

# The Transition Institute 1.5

L'ambition d'une véritable transition

## NOTE D'ÉCLAIRAGE

#15 - avril 2025

### Vers une utilisation de plus en plus intensive de l'aluminium recyclé

ELEONORA ABI RACHED

Mines Paris, Université PSL, Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF), UMR CNRS 7635, 06904 Sophia Antipolis, France

*eleonora.abi\_rached@minesparis.psl.eu*

# I. INTRODUCTION

L'industrie de mise en forme a connu une évolution majeure au fil des siècles, marquée par les grandes révolutions industrielles qui ont transformé les méthodes de fabrication. D'un travail artisanal manuel, elle est passée à une production mécanisée de plus en plus performante, accompagnée par l'essor des nouvelles technologies. Cette transformation a profondément influencé le secteur des matériaux, notamment la métallurgie, qui a bénéficié d'innovations en matière de mise en forme et de production.

L'histoire de l'industrie de l'aluminium s'inscrit également dans cette dynamique. Découvert au début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'aluminium est rapidement devenu un matériau incontournable, notamment grâce aux avancées dans son extraction et son recyclage. Aujourd'hui, son importance ne cesse de croître dans un contexte où la transition vers une industrie plus durable et économe en ressources est devenue un enjeu majeur. Dans ce qui suit, l'évolution de l'industrie de mise en forme sera explorée en mettant en lumière son impact sur le développement de l'aluminium et des technologies qui lui sont associées.

# II. Histoire de l'industrie de mise en forme

## II. 1 - Histoire de l'industrie

L'industrie de mise en forme a connu une transformation significative au fil des révolutions industrielles, passant d'un modèle artisanal lent à une production mécanisée rapide. Avant la révolution industrielle, l'industrie manufacturière reposait sur le travail manuel réalisé par des artisans qualifiés. Cela rendait la production lente et la quantité de biens limitée, nécessitant un temps considérable. En ce qui concerne la métallurgie, la mise en forme des matériaux consistait principalement en des techniques de forgeage et de moulage du bronze et du fer, utilisées pour produire des outils, des armes, des objets décoratifs, etc.

La Deuxième Révolution Industrielle a marqué la transition de la puissance de la vapeur à l'électricité tandis que la Troisième Révolution s'est concentrée sur la transformation des processus mécaniques et analogiques en processus numériques.

Enfin, la Quatrième Révolution a, quant à elle, mis l'accent sur l'automatisation et l'intégration du numérique dans les systèmes de production. Ainsi, au fil du temps, la fabrication des produits est devenue plus facile et plus rapide, répondant aux demandes des consommateurs en satisfaisant leurs besoins et en développant de nouvelles technologies pour suivre le marché et son évolution. Parallèlement, l'industrie de l'aluminium a connu un essor au XIX<sup>e</sup> siècle grâce à la découverte de ce métal et à l'optimisation des procédés d'extraction. L'aluminium, apprécié pour sa légèreté et sa recyclabilité, est désormais indispensable dans de nombreuses applications industrielles. Cependant, sa production primaire reste énergivore, ce qui rend le recyclage essentiel pour réduire l'empreinte carbone et promouvoir une métallurgie durable.

## II. 2 - Industrie de l'aluminium

L'industrie de l'aluminium s'est créée sur plusieurs décennies. Avant que l'aluminium ne soit produit industriellement, il a été découvert par le chimiste anglais Humphry Davy en 1808, qui l'a nommé « *aluminium* », dérivé du mot latin « *alumen* » pour l'alun

(sulfate double d'aluminium et de potassium). Davy a montré que l'aluminium pouvait être produit par réduction électrolytique de l'alumine (oxyde d'aluminium) mais n'a pas réussi à prouver cette théorie en pratique.

En 1821, une roche argileuse rougeâtre, blanche ou grise a été découverte en France par le géologue Pierre Berthier, qui la nomma « *bauxite* » en l'honneur de la région des Baux-de-Provence où il l'avait trouvée. Cette roche est constituée d'alumine ( $Al_2O_3$ ) et d'oxydes de fer (Figure 1).



Figure 1. Minerai de la bauxite [1].

L'aluminium, naturellement présent sous forme d'oxydes, n'a été découvert sous sa forme pure qu'après les avancées en chimie et l'avènement de l'électricité. C'est pourquoi, il a été isolé par l'homme relativement tard, au XIX<sup>e</sup> siècle. En effet, l'extraction de l'alumine à partir de la bauxite est réalisée à l'aide du procédé Bayer. L'électrolyse de l'alumine permet ensuite de produire de l'aluminium. Cet aluminium, ainsi que ses alliages, est utilisé pour fabriquer une large gamme de produits tels que des feuilles, des plaques, des tiges, des barres, des fils, des tubes, des tuyaux et des structures. Il sert également à la production de pièces d'ingénierie comme les profilés extrudés, les pièces forgées, embouties et moulées.

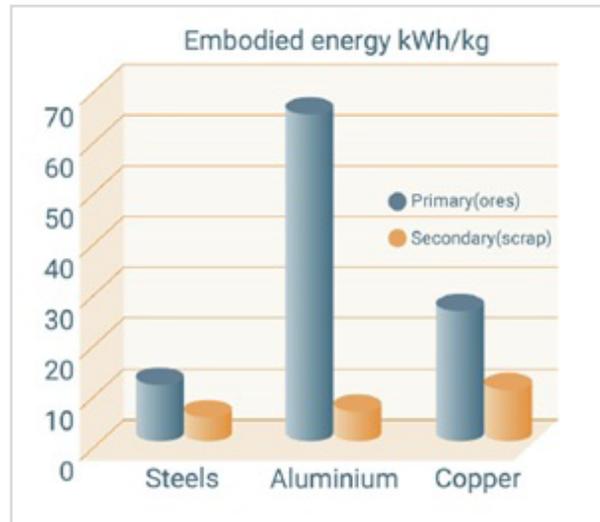
L'alliage le plus pur d'aluminium, avec au moins 99% d'aluminium, est largement préféré pour les emballages techniques et les applications nécessitant une excellente résistance à la corrosion ainsi qu'une formabilité exceptionnelle (série 1XXX). L'incorporation

d'éléments chimiques supplémentaires à l'alliage, même sous forme d'impuretés, peut conférer des propriétés mécaniques spécifiques en fonction de la nature des éléments introduits. Ces ajouts permettent d'ajuster les caractéristiques de l'alliage telles que sa résistance ou sa formabilité. Par ailleurs, la résistance mécanique de certains alliages peut être considérablement renforcée par l'application de traitements thermiques adaptés qui modifient la structure interne du matériau pour en optimiser ses performances.

# III. Développement et intégration de matières recyclées

L'aluminium est largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles en raison de sa combinaison unique de propriétés. Sa faible densité, environ trois fois inférieure à celle du cuivre, en fait un matériau de choix pour les secteurs où la légèreté est essentielle comme l'aéronautique, l'automobile et le transport. Malgré cette légèreté, l'aluminium conserve des propriétés mécaniques et physiques remarquables, notamment une excellente conductivité électronique, une résistance à la corrosion, une malléabilité élevée, etc. Cependant, il possède un double aspect de durabilité puisque sa production crée beaucoup de gaz à effet de serre. Son extraction, à partir de la bauxite, émet du dioxyde de carbone, du méthane, des oxydes d'azote, des hydrofluorocarbures, des perfluorocarbures et de l'hexafluorure de soufre. Ces émissions correspondent à 3% des gaz à effet de serres mondiaux, avec environ 1,1 gigatonne équivalent de dioxyde de carbone par an.

La production d'aluminium primaire à partir de la bauxite est, cependant, un processus très énergivore, nécessitant environ 45 kWh par kilogramme d'aluminium produit et créant 12 kg de CO<sub>2</sub> par kilogramme. En revanche, le recyclage de l'aluminium, appelé aluminium secondaire, consomme seulement 5% de cette énergie, soit 2,8 kWh par kilogramme, et ne produit que 0,6 kg de CO<sub>2</sub> par kilogramme. Cette économie d'énergie considérable s'explique notamment par le faible point de fusion de l'aluminium, fixé à 660°C, ce qui rend son retraitement bien plus efficace que l'extraction initiale. La différence marquée en termes de consommation d'énergie et d'émissions de CO<sub>2</sub> entre la production primaire et le recyclage démontre l'importance cruciale du recyclage dans la réduction de l'empreinte carbone de l'industrie de l'aluminium. Le recyclage joue ainsi un rôle central dans la transition vers une métallurgie plus durable et respectueuse de l'environnement (Figure 2).



**Figure 2 : Comparaison de la consommation énergétique entre la production primaire et la production secondaire de trois métaux : acier, aluminium et cuivre [2].**

Il est essentiel de souligner que l'aluminium est infiniment recyclable sans altération de ses propriétés chimiques et physiques, ce qui en fait un matériau particulièrement favorable à l'économie circulaire. L'aluminium ne subit pas de changements chimiques qui pourraient altérer sa performance et ne perd pas ses propriétés mécaniques comme la résistance, la durabilité ou la légèreté. Il peut être fondu, purifié et refondu plusieurs fois sans perte de qualité.

# IV. Indépendance de la France

**E**n tenant compte des avantages du recyclage de l'aluminium, il serait plus judicieux pour la France de favoriser cette pratique car le pays dépend actuellement des importations pour répondre à ses besoins en aluminium. En développant une filière de recyclage à grande échelle, la France pourrait créer une véritable « mine » locale. En effet, la bauxite, principal minerai utilisé pour la production d'aluminium, est très peu exploitée en Europe, ce qui rend le continent largement dépendant des importations, à hauteur de 87%. Par exemple, la Guinée est le principal fournisseur de bauxite pour l'Union Européenne. En renforçant ses capacités de recyclage, la France pourrait non seulement réduire cette dépendance vis-à-vis de l'étranger mais aussi diminuer son empreinte carbone, tout en assurant un approvisionnement en aluminium plus durable et stable. Cela renforcerait son autonomie, notamment dans un contexte mondial où les matières premières deviennent de plus en plus stratégiques.

Pour atteindre cet objectif, il est essentiel d'adapter les procédés industriels de mise en forme car les matériaux recyclés sont généralement plus durs et moins ductiles en raison de leur pureté inférieure, ce qui les rend plus difficiles à transformer. Il est donc crucial d'optimiser ces procédés pour prendre en compte la diversité des alliages d'aluminium, chacun contenant des impuretés à des concentrations variées. Cette diversité nécessite de repenser les techniques de mise en forme afin de maximiser la qualité et les performances des produits finis. Une connaissance approfondie des microstructures des alliages recyclés, ainsi que des mécanismes de plasticité et de recristallisation, est indispensable car ces phénomènes peuvent entraîner des évolutions microstructurales au cours des différentes étapes de mise en forme. Étudier ces mécanismes est primordial pour garantir que les matériaux recyclés répondent aux mêmes exigences de performance que les matériaux primaires, tout en optimisant l'efficacité des processus industriels.

Ainsi, adopter une politique de recyclage ambitieuse, notamment pour l'aluminium, pourrait renforcer la souveraineté économique de la France dans ce secteur mais cela ne garantirait pas une autonomie totale. Le concept de souveraineté demeure complexe bien que des gains d'autonomie soient envisageables sur certains aspects.

Cependant, au-delà de l'indépendance économique, cela pourrait également offrir des bénéfices en matière de souveraineté énergétique et industrielle. En réduisant la demande d'importations d'énergie pour ce secteur, la France pourrait répondre aux objectifs de transition énergétique et de réduction de son empreinte carbone. En outre, le développement de technologies et d'infrastructures de recyclage avancées permettrait la création d'emplois locaux et favoriserait l'innovation, consolidant ainsi l'indépendance industrielle du pays.

# V. Conclusion

**E**n conclusion, face aux défis environnementaux et économiques actuels, le recyclage de l'aluminium émerge comme une solution stratégique pour renforcer la compétitivité des industries tout en réduisant leur empreinte carbone. Étant donné les nombreux avantages que le recyclage de l'aluminium peut apporter à la souveraineté économique dans ce secteur, il est crucial que les industries s'engagent dès maintenant dans des études approfondies afin d'intégrer efficacement ces matériaux recyclés dans leurs processus de production. Cette transition vers l'utilisation de matériaux recyclés est non seulement nécessaire pour répondre aux exigences croissantes de durabilité et de responsabilité environnementales mais elle constitue également un levier pour améliorer leur compétitivité sur le marché. En adoptant une démarche proactive en matière de recherche et développement, les industries pourront découvrir de nouvelles opportunités et innovations facilitant l'intégration des matériaux recyclés tout en garantissant les normes de qualité et de performance requises.

# VI. Références

1. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite>
2. D. Raabe et al., Progress in Materials Science 128, 100947, 2022.
3. Atlas industriel - Bilan et enjeux, Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE), Tome 1, Édition 2014.
4. ([https://aluminiumleader.com/history/industry\\_history/](https://aluminiumleader.com/history/industry_history/)) en ligne, consulté le 30/05/2024.
5. M. Gastou, Saga Information - N° 385 - Novembre-Décembre 2021.
6. L'aluminium, Techniques de l'Ingénieur, Construction et travaux publics, Réf. : TBA1066, 2005.



## CONTACT

🌐 [the-transition-institute.minesparis.psl.eu](https://the-transition-institute.minesparis.psl.eu)

✉ [tti.5@minesparis.psl.eu](mailto:tti.5@minesparis.psl.eu)