facteurs suivants que nous allons énumérés pour améliorer la situation en Suisse seraient aussi de bonnes solutions pour améliorer celle en France qui paraît plus critique. [7]

Les facteurs qui peuvent être améliorés

Afin d'espérer atteindre un jour les 100 % de recyclage pour les canettes en aluminium en suisse, plusieurs facteurs de la chaîne du tri doivent être améliorés :

- Les déchèteries sont souvent excentrées et les points de collectes ne desservent pas encore toute la population.
- Les éco-points ne sont pas assez nombreux et se situent souvent dans les centres commerciaux dont la proximité n'est pas identique pour tous.
- Il n'y a aucun conteneur ou poubelle pour le tri de l'aluminium au pied des habitations contrairement aux autres déchets comme le verre par exemple.

De ce fait, plusieurs solutions peuvent être envisagées pour améliorer la chaîne du tri :

- Augmenter la fréquence des déchèteries ainsi que celle des écopoints.
- Ajouter les poubelles pour l'aluminium au pied des immeubles afin de permettre un tri rapide de l'aluminium pour éviter que ce dernier ne se retrouve dans les poubelles blanches pour les cantons qui pratiquent la taxe ou dans les poubelles noires pour les cantons qui ne la pratiquent pas.
- Effectuer une campagne de sensibilisation tout au long de l'année avec des rappels sur l'importance du recyclage de l'aluminium auprès des ménages.
- Mettre en place un système de consignes permettant de motiver les citoyens à trier par le biais d'une récompense.

L'idée générale serait de développer une chaîne de collecte à part pour l'aluminium qui a besoin d'un traitement spécial.

*Réponse à la question : Nous avons tenté de joindre IGORA à plusieurs reprises par le seul moyen disponible mis à disposition : mail depuis leur site. Cependant aucune de nos tentatives n'as reçu de réponses. Après un contact avec des centres de collecte privés tel que Transvoirie-Bussigny nous avons obtenu quelques éléments de réponses. Ce sont actuellement les communes qui décident des types de conteneurs selon les matériaux qu'elles veulent recycler. Venir récupérer l'aluminium au pied de chaque habitation serait compliqué à organiser d'un point de vue logistique et augmenterait la pollution de l'air due aux tournées des camions dans les villes. Mais pourquoi le papier plus que l'aluminium ? Nous n'avons pas vraiment eu de réponse, il semblerait que cela ait été décidé de cette façon. Or le groupe BAREC nous a informé que le recyclage de l'aluminium était bien plus important d'une point de vue pécuniaire. Il n'y a donc pas de facteurs limitants financiers et rien n'empêcherait le mise en place de ces poubelles de proximité. Nous avons alors contacté un invité du cours de

technologie du bâtiment à l'EPFL, Patrick Clément, qui fait aussi parti de Sottas SA, une entreprise spécialisée dans la construction métallique en Suisse et à l'étranger. Ce-dernier explique que les déchets d'aluminium s'excitent au contact de l'air dans les déchèteries communales. C'est à dire qu'ils s'oxydent, formant une fine pellicule d'oxyde. Cette couche protège l'aluminium d'oxydations ultérieures. Elle est nécessaire sur le produit final de fabrication mais dérangeante pour le recyclage. C'est pourquoi il ne faut pas laisser trop longtemps les déchets aluminium en conteneurs. Un ramassage hebdomadaire est donc nécessaire. Ceci n'empêche donc pas l'implantation de poubelles au pieds des habitations si tout le suivi logistique est assuré derrière.

Procédés de séparation

Une fois les déchets acheminés dans les différentes usines de recyclage, ces derniers vont être séparés et transformés afin de pouvoir les réutiliser ultérieurement. Pour ce faire, différentes méthodes de tri sont appliquées aux matériaux :

1. Séparation par flottaison

Le tri par flottaison permet de séparer les matériaux par le biais de leur masse volumique. En effet, les déchets sont placés dans un liquide dont la masse volumique se situe entre celle des deux types de déchets que l'on veut séparer. Cette méthode est par exemple utilisée pour vérifier qu'aucun plastique ne se trouve dans les déchets aluminium.

Les métaux ayant généralement une masse volumique supérieure à 1 kg / dm³ et le plastique ayant une masse volumique plus faible que 1 kg / dm³, l'utilisation de ce procédé avec de l'eau permet de séparer les deux types de déchets. Les déchets plastique, flottant sur l'eau, sont récupérés à la surface et les déchets métalliques, coulant au fond de l'eau, sont récupérés sous la surface.

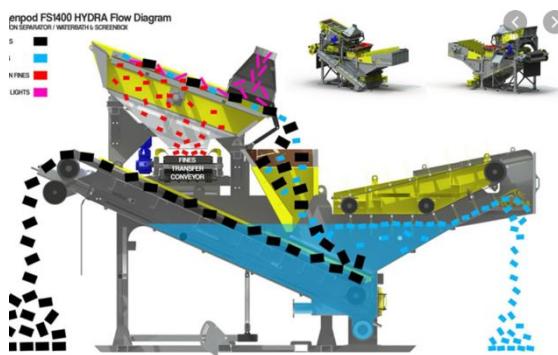


Figure 10 : Schéma du procédé de séparation par flottaison

2. Séparation à courant de Foucault

Une fois les matériaux métalliques isolés, il est nécessaire de les séparer pour pouvoir isoler l'aluminium. En effet, même si des poubelles spéciales pour l'aluminium sont en place en Suisse, les habitants peuvent confondre l'aluminium avec le fer blanc (pour les boîtes de conserve par exemple) et mettre les deux types de déchets dans la même poubelle.

La séparation à courant de Foucault permet de séparer les métaux ferreux des métaux non ferreux ainsi que des matériaux stériles (par exemple du plastique ou du papier).

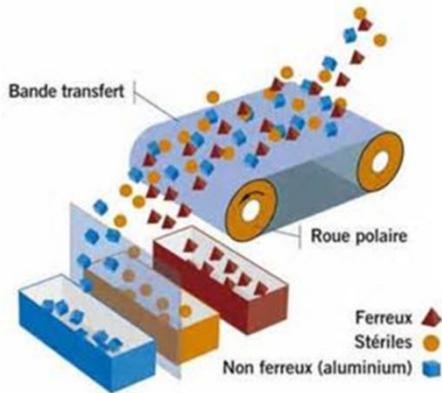


Figure 11 : Schéma d'un tapis de séparation à courant de Foucault

Un tapis de séparation à courant de Foucault fonctionne comme indiqué sur le schéma ci-dessus. Un tapis roulant muni d'une bobine avec un inducteur de champ magnétique à son extrémité permet de séparer dans différents emplacements les déchets en fonction de leur réponse au champs magnétique.

En effet, les éléments non ferreux tel que le magnésium et l'aluminium sont repoussés par l'inducteur et sont propulsés du tapis pour être récupérés dans le conteneur le plus éloigné. Les éléments ferreux tel que le cuivre, les cupronickels ainsi que certains aciers inoxydables sont attirés par l'inducteur et se décrochent du tapis roulant une fois que le contact avec la bobine est terminé pour être récupérés dans un conteneur spécifique. Les éléments stériles, qui ne répondent pas au champ magnétique, se décrochent quant à eux du tapis grâce à la gravité et tombent dans le conteneur prévu à cet effet.

3. Sélection des alliages par spectrométrie

Lorsque la composition précise d'un alliage est recherchée afin d'optimiser les propriétés de l'alliage résultant du recyclage, il est possible d'utiliser un spectromètre portable XRF permettant de quantifier et qualifier la composition d'un échantillon grâce à la formation de plasma à la surface du matériau induite par une courte impulsion laser.

Ce contrôle spectrométrique des émissions atomiques permet de connaître la composition de l'alliage avec une grande précision. Ce procédé permet donc de reformer un alliage au plus proche possible de l'alliage initial en sélectionnant des matériaux dont la composition de l'alliage est proche de celui recherché.

Recyclage de l'aluminium

Le recyclage de l'aluminium se fait en plusieurs étapes :

1^{ère} étape : Une fois les différents métaux séparés par une bobine à courant de foucault, les déchets d'aluminium sont compactés en gros blocs.

2^{ème} étape : Les blocs d'aluminium sont broyés et incorporés dans un four à 500 °C par pyrolyse pour éliminer les restes de salissures, de nourriture ainsi que les étiquettes encore présentes après la séparation des déchets effectuée par le biais des méthodes présentées dans la section précédente. Cette pyrolyse produit un gaz pyrolytique qui est réutilisé ultérieurement comme carburant pour la pyrolyse suivante.

3^{ème} étape : Les déchets d'aluminium sous forme de blocs sont disposés dans un four à environ 800 °C et passent sous forme liquide sachant que la température minimum de fusion de l'aluminium se situe à 660 °C.

4^{ème} étape : Afin d'augmenter certaines propriétés de l'alliage en aluminium résultant du recyclage, il est possible de le raffiner grâce par exemple au dégazage [25], à la réduction de la teneur en magnésium ou encore par l'adjonction d'éléments d'alliage. Ces méthodes ont pour but d'augmenter ou de diminuer la teneur en certains éléments de l'alliage afin de créer un alliage spécifique.

Une fois l'aluminium fondu, ce dernier est moulé dans de grands cylindres et laminé à chaud (500 °C) et à froid afin de produire des rouleaux de plaques fines. Ces plaques peuvent ensuite être compressées pour obtenir des couches beaucoup plus fines que quelques millimètres d'épaisseur pour produire de canettes par exemple. Les cylindres initiaux peuvent aussi être laminé pour produire des barres pour d'autres utilisations par exemple.



Figure 12 : Bobine d'aluminium recyclé et laminé.

L'énergie nécessaire pour mener à bien la chaîne du recyclage de l'aluminium représente seulement 5% de l'énergie nécessaire pour fabriquer de l'aluminium en tenant en compte l'extraction des métaux et la fabrication de l'alliage. Le recyclage est donc une manœuvre hautement écologique.

Le schéma suivant récapitule les différentes étapes du recyclage de l'aluminium à travers l'exemple des cannettes d'aluminium :

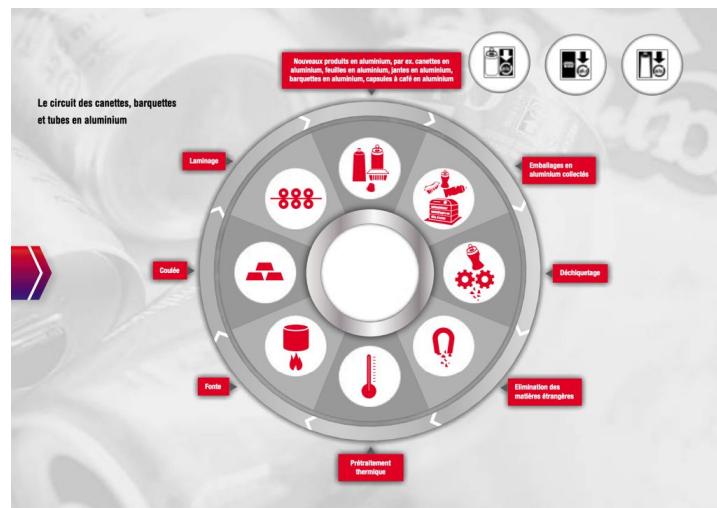


Figure 13 : Diagramme des différentes étapes du tri pour les canettes d'aluminium

Réutilisation de l'aluminium

Alliage	Etat	Comportement à l'atmosphère (1)		Aptitude à l'anodisation			Aptitude au soudage			Usinage		Aptitude à l'emboutissage		Aptitude au repoussage	
		urbaine industrielle	marine	protection	dure	décoration (2)	TIG / MIG (3)	par résistance	brasage	par faisceau d'électron	fragmentation copeaux	brillance surface	par expansion	emboutissage profond	
1050	H14	A	B	A	A	B	B	B	A	A	D	A	B	A	B
1200	0	A	B	A	A	B	A	C	A	A	D	A	A	A	A
2017A	T4	C	D	C	B	D	D	B	D	B	B	B	D	C	D
2024	T4	C	D	C	B	D	D	B	D	B	B	B	D	D	D
2030	T3	D	D	C	B	D	D	--	D	--	A	B	--	--	--
2618A	T6	C	D	C	B	D	D	B	D	--	B	B	D	D	D
3003	0	A	B	A	B	C	A	C	A	A	D	A	A	A	A
3005	0	A	B	A	B	C	A	C	A	A	D	A	A	B	B
	H26	A	B	A	B	C	B	A	A	A	D	A	A	C	D
Isolal®	H11	A	B	B	--	D	A	--	--	--	--	--	--	--	--
Isoxal®	H12	A	B	B	--	D	A	--	--	--	--	--	--	--	--
Poudral®	H22	A	B	B	--	D	A	--	--	--	--	--	--	--	--
5005	H24	A	B	A	A	B	A	A	C	A	D	A	C	A	C
5083	H111	A*	A*	A	A	D	A	B	D	A	C	A	C	B	C
5086	H111	A*	A*	A	A	D	A	B	D	A	C	A	C	B	C
5754	H111	A	A	A	A	C	A	B	D	A	C	A	C	B	C
6005A	T6	B	B	A	A	B	B	--	B	B	C	A	--	--	--
6060	T6	B	B	A	A	B	B	--	A	B	C	A	--	--	--
6061	T6	B	B	A	A	C	B	B	C	B	C	A	D	D	--
6106	T6	B	B	A	A	B	B	--	B	B	C	A	--	--	--
6082	T6	B	B	A	A	C	B	B	D	B	C	--	C	C	C
7075	T6	C***	D***	B	A	C	D	B	D	B	B	B	D	D	--
7049A	T6	C***	D***	B	A	C	D	B	D	B	B	B	D	D	--

Code : A = Très bon
B = Bon
C = Assez bon
D = mauvais, à éviter / non recommandé.

* Pour des utilisations à des températures supérieures à 65°C en milieu agressif, consulter le service technique Almet.
*** Risque de corrosion sous contraintes dans ces états.

Figure 14 : Classification des alliages d'aluminium selon leurs propriétés [19].

Ce tableau nous renseigne sur les différentes propriétés d'utilisations des principaux alliages d'aluminium. Les propriétés sont classées de A (très bon) à D (mauvais, à déconseiller) pour chaque propriété (à noter: l'aptitude anodisation représente la capacité d'édifier une couche d'oxyde beaucoup plus épaisse que la pellicule d'alumine naturelle, qui confère de la résistance supplémentaire à l'alliage). Après le processus de recyclage, les usines choisissent l'alliage de sortie en fonction des besoins de leurs clients. Pour le cas des objets que l'on a choisi de créer, l'alliage le plus approprié pour la partie interne de la gourde serait l'alliage 1050A car il possède une excellente aptitude à l'emboutissage et permet d'empêcher la libération de substances métalliques dans l'eau, c'est en général l'alliage utilisé lorsqu'il y'a un contact avec des substances alimentaires. Cependant, il faut ajouter une pellicule de résine d'époxy (plastique) pour éviter l'effet de lixiviation du contenant (bouteille) vers le contenu (liquide, dans notre cas l'eau) [23]. Une autre solution serait d'opter pour une gourde à double paroi, avec la paroi interne en acier inoxydable (inox) et la paroi externe en alliage d'aluminium, mais la gourde serait alors moins légère.

Déchets récupérés: Dans le cas de notre étude, les principaux déchets récupérables sont les canettes de bières ou de boissons gazeuses. Les alliages utilisés pour ces produits sont des alliages de la série 3000, qui possèdent une très bonne résistance mécanique. Les alliages de la série 3000 ont pour principal élément d'alliage le manganèse, et une petite quantité de magnésium.

A la suite du tri, les emballages en aluminium sont compactés puis envoyés vers un centre d'affinage où l'aluminium sera transformé. Les canettes compactées sont ensuite chargées dans des fours rotatifs pour brûler les laques présentes sur les boîtes. Puis l'aluminium liquide est transvasé dans un autre four afin d'être élaboré puis purifié [22]. Ainsi, l'aluminium est raffiné afin de correspondre aux besoins du client. On peut donc obtenir en sortie d'usine de recyclage de l'aluminium en alliage 1050A (teneur en aluminium = 99.5 %) car l'aluminium fondu peut subir un dégazage [25] (se déroule au cours du transfert entre le four de fusion et le four de maintien, insuffle un gaz neutre pour faire remonter en surface les oxydes et gаз inclus, durée dépend de l'alliage recherché) pour réduire la teneur de certains éléments, on obtient ensuite l'alliage souhaité par adjonction d'éléments d'alliages manquants (Silicium, Fer, Cuivre..) [20].

Le tableau suivant nous renseigne sur les compositions des principaux alliages d'aluminium que l'on pourrait utiliser pour nos produits:

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti		Chaq.	Tot.(3)	Al
1050 A		0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05		0,03		le reste
3003				0,05	1,00				Zr+Ti			
	0,60	0,70	0,20	1,50			0,10		0,10	0,05	0,15	le reste
3005				1,00	0,20					0,05	0,15	le reste
	0,60	0,70	0,30	1,50	0,60	0,10	0,25	0,10				
5005				0,50						0,05	0,15	le reste
	0,30	0,70	0,20	0,20	1,10	0,10	0,25					
6005A	0,50				0,40				Mn+Cr			
	0,90	0,35	0,30	0,50	0,70	0,30	0,20	0,10	0,10-0,50	0,05	0,15	le reste
6060	0,30	0,10			0,35					0,05	0,15	le reste
	0,60	0,30	0,10	0,10	0,60	0,05	0,15	0,10				
6061	0,40		0,15		0,80	0,04				0,05	0,15	le reste
	0,80	0,70	0,40	0,15	1,20	0,35	0,25	0,15				
6082	0,70			0,40	0,60					0,05	0,10	le reste
	1,30	0,50	0,10	1,00	1,20	0,25	0,20	0,10				
6106	0,30	0,35	0,25	0,05	0,40	0,20	0,10			0,05	0,15	le reste
	0,60			0,20	0,80							

Figure 15 : Composition des alliages d'aluminium correspondant à nos produits [19].

Comme on peut le constater, les alliages 1050A et ceux de la série 3000 présentent des compositions similaires, avec des taux plus élevés de Silicium, Fer, Cuivre, Manganèse, Magnésium, Chrome, Zinc et Tin. Il serait donc possible d'obtenir de l'alliage 1050A en recyclant des déchets qui sont produit à partir d'alliages de la série 3000. L'aluminium recyclé contiendra l'ensemble de ces éléments, il s'agira ensuite de réduire les fractions de ces éléments afin d'obtenir l'alliage 1050A, en suivant les processus permettant l'extraction des autres éléments [21].

Propriétés mécaniques des alliages:

Le tableau suivant nous renseigne sur les caractéristiques mécaniques des principaux alliages d'aluminium:

Alliage	Etat	Caractéristiques mécaniques en traction				Dureté Brinell	Module (2) de Young MPa	Résistance au cisaillement
		Rp 0,2 mini MPa	Rm mini	Rm maxi MPa	A 5,65 mini %			
1050A	H14	85	105	145	4	35	69 000	70
1200	O	25	75	105	24	23	69 000	60
2017A	T4	260	390	425	13	111	74 000	275
2024	T3	290	340	475	14	123	73 000	290
2030	T3	240	370	460	7	115	73 000	280
3003	H14	125	145	185	3	45	69 000	95
3005	H14	150	170	215	2	55	69 000	120
Iisolalu®	H11	90	120	175	3	----	69 000	----
Isoxal®	H12	120	145	195	2	----	69 000	----
Poudral® ep < 2,1	H12	120	145	195	2	----	69 000	----
Poudral® ep > 2,1	H12	80	140	180	12	----	69 000	----
5005	H24	120	145	185	3	45	69 000	95
5083	H111	125	275	350	15	70	71 000	175
Sealium®	H116	220	305		10	----	71 000	----
5086	H111	100	240	310	15	65	71 000	165
5754	H111	80	190	240	18	55	70 000	140
5754	H22	130	220	270	10	75	70 000	140
6005A	T6	215	260	285	8	90	79 500	175
6060	T6	160	215	245	12	85	69 500	150
6061	T6	240	260		8	95	69 000	190
6082	T6	200	270		10	95	69 000	210
6106	T6	200	250		14	85	69 500	----
7075	T6	475	545		8	150	72 000	305

Figure 16 : Caractéristiques mécaniques des principaux alliages d'aluminium [19].

La tôle d'aluminium

La tôle d'aluminium est un matériau qui peut être utilisé dans beaucoup de situation en construction. Il s'agit simplement d'une plaque d'aluminium, généralement assez fine, d'une épaisseur variable de l'ordre du millimètre. Suivant les besoins, elles peuvent avoir un profil plat ou cisaillé. Sa densité est d'environ 2'700 kg/m³ ce qui en fait un matériau léger comparé à la tôle en acier par exemple dont la densité vaut 7'800 kg/m³. L'idée est d'avoir un matériau assez robuste mais pas incassable, et donc il est préférable d'opter pour les alliages 6060 et 6082 qui répondent à ces besoins de part la fraction importante de magnésium présente. Le choix entre ces deux alliages dépendra essentiellement du domaine dans lequel sera utilisée la tôle (transport ou construction). La résistance liée à ces deux alliages est donnée plus haut. La figure suivante montre plusieurs applications possibles de tôles dont d'aluminium, dont le profil est très varié. [2]

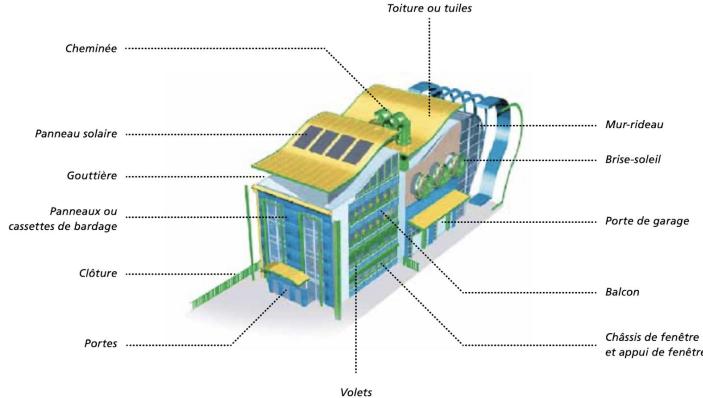


Figure 17 : Divers applications de tôles d'aluminium en construction

Figure : Schéma des différentes applications de tôles d'aluminium dans le bâtiment

Pourquoi avons-nous choisis la tôle comme objet recyclé ?

La liste des avantages de cet objet est longue, d'autant plus si il est fait en aluminium. Le plus important est sa durée de vie, qui n'est pas explicité mais à titre d'exemple le toit de l'Église San Giaocchino de Rome a été recouvert de tôles d'aluminium en 1898 et il ne présente aucune marque de dégradation. De plus l'entretien lié est quasi-nul, il concerne seulement le nettoyage, ce qui est un bon point pour l'environnement. La réflectivité de l'aluminium permet de réduire la consommation d'énergie en été par exemple, des tôles brise-soleil peuvent être utilisées pour compenser l'utilisation de la climatisation. Sa température de fusion de 660°C le classe parmi les matériau de construction incombustibles A1 (selon les normes européennes). De plus, il ne relâche pas de gaz nocifs s'il vient à brûler ce qui fait de la tôle d'aluminium un très bon matériau pour les toits et murs. À l'état de repos, la tôle d'aluminium ne risque pas non plus d'émaner des substances nocives pour l'homme et l'environnement. Comme rapidement vu à la réponse à la question, l'aluminium s'oxyde naturellement au contact de l'air et forme à sa surface une fine couche d'oxyde. Cette pellicule empêche toute réaction entre les éléments environnants et la tôle d'aluminium. Un procédé d'anodisation amplifie ce mécanisme naturel pour assurer une protection plus durable. Finalement, l'aluminium est un métal très malléable et suivant l'alliage utilisé pour former la tôle celle ci peut être plane, ondulée, courbée ou transformée en cassette. De plus elle peut être sciée, vissée, percée, Le rayon d'exploitation est donc extrêmement vaste. [8]

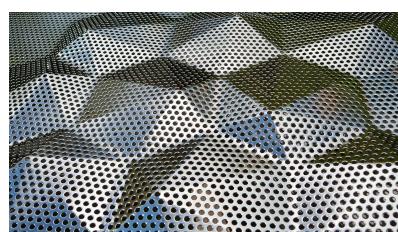


Figure 18 : Tôle perforée courbée



Figure 19 : Tôle profilée sandwich (gauche), tôle profilée ondulée (milieu), tôle profilée trapézoïdale

Quels sont les méthodes de fabrication de tôles d'aluminium ?

Selon les différents profils nécessaires, le processus de fabrication ne varie pas beaucoup. Les rouleaux d'aluminium obtenu à la fin des étapes de recyclage citées dans la partie *Recyclage de l'aluminium* peut déjà être directement utiliser en tant que tôle brise-soleil par exemple. Si l'on souhaite obtenir une tôle ondulée par exemple, il est nécessaire de faire appel à une machine dite “ligne de profilage” ou appelée profileuse comme celle présentée ci-dessous. [9]



Figure 20 : Profileuse de tôle ondulée plate

Voici un schéma permettant de mieux comprendre ce qu'il se passe lorsque cette machine est en route. [10]

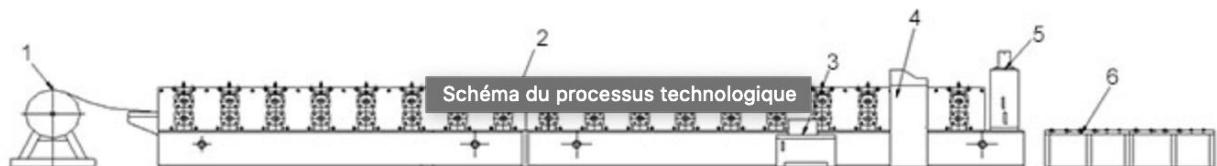


Figure 21 : Schéma du processus technologique d'une profileuse standard

Étape 1 : Dispositif de déroulement de la bobine d'aluminium

Étape 2 : Rouleaux de formage en acier de forgeage supérieur, puissance 5,5 KW et vitesse de travail entre 5 et 17 m/min

Étape 3 : Réservoir hydraulique

Étape 4 : Contrôle informatique

Étape 5 : Cisaille hydraulique avec une lame de découpe en Cr12, puissance 4 KW

Étape 6 : Dispositif de décharge

À qui pouvons-nous nous adresser pour fabriquer notre tôle ?

En Suisse il n'y a plus qu'une seule raffinerie encore en service. Il s'agit de celle de Cressier aux abords du lac de Neuchâtel. Ainsi il faudrait leur apporter nos déchets aluminium collectés et leur demander de réaliser une bobine en alliage 6060 ou 6082. Par la suite nous devrons profilé notre bobine d'aluminium et la découper pour obtenir plusieurs tôles au profil désiré. Si la raffinerie ne possède pas de lignes de profilage nous pouvons prendre contact avec une entreprise spécialisée dans ce domaine. Nous pourrions par exemple contacter MONTANA SYSTÈMES DE CONSTRUCTION SA dont le siège principal est à Villmergen non loin de Zurich. [11][12]

Peut-être qu'il y a une profileuse à l'EPFL ? Nous n'avons pas trouvé d'informations à propos sur internet.

La gourde en aluminium

Afin de produire une gourde en aluminium ou n'importe quel objet creux de forme cylindrique tel qu'une casserole ou encore une assiette, le procédé consiste à effectuer un emboutissage profond sur un flan (pièce d'aluminium cylindrique de la forme d'une pièce de monnaie) afin d'étendre ce dernier et de lui donner la forme voulue.

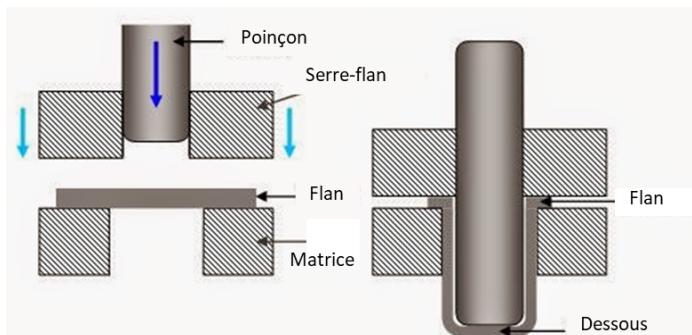


Figure 22 : Schéma de la méthode d'emboutissage

Pour cette étape, il est nécessaire d'utiliser un lubrifiant servant à la fois de liquide de refroidissement mais permettant aussi à l'aluminium de ne pas céder sous les contraintes de la presse effectuant l'emboutissage. Le type de lubrifiant utilisé est inversement proportionnel au rapport d'emboutissage et varie en fonction de la valeur de RE-1 comme montré dans le tableau ci-dessous :

10% ou moins	Entre 10% et 50%	50% et plus
Huile minérale, viscosité 100 SUS; huile minérale avec approximativement 10% d'huile de lard	Huile minérale, viscosité 200-250 SUS; huile minérale avec approximativement 15% d'huile de lard	Huile minérale avec additifs de pression extrême, sulfure et autres

Figure 23 : Classification des lubrifiants à appliquer lors de l'emboutissage en fonction de RE-1

Afin de pouvoir évaluer la faisabilité d'un emboutissage en fonction des caractéristiques du flan, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes suivantes :

1. Le rapport d'emboutissage (RE) doit être inférieur ou égal à la valeur limite (LDR) pour chaque emboutissage.
2. La réduction (r) doit être inférieur à l'anisotropie de l'alliage.
3. Le rapport de l'épaisseur par rapport au diamètre du disque (e/eD) doit être supérieur à 1 %

Avec RE = diamètre du flan (D) / diamètre intérieur de l'objet désiré (d), r = diamètre du flan - diamètre intérieur de l'objet désiré) / diamètre du flan, e/D = épaisseur du flan (e) / diamètre du flan. Cette table nous permet de définir la valeur limite du rapport d'emboutissage ainsi que l'anisotropie de l'alliage :

Matériau	Anisotropie (r)	LDR
Zinc alloys	0.4-0.6	1.8
Hot-rolled steel	0.8-1.0	2.3-2.4
Cold-rolled rimmed steel	1.0-1.4	2.3-2.5
Cold-rolled Al-killed steel	1.4-1.8	2.5-2.6
Aluminum alloys	0.6-.8	2.2-2.3
Copper and brass	0.6-0.9	2.3-2.4
Ti alloys (α)	3.0-5.0	2.9-3.0

figure 24 : [14] Valeur limite du rapport d'emboutissage en fonction du métal utilisé

Le rapport limite d'emboutissage nous donne la valeur limite de RE pour chaque emboutissage successif. Nous voulons nous retrouver avec une gourde de 66 mm de diamètre et 180 mm de hauteur. La formule suivante nous donne le diamètre du flan en fonction de la hauteur et du diamètre interne final de la pièce :

$$D = \sqrt{d^2 + 4*d*h}$$

De ce fait, le diamètre initial de la pièce doit être de : D = 227.76 mm et le ratio D/d est de 3.45 qui est plus grand que la valeur limite du rapport d'emboutissage. Il faudra donc effectuer plusieurs passes pour pouvoir atteindre la hauteur espérée. En pratique, la valeur limite du RE diminue progressivement avec le nombre de passe effectué. De ce fait, il est nécessaire d'utiliser le tableau suivant produit empiriquement grâce à la répétition d'emboutissage successifs sur différents alliages afin de connaître la valeur limite du RE par passe pour l'alliage 1050A par exemple. La multiplication des valeurs de RE sélectionnées pour chacune des passes nous donne la valeur du RE finale. De ce fait, dans notre cas de figure, trois passes sont nécessaires pour atteindre la valeur de ratio de 3.45 :

Nº de la passe	Rapport d'emboutissage (2)				
	1050 A 1200	5005 (3)	5754 X	5086	5056 A
1 ^e	1,55 à 2,2	1,55 à 1,8	1,55 à 2	1,55 à 2	1,55 à 2 Recuit
2 ^e	1,25 à 1,65	1,2 à 1,55	1,25 à 1,65	1,25 à 1,65 Recuit	1,2 à 1,4 Recuit
3 ^e	1,1 à 1,25	1,1 à 1,2	1,1 à 1,25 Recuit	1,4 à 1,8	1,35 à 1,65 Recuit
4 ^e	1,1 à 1,25	1,05 à 1,1 Recuit	1,4 à 1,8	1,2 à 1,4 Recuit	1,25 à 1,55 Recuit
5 ^e	1,05 à 1,1	1,35 à 1,65	1,2 à 1,55		
6 ^e	1,05 à 1,1 Recuit	1,1 à 1,4	1,05 à 1,2 Recuit		

Figure 25 : [3] Rapport d'emboutissages de quelques alliages d'aluminium pour chaque passe successive

De plus, pour respecter la contrainte n°2, il est nécessaire que l'épaisseur minimum du flan soit de 2.28 mm.

Les formules suivantes permettent de trouver la force qu'il est nécessaire d'appliquer à chaque passe avec $t=e$ et R_m la résistance maximale de l'alliage:

Pour la Première passe :

$$F = \pi \cdot d \cdot t \cdot R_m \cdot k$$

Pour les passes suivantes :

$$F_n = \frac{F_{n-1}}{2} + \pi \cdot d_n \cdot t \cdot R_m \cdot k$$

Avec k exprimé en fonction du rapport d'emboutissage :

k	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
$\beta_{\text{actual}} = \frac{D}{d}$	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2

LDR pour chaque cas

Figure 26 : [14] Valeur de k en fonction du rapport d'emboutissage

De ce fait, il est possible d'atteindre la hauteur souhaitée en trois passes successives :

1. $D/d = 2 \rightarrow d = 113.88 \text{ mm}$, $F = 103'186.46 \text{ N} = 103.186 \text{ kN} = 10522.04 \text{ kg} = 10.522 \text{ tonnes.}$
2. $D/d = 1.5 \rightarrow d = 75.92 \text{ mm}$, $F = 89'115.58 \text{ N} = 89.116 \text{ kN} = 9087.3 \text{ kg} = 9.087 \text{ tonnes.}$
3. $D/d = 1.15 \rightarrow d = 66 \text{ mm}$, $F = 58'149.26 \text{ N} = 58.149 \text{ kN} = 5929.55 \text{ kg} = 5.930 \text{ tonnes.}$

Compte tenu des calculs précédents, une presse hydraulique à emboutissage de 12 tonnes ou plus ou d'une force supérieur à 105 kN permettrait d'effectuer l'emboutissage pour créer une gourde avec l'alliage 1050A qui peut être produit avec de l'aluminium recyclé et raffiné.

Par exemple, le laboratoire de métallurgie mécanique de l'EPFL (LMM) possède une presse hydraulique possédant une force maximale de 700 kN (MXE013) qui pourrait nous permettre de créer une gourde.

De plus, un méthode simple de "metal spinning" permet de modifier la forme de l'extrémité ouverte afin d'en faire un goulot. Un spray anti-corrosion (couche transparente) est ensuite appliqué sur la couche interne de la gourde afin d'éviter l'oxydation de cette dernière et de conserver le goût du liquide contenu dans la gourde lors de longues conservations. Une fois la forme de la gourde terminée, un bouchon en liège peut être utilisé pour fermer la gourde. L'utilisation d'un bouchon en liège permet d'éviter l'utilisation de plastiques lors de la création du bouchon et simplifie la manufacture du bouchon. Cependant, un système de pièce de rechange doit être mis en place pour le bouchon car ce dernier risque de se dégrader plus rapidement qu'un bouchon en plastique classique pour ce type de gourde.

Limites du recyclage de l'aluminium

Les propositions suivantes d'objets réalisés à partir d'aluminium sont à considérer à grande échelle. Toutes les étapes du recyclage ne sont pas viables pour la réalisation d'une seule gourde et d'une seule plaque de tôle. Dans notre projet nous avons pensé de manière globale. Au vu de tous les avantages de l'aluminium, tant dans sa fabrication et ses applications, nous voulions motiver son recyclage pour toute la Suisse et éliminer tous les défauts actuels. L'initiative de la gourde et de la tôle ne sont que des propositions rendant compte du vaste panel de choix possible et imaginable.

Nous n'avons pas parlé du coût de réalisation car celui-ci est très variable. Premièrement en fonction du prix de l'aluminium et des autres métaux qui varient chaque jour selon l'offre et la demande. Deuxièmement la composition de tous les déchets d'aluminium récupérés n'est pas constante car dépendante des consommateurs. Ainsi il est difficile de prévoir les modifications à apporter pour obtenir les alliages souhaités et donc le coût en usine.

ALUMNI-HOME

Cependant, si nous avons l'occasion de réaliser notre propre gourde voici une idée de logo et de nom de marque. Alumni-home est une gourde réalisée par des Alumni EPFL pour la maison.



Figure 27 : Proposition de gourde créer avec le l'aluminium recyclé suite à cette étude.

ALUMNI-HOME car le recyclage de l'aluminium commence à la maison et concerne même les étudiants!

Références

Articles scientifiques :

[1] Radhika Sajja, Srinivasa Rao, D.Swapna, “A review on deep drawing process”, Juin 2017, 10.23956/ijerm.v6i6.260, Disponibilité : https://www.researchgate.net/publication/318044067_A_Review_on_Deep_Drawing_Process

[2] Slides cours Technologie de Bâtiment IV, section architecture par l'intervenant Patrick Clément

Livres :

[3] Roger Develay, Propriétés technologiques de l'aluminium et ses alliages corroyés, 1992, ref : M439 v1

Sites internet :

[4] Fiche: Calcul du taux de recyclage des canettes en aluminium - 05/03/2019 par Office Fédérale de l'Environnement OFEV - www.bafu.admin.ch

[5] Actu-Environnement.com - Organisation de la collecte en France, La gestion des déchets ménagers - 23/03/2009

[6] Poubelle jaune <http://clcv-valdoise.over-blog.com/article-poubelle-jaune-recycler-39902030.html>

[7] Recyclage de l'aluminium en France - Chiffres
<https://www.planetoscope.com/matières-premieres/1793-recyclage-de-l-aluminium-en-france.html>

[8] Brochure “L’aluminium dans les bâtiments, une solution durable” par European Aluminium Association - Disponible sur le site www.alu.ch

[9] Ligne de profilage pour tôle tuile ondulée, machine profileuse de tôle
<https://youtu.be/TjZyB6VQ2rw>

[10] Profileuse de tôles ondulées. <http://formingmachinery.eu/4-flat-sheet.html>

[11] La raffinerie de Cressier joue un rôle-clé en Suisse - www.24heures.ch 27/01/2019

[12] Site officiel Montana Systèmes de Construction SA - www.montana-ag.ch

[13] Initiative FoxDrop - www.foxdrop.ch

[14] Mediamef - Analyse des forces et des dimensions des tôles en emboutissage.
http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-2/EXPORTS_S125_publi/web/co/module_S125_3.html

[15] Le feuillard technique - L’emboutissage de l’aluminium.
https://www.cqrda.ca/wp-content/uploads/2013/07/Feuillard31_Emboutissage.pdf

[16] Swiss Recycling - aluminium.
<http://www.swissrecycling.ch/fr/substances-valorisables/aluminium/>

[17] Alu.ch - Recyclage de l'aluminium. <https://alu.ch/fr/materiau/recyclage-de-laluminium/>

[18] Igora.ch <https://igora.ch/fr/home/>

[19] Classification des alliages d'aluminium et leurs propriétés
<http://www.almet-metal.com/images/Catalogue-Almet.pdf>

[20] Recyclage des canettes en aluminium <https://www.youtube.com/watch?v=3VRJaFgGYdg>

[21] Recyclage aluminium au Québec <https://ceal-aluquebec.com/recyclage-aluminium/>

[22] Aluminium recycling process <https://www.youtube.com/watch?v=chIFt2A9MRI&t=131s>

[23] Gourdes alu et inox <https://www.sans-bpa.com/content/198-conseils-gourdes-bouteille>

[24] Dechets.ch - Collecte et recyclage de l'aluminium
https://www.dechets.ch/pages/info/pdf/Collecte_recyclage_alu.pdf

[25] Le dégazage des bains d'alliage d'aluminium
<https://metalblog.ctif.com/2019/01/21/le-degazage-des-bains-dalliage-daluminium/>