

# Production d'aluminium par électrolyse

## Production of aluminium by electrolysis

**Mots-clefs :** Electrolyse, métallurgie, aluminium, alumine, cryolithe, carbone  
**Keywords :** Electrolysis, metallurgy, aluminium, alumina, cryolite, carbon

**Auteur :** Laurent CASSAYRE

**Accroche :** L'aluminium est le second métal le plus utilisé dans le monde, grâce à sa faible densité et ses propriétés électriques. Un éclairage sur une étape déterminante de sa production, l'électrolyse par le procédé Hall-Héroult.

**L'essentiel :** Cet article propose une présentation générale de la production d'aluminium par électrolyse de l'alumine à 960°C. Les différents aspects chimiques, énergétiques et techniques sont abordés, ils donnent les clefs pour une compréhension des principaux problèmes technologiques et environnementaux liés au procédé.

**Synopsis :** This article proposes a general overview of the production of aluminium by electrolysis of alumina at 960°C. The chemical, energetic as well as technical aspects of the process are presented, which will give the key for a good understanding of the main technological and environmental problems faced by the aluminium industry.

**Résumé :** Le procédé d'électrolyse Hall-Héroult, dont l'invention date de 1886, s'est imposé comme le seul procédé utilisé industriellement pour extraire l'aluminium de son oxyde. Nécessitant une puissance continue de 300 MW, une usine d'aluminium est dévoreuse d'énergie électrique et, en conséquence, chaque détail de la cellule d'électrolyse a été étudié et optimisé.

Cet article propose une présentation générale du procédé qui consiste à électrolyser l'oxyde d'aluminium, dissout dans un électrolyte, par passage d'un courant continu à environ 960°C. Les principaux problèmes technologiques (pureté de l'aluminium, équilibre thermique, effet d'anode, usure de la cathode) ainsi qu'environnementaux (traitement des effluents, émissions de gaz à effet de serre) sont abordés.

**Abstract :** The Hall-Héroult process was invented in 1886 and has since imposed as the only industrial process used to extract aluminium from its oxide. The aluminium plant is a huge energy consumer, needing an electrical power of about 300 MW, which explain that every single details of the electrolysis cell has been studied and optimised.

This article proposes a general overview of the production of aluminium, according to a process consisting in electrolysing the aluminium oxide, dissolved in an electrolyte, by the use of a direct current at 960°C. The main technological problems (aluminium purity, thermal equilibrium, anode effect, cathode wear) as well as the environmental ones (treatments of fumes, green house gas emissions) are presented.

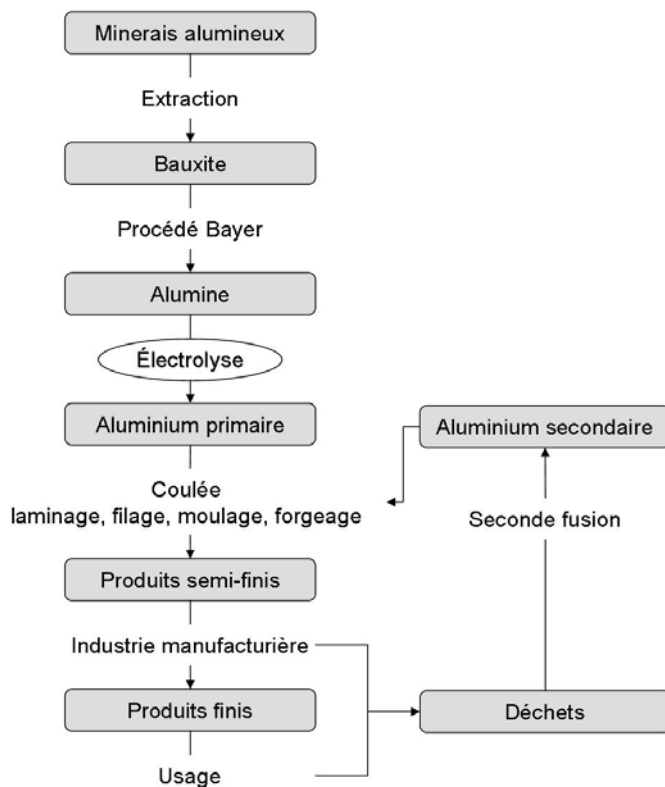
## TEXTE

### 1. Introduction

Jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle, l'aluminium est resté inconnu sous sa forme métallique, malgré sa présence abondante dans la croûte terrestre sous forme d'oxyde dans les silicates et la bauxite. F. Wöhler réussit en 1827 à produire suffisamment d'aluminium pour étudier ses propriétés physiques, et mesurer en particulier son bas point de fusion et sa densité particulièrement faible par rapport aux autres métaux courants. Suit une succession d'inventions destinées à mettre au point un procédé de fabrication industriel, en utilisant notamment la réduction par le sodium.

En 1886, P. Héroult dépose en France le premier brevet sur la fabrication de l'aluminium par électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue, méthode qui a permis le développement de l'industrie de l'aluminium et qui reste la seule utilisée. L'américain C.M. Hall brevète la même année et indépendamment un procédé similaire, appelé aujourd'hui procédé Hall-Héroult.

La chaîne actuelle de production consiste en une extraction de la bauxite, dont est produite l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) grâce au procédé Bayer, en une électrolyse puis en une mise en forme de l'aluminium. Les principaux stades de la fabrication de produits en aluminium sont présentés sur la figure 1.

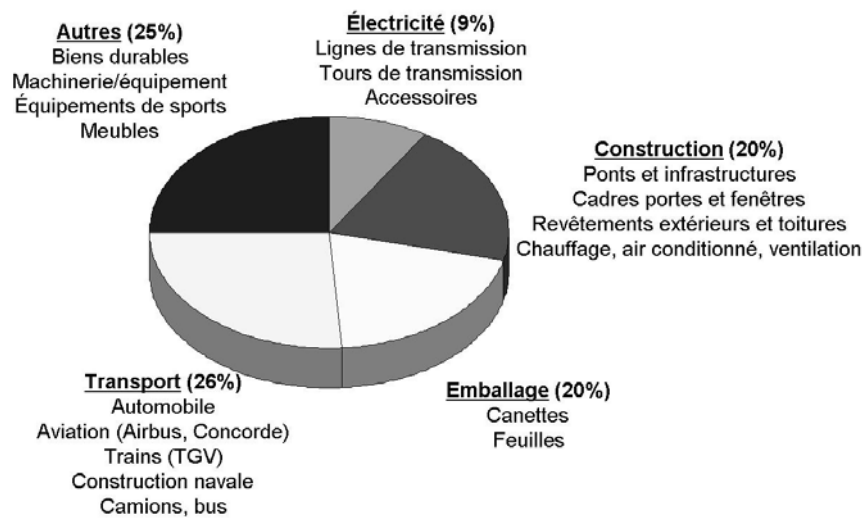


**Figure 1 : Principales étapes de la métallurgie de l'aluminium**

Actuellement, l'aluminium est le second métal le plus utilisé dans le monde, après le fer qui constitue plus de 90% des métaux raffinés (cf. tableau 1). C'est principalement grâce à sa faible densité que l'aluminium s'est imposé comme matériau incontournable dans divers secteurs économiques. En effet, la réduction du poids des moyens de transports conçus en alliages d'aluminium (par exemple Al-Cu ou Al-Zn-Mg-Cu) permet de réduire efficacement leur consommation en énergie. Comme l'indique la figure 2, l'aluminium est également largement utilisé dans le secteur des emballages (notamment les canettes pour boissons), celui de la construction, ainsi qu'en tant que conducteur électrique.

Métal	Production mondiale en 2004 (Mt/an)	Prix (\$/kg)	Abondance dans l'écorce terrestre (%)	Température de fusion (°C)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Résistivité électrique (μΩcm)
Fer	1020 (acier)	0,1-0,3	5,6	1538	7,9	9,71
<b>Aluminium</b>	<b>22,6</b>	<b>1,8</b>	<b>8,3</b>	<b>660</b>	<b>2,7</b>	<b>2,65</b>
Cuivre	13,8	3,7	0,006	1085	8,9	1,67
Zinc	10,5	1,3	0,007	420	7,1	5,96
Plomb	3,0	0,9	0,001	327	11,3	20,65
Nickel	1,2	14,6	0,008	1455	8,9	6,84

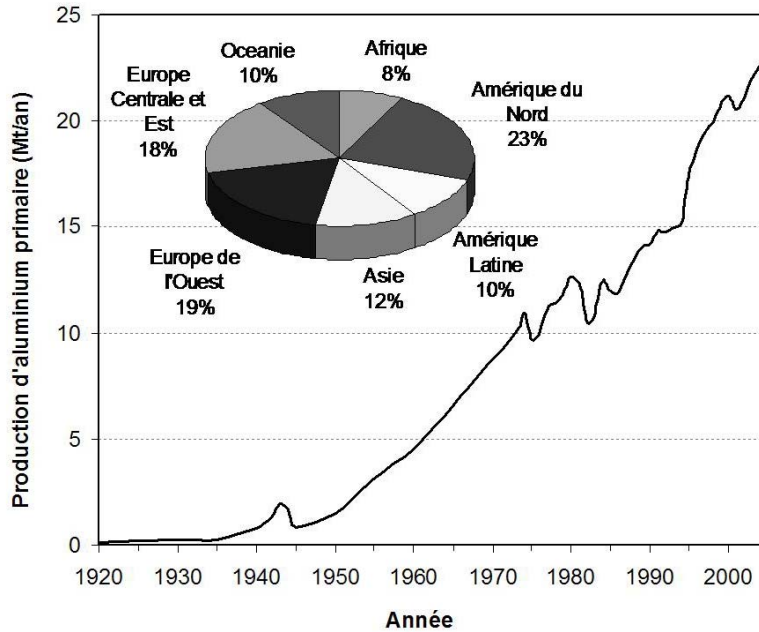
**Tableau 1 : Quelques données concernant les six métaux les plus utilisés dans le monde**



**Figure 2 : Utilisation de l'aluminium (source : [1])**

Pour faire face à la forte demande, la production annuelle mondiale par électrolyse a subi une constante évolution, comme l'indique la figure 3 : de 6 000 tonnes en 1900, elle atteint 22,6 millions de tonnes en 2004.

Les plus grands consommateurs d'aluminium sont le Japon (29 kg par habitant et par an) et les Etats-Unis (27 kg/habitant.an). En France, la consommation annuelle est de 17 kg/habitant.



**Figure 3 : Evolution de la production annuelle mondiale d'aluminium (en millions de tonnes) et répartition géographique de la production en 2004 (source : [1]).**

Un autre grand avantage de l'aluminium est qu'il est hautement recyclable, avec une économie d'énergie de 95% par rapport à celle nécessaire à la fabrication par électrolyse. Le recyclage est devenu une composante majeure de l'industrie de l'aluminium : chaque année, 8 millions de tonnes de métal dit *secondaire* sont produites, et 30% de la consommation française est alimentée par le recyclage [2].

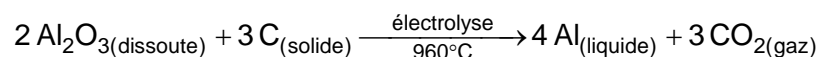
La suite de cet article est consacrée à la description du procédé d'électrolyse, ainsi qu'aux problèmes technologiques et environnementaux posés actuellement à l'industrie de l'aluminium.

## 2. Le procédé Hall-Héroult

Le procédé utilisé pour obtenir l'aluminium primaire consiste à électrolyser l'alumine dissoute dans un électrolyte, par passage d'un courant continu, à environ 960°C [3-5].

### 2.1 Principe de l'électrolyse

La réaction globale intervenant dans la cellule est :

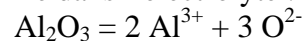


L'aluminium se forme à la cathode, et l'anode en carbone réagit en formant du dioxyde de carbone gazeux.

Pour produire une tonne d'aluminium, cette réaction requiert 0,415 tonnes de carbone et 1,920 tonnes d'alumine, tandis que 650 m<sup>3</sup> de dioxyde de carbone sont produits par la combustion des anodes. L'alumine est ajoutée continuellement dans l'électrolyte et les anodes en carbone sont remplacées régulièrement.

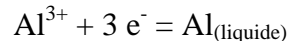
De manière schématique, trois réactions permettent de décrire le procédé dont le principe est représenté sur la figure 4 :

1) Dissolution et dissociation de l'alumine dans l'électrolyte :



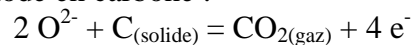
L'alumine est ajoutée sous forme de poudre dans l'électrolyte, pour faciliter sa dissolution. Elle forme alors des ions complexes, du fait des propriétés particulières de l'électrolyte qui sont abordées ci-dessous.

2) Réduction des cations  $\text{Al}^{3+}$  à la cathode :



Le métal se forme à la surface de la cathode, et coalesce pour former une nappe d'aluminium liquide.

3) Oxydation des anions  $\text{O}^{2-}$  à l'anode en carbone :



Les molécules de  $\text{CO}_2$  coalescent à la surface de l'anode, jusqu'à former de grosses bulles (de taille caractéristique 1cm-10cm) qui glissent sous l'anode avant de s'échapper dans l'atmosphère.

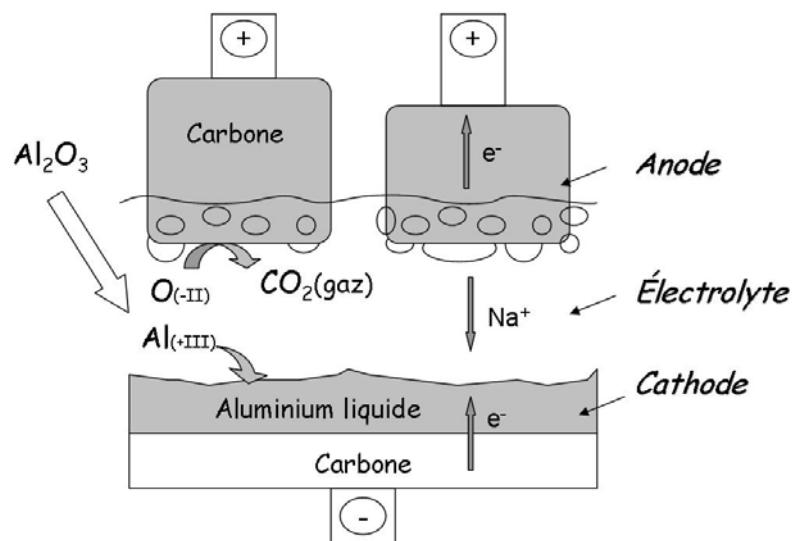
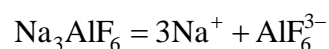


Figure 4 : Schéma de principe de la cellule d'électrolyse

## 2.2 Electrolyte

Le bain d'électrolyse est constitué en majeure partie de cryolithe, de formule chimique  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . Ce sel, dont la température de fusion est de  $1011^\circ\text{C}$ , se dissocie pour former un liquide composé uniquement d'ions selon :

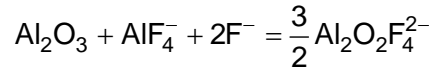
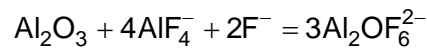


Le passage du courant à travers l'électrolyte est alors essentiellement assuré par les ions  $\text{Na}^+$ . De plus, les anions se dissocient partiellement selon :



Des réactions d'échanges du fluorure  $\text{F}^-$  menant à la formation d'autres fluoroaluminates tels que  $\text{AlF}_5^{2-}$  ou  $\text{Al}_2\text{F}_7^-$  sont également envisagées, mais actuellement, il n'existe pas de modèle unanimement reconnu pour décrire la composition ionique des mélanges cryolithiques.

L'avantage majeur de la cryolithe fondue est qu'elle permet de dissoudre l'alumine en quantité importante, ce qui n'est le cas avec quasiment aucun autre électrolyte. La dissolution de l'alumine se produit selon des réactions du type :



L'oxygène au degré d'oxydation -II est ainsi engagé dans des ions complexes appelés oxyfluoroaluminates.

L'ajout d'additifs tels que  $\text{AlF}_3$  et  $\text{CaF}_2$  permet d'abaisser le point de fusion jusqu'à  $950^\circ\text{C}$ . Le mélange est alors conducteur ( $\sigma \sim 2,2 \text{ S/cm}$ ), d'une viscosité proche de celle de l'eau, et sa densité ( $\rho_{\text{cry}} = 2,1 \text{ g/cm}^3$ ) est inférieure à celle de l'aluminium ( $\rho_{\text{Al}} = 2,4 \text{ g/cm}^3$ ) : le métal formé, plus lourd, se dépose au fond de la cuve d'électrolyse.

Typiquement, la composition massique d'un bain industriel est : 81,5%  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , 11%  $\text{AlF}_3$ , 5%  $\text{CaF}_2$  et 2,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### 2.3 Cuves d'électrolyse

La cuve d'électrolyse, schématisée sur la figure 5, se compose des éléments suivants :

- un caisson en acier,
- un garnissage isolant thermique constitué de briques réfractaires,
- un creuset polarisé cathodiquement constitué d'un assemblage de blocs de carbone cuits à base d'anthracite et liés par une pâte carbonée appelée pâte de brasque,
- des barres d'acier traversant le caisson et permettant l'arrivée du courant à la cathode,
- des tiges sur une superstructure en aluminium au-dessus du creuset maintenant les anodes carbonées,
- un système d'aspiration des gaz vers la station de traitement,
- un système d'alimentation en alumine.

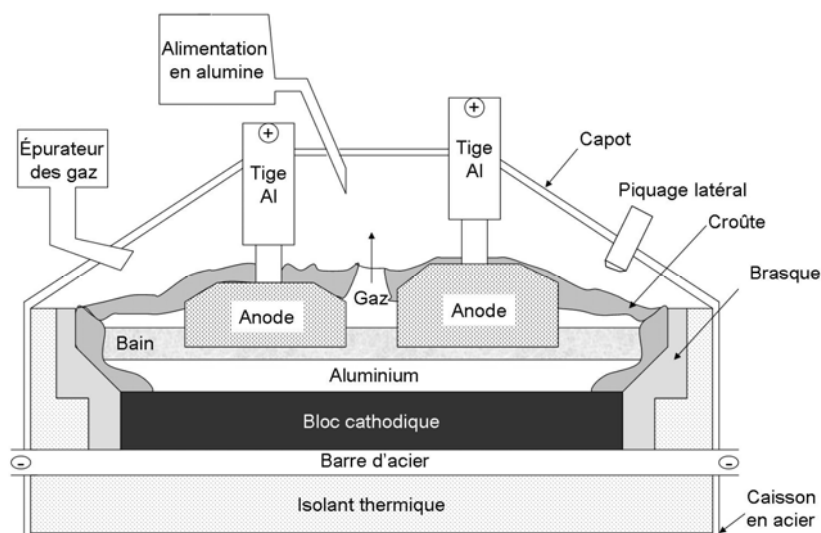


Figure 5 : Schéma en coupe d'une cuve d'électrolyse de l'aluminium

La distance entre l'anode et le métal est ajustée par des moteurs en fonction de la consommation des anodes. Par ailleurs, deux opérations principales sont effectuées régulièrement :

- le soutirage de l'aluminium, qui s'effectue par aspiration dans une poche de coulée grâce à un tuyau en fonte plongé dans la couche de métal liquide,
- le remplacement des anodes consommées, chaque anode durant environ 25 jours.

De manière à assurer la qualité de la production, de nombreux contrôles sont effectués : mesure de la hauteur de métal et de bain, prélèvement et analyse du métal, suivi de la température et des paramètres électriques. Une régulation automatisée des paramètres de marche a permis d'améliorer grandement le rendement du procédé.

Les cuves modernes sont constituées d'une vingtaine d'anodes soumises à une densité de courant de  $0,8 \text{ A/cm}^2$ . Elles sont disposées en deux séries parallèles d'une centaine de cuves, dans deux halls séparés et éloignés de quelques dizaines de mètres. Comme l'indique la photographie de la figure 6, les cuves sont disposées "en travers" et non en long par rapport à l'axe de la série.

Une cuve de 300 000 ampères produit environ 850 tonnes d'aluminium par an. Avec deux séries de cent cuves, une usine peut produire 170 000 tonnes d'aluminium par an.



**Figure 6 : Photographie d'une série de cuves d'électrolyse**

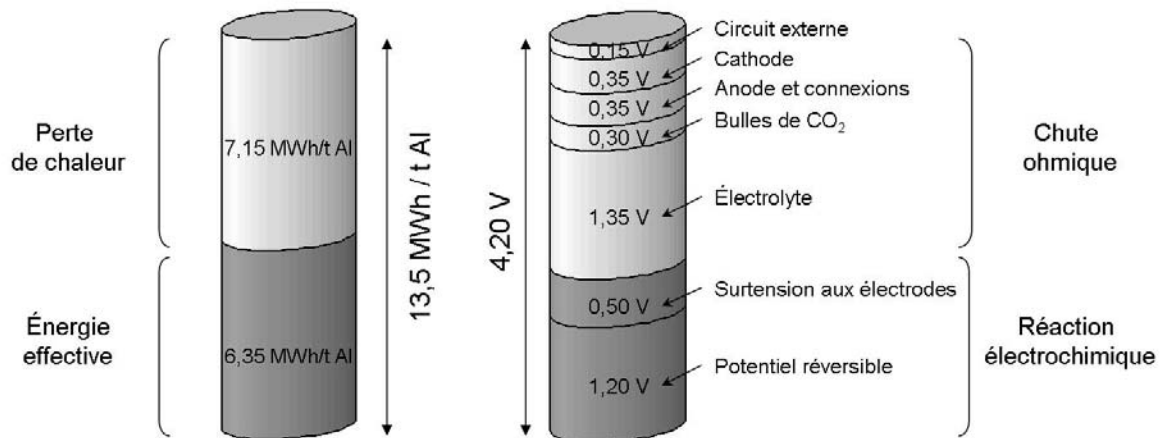
#### **2.4 Aspect énergétique**

Dans les cuves modernes, le rendement Faraday (rapport de la masse d'aluminium produite à la masse d'aluminium théoriquement déposable) est de l'ordre de 95 % ; les pertes s'expliquent principalement par une dissolution partielle de l'aluminium dans l'électrolyte et sa réoxydation dans la zone anodique.

La tension aux bornes de la cellule d'électrolyse est d'environ 4,20 V. Au potentiel réversible de la réaction électrochimique (1,20 V) s'ajoutent les surtensions aux électrodes nécessaires pour obtenir une vitesse de réaction satisfaisante. Comme le détaille la figure 7, la chute ohmique induite par le passage du courant à travers l'électrolyte, la couche de gaz et les électrodes implique une tension supplémentaire de 2,50 V.

Ainsi, 5,64 MWh d'énergie électrique sont théoriquement nécessaires pour fabriquer une tonne d'aluminium. Cependant, l'énergie consommée est d'environ 13,5 MWh par tonne, du fait d'une dissipation de l'énergie par effet Joule. Ce dégagement de chaleur suffit à maintenir la température du bain aux alentours de 960°C, mais implique également un faible rendement énergétique global, de l'ordre de 50%.

L'énergie effective pour produire une tonne d'aluminium, incluant l'énergie nécessaire à chauffer les réactifs à 960°C, est de 6,35 MWh.



**Figure 7 : Répartition du potentiel de cellule et consommation énergétique**

Pour une usine d'électrolyse contenant 200 cuves alimentées par 300 000 A sous une tension de 4,20 V, le générateur d'énergie doit alors fournir 250 MW. En y ajoutant les auxiliaires, notamment la cuisson des anodes et la fonderie, une usine doit donc disposer d'une puissance de près de 300 MW.

### **3. Problèmes technologiques liés au procédé d'électrolyse**

L'amélioration de la productivité des usines d'électrolyse a rendu nécessaire une compréhension approfondie du procédé, qui bénéficie de plus de cent ans de développement technologique. Les points les plus cruciaux sont abordés dans les paragraphes suivants.

#### **3.1 Impuretés dans l'électrolyte**

Comme le détaille le tableau 2, de nombreuses impuretés sont introduites dans la cellule d'électrolyse via l'alumine, la cryolithe et les anodes. Ces impuretés se retrouvent en majeure partie dissoutes dans l'électrolyte ; elles sont néfastes au procédé car elles induisent plusieurs types d'interactions :

- modification de la composition de l'électrolyte,
- réaction avec les blocs cathodiques et les anodes,
- pollution de la nappe d'aluminium.

Ce dernier point est particulièrement crucial, puisque la pureté de l'aluminium représente un élément clé pour l'industrie : plus le métal est pur, plus sa valeur est grande.



Quantité d'impureté (q en %massique)	Alumine et cryolithe
0,001% < q < 0,05%	TiO <sub>2</sub> ; CaO ; ZnO ; V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; K <sub>2</sub> O ; Ca
0,05 % < q < 0,5%	SiO <sub>2</sub> ; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Na <sub>2</sub> O ; H <sub>2</sub> O ; SO <sub>4</sub>
	Coke de pétrole (anodes)
0,01% < q < 0,1 %	Si, Fe, V, Ni, Na, Mg, Ca
q~1%	S

**Tableau 2 : Impuretés présentes dans l'alumine, la cryolithe et le coke de pétrole**

### 3.2 Equilibre thermique des cuves

Comme indiqué dans le paragraphe 2.3, une grande partie de l'énergie fournie à la cellule est perdue par dissipation de la chaleur produite par effet Joule. L'équilibre thermique de la cuve d'électrolyse, qui détermine partiellement sa durée de vie, est donc l'un des aspects les plus importants de la gestion du procédé.

La cuve est protégée par une isolation thermique de manière à maintenir constante la température du bain et à entretenir une couche d'électrolyte solide (la croûte sur la figure 5) d'une épaisseur suffisante. Des progrès importants ont été réalisés pour réduire les pertes de chaleur grâce à une meilleure conception technologique et à une amélioration des propriétés des matériaux réfractaires utilisés pour l'isolation [6].

### 3.3 Champs magnétiques

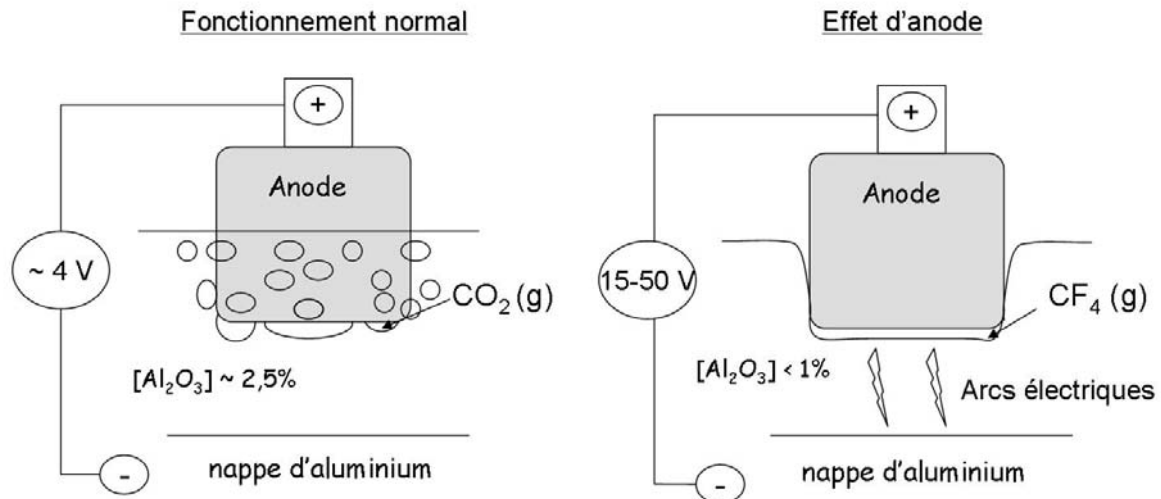
Pour la régularité de marche, la surface de la nappe d'aluminium devrait être, dans l'absolu, d'une planéité parfaite. Cependant, dès que la puissance des cuves a atteint 30 à 40 000 ampères, dans les années 1920-1930, des effets électromagnétiques sont apparus, causés par l'interaction du métal liquide avec les lignes de courant.

Ces effets créent des oscillations de la nappe d'aluminium et des vagues entre divers points de la cuve, allant jusqu'à provoquer des "giclées" de métal fondu hors de la cuve.

Bien qu'ils soient actuellement partiellement contrôlés, les effets électromagnétiques limitent la distance minimum entre l'anode et la nappe d'aluminium à environ 4-5 cm, de manière à éviter les courts-circuits. Comme la chute ohmique à travers l'électrolyte est responsable d'une perte importante d'énergie (cf. figure 7), ces effets diminuent l'efficacité énergétique globale du procédé.

### 3.4 Effet d'anode

L'effet d'anode [7] est principalement caractérisé par une soudaine augmentation de la tension aux bornes de la cuve, qui passe d'environ 4 V à une valeur comprise entre 15 V et 50 V. Il se produit lorsque la concentration en alumine à proximité de l'anode descend en dessous d'un certain seuil (~1% massique). Comme l'illustre la figure 8, ce phénomène se traduit par la formation d'une fine couche de gaz à la surface de l'anode qui bloque le passage du courant.



**Figure 8 : Représentation schématique de l'effet d'anode**

Les effets d'anode étaient par le passé largement acceptés dans les opérations normales d'une cuve, à raison d'environ un par jour et par cuve. Ils permettaient notamment de contrôler le taux d'alumine du bain, et d'homogénéiser la surface des anodes.

Cependant, ce phénomène représente une perte d'énergie importante et perturbe l'équilibre thermique de la cuve. De plus, il est responsable de l'émission de gaz à effet de serre, les perfluorocarbones. Les technologies actuelles visent donc à réduire le nombre d'effets d'anode, principalement grâce à l'automatisation des ajouts en alumine et des contrôles de l'évolution de la tension des cuves. Le taux classique d'effet d'anode est de l'ordre de 0,1 par cuve et par jour.

### 3.5 Usure des blocs cathodiques

Les blocs cathodiques en carbone placés sous la nappe d'aluminium liquide subissent une lente dégradation produite par différents facteurs :

- l'érosion mécanique due aux mouvements abrasifs de la nappe d'aluminium,
- la pénétration progressive d'aluminium, de sodium et de cryolithe,
- la formation de carbure d'aluminium ( $Al_4C_3$ ) qui est soluble dans l'électrolyte,
- la modification de la structure du carbone due aux effets thermiques et aux contraintes mécaniques.

Ces phénomènes aboutissent, après environ 5 ans, à une rupture qui nécessite l'arrêt définitif de la cuve. L'amélioration de la résistance à l'usure des blocs *cathodiques*, permettant d'augmenter la durée de vie de la cuve et donc de diminuer les coûts de production, est l'un des grands thèmes de recherche lié au procédé d'électrolyse [8].

## **4. Aspects environnementaux de l'électrolyse**

Comme tout procédé métallurgique, la production de l'aluminium génère des émissions gazeuses et des déchets en quantité importante, dont la nature produit des effets néfastes sur l'environnement.

### **4.1 Traitement des résidus et des fumées**

#### **4.1.1 Résidus du procédé**

Les blocs cathodiques contiennent des fluorures et des cyanures et constituent des déchets dangereux. Ils sont en partie réutilisés dans la fabrication de nouveaux brasquages, mais également entreposés dans l'attente de la mise au point d'un traitement approprié. Aujourd'hui, certains procédés permettent de neutraliser les composants nuisibles.

Les sels constituant l'électrolyte ainsi que les résidus d'anodes sont eux presque intégralement recyclés.

#### **4.1.2 Epuration des effluents**

Le problème de l'épuration des gaz d'électrolyse a pris de l'importance avec les augmentations de capacité des usines d'électrolyse, quand il est apparu que les rejets, sous forme de fluor particulaire et de fluor gazeux (principalement le fluorure d'hydrogène HF), causaient des dégâts à proximité des usines.

Les gaz provenant de l'évaporation de l'électrolyte sont donc traités dans des tours de lavage permettant de précipiter le fluor sous forme de fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) qui peut être réutilisé dans l'électrolyte.

Le passage des gaz à travers la poudre d'alumine destinée à l'électrolyse permet par ailleurs, grâce une réaction d'adsorption de HF sur l'alumine, de fixer plus de 98% des émissions tout en améliorant les propriétés de la matière première.

Les émissions d'oxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), d'hydrocarbures polycycliques (HAP) et de poussières de carbone provenant de la préparation et de la combustion des anodes sont également sources de pollution.

### **4.2 Emissions de gaz à effet de serre**

Les problèmes environnementaux induits par le dégagement massif de  $\text{CO}_2$  et dans une moindre mesure de perfluorocarbones (PFC) dans l'atmosphère représentent une préoccupation assez récente liée au procédé Hall-Héroult, depuis qu'il est avéré que ces gaz participent au réchauffement climatique. Les mesures établies en 1997 par le protocole de Kyoto tendent à instaurer des quotas d'émissions et concernent donc l'industrie de l'aluminium.

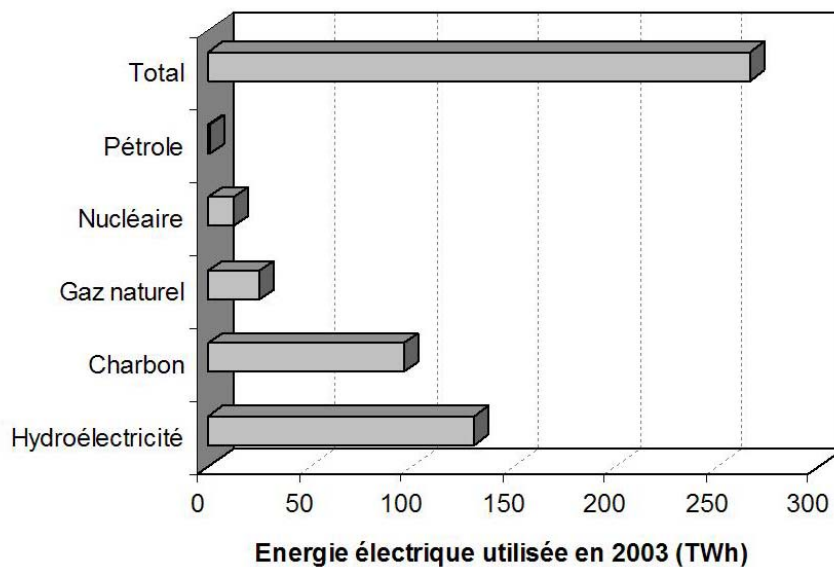
La réaction d'électrolyse produit des quantités importantes de dioxyde de carbone : la production annuelle d'aluminium (22 millions de tonnes) aboutit au dégagement dans l'atmosphère d'environ 45 millions de tonnes de dioxyde de carbone.

Le tétrafluorométhane ( $\text{CF}_4$ ) et l'hexafluorométhane ( $\text{C}_2\text{F}_6$ ) sont la deuxième classe de gaz à effet de serre produites par le procédé. Ces PFC sont produits lors de l'effet d'anode, à raison d'environ 1 kg de  $\text{CF}_4$  par tonne d'aluminium.

D'une stabilité de l'ordre de plusieurs milliers d'années, ces composés absorbent dix mille fois plus le rayonnement infrarouge que le dioxyde de carbone. Ils ne se forment pas dans la nature, et l'industrie de l'aluminium en est la première source dans le monde. Seule une

amélioration dans la gestion du procédé, en réduisant drastiquement la fréquence des effets d'anode, semble pouvoir permettre de supprimer les émissions.

Par ailleurs, la production d'électricité pour l'électrolyse représente indirectement une source de production importante de gaz à effet de serre. Comme l'illustre la figure 9, près d'un tiers de l'électricité produite pour l'industrie de l'aluminium provient de centrales à charbon [1]. Au niveau mondial, 70% des gaz à effet de serre (en équivalent CO<sub>2</sub>) émis pour la production de l'aluminium proviennent de la combustion des énergies fossiles destinées à la production d'électricité pour les différentes opérations du procédé (production de l'alumine, confection des anodes, électrolyse). La réduction des émissions passe donc également par une modification des moyens de production de l'énergie.



**Figure 9 : Sources et quantité d'énergie électrique (en térawatt-heure) utilisées dans le monde pour la production d'aluminium par électrolyse (source : [1])**

## **5. Conclusion**

Le procédé Hall-Héroult a sans cesse été modernisé depuis sa création, les objectifs principaux étant une amélioration de la productivité et du rendement de la réaction de dépôt, ainsi qu'une réduction du coût des investissements et des émissions polluantes. Pour ce faire, l'évolution industrielle a conduit à l'augmentation de l'ampérage des cuves, qui de 4 000 A dans les années 1900, est passé à plus de 300 000 A pour les usines modernes. Des projets d'usine de 500 000 A sont actuellement à l'étude, mais leur mise au point reste problématique.

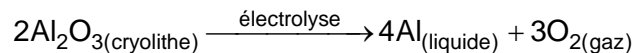
Seules des améliorations minimales restent possibles sans changement de technologie, les limites imposées par la thermodynamique de la réaction ainsi que par la configuration des cellules étant atteintes. Bien que d'autres méthodes de production de l'aluminium soient envisagées (par carboréduction à 2000°C, par réduction des chlorures d'aluminium), il n'existe aucune technologie capable de réduire la consommation en énergie de manière suffisante pour justifier le remplacement du procédé actuel. En conséquence, l'industrie de l'aluminium poursuit la recherche dans deux voies technologiques destinées à l'amélioration

du procédé existant : les cathodes mouillées par l'aluminium et les anodes non consommables.

La thématique de recherche sur les cathodes est liée au fait que l'aluminium mouille très mal les matériaux carbonés constituant actuellement les blocs cathodiques. Pour établir une surface de métal liquide plane, une couche épaisse d'aluminium (10-40 cm) est nécessaire, ce qui induit des instabilités de la nappe (cf. paragraphe 3.3). De manière à éviter ces inconvénients et à diminuer la distance anode-métal, des matériaux bien mouillés par l'aluminium sont recherchés.

Des matériaux composites à base de carbone-TiB<sub>2</sub> sont proches de l'application industrielle, ils permettent de réduire l'épaisseur de la couche de métal à quelques centimètres. La technologie associée à une telle cathode permet de plus de réaliser des cellules avec un fond légèrement incliné, de sorte que le drainage du métal peut être réalisé en continu.

La nature du matériau constituant l'anode fait également l'objet de recherches. Contrairement au procédé actuel, pour lequel l'anode en carbone est consommée, l'utilisation d'une anode ne participant pas à la réaction électrochimique permettrait de réaliser la décomposition de l'alumine selon :



Une telle anode, généralement désignée sous le terme d'anode inerte, d'anode non consommable ou encore d'anode à dégagement d'oxygène, permet idéalement de remplacer le dégagement de dioxyde de carbone par celui de l'oxygène. En pratique, et malgré une recherche remontant à la découverte du procédé Hall-Héroult et toujours très active (130 brevets relatifs à ce sujet ont été déposés entre 1985 et 1999), tous les matériaux d'anode étudiés jusqu'ici se dissolvent plus ou moins rapidement dans la cryolithe. La mise au point d'un tel matériau représenterait une avancée considérable du point de vue du développement durable et reste un défi pour l'industrie de l'aluminium [9, 10].

## Références

- [1] *Historical IAI Statistics*, The International Aluminium Institute, <http://www.world-aluminium.org> (2004).
- [2] F. Herbulot, *Récupération et recyclage de l'aluminium. Stratégie*, Techniques de l'ingénieur - traité "Elaboration et recyclage des métaux" réf. M 2345 (2001).
- [3] K. Grjotheim and H. Kvande, *Understanding the Hall-Héroult process for the production of aluminium*, Aluminium-Verlag, Dusseldorf (1986).
- [4] J. Thonstad, P. Fellner, G.M. Haarberg, J. Hives, H. Kvande and A. Sterten, *Aluminium electrolysis, fundamentals of the Hall-Héroult process*, 3<sup>rd</sup> ed., Aluminium-Verlag, Dusseldorf (2001).
- [5] P. Voisin, *Métallurgie extractive de l'aluminium*, Techniques de l'ingénieur - traité "Elaboration et recyclage des métaux" réf. M 2340 (1992).
- [6] H. Zhang, V. De Nora and J.A. Sekhar, *Materials used in the Hall-Héroult cell for aluminum production*, TMS, Warrendale, Pennsylvania (1994).
- [7] J. Thonstad, T.A. Utigard and H. Vogt, *On the anode effect in aluminum electrolysis*, Light Metals (2000).
- [8] H.A. Oye and B.J. Welch, *Cathode performance: The influence of design, operations and operating conditions*, JOM-Journal of Minerals, Metals and Materials, **50**, 2 (1998) 18-23.

- [9] U.S. Department of Energy, *Inert anode roadmap - Report of The Aluminium Association Inc.* (1998) [disponible sur le site : <http://www.eere.energy.gov/industry/aluminum/>]
- [10] D.R. Sadoway, *Inert anodes for the Hall-Héroult cell: The ultimate materials challenge*, JOM-Journal of Minerals, Metals and Materials, **53**, 5 (2001) 34-35.