

Recyclage de l'aluminium : enjeux, défis et opportunités

Fanny Mas, Ingénieure Recherche et Développement en métallurgie chez Constellium

Introduction

Commençons par une rapide présentation de l'entreprise Constellium et de son centre de recherche. Ensuite nous regarderons les sources d'émissions de gaz à effet de serre dans l'ensemble du cycle de vie de l'aluminium et en quoi le recyclage a un rôle clé à jouer. Nous finirons par un focus sur un domaine particulier qui est l'automobile et les défis de la mise en place d'une économie circulaire dans ce domaine.

Constellium est l'une des multiples émanations d'un groupe

historique français, Pechiney¹. Aujourd'hui, Constellium c'est 12 500 employés répartis en 28 sites de production et 3 centres de recherche, majoritairement en Europe et aux États-Unis, avec un chiffre d'affaires de l'ordre de 8 milliards d'euros. Constellium conçoit et développe des produits et des solutions pour une variété de marchés en partenariat avec ses clients et pratique aussi le recyclage.

1. Ancien groupe français spécialisé dans l'électrometallurgie et le traitement de l'aluminium disparu en 2003.

Les différents types de produits vendus par Constellium sont résumés sur la **Figure 1** : les produits laminés, les bobines qui vont ensuite servir à la construction d'une pièce de carrosserie automobile par exemple, et aussi des produits extrudés qui peuvent servir à une structure dans une aile d'avion ou dans des composants automobiles. Nous reviendrons sur le recyclage plus en détail.

Nos grands secteurs d'activité sont (**Figure 2**) : l'emballage (avec notamment la canette), l'automobile, l'aéronautique, et de façon plus générale, l'industrie. Nos clients sont les principaux constructeurs automobiles, les fournisseurs de boîtes boissons, de sodas ou de bières et les constructeurs aéronautiques et aérospatiaux. Le centre de recherche (**Figure 3**), situé en France, près



Figure 1

Principaux matériaux produits et recyclés chez Constellium.

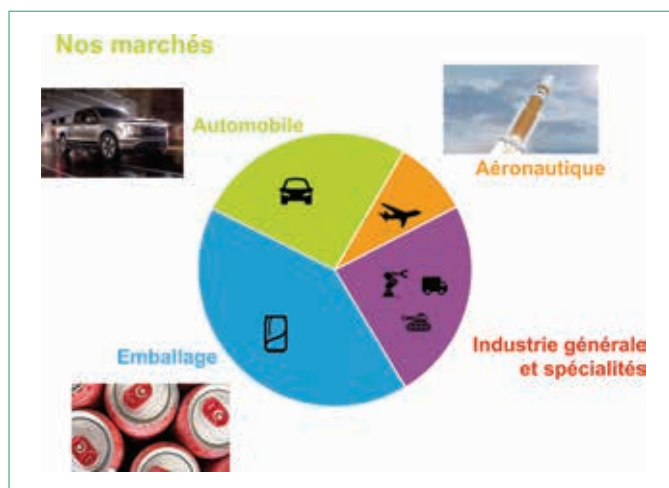


Figure 2

Les différentes branches d'activité de Constellium.

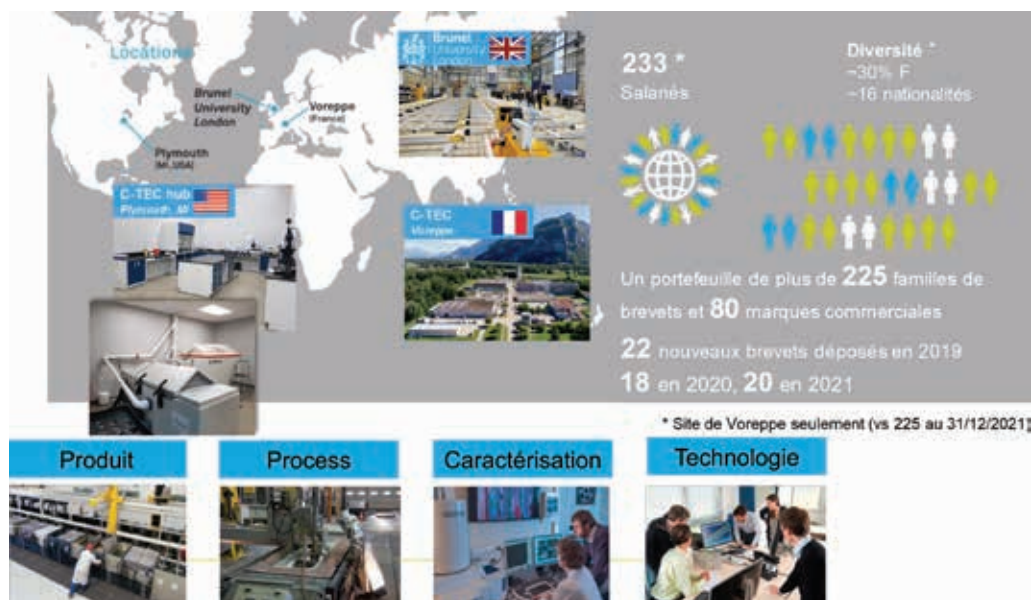


Figure 3

La recherche technologique chez Constellium.

de Grenoble, a deux antennes : une antenne sur le sol américain, dans le Michigan, et une antenne en Angleterre. La Recherche représente 230 salariés et un portefeuille de brevets de l'ordre de 225 familles de brevets². Nous développons des nouveaux produits (des nouveaux alliages), nous améliorons les procédés de fabrication, nous caractérisons les matériaux et nous fournissons un support technique à l'ensemble de nos usines. Nous avons aussi toute une partie de développement technologique sur les procédés de nos clients, et en collaboration avec eux : soudage, assemblage et mise en forme.

2. Brevets portant sur le même type d'innovation (parties d'un même procédé, d'un même produit).

1 Principales sources d'émissions de gaz à effet de serre dans le cycle de vie de l'aluminium

Le cycle de vie de l'aluminium est résumé sur la *Figure 4*. On part du minerai qui est bien connu : la bauxite³. Ensuite, il y a une étape d'affinage qui permet d'obtenir l'alumine (une combinaison d'oxygène et d'aluminium) puis une étape d'électrolyse⁴ qui permet de passer de l'oxyde au métal aluminium. Enfin, pour faire

3. Bauxite : roche sédimentaire blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer.

4. Électrolyse : méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique.

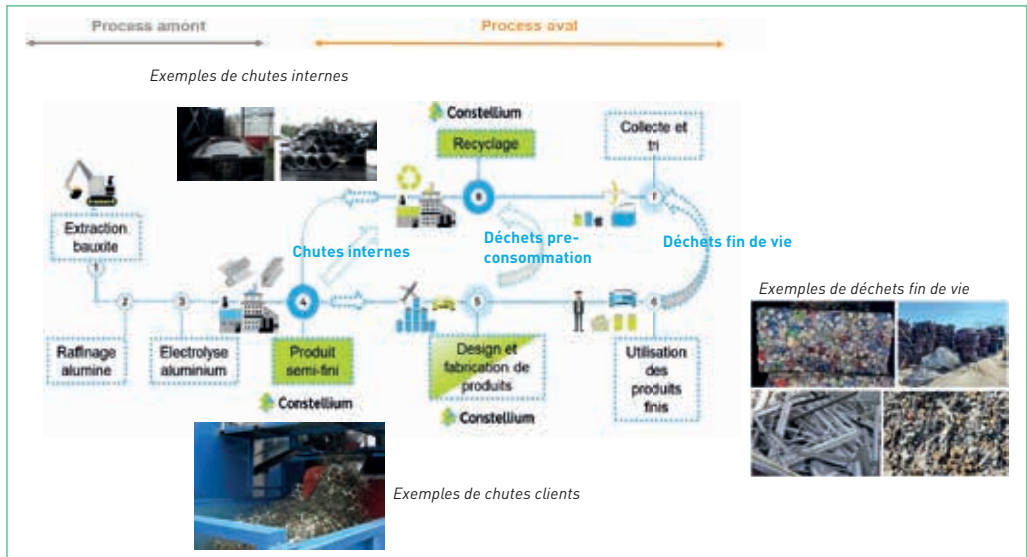


Figure 4

Positionnement de Constellium le long de la chaîne de valeur de l'aluminium.

un produit qu'on appelle semi-fini, on peut combiner de l'aluminium primaire (qui provient du minerai), et de l'aluminium secondaire qui provient de la boucle à droite (c'est-à-dire des différentes chutes qu'on va pouvoir récupérer lors du cycle de vie de l'aluminium).

Le premier type de chutes sont nos chutes internes issues de nos procédés de fabrication qui sont incorporées dans la fabrication des produits. Le second type de chutes, que l'on appelle les déchets pré-consommation, provient des chutes de nos clients (Figure 4). Par exemple, lors de la livraison d'une bobine, vont avoir lieu des étapes de découpe et de mise en forme : ces étapes conduisent à des chutes qui peuvent être elles aussi réutilisées dans le procédé. *Le plus important, ce sont les déchets fins de vie dont*

beaucoup sont bien connus : la canette en aluminium, les câbles électriques ou les profilés bâtiments (par exemple les profilés de fenêtres). Nous reviendrons sur l'aluminium issu de pièces automobiles usagées plus tard.

Constellium n'intervient pas sur la partie extraction de la bauxite, affinage de l'alumine et électrolyse, nous achetons l'aluminium primaire et nous y incorporons des éléments d'alliages tels que le silicium, le magnésium, le cuivre, le zinc...

L'empreinte carbone de la production de l'aluminium primaire (Figure 5) est importante. Pour donner un ordre de grandeur, le monde de l'aluminium représente 2% des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, avec une moyenne de 17 tonnes

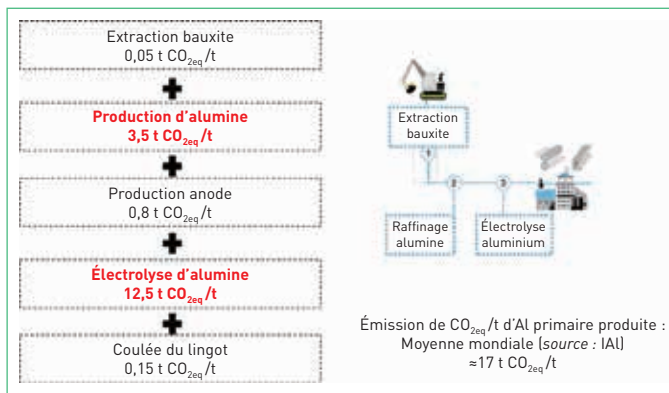


Figure 5

Empreinte carbone de la production d'aluminium primaire.

d'équivalent CO₂⁵ (noté T_{éq}/t dans la suite) par tonne d'aluminium produite.

L'électrolyse de l'aluminium est un procédé particulièrement énergivore qui, suivant la source d'énergie qui va être utilisée, émet une quantité significative de CO₂.

L'empreinte carbone de l'aluminium est donc dominée par le contenu en CO₂ du métal arrivant en amont de nos productions (Figure 6). Nos procédés internes, c'est-à-dire les émissions de CO₂ à la sortie de nos usines et l'électricité que nous consommons, sont bien plus faibles, comme représenté par la taille du petit rond orange de la figure ci-après.

Dans l'industrie, on divise les émissions de CO₂ en trois scopes. Le scope 1, ce sont les émissions à la sortie des

5. Tous les gaz à effet de serre n'ont pas le même impact sur le réchauffement de l'atmosphère. Dans un souci de compréhension, on standardise en fonction du pouvoir de réchauffement d'une molécule de dioxyde de carbone. Par exemple, si une tonne d'un gaz X a une capacité de réchauffement quatre fois plus grande que le CO₂, elle équivaldra à 4 tonnes d'équivalent CO₂.

usines. Le scope 2, c'est l'électricité consommée, et le scope 3 représente tous les achats. Dans notre cas, nous achetons de l'aluminium primaire qui provient de l'électrolyse. C'est donc ce scope 3 qui domine le contenu CO₂ du métal final livré à nos clients.

Le groupe Constellium s'est engagé à une réduction des émissions de CO₂. Nous sommes aujourd'hui en moyenne à 5 T_{éq}/t. Notre objectif est de passer à 3,5 T_{éq}/t,

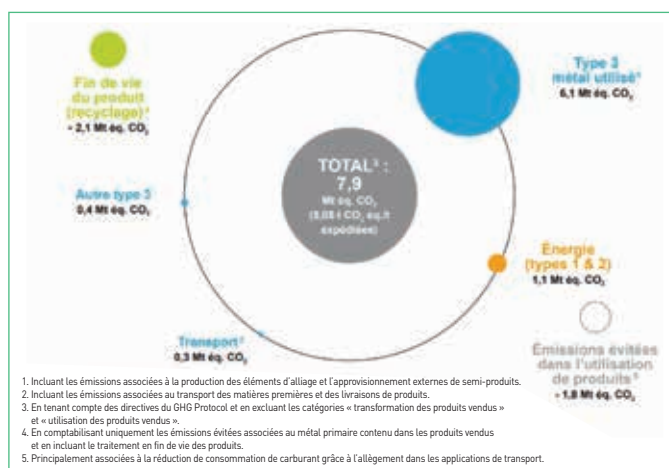


Figure 6

L'empreinte carbone de Constellium.

ce qui inclut nos achats de matières extérieures. La tenue de cet objectif passe notamment par une augmentation du recyclage avec un minimum de 50 % d'aluminium utilisé issu des process de recyclage en 2030.

2 Le rôle clé du recyclage de l'aluminium

2.1. L'impact de l'aluminium primaire sur l'environnement

Le graphique de la *Figure 7* donne l'empreinte carbone par tonne d'aluminium primaire en fonction de son procédé de production. On retrouve les 17 Téqu/t de la moyenne mondiale (barre orange), même si cela va varier en fonction du pays dans lequel l'aluminium primaire est produit et de la source d'électricité utilisée pour cette production. On voit que, même quand on utilise une énergie décarbonée (par exemple sur l'usine de Dunkerque), on émet tout de même 4,5 Téqu/t (barre bleue). Mais quand on recycle (refusion de chutes), on passe de 17

à 0,5 Téqu/t (barre verte) et on réduit de 95 % les émissions de dioxyde de carbone, ainsi que l'énergie utilisée.

Le recyclage est un objectif clé pour l'aluminium étant donné ce gap⁶ d'émission de CO₂ entre la production primaire et le recyclage. La comparaison entre l'énergie utilisée pour la production primaire de différents matériaux et l'énergie utilisée pour recycler ces matériaux est représentée sur la *Figure 8*. Nous voyons que l'aluminium est le matériau pour lequel, parmi les matériaux courants, la différence est la plus importante. C'est lié au fait que l'aluminium a une forte affinité pour l'oxygène. Ainsi, lors de l'étape d'électrolyse, pour passer de l'alumine à l'aluminium, il va falloir séparer l'aluminium de l'oxygène et cette étape est très énergivore. À l'inverse, l'aluminium a un bas point de fusion, c'est-à-dire que quand il faut le refondre pour le recycler, il suffit de le chauffer à une température entre 600 et 700 °C. Ainsi, la consommation énergétique liée à l'étape

6. Gap : écart.

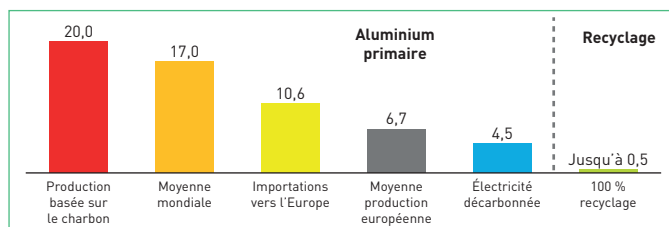


Figure 7

Émissions de gaz à effet de serre de la production d'aluminium primaire et du procédé de recyclage en tonne d'équivalent CO₂ par tonne d'aluminium produit (Téqu/t).

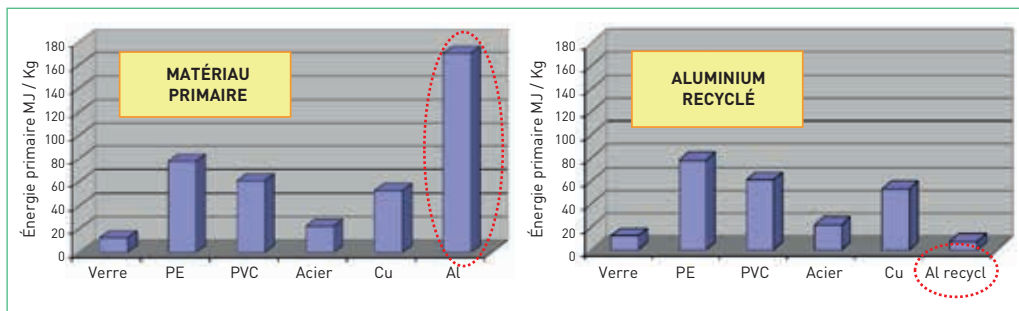


Figure 8

Différence d'énergie utilisée par les matériaux primaires et recyclés.

de recyclage est relativement faible. **Le recyclage est vraiment la pierre angulaire de la diminution des émissions de CO₂ dans le domaine de l'aluminium.**

Le recyclage des canettes

Regardons l'exemple de la canette en aluminium. Le taux de collecte des canettes en Europe est de 80 %. La France est un mauvais élève parce qu'elle n'en collecte que 60 %. Dans beaucoup de pays il y a une consigne sur la canette en

aluminium et ces canettes sont collectées séparément des autres déchets. Globalement, quand elles sont ainsi collectées, elles peuvent être directement compactées (Figure 9) et envoyées dans nos fours de recyclage. Pendant le cycle de fusion, il y a une étape qui permet d'éliminer les peintures et les vernis, on obtient ensuite un lingot (Figure 10). Ce lingot peut servir à refabriquer le corps de la canette en aluminium. Ce cycle de recyclage fonctionne bien et tend vers un



Figure 9

Aluminium compacté.

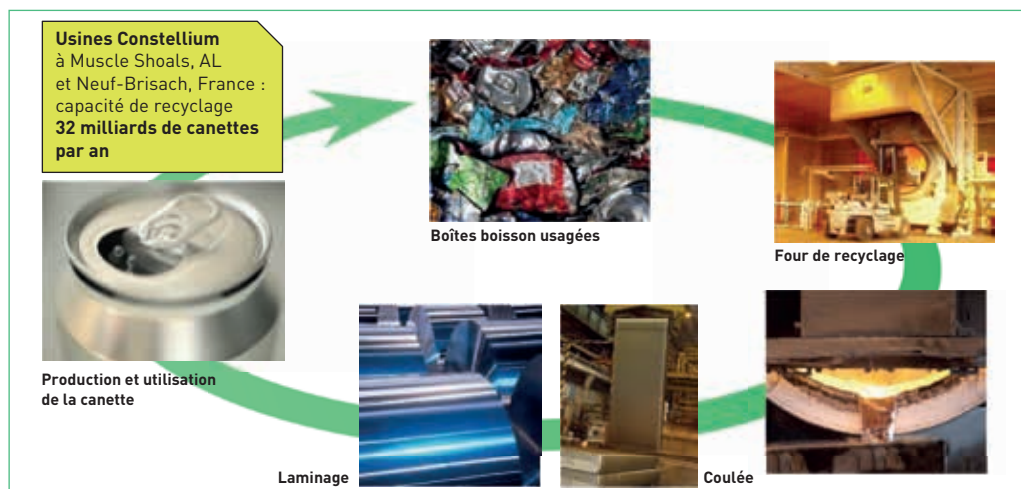


Figure 10

Canettes en aluminium : cycle de recyclage de l'aluminium.

recyclage infini (ce n'est pas le cas forcément des autres domaines).

Dans le cas des canettes, le challenge est l'investissement : il faut investir sur les capacités de recyclage, et plus particulièrement sur les fours de recyclage. Sur notre site production en Alsace, il y a un chantier de construction d'un nouveau centre de recyclage (*Figure 11*). L'objectif est de pouvoir accueillir 135 000 tonnes supplémentaires de produits recyclés et ainsi éviter 400 000 tonnes d'émissions de CO₂ sur ce site. Les avantages seront la diminution de la dépendance à l'électrolyse, et la diminution du contenu CO₂ de nos produits en réponse aux attentes environnementales de nos clients, ainsi qu'une diminution des coûts de production et une meilleure efficacité énergétique. Le début de la production pour ce nouveau centre de recyclage est prévu pour septembre 2024.

2.2. Les enjeux du recyclage de l'aluminium

Le recyclage de l'aluminium peut parfois être limité par la présence d'impuretés ainsi que le mélange des familles d'alliages.

Il y a deux gros challenges à résoudre qui sont la séparation de l'aluminium par famille d'alliages et l'élimination de la contamination. Le pire ennemi est le fer, or l'acier est abondant dans un certain nombre de produits. Regardons l'exemple de la *Figure 12*, à gauche : c'est une image au microscope électronique à balayage⁷ d'un produit en aluminium. Ce qui figure en blanc et en noir est ce qu'on appelle des phases intermétalliques. Comme le fer n'est pas très

7. Microscope électronique à balayage : technique de microscopie qui utilise un fin faisceau d'électrons capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.



Figure 11

Usine de recyclage d'aluminium en construction.

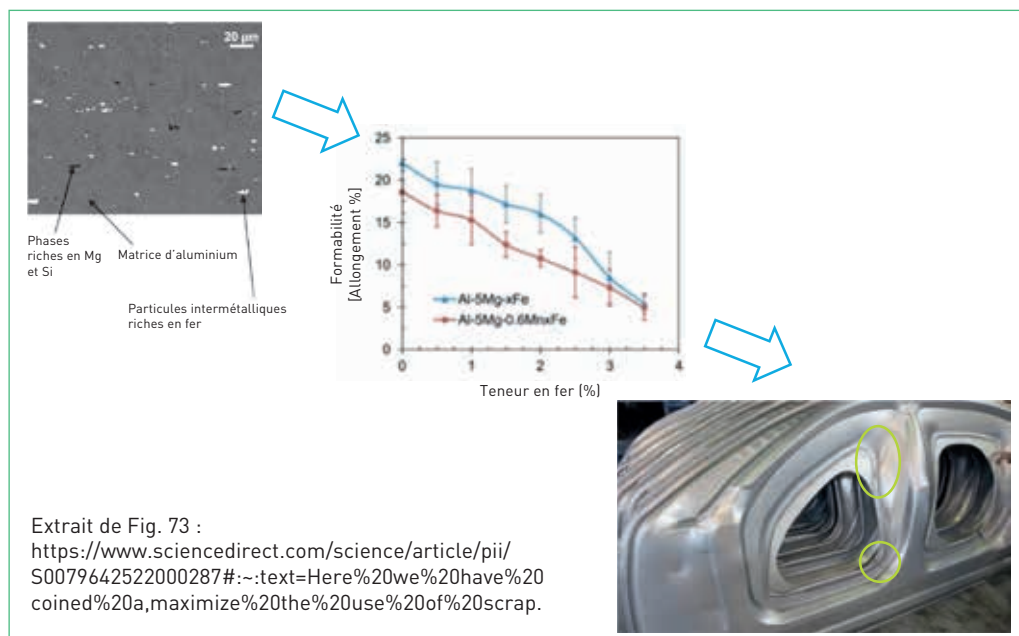


Figure 12

Conséquence de la présence de fer dans les alliages d'aluminium.

soluble dans l'aluminium, il s'agglomère pour former ces phases intermétalliques qui, ensuite, peuvent donner lieu à des sites d'endommagement lors de la sollicitation mécanique du matériau. On voit la conséquence sur la **Figure 12**, à droite, le produit final qui est un côté de caisse automobile qui a été embouti et qui présente des fissures.

De plus, un certain nombre de produits doivent répondre à des caractéristiques mécaniques de ductilité⁸ et de mise en forme importantes, qui peuvent dépendre de la pureté de l'aluminium : il va donc falloir focaliser nos efforts sur la décontamination lors du recyclage.

8. Ductilité : capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre.

3 Le challenge de l'économie circulaire pour l'aluminium de l'automobile

3.1. L'aluminium dans les véhicules légers

Dans l'automobile, la situation est très différente de la situation de la canette mentionnée précédemment. Dans l'automobile, on utilise beaucoup d'alliages d'aluminium différents, ce sont des produits plus complexes qu'une canette. On a deux grandes familles d'alliages d'aluminium :

- **Les alliages moulés créés par des procédés de moulage.**

Ces alliages sont actuellement très présents dans l'automobile parce qu'ils sont utilisés dans toutes les pièces du bloc motopropulseur d'un véhicule thermique. Il y a deux types



Figure 13

Poutre de pare-chocs.

d'alliages de moulage. On va trouver *des alliages de moulage secondaires* qui peuvent tolérer beaucoup d'impuretés, car ils sont utilisés pour des pièces qui sont peu sollicitées mécaniquement (c'est le cas par exemple d'un caisson d'un moteur thermique).

Au contraire dans le cas des roues ou des pièces de structure, on utilise *des alliages de moulage primaires* qui vont avoir peu de tolérance aux impuretés. Ces alliages sont des mélanges d'aluminium et de silicium, pouvant contenir jusqu'à 10-12 % de silicium. Constellium ne travaille pas sur ce type d'alliage.

- La deuxième famille est celle des **alliages corroyés** qu'on retrouve plutôt sur tous les ouvrants, parmi lesquels les portières, les capots, les poutres de pare-chocs comme celle qui est représentée

Figure 13 ou certaines pièces de structure. Ces pièces sont fabriquées avec d'autres alliages que les pièces moulées. Certes, on a toujours majoritairement de l'aluminium, mais on a aussi du magnésium pour la famille 5xxx, ou pour la famille 6xxx des mélanges silicium et magnésium.

Le challenge pour recycler l'aluminium du véhicule est non seulement de l'extraire au milieu de tous les autres éléments qui sont présents (verre, plastique, acier, autres matériaux métalliques), mais aussi de faire ensuite une séparation par famille d'alliage.

Malheureusement, les alliages corroyés sont peu tolérants aux alliages de moulage. À l'inverse, les alliages de moulage de seconde fusion peuvent absorber les alliages corroyés, mais ce n'est pas le cas dans l'autre sens (**Figure 14**).

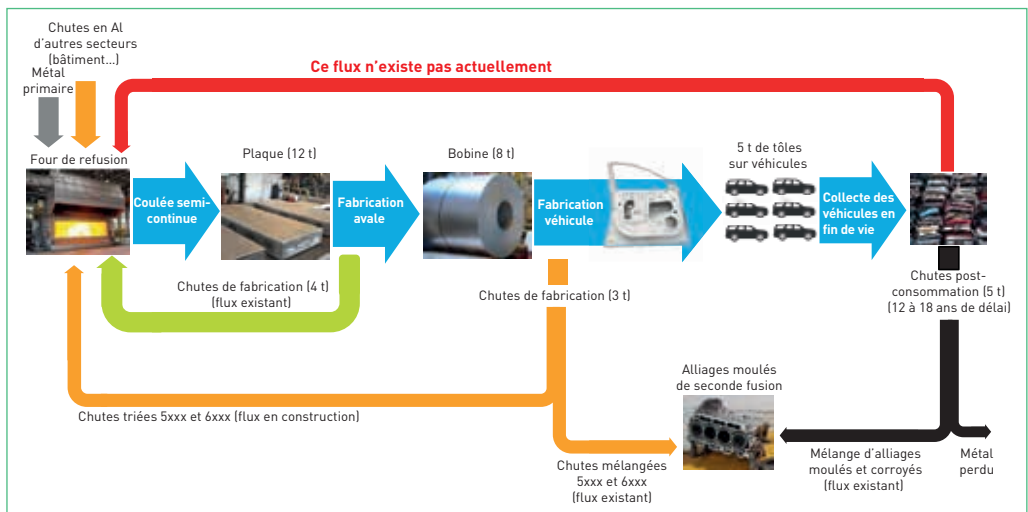


Figure 14

État du recyclage de l'aluminium dans l'automobile.

3.2. Le recyclage de l'aluminium dans l'industrie automobile (Figure 14)

Aujourd'hui, nos fours de fusion sont alimentés, soit par du métal primaire, soit par des déchets de fin de vie. Mais ces déchets de fin de vie ne viennent pas de l'automobile, ce sont des déchets issus du bâtiment ou issus de câbles. Ces déchets sont coulés en lingots et les chutes de fabrication reviennent dans le four de fusion.

Ensuite, la bobine qui est obtenue va être livrée chez le constructeur automobile qui va la mettre en forme et la découper pour en faire par exemple une portière. À ce moment-là, il y a des chutes de fabrication. Le flux retour des chutes entre les constructeurs automobiles et les fabricants d'aluminium est en train de se mettre en place, notamment parce que certaines lignes traditionnelles des constructeurs automobiles ne font pas l'objet de tri entre familles d'alliages (5xxx et 6xxx mélangés). En effet, pour une même pièce de carrosserie par exemple, on peut avoir un alliage 5xxx pour la partie interne et un alliage 6xxx pour la tôle externe. Quand les chutes sont mélangées, elles retournent dans les alliages de seconde fusion, elles sont certes recyclées, mais pour une application différente à moindre valeur ajoutée.

Enfin, le véhicule en fin de vie représente un dernier challenge : il compte parmi les déchets qu'on appelle post-consommation. Lorsque le véhicule est broyé, on sépare l'aluminium des autres matériaux ; par contre, tous

les mélanges d'aluminium retournent dans les alliages de moulage de seconde fusion. L'enjeu est d'être capable d'extraire les alliages corroyés des véhicules pour les réinjecter dans nos fours.

3.3. Perspectives pour le futur du recyclage (Figure 15)

Nous avons un projet en cours de construction, avec l'ADEME⁹ et l'Écosystème du recyclage automobile, pour récupérer les alliages corroyés sur les véhicules en fin de vie. Sachant que leur part ne fait qu'augmenter, à l'avenir les quantités à traiter vont être de plus en plus importantes. Globalement, nous voulons travailler sur deux types de filière, en collaboration avec des partenaires.

La filière traditionnelle est celle du broyage du véhicule et du traitement du résidu d'aluminium après séparation d'avec les autres matériaux¹⁰. Nous travaillons avec des techniques de tri type laser pour séparer les différentes familles d'alliages d'aluminium, notamment pour récupérer la famille 6xxx qui nous intéresse particulièrement.

Avec un partenaire français appelé l'Indra, qui est spécialisé dans le démantèlement des véhicules, nous voulons tester une autre filière basée sur le démontage. Plutôt que de mélanger et de broyer la voiture, nous souhaitons aller chercher spécifiquement les pièces en aluminium. Notre projet a pour but d'évaluer la faisabilité technique et l'intérêt

9. ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

10. Ce résidu est appelé « twitch ».



Figure 15

Les différents projets de Constellium pour la circularité de l'aluminium.

économique de ces deux filières et de les comparer.

Avec une croissance des véhicules électriques pour lesquels la demande en alliage de moulage de seconde fusion va être bien moindre, on devrait se retrouver avec un surplus de ce type de déchets. Ainsi, l'idée est de développer des alliages

plus tolérants aux impuretés, plus compatibles avec ce type de matériaux d'entrée. Une application possible concerne le caisson de la batterie du véhicule électrique. Nous travaillons sur des modèles qui seraient capables d'avoir des hautes teneurs en aluminium de recyclage à partir de ce type de mélange.

Conclusion

Dans la filière de l'aluminium, augmenter le contenu recyclé du métal est la façon la plus rapide, la plus simple et la moins consommatrice d'énergie pour réduire l'empreinte carbone des produits. C'est une combinaison unique d'opportunités et de challenges.

La culture du recyclage est déjà bien développée (avec une excellente recyclabilité intrinsèque) et présente un bénéfice économique clair.

En revanche, le concept d'économie circulaire doit être étendu à l'ensemble des marchés avec le challenge d'atteindre les exigences de performance des produits finis.

Constellium est actif pour aborder ces défis aussi bien sur la partie investissement industriel qu'au niveau R&D avec de multiples actions :

- développement d'alliages plus tolérants aux impuretés et aux variations de composition ;
- écodesign en partenariat avec les constructeurs pour faciliter le recyclage en fin de vie (composants mono alliage notamment) ;
- amélioration des techniques de tri avec les spécialistes du tri, et optimisation de la préparation des chutes avant refusion avec les récupérateurs.