

La production mondiale de l'aluminium

Empreinte carbone

Introduction

L'aluminium est le métal le plus répandu après le silicium. Dans la nature, l'aluminium et le silicium n'existent pas à l'état libre. Dans la bauxite, l'aluminium se retrouve sous forme d'oxydes hydratés ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) combinés à d'autres minéraux [1]. La production mondiale d'aluminium en 2015 s'élève à tout près de 60 Mt dont les trois principaux pays producteurs sont : la Chine, la Russie et le Canada (où 90 % de l'aluminium est produit au Québec) ([2, 3]. En 2015, la quantité mondiale d'émissions des gaz à effet de serre (GES) reliée à la production d'aluminium est estimée à 562 Mt de CO_2 équivalent (voir glossaire, p.12) [2, 4], ce qui représente environ 9 tonnes de CO_2 équivalent par tonne d'aluminium produit. Au cours des dernières années, de nombreuses améliorations ont été réalisées par les producteurs d'aluminium consciencieux pour l'environnement afin de diminuer leurs émissions de GES [2, 6]. Grâce à ces efforts au niveau du procédé d'électrolyse et à l'utilisation de l'hydroélectricité, en 2017, les producteurs d'aluminium canadiens ont abaissé leurs émissions à environ 2 tonnes de CO_2 équivalent par tonne d'aluminium produit [15]. On comprend que la production d'aluminium primaire à l'échelle mondiale demeure un secteur d'activités qui, pour diminuer son impact environnemental, doit commencer par s'affranchir de l'électricité produite avec les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel).

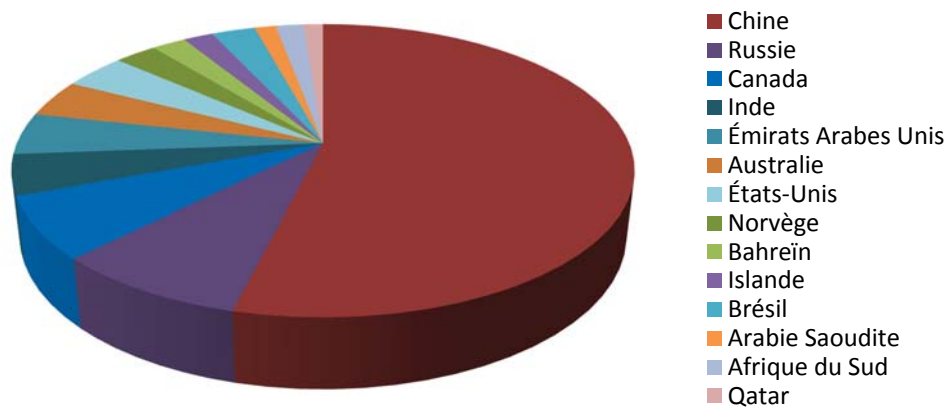


Figure 1. Répartition moyenne de l'aluminium primaire fabriqué par les principaux pays ayant la plus grande production (moyenne de 2010 à 2016) [2, 3].

Le gouvernement du Québec avait mis en place un projet pilote sur l’empreinte carbone. Les trois producteurs d’aluminium primaire du Québec, Alcoa, Alouette et RioTinto, qui possèdent déjà la plus faible empreinte carbone au monde, sont parmi les entreprises participantes de ce projet qui visait à consolider le leadership du Québec dans ce secteur industriel [7].

Selon les modèles établis pour le calcul de l’empreinte carbone associé à la production de l’aluminium primaire, le procédé d’électrolyse et surtout le type d’électricité utilisé sont les éléments ayant le plus d’impacts sur les GES. Plusieurs études ont démontré que l’utilisation de l’hydroélectricité, de concert avec une technologie plus efficace d’un point de vue environnemental, procure un aluminium ayant la plus faible émission de GES [4, 8]. L’usage d’énergie renouvelable, tel que l’hydroélectricité, dans la production de l’aluminium est d’autant plus important en considérant les perspectives d’avenir de la disponibilité des énergies fossiles [9]. Les contraintes sur la production future d’aluminium primaire proviendront de la disponibilité et la qualité des ressources minérales et du coût de l’énergie électrique renouvelable. Certaines études laissent prévoir que la quantité d’aluminium disponible sur le marché mondial proviendra majoritairement de l’aluminium recyclé autour de 2030. Cependant avec les pertes au recyclage, à la durabilité de l’aluminium (stockage dans les produits) et l’accroissement des besoins, l’aluminium recyclé disponible ne pourra pas suffire à la demande. La production d’aluminium primaire devra donc combler les besoins. La pérennité de l’aluminium tel que produit actuellement dépend fortement de la gestion des réserves (combustibles fossiles, minerais et taux de recyclage de l’aluminium) [9]. Sachant que les anodes utilisées présentement par l’ensemble de l’industrie nécessitent des produits dérivés du pétrole, une des avenues serait l’élaboration d’anodes en bio-carbone ou d’anodes inertes efficaces permettant de s’affranchir totalement des combustibles fossiles. Face à la croissance des besoins pour la fabrication de produits en aluminium et le futur de la production du métal, l’aluminium du Québec fait partie des choix qui s’imposent grâce à son hydroélectricité, sa capacité de production et son expertise en recherche et développement de technologies innovantes dans le domaine. Dans cette optique, le gouvernement du Québec a décidé de se donner « les moyens de favoriser la croissance et le rayonnement de tous les maillons de la chaîne de valeur de l’aluminium », production et transformation, en adoptant la Stratégie québécoise de développement de l’aluminium (SQDA) 2015-2025 [6]. De plus, les gouvernements du Québec et du Canada ont consenti d’appuyer l’entreprise Elysis en vue d’industrialiser un procédé de production d’aluminium sans GES, grâce à l’utilisation d’anodes inertes [16, 17].

Procédé de production de l'aluminium

Le procédé Bayer

Afin de produire l'aluminium primaire, il faut d'abord extraire la bauxite, puis procéder à son raffinage pour produire l'alumine qui, soumise à l'électrolyse, fournira l'aluminium primaire. Plus de quatre tonnes de bauxite sont nécessaires pour obtenir environ deux tonnes d'alumine et produire environ une tonne d'aluminium (Figure 2). La répartition des coûts de production est : extraction et traitement du minerai 4.6 % ; production d'alumine 22.3 % ; production du métal 73.1 % [16].

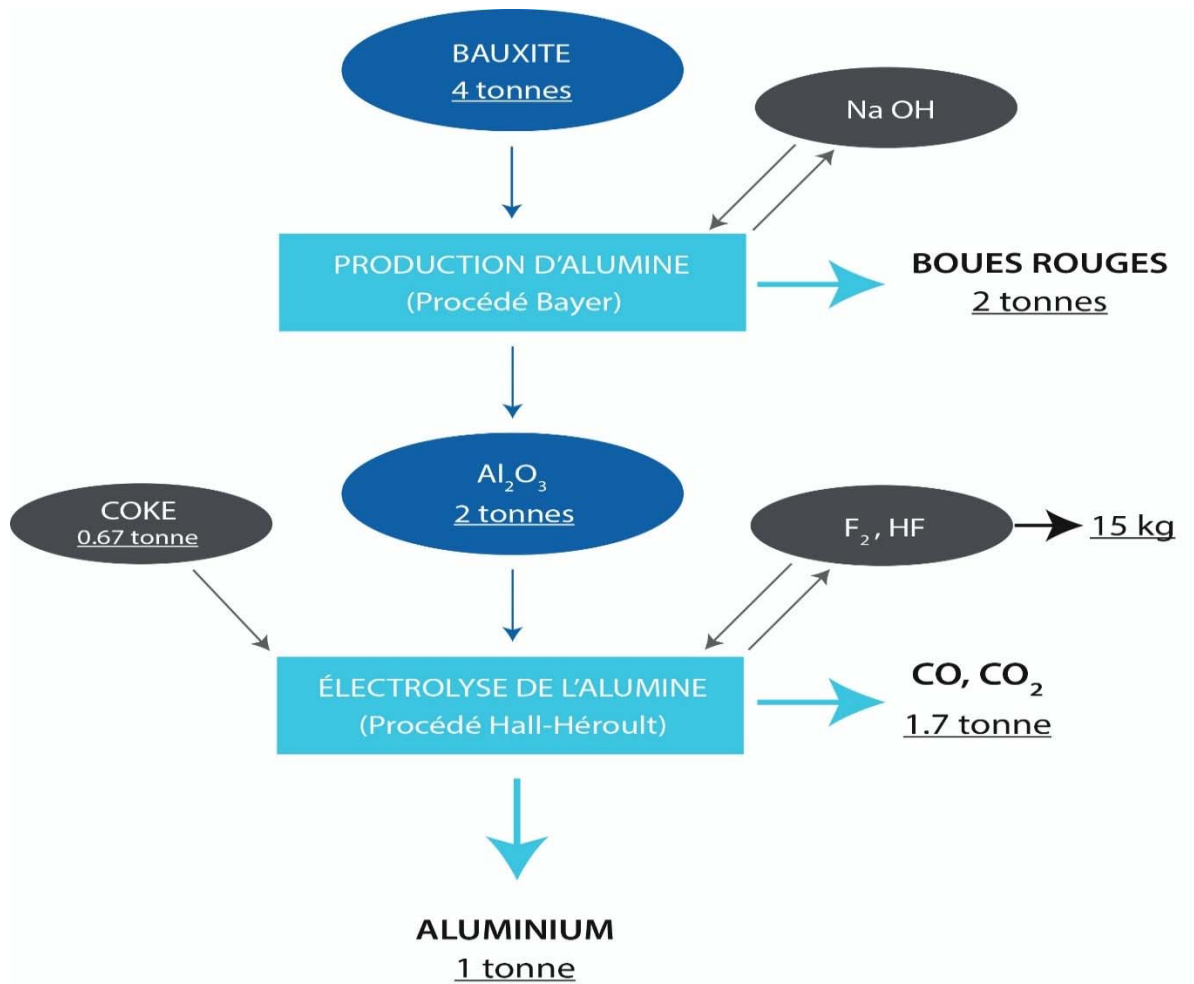


Figure 2. Quantités associées à la production d'une tonne d'aluminium.

L'extraction de l'alumine à partir de la bauxite est réalisée par le procédé Bayer (Figure 3). Le minerai de bauxite est d'abord concassé, lavé, séché et broyé. On procède ensuite au lessivage (1-4 heures) dans une solution caustique (NaOH à 350-600 g/l) vers 175 °C) sous forte pression (400 à 800 kPa)

dans un autoclave. Après décantation des solides, le liquide est dilué puis filtré pour en retirer toutes les impuretés insolubles (boues rouges : 60 % oxydes de fer, 8 % silice et 14 % d'alumine résiduelle). La diminution de la température (25-35 °C) provoque la précipitation d'alumine hydratée ($\text{Al}(\text{OH})_3$) et l'agitation (environ 4 jours) permet de récupérer par filtration les particules grossières. Le procédé est complété par l'étape de calcination à 1000 °C pour obtenir de l'alumine (Al_2O_3) pure à 99.55 %. La solution de soude caustique est concentrée par évaporation et recyclée (Figure 3).

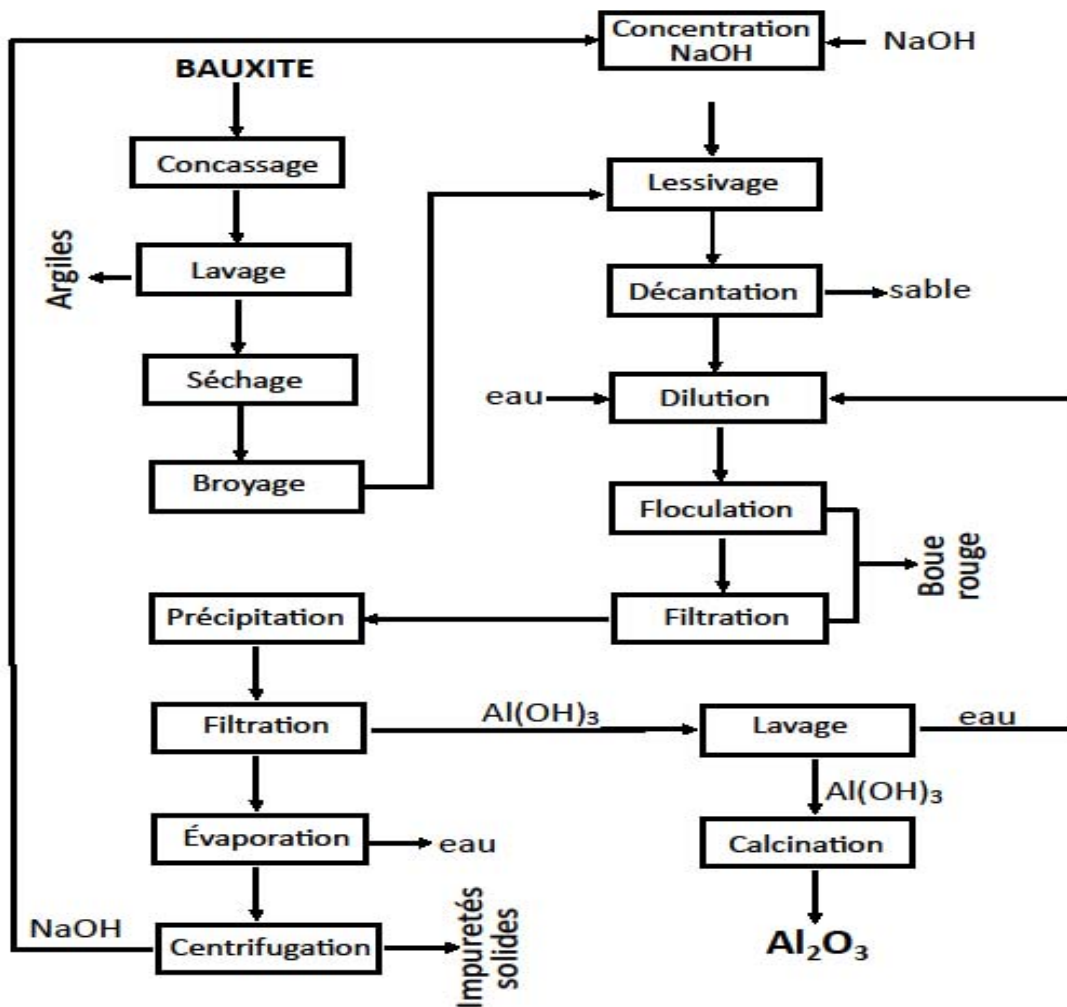


Figure 3. Les étapes du procédé Bayer [16]

Le procédé Hall-Héroult

Afin de procéder à l'électrolyse, l'alumine est ajoutée (en petite quantité à la fois pour maintenir une concentration optimale de $\pm 8\%$ de Al_2O_3) dans la cryolithe fondue vers 960°C contenant divers autres additifs (fluorures métalliques) pour optimiser le procédé. L'alumine, en se dissolvant, forme des ions AlOF_3^{2-} dans le bain électrolytique de la cuve (figure 4). Les anodes et cathodes de carbone fournissent les électrodes conductrices et résistantes au bain et à l'aluminium liquide pour la séparation électrolytique de l'alumine en aluminium et en oxygène.

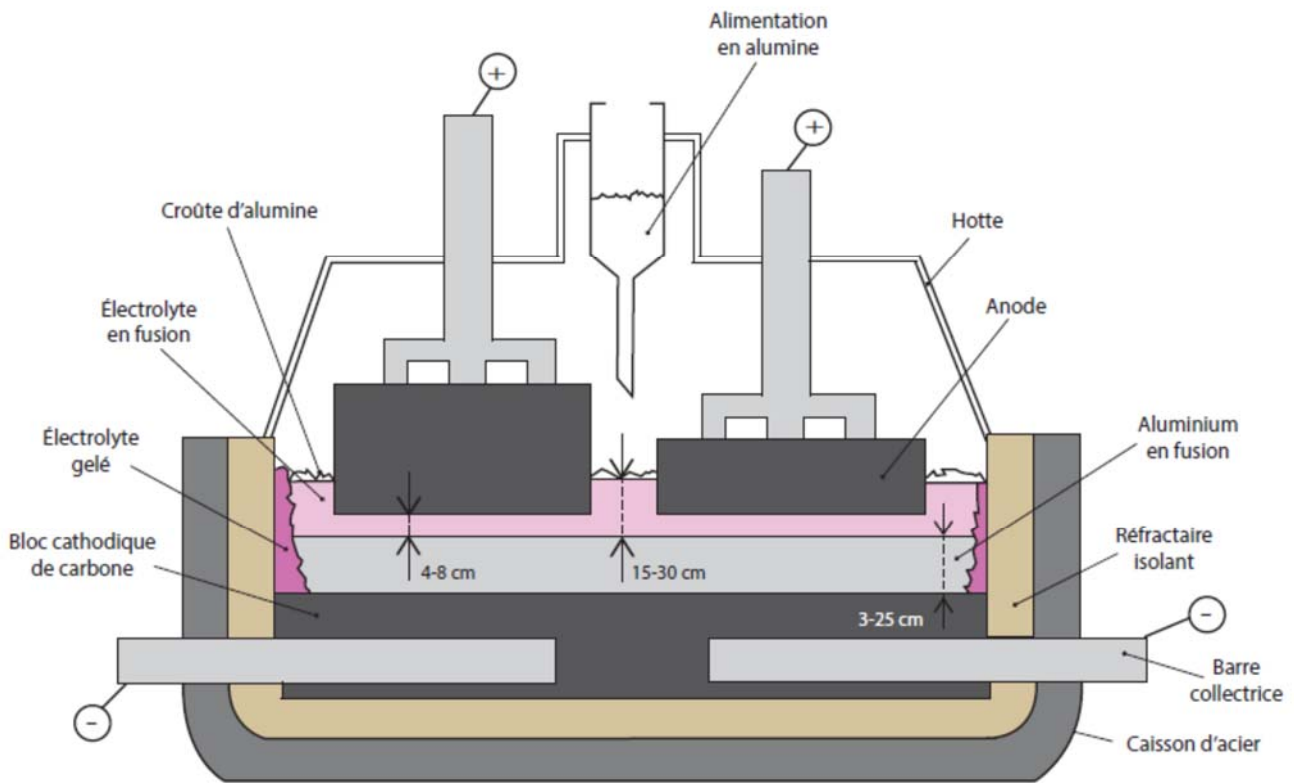
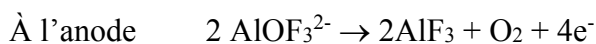


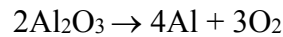
Figure 4. Schéma d'une cuve d'électrolyse de l'alumine

Sous l'effet du courant électrique ($360\,000\text{ A}$ à 4.25 VDC dans les cuves modernes) on a les réactions suivantes [16, 18]:

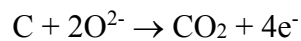


À la suite de cette réaction, l'aluminium (métal) plus dense que la cryolithe fondue (bain d'électrolyte) se dépose en couvrant la cathode qui constitue le fond de la cuve (bloc cathodique).

De manière générale, l'aluminium est obtenu selon la réaction complète suivante:



La réaction d'oxydation qui se produit à l'anode en libérant du gaz carbonique est :



Cette dernière réaction conduit à la consommation des anodes qui ont une durée de vie d'environ 3 semaines. La durée de vie du bloc cathodique est de 2 à 6 ans.

Après une durée de 1 à 3 jours d'électrolyse, l'aluminium liquide accumulé au fond de la cuve peut être siphonné et transféré dans un four d'attente pour le combiner à d'autres métaux afin de former divers alliages d'aluminium. Tel que schématisé à la figure 5, l'alliage liquide est ensuite envoyé à la coulée (coulée semi-continue verticale, coulée continue horizontale) pour former des lingots qui pourront par la suite être transformés en tôles, extrusions, tiges, et lingots [10, 11].

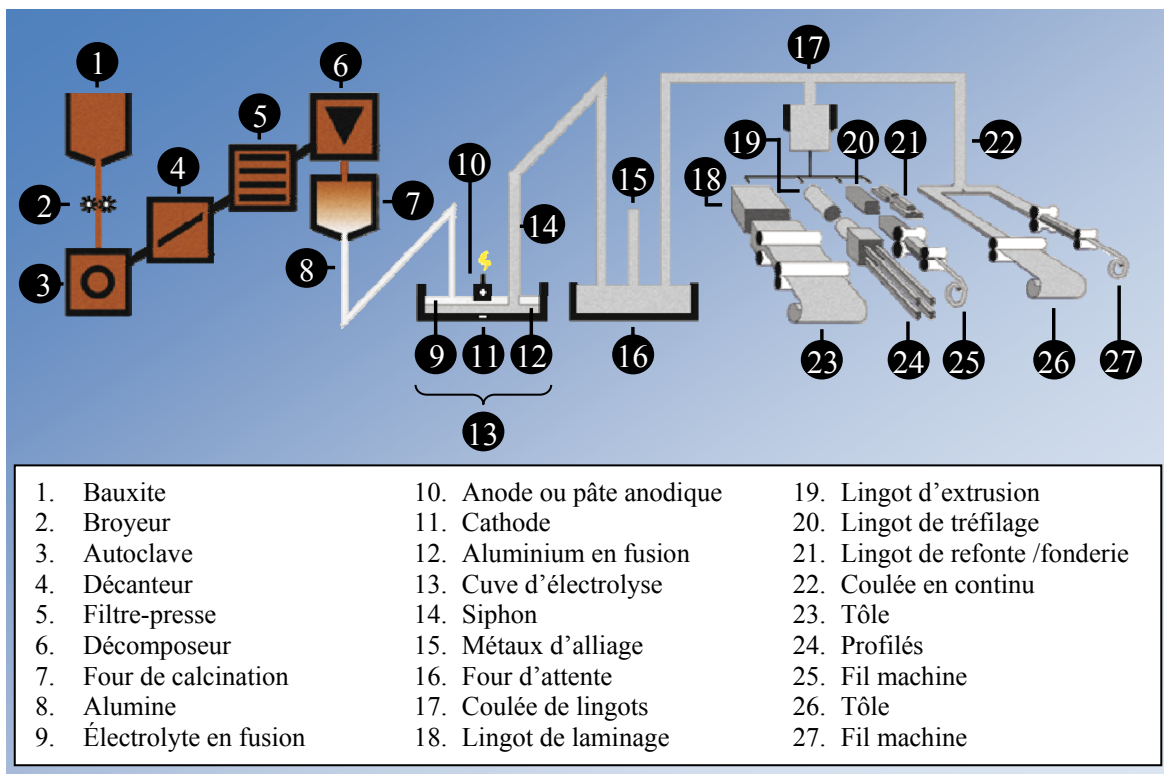


Figure 5. Schéma du procédé de production des alliages à partir de la bauxite. *Source : Rio Tinto*

Les GES générés par la production d'aluminium au Québec sont principalement dus à la consommation des anodes. Afin d'améliorer la productivité, d'être indépendant des ressources d'énergie fossile et de produire de l'aluminium sans émission de GES, des recherches avaient été entreprises, il y a plusieurs années, afin de développer des anodes capables de résister à l'oxydation et compatibles avec le procédé de réduction électrolytique. Des anodes résistantes à l'oxydation, dégageant de l'oxygène au lieu du gaz carbonique des anodes de carbones et ayant une durée de vie de quelques années, diminueraient les coûts de production et permettrait d'éliminer les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), de perfluorocarbures (PFCs), d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), et la dépendance à une ressource non renouvelable [10, 11, 18]. Les recherches effectuées au centre de recherche d'Alcoa pour trouver un matériau (céramiques, cermets, métaux) répondant aux caractéristiques de base (stabilité à 1000 °C, résistance à la corrosion par l'électrolyte, conducteur électrique, stabilité électrochimique, résistance mécanique et thermique, recyclable et globalement économique) a permis le démarrage de Elysis, une coentreprise de Alcoa et Rio Tinto, qui sera chargée du développement au Québec de la nouvelle technologie pour l'application industrielle des anodes inertes [17]. Le défi à relever, qui devait porter sur le bon matériau et la fabrication des anodes inertes, devrait aussi porter sur une nouvelle conception de cellule d'électrolyse plutôt qu'une simple adaptation aux cuves actuelles [18]. Une conception permettant de moduler la consommation des futures alumineries pour niveler la demande en hydroélectricité apporterait un avantage majeur au niveau des installations électriques et donc du coût associé à la production d'énergie électrique au Québec.

Empreinte carbone

Afin de calculer l'empreinte carbone associée à la fabrication de l'aluminium, il est essentiel de considérer le cycle de vie total de l'aluminium. Le cycle commence par l'extraction de la matière première jusqu'à la coulée des lingots d'aluminium tel qu'expliqué précédemment. Le cycle se poursuit avec la fabrication de produits de consommation qui seront distribués dans les différents détaillants, puis vendus aux consommateurs. Le cycle est complété par la phase d'utilisation du produit et se termine par la fin de vie du produit, soit au dépotoir ou encore en centre de récupération. La figure 6 représente le cycle de vie de l'aluminium et illustre les émissions directes de GES associés à chacune des étapes, ainsi que les émissions indirectes des processus auxiliaires (GES des flux entrants et sortants). La majorité de l'aluminium produit est récupéré afin d'être réintroduit dans le cycle; ce qui

est considéré comme un bilan d'autant plus positif dans le calcul de l'empreinte carbone, que le coût énergétique du recyclage représente 5 % de celui associé à sa production. Le calcul de l'empreinte carbone relative à la fabrication et aux étapes subséquentes est propre à chacun des produits de consommation et leur point de vente. Par conséquent, il est difficile d'en établir le calcul à titre comparatif contrairement aux étapes en début de cycle [4, 7, 12].

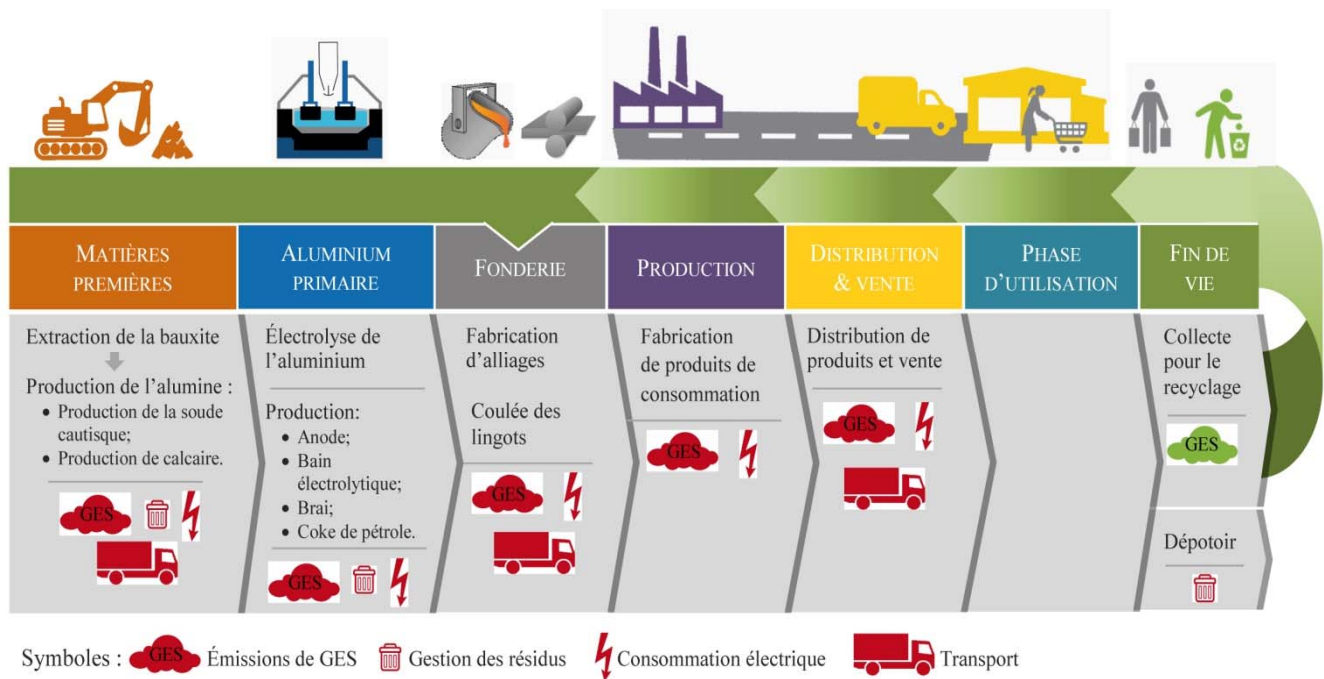


Figure 6. Cycle de vie de l'aluminium.

La figure 7 représente le portrait mondial des émissions de GES émis (converties en équivalent de CO₂) à chacune des étapes du procédé de fabrication de l'aluminium primaire. Contrairement au raffinage de l'alumine et au procédé d'électrolyse, trois des étapes du procédé ont peu d'impact, soit ; l'extraction de la bauxite, la production des anodes et le procédé de fonderie. Le principal impact du raffinage de l'alumine sur les GES est dû à la production de l'énergie thermique nécessaire au procédé. Puisque l'énergie thermique peut être produite à partir d'hydroélectricité, les émissions de GES peuvent être réduites de façon importante au niveau du raffinage. Pour ce qui est des GES associés au procédé d'électrolyse, les émissions dues au procédé lui-même et procédés sous-jacents sont similaires à celles associées à l'énergie thermique lors du procédé de raffinage. Par ailleurs les émissions dues à la production d'électricité y sont nettement supérieures à l'ensemble des autres émissions. C'est pourquoi l'aluminium produit au Québec avec l'hydroélectricité ramène presque à zéro les GES reliés

à la production électrique (voir aussi tableau 1). Il en sera de même pour les GES liés au procédé lors de l'utilisation d'anodes non consommables puisque ces GES sont produits essentiellement par la consommation des anodes de carbones.

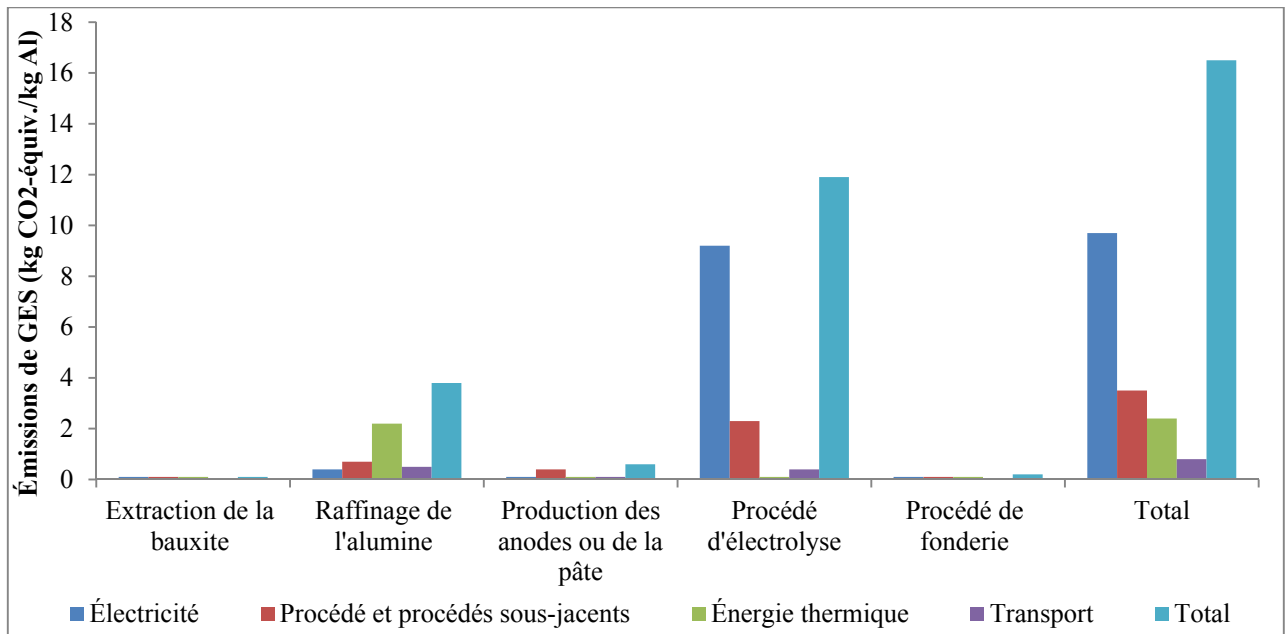


Figure 7. Émissions mondiales de gaz à effet de serre en fonction des différentes étapes du procédé de fabrication de l'aluminium primaire [4].

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

Tableau 1. Facteurs d'émission de GES pour la production d'électricité selon la source d'énergie [14].

Tel que mentionné, la production d'électricité est la principale cause des émissions de GES. Par conséquent, la source d'énergie utilisée afin de produire l'électricité et l'énergie thermique aura une

influence directe sur l’empreinte carbone. Le tableau 1 présente les facteurs d’émissions de GES pour la production primaire d’aluminium, selon la source d’énergie exploitée, afin de générer l’énergie électrique requise. On peut voir que l’hydroélectricité bénéficie d’un facteur d’émission inférieur aux autres sources et plus de 100 fois inférieur à l’utilisation des combustibles fossiles [14]. De toutes les sources d’énergie utilisées mondialement, l’hydroélectricité s’avère être le choix écoresponsable, sans déchets et renouvelable.

Le tableau 2 illustre la répartition mondiale des sources d’énergie utilisées dans la fabrication de l’aluminium primaire [2, 4].

Lieux de production	Hydroélectricité	Charbon	Pétrole	Gaz naturel	Énergie nucléaire
Afrique (Afr)	57	43	0	0	0
Amérique du Nord (AmN)	74	24	0	1	1
Amérique du Sud (AmS)	72	0	0	27	0
Asie (sauf la Chine)	14	86	0	0	0
Canada	100	0	0	0	0
Chine	10	90	0	0	0
Conseil de coopération du Golfe (CCG)	0	0	0	100	0
Europe	68	10	1	5	16
Océanie	27	73	0	0	0
Russie et autres pays de l'Europe	98	2	0	0	0
Monde	30	59	0	9	2

Tableau 2. Pourcentage des sources d’énergie utilisées en 2015 [2, 4].

Filière québécoise de l’aluminium

La filière québécoise de l’aluminium comprend cinq principaux secteurs d’activité :

1. Les **équipementiers et les fournisseurs** spécialisés dans l’approvisionnement des alumineries. En 2014, 76 équipementiers québécois ont été identifiés par la cartographie d’AluQuébec.
2. Les trois **producteurs d’aluminium primaire**, Alcoa, Aluminerie Alouette et Rio Tinto. L’ensemble de leurs installations comptent neuf alumineries.
3. Les **transformateurs secondaire et tertiaire** représentés par au moins 1400 entreprises dont l’objectif est d’ajouter de la valeur à l’aluminium par procédé métallurgique ou d’assemblage.
4. Les **acteurs en innovation** responsables de la recherche, du soutien technique et du transfert technologique.
5. Les **organismes de l’industrie** ayant pour mission de développer l’industrie et d’assurer la cohésion entre les différents intervenants de la filière [6].

Consulter les liens suivants pour plus de précisions :

http://www.valuminium.ca/fr/la_grappe_industrielle

https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/par-secteur-dactivite/metallurgie/aluminium/page/le-secteur-19764/?no_cache=1&tx_igaffichagepages_pi1%5Bmode%5D=single&tx_igaffichagepages_pi1%5BbackPid%5D=19755&tx_igaffichagepages_pi1%5BcurrentCat%5D=&cHash=8c78e31d9127dc96b475d933900e4c6d

Glossaire

Alliage d'aluminium : Combinaison par fusion d'aluminium avec au moins un autre élément chimique. L'ajout d'autres éléments permet de modifier les caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques de l'aluminium (limite élastique, dureté, conductivité électrique, résistance à la corrosion) [10, 11].

Alumine : L'alumine est un oxyde d'aluminium (Al_2O_3) obtenu généralement à partir du raffinage de la bauxite dont l'un des résidus est la boue rouge [10, 11].

Anode et cathode : L'anode est une électrode par laquelle le courant entre lors d'une réaction électrochimique (l'oxydation). À l'inverse, la cathode est une électrode par laquelle le courant sort lors d'une réaction électrochimique (la réduction). Dans l'industrie, l'anode et la cathode sont faites de carbone [10, 11].

Anode de carbone : Une anode est formée à partir de la pâte anodique et est versée dans un moule, puis transférée dans un vibrocompacteur. L'anode crue façonnée est ensuite cuite. Une tige de métal lui est ajoutée afin de permettre la distribution du courant lors de l'électrolyse. La cuisson de l'anode convertit le brai sous forme cristalline (cokéfaction), entraînant une bonne liaison avec les agrégats secs nécessaires à l'obtention des propriétés finales de l'anode cuite (technologie des anodes précuites). La cuisson préalable des anodes présente l'avantage d'éliminer d'importante quantité de gaz toxique et cancérigène dans les fours de cuisson. En plus, les anodes précuites procurent davantage de contrôle des émissions gazeuses produites au cours du procédé d'électrolyse. Enfin, les anodes précuites possèdent une qualité de compaction supérieure et une meilleure conductibilité électrique, ce qui entraîne une diminution de la consommation des anodes par oxydation [10, 11].

Anode inerte : Anode résistante à l'oxydation et dégageant de l'oxygène au lieu du gaz carbonique avec les anodes de carbones. Contrairement aux anodes de carbone dont la durée de vie est d'environ 3 semaines, la capacité de résistance de cette anode inerte serait de plusieurs années. Son utilisation permettrait d'éliminer les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), de perfluorocarbures (PFCs) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) et à terme, la dépendance à une ressource non renouvelable [10, 11]. La recherche de matériaux adéquats remonte à de nombreuses années, mais la première recherche sur une industrialisation des anodes inertes va se dérouler au Québec [17, 18].

Bauxite : La bauxite est un minéral extrait des mines constituant la matière première contenant l'alumine nécessaire à la fabrication de l'aluminium primaire [10, 11].

Cycle de vie : Le cycle de vie d'un produit comprend l'ensemble des étapes débutant par l'extraction des matières premières, suivie de la première transformation, la production, la distribution et le stockage jusqu'à son utilisation et se termine par sa gestion de fin de vie [7].

Effet de serre : L'effet de serre est un phénomène naturel d'augmentation de la température atmosphérique. Certains gaz dits « à effet de serre » contribuent à l'absorption et la réémission des rayonnements infrarouges terrestres, ce qui a pour effet d'emmagasiner la chaleur à la surface de la Terre. Toutefois, les humains contribuent aussi à l'augmentation de l'effet de serre par leurs actions (consommation, industrie, transport, chauffage, etc.) en libérant des gaz souvent stockés dans la matière fossile (charbon, pétrole, gaz naturel) [7]. La production mondiale de CO₂ équivalent est estimée à 45 000 Mt dont, à titre d'exemple, 1,2 % provient de la production mondiale d'aluminium et 2 à 3 % du transport maritime.

Empreinte carbone : Le terme désigne 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].

Equivalent CO₂ : L'équivalent de CO₂ relatif à l'émission d'un gaz polluant est obtenu par comparaison au CO₂ pour son potentiel de réchauffement climatique. L'émission totale en équivalent de CO₂ (ou CO₂ équivalent) est obtenue en additionnant les émissions de chacun des gaz en équivalent de CO₂.

Gaz à effet de serre (GES) : Des gaz qui absorbent et réfléchissent des radiations infrarouges émises par la terre. Il a été démontré que l'augmentation de la concentration de GES tels que : le CO₂, le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFCs), les PFCs, l'hexafluorure de soufre (SF₆) peuvent contribuer à l'effet de serre [7].

Pâte anodique : La pâte est faite d'agréats secs et d'un agent liant (brai communément appelé *pitch*). Les agrégats composés de coke de pétrole calciné, de rejet d'anode (cru et cuit) et de mégots sont d'abord individuellement broyés et triés selon leur granulométrie, avant de les combiner selon la recette préconisée par l'industrie. Les agrégats sont chauffés et mélangés au brai (préchauffé) à l'aide d'un mélangeur ou d'un mixeur [10, 11].

Mégot : Le mégot est la partie de l'anode qui n'a pas réagi lors du procédé d'électrolyse et qui a été retirée afin de prévenir la dégradation de la tige de métal. Le mégot est nettoyé puis revalorisé en l'ajoutant à la recette de la pâte d'anode, diminuant ainsi la production de déchets [10, 11].

Production électrolytique de l'aluminium : Le procédé d'électrolyse de l'aluminium, développé indépendamment par Hall et Héroult, couramment appelé procédé Hall-Héroult, utilise l'énergie électrique (13k Wh par kg d'aluminium métal) afin de séparer l'aluminium de l'oxygène à partir de l'alumine mise en solution dans un sel (cryolithe) fondu à 960 °C. L'oxygène libéré se combine au carbone des anodes (anodes précuites ou pâte anodique du procédé Söderberg) pour former du CO₂. En raison de la consommation du carbone, les anodes de carbone doivent être remplacées environ aux trois semaines (procédé d'anodes précuites), tandis que la pâte est alimentée régulièrement au caisson de l'anode et sa cuisson s'effectue grâce à la chaleur dégagée au cours de l'électrolyse (procédé Söderberg) [10, 11].

Recyclage de l'aluminium : Processus de récupération de l'aluminium en fin de phase d'utilisation, qui, à la suite de différents procédés (deuxième fusion), permettra de produire des alliages d'aluminium pour une phase subséquente d'utilisation [1]. La production de cet aluminium secondaire ne demande que 5 % de l'énergie requise pour sa production électrolytique.

Références

1. 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.
2. *World Aluminium*. 2017 [accédé 18/08/2017]; Disponible au : <http://www.world-aluminium.org/>
3. *The Statistics Portal*. [accédé 21/07/2017]; Disponible au: <https://www.statista.com/statistics/264624/global-production-of-aluminum-by-country/>.
4. Nunez P. et Jones S., *Cradle to gate: life cycle impact of primary aluminium production*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016. 21(11): p. 1594-1604.
5. *Compensation co2*. 2017 [accédé 18/08/2017]; Disponible au: <http://www.compensationco2.ca/>.
6. *Ministère de l'Économie, de la Science de l'Innovation du Québec (s'informer/ l'aluminium)*. [accédé 21/07/2017]; Disponible au: https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/par-secteur-dactivite/metallurgie/aluminium/?no_cache=1.
7. *Empreinte Carbone Québec*. 2017 [accédé 21/07/2017]; Disponible au: <http://www.empreintecarbonequebec.org/fr/index.php>.
8. Paraskevas D., Kellens K., Van de Voorde A., Dewulf W., et Duflou J.R., *Environmental Impact Analysis of Primary Aluminium Production at Country Level*. Procedia CIRP, 2016. 40: p. 209-213.
9. Sverdrup H.U., Ragnarsdottir K.V., et Koca D., *Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves*. Resources, Conservation and Recycling, 2015. 103: p. 139-154.
10. Charette A., Kocaefe Y.S., et Kocaefe D., *Le carbone dans l'industrie de l'aluminium*. xxi ed. 2012, Chicoutimi, Québec: Les presses de l'aluminium. 325.
11. Totten G.E. et Mackenzie D.S., *Handbook of aluminum*. 2003, New York, Basel: Marcel Dekker, Inc. 2 v.
12. *lca_report_2015_final.pdf*. 2015 [accédé ; Disponible au: .
13. The Aluminium Association. *The environmental Footprint of Semi-Finished Aluminium Products in North America*. 2013 [accédé 21/08/2017]; Disponible au: https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEWjm9Oa69OvVAhVI_4MKHaLvCLYQFggvMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.aluminium.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2FLCA_Report_Aluminum_Association_12_13.pdf&usg=AFQjCNFwa9Ix97sV-uAPhKfLonHkDz19Tg.

14. Turconi R., Boldrin A., et Astrup T., *Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 28: p. 555-565.
15. Rapport de développement durable 2017, Association de l'aluminium du Canada, 2018; Disponible au: <https://aac.metrio.net/>
16. Handbook of Aluminum, vol.2 ; Extractive metallurgy of aluminum, p.1-75.
17. Une première technologie mondiale de production d'aluminium primaire carboneutre sera mise au point au Canada, Nouvelle AAC, 2018. Disponible au :
<https://aluminium.ca/fr/communications/nouvelles/531/une-premiere-technologie-mondiale-de-production-daluminium-primaire-carboneutre-sera-mise-au-point-au-canada> ;
<https://www.elysis.com/fr>
- 18 Handbook of Aluminum, vol.2 ; Smelting of aluminum, p.47-79

Liens internet :

<http://cdiac.ornl.gov/GCP/carbonbudget/2016/>

<https://www.economie.gouv.qc.ca/accueil/>

<http://www.empreintecarbonequebec.org/fr/>

<http://www.ghgprotocol.org>

<http://www.enviroaccess.ca/expert-conseil/>

<https://youtu.be/Fweuy01GcJA>

https://youtu.be/wDW26_5EMs4

<https://youtu.be/TFbMqPGiNKM>

Calcul empreinte carbone, règles et compensation :

<http://www.ciraig.org/fr/outils.php>

<http://www.empreintecarbonequebec.org/fr/pcr.php>

<http://www.voirvert.ca/outils/calculateurs>

<http://www.compensationco2.ca/calcul-emissions-co2/>

<https://www.newswire.ca/fr/news-releases/alcoa-et-rio-tinto-annoncent-la-creation-du-tout-premier-procede-delectrolyse-de-laluminium-sans-carbone-682306361.html>