

Une vie d'aluminium

Expériences de chimie sur l'élaboration et les propriétés d'un matériau

par J.-L. VIGNES, T. DI COSTANZO
Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie :
Économie - Industrie - EXC-I
ENS de Cachan - 94235 Cachan Cedex
et CECM-CNRS - 94400 Vitry-sur-Seine
S. BOUQUET
ENS de Chimie de Paris
et D. FERTON
Pechiney CRV - 38340 Voreppe

Les expériences présentées dans cet article sont destinées à illustrer, au laboratoire, différents aspects d'un matériau largement utilisé dans la vie courante. Ces expériences font appel à du matériel disponible dans les collèges et les lycées et à des produits facilement accessibles ne présentant pas de grandes difficultés d'utilisation. Elles peuvent, en particulier, être mises en œuvre dans le cadre des nouveaux programmes de chimie de la classe de troisième.

L'aluminium est un métal jeune : c'est lors de l'Exposition Universelle de 1855, à Paris, que le Français Sainte-Claire Deville présente pour la première fois au public un métal léger et aussi brillant et inoxydable que l'argent. L'Empereur Napoléon III encourage financièrement l'inventeur qui peut monter un petit atelier expérimental à Paris.

Les autres grands métaux industriels sont apparus très progressivement à l'homme qui, pendant longtemps, n'a connu que les métaux natifs, puis a découvert fortuitement quelques principes de métallurgie. On peut citer les dates de naissance des principaux métaux de l'industrie moderne :

- environ 10 000 ans avant Jésus-Christ : métaux natifs (or, argent, cuivre),
- environ 5 000 ans avant Jésus-Christ : métallurgie du cuivre,
- environ 3 000 ans avant Jésus-Christ : découverte du bronze,
- environ 1 000 ans avant Jésus-Christ : début de l'âge du fer,
- XVI^e siècle : le zinc,

- XVIII^e siècle : le nickel,
- XIX^e siècle : l'aluminium.

Cette apparition tardive de l'aluminium, parmi les métaux d'usage courant, est due à la difficulté de réduction de l'oxyde d'aluminium, forme sous laquelle est, en général, présent l'aluminium, dans la nature. Dès 1807, le chimiste et physicien anglais H. Davy obtient un globule d'un métal blanc qu'il baptise «aluminium» qui deviendra ultérieurement aluminium. Il faut attendre Sainte-Claire Deville et 1854 pour disposer d'une production industrielle limitée d'aluminium par réduction du chlorure d'aluminium par le sodium. 1886 est l'année charnière dans l'histoire de l'industrie de l'aluminium, puisque P. Héroult en France et C.M. Hall aux États-Unis découvrent simultanément le procédé d'électrolyse de l'oxyde d'aluminium dissous dans un bain de cryolithe en fusion. Cette découverte a donné le coup d'envoi de l'extraordinaire développement de la consommation d'aluminium qui est devenu, en un siècle, le deuxième métal le plus utilisé, après l'acier, avec, hors métal recyclé, plus de 19 millions de tonnes dans le monde en 1994.

1. L'ÉLABORATION DE L'ALUMINIUM [1 à 3]

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant au sein de l'écorce terrestre (8 %). Il se présente sous forme oxydée dans des argiles, schistes... La bauxite, composée d'oxyde hydraté d'aluminium, de silice et d'oxyde de fer qui lui donne sa couleur rouge, est le minerai le plus utilisé pour produire l'alumine (oxyde d'aluminium) puis l'aluminium. Si le nom du minerai vient de l'exploitation d'un gisement, à partir de 1821, au village des Baux de Provence, les lieux principaux de production actuels se situent en Australie, Jamaïque, Guinée et Brésil. Les réserves en bauxite sont très importantes, plus de 20 milliards de tonnes, soit deux cents années de production, au rythme actuel.

L'élaboration de l'aluminium, à partir de la bauxite, s'effectue en deux étapes distinctes. Il faut d'abord extraire l'alumine de la bauxite, ceci est réalisé selon le procédé Bayer, ensuite, l'alumine subit une électrolyse en sel fondu pour donner l'aluminium.

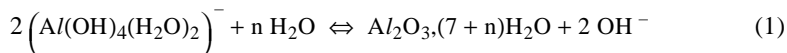
1.1. Obtention de l'alumine

La bauxite qui contient de 40 à 60 %, en masse, de Al_2O_3 sous forme hydratée, l'hydrargillite, $Al(OH)_3$ ou la böhmite, $AlO(OH)$, renferme également, principalement, de 10 à 20 % d'oxyde de fer hydraté, $FeO(OH)$ et des quantités variables de silice (en général moins de 5 %). La difficulté de la séparation entre l'alumine et l'oxyde de fer réside

dans le fait que les deux oxydes hydratés, la böhmite, $AlO(OH)$, et la goëthite, $FeO(OH)$, forment des solutions solides. Pour les séparer il faut, à l'échelle atomique, détruire totalement la structure cristalline. Ce cas se présente pour les bauxites européennes. Par contre, les bauxites extraites dans les pays tropicaux, riches en hydrargillite, sont plus faciles à traiter.

Dans le procédé Bayer mis au point en 1887 et actuellement universellement employé, les propriétés amphotères de l'alumine sont mises à profit.

La bauxite est attaquée par une solution de $NaOH$ concentrée et chaude dans des autoclaves, à $250^{\circ}C$, et plus de 4.10^6 Pa. On sépare ainsi Al (III) qui passe en solution sous forme d'ion aluminate hydraté $(Al(OH)_4(H_2O)_2)^-$, de Fe (III) qui se retrouve sous forme d'oxyde de fer Fe_2O_3 insoluble. Après filtration et élimination de l'oxyde ferrique, Al_2O_3 hydraté précipite par dilution et refroidissement selon la réaction :



L'hydrolyse dure environ deux jours. La précipitation est initiée et contrôlée par une quantité importante d'amorce d'alumine provenant de fabrications précédentes. Les bacs de précipitation peuvent atteindre des volumes de $4500 m^3$.

La bauxite doit être la plus pauvre possible en silice car cette dernière consomme de la soude et de l'alumine pour former un silicoaluminate de sodium insoluble de formule proche de $5SiO_2 \cdot 3Al_2O_3 \cdot 3Na_2O \cdot 5H_2O$.

Il faut de 2,5 à 2,7 tonnes de bauxite pour produire une tonne d'alumine. En 1994, la production mondiale d'alumine atteint près de 42 millions de tonnes. L'implantation des usines d'alumine est de plus en plus réalisée à proximité des gisements de bauxite. L'usine d'alumine la plus importante dans le monde est située sur la côte Est de l'Australie, à Gladstone. Sa capacité de production est de 3,3 millions de tonnes d'alumine par an. En France, Pechiney exploite l'usine de Gardanne, dans les Bouches-du-Rhône, qui produit près de 500 000 tonnes par an d'alumine.

Illustration expérimentale

Matériel et produits

- Sulfate d'aluminium (par exemple $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$).
- Sulfate ferrique $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$.

- Solution aqueuse de soude $2,5 \text{ mol.L}^{-1}$.
- Acide chlorhydrique 3 mol.L^{-1} .
- Éprouvette graduée de 100 mL.
- Deux béchers ou erlenmeyers de 250 mL.
- Étuve à 80°C .
- Mortier et pilon.
- Nécessaire à filtration sur Büchner, trompe à eau.

Risques et précautions particuliers

Aucun sinon l'utilisation de solutions acides et basiques.

Expérience

Ne disposant pas de bauxite, nous reconstituons un minerai à partir de produits courants de laboratoire.

• *Préparation de la bauxite de départ*

Dissoudre 5 g de sulfate d'aluminium hexadécahydraté et 0,5 g de sulfate ferrique hydraté dans 25 mL d'eau distillée. Ajouter 15 mL de solution de soude $2,5 \text{ mol.L}^{-1}$: un précipité rouge brique apparaît, composé d'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et d'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$. Vérifier que le pH reste compris entre 4 et 9 afin d'éviter la dissolution de l'hydroxyde d'aluminium. Récupérer ce précipité sur Büchner, le laver plusieurs fois à l'eau distillée, puis le placer à l'étuve (80°C) : on obtient alors un solide d'une composition proche de celle de la bauxite (Al_2O_3 : 75 % ; Fe_2O_3 : 25 %).

• *Séparation $\text{Al}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$*

Après broyage, dissoudre le minerai formé, à environ 80°C , dans 15 mL de solution de soude $2,5 \text{ mol.L}^{-1}$. L'hydroxyde d'aluminium se dissout et forme des ions aluminates $\left(\text{Al}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2\right)^-$, tandis que l'hydroxyde ferrique demeure insoluble. Filtrer sur papier filtre, ajouter enfin au filtrat quelques gouttes d'acide chlorhydrique 3 mol.L^{-1} : l'hydroxyde d'aluminium précipite.

Remarque : Nous n'avons pas pu, dans nos conditions expérimentales, faire précipiter l'hydroxyde d'aluminium par simple dilution, nous avons alors diminué le pH à l'aide

d'un ajout d'une solution acide. Dans les deux cas, l'équilibre (1) est déplacé vers la droite.

1.2. Élaboration de l'aluminium

L'aluminium étant un métal très réducteur, il n'est pas possible, thermodynamiquement, de réduire l'alumine par pyrométallurgie en utilisant les réducteurs industriels usuels (oxyde de carbone ou dihydrogène). Le carbone pourrait être utilisé (par exemple dans le procédé Alcar mis au point dans les années 1960 par Pechiney mais non économiquement rentable) mais nécessiterait l'emploi d'une température très élevée ($> 2075^{\circ}\text{C}$) et la formation de carbure d'aluminium est difficile à éviter. Par ailleurs, l'électrolyse en solution aqueuse n'est pas possible, la réduction de l'eau se produisant préférentiellement à celle des ions aluminium. A partir de 1854, de l'aluminium a été produit industriellement selon le procédé de Henri Sainte-Claire Deville mais il restait un métal cher, son prix était du même ordre de grandeur que celui de l'argent. Il a fallu attendre 1886 pour que Paul Héroult en France, suivi indépendamment, quelques mois plus tard par Charles Martin Hall aux États-Unis, âgés tous deux de vingt-trois ans, découvrent le procédé par électrolyse en sels fondus qui allait permettre une production économiquement intéressante de l'aluminium.

La température de fusion de Al_2O_3 étant élevée (2040°C) on ajoute de la cryolithe (Na_3AlF_6) permettant d'obtenir un eutectique fondant vers 960°C . La cryolithe qui à l'origine était exploitée au Groenland est actuellement obtenue par synthèse. La composition moyenne d'un bain d'électrolyse est la suivante : 83 % de cryolithe, 7 % de AlF_3 , 5 % de CaF_2 , 5 % de Al_2O_3 . Les réactions se produisant lors de l'électrolyse sont extrêmement complexes. Globalement on peut écrire :

à la cathode :
$$2/3 \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 4/3 \text{Al} + \text{O}_2$$

à l'anode :
$$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$$

La cathode est constituée par le creuset, en graphite, de la cellule (ou cuve) d'électrolyse. Sa masse est de 50 tonnes et sa durée de vie de cinq ans. Par exemple, la construction de l'usine d'électrolyse de Dunkerque a utilisé 9000 tonnes de produits carbonés pour le garnissage des cuves. Les anodes sont en carbone et sont consommées en moyenne en vingt-six jours. Elles sont élaborées à partir de coke de pétrole et de brai, dans l'usine de production d'aluminium. Pour produire en un an 170 000 tonnes de Al il faut 200 000 anodes de 400 kg chacune. Les caractéristiques de l'électrolyse sont les suivantes :

- tension : 4 V,
- intensité : 180 000 à 300 000 A (à Dunkerque).

Jusqu'à deux cent soixante-quatre cuves (à Dunkerque, dans deux halls de 850 m de long) sont montées en série. Les cellules ont les dimensions suivantes : longueur de 9 à 16 m, largeur de 3 à 4 m, hauteur de 1 à 1,5 m.

Leur capacité de production peut atteindre 4,5 tonnes de Al en quarante-huit heures.

Pour produire 1 tonne d'aluminium dit de «première fusion» il faut :

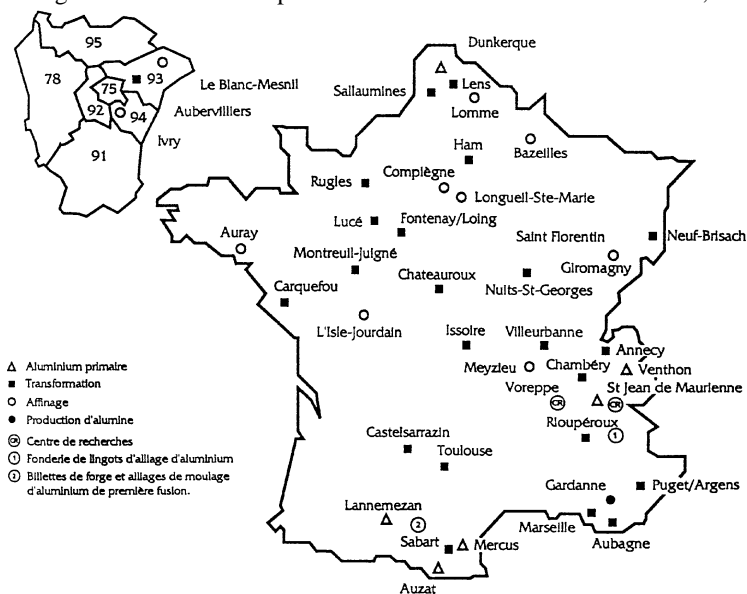
Al_2O_3 : 1900 kg

Produits fluorés : 30 kg (exprimés en F^-)

Carbone : 430 kg

Énergie : 13 000 kWh

L'aluminium liquide (il fond à 660°C) de 99,5 et 99,9 % de pureté se dépose sur le fond du creuset. Il est protégé de l'oxydation par la couche de sel fondu, moins dense, et est régulièrement prélevé par siphonnage dans une poche, puis déversé dans un four où l'on peut ajouter divers métaux dans des proportions précises pour obtenir différentes nuances d'alliages. L'aluminium est ensuite dégazé en continu avant d'être solidifié sous différentes formes : plaques destinées au laminage, billettes pour le filage ou la forge, fil machine pour le tréfilage, lingots destinés à la fonderie de moulage. Sur la figure 1 figurent les lieux d'implantation de l'industrie de l'aluminium, en France.



Source : Chambre Syndicale de l'aluminium

Figure 1 : L'industrie de l'aluminium, en France [2].

Évolution des technologies

Le rendement de l'électrolyse est fonction de l'intensité du courant électrique qui traverse les cuves : de 4000 ampères en 1889, cette intensité est passée à 300 000 ampères pour les nouvelles séries actuelles. L'énergie électrique est l'une des composantes essentielles pour la fabrication de l'aluminium. Ce facteur explique le souci permanent des producteurs à rechercher des implantations d'usines d'électrolyse dans des régions où l'électricité est abondante et bon marché : Australie, Canada, Norvège... D'autre part, les producteurs ont en permanence cherché à réduire la consommation électrique par tonne d'aluminium produite qui est passée de 80 000 kWh/t en 1896 à 13 000 kWh/t aujourd'hui.

Les cuves d'électrolyse sont entièrement capotées afin de capter les gaz qui s'échappent du bain (le difluor en particulier) et de les envoyer dans un dispositif d'épuration.

Illustration expérimentale [4 et 5]

On se propose d'élaborer l'aluminium par électrolyse de l'alumine en sel fondu. Nos conditions expérimentales en laboratoire, très éloignées des conditions industrielles, permettent d'obtenir quelques globules d'aluminium, en deux heures.

Matériel et produits

- Alumine calcinée, $Al_2O_3 \alpha$.
- Cryolithe, Na_3AlF_6 .
- Trifluorure d'aluminium, AlF_3 .
- Four électrique 1000°C, vertical, muni d'un couvercle.
- Creuset en nickel (diamètre 5 cm, hauteur 5 cm) muni d'une arrivée de courant, soudée, en nickel.
- Creuset en graphite (diamètre extérieur 4 cm, diamètre intérieur 3 cm, hauteur 7 cm), par exemple fourni par LE CARBONE LORRAINE - 41, rue Jean Jaurès - 92230 GENNEVILLIERS. Le creuset est détruit en fin d'expérience.
- Électrode en graphite (par exemple un charbon d'arc de diamètre 8 mm et longueur 20 cm).
- Alimentation stabilisée, 5 V continu pouvant délivrer 5 A.
- Ampèremètre.
- Voltmètre.
- Hotte.

Risques et précautions particuliers

Éviter les courts-circuits, placer le montage sous une hotte car il se produit un dégagement de fluorure d'hydrogène.

Expérience

Réaliser le montage décrit sur la figure 2. Chauffer au préalable le four vers 900°C , placer dans le creuset en graphite un mélange de 4 g de trifluorure d'aluminium et de 13 g de cryolithe. Le mélange fondant, son volume diminue, ce qui permet de rajouter le reste du mélange en plusieurs fois, si nécessaire. Lorsque tout le mélange de sel est fondu, ajouter environ 1 g d'alumine. Placer l'anode dans le bain fondu, en prenant garde qu'elle ne touche pas le fond du creuset en graphite. Placer le couvercle du four et appliquer une tension de 5 V. L'intensité du courant est d'environ 5 A. Au cours de l'électrolyse ajouter progressivement l'alumine, 6 g au total, et maintenir l'anode en graphite au sein du bain fondu. En effet, au cours de l'électrolyse, l'anode est consommée, il faut donc périodiquement la descendre dans le bain et contrôler régulièrement que le circuit électrique n'est pas coupé. Prolonger l'électrolyse pendant au moins deux heures.

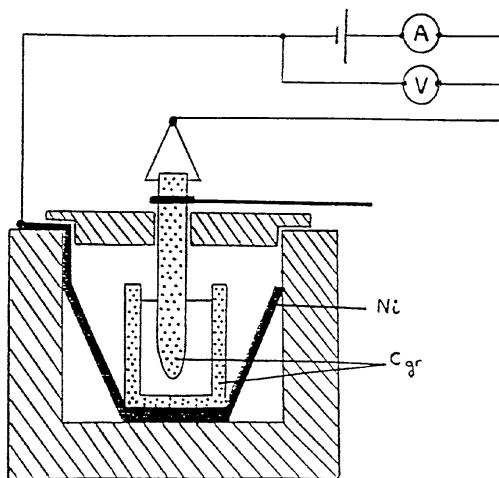


Figure 2 : Schéma du montage d'électrolyse de l'alumine.

Arrêter le passage du courant, le chauffage du four et laisser refroidir. Retirer le creuset en graphite du four et le briser à l'aide d'un marteau. On constate la formation de petits globules d'aluminium de quelques millimètres de diamètre situés entre le creuset et le sel qui a cristallisé lors du refroidissement.

Bilan de l'électrolyse

Au total, a été introduite 0,06 mole d'alumine qui donnerait si la réduction était complète 0,12 mole d'aluminium.

Si l'électrolyse a duré deux heures sous 5 A, il a circulé, $3 \cdot 10^4$ coulombs. Pour réduire une mole de Al^{3+} , il faut apporter $3 \times 6,022 \cdot 10^{23} \times 1,6 \cdot 10^{-19}$ coulombs, soit $29 \cdot 10^4$ coulombs. Il y aura donc 0,1 mole de Al^{3+} qui aura été réduite soit 2,7 g.

Si l'on considère que tout l'aluminium formé se rassemble en un seul globule celui-ci aurait un volume de 1 cm^3 soit un diamètre de 1,2 cm.

2. LA NATURE POLYCRISTALLINE D'UNE PLAQUE D'ALUMINIUM [6 et 7]

Il est très rare qu'un matériau se présente sous la forme d'un monocristal c'est-à-dire d'un solide dans lequel les atomes sont répartis périodiquement dans l'ensemble du volume en formant un seul grain. Dans la vie courante, les exceptions sont, par exemple, les cristaux des collections de minéralogie, les diamants de joaillerie, le silicium des puces utilisées en micro-électronique ou le quartz piézo-électrique des montres. Dans le cas des métaux, l'industrie ne produit couramment que des matériaux polycristallins c'est-à-dire, formés d'un ensemble de grains, ces grains ayant la même composition, mais des orientations différentes les uns par rapport aux autres. La frontière entre deux grains est appelée joint de grains.

Les tailles des grains sont très variables et, en général, trop faibles pour être observables à l'œil nu. Une exception est celle du zinc qui recouvre l'acier galvanisé (voir l'article «*Une vie d'acier zingué*» dans ce numéro). Les propriétés mécaniques des métaux et en particulier leur résistance à la déformation sont, pour un métal donné, en partie liées à la dimension des grains (voir l'article «*Une vie de cuivre*» dans ce numéro) : plus les grains sont petits, plus la résistance à la déformation est grande. Par contre, un monocristal métallique est mou et d'autant plus mou qu'il est parfait (exempt de dislocations).

Lors du refroidissement d'un métal ou d'un alliage métallique préalablement fondu, si celui-ci s'effectue sans précaution particulière, la solidification commence par la formation de petits volumes solides, appelés germes, qui en grossissant deviennent des grains en contact les uns avec les autres. En général, il se forme initialement de nombreux germes, ceux-ci ayant des orientations (au niveau de la disposition des atomes) quelconques : cela donne un matériau polycristallin.

2.1. Élaboration d'un monocristal d'aluminium

Pour former un monocristal il faut, au refroidissement, qu'il ne se forme initialement qu'un seul grain (en général, on apporte ce grain de l'extérieur du métal, ce qui permet de contrôler son orientation) et que ce soit ce grain qui grossisse lors de la solidification. Cela impose une vitesse de refroidissement très lente.

Illustration expérimentale

Matériel et produits

- Deux lames d'aluminium (pureté $\geq 99,9\%$) de dimensions approximatives suivantes : longueur 5 cm, largeur 1 cm, épaisseur 1 mm. L'aluminium de haute pureté peut, par exemple, être obtenu auprès de la société GOODFELOW - 76, boulevard J.-B. Lebas - 59000 LILLE.
- Four tubulaire (700-800°C) monté sur roulettes relié à un moteur (figure 3)
- Support réfractaire, par exemple tube en alumine, coupé dans le sens de la longueur.
- Briques réfractaires.

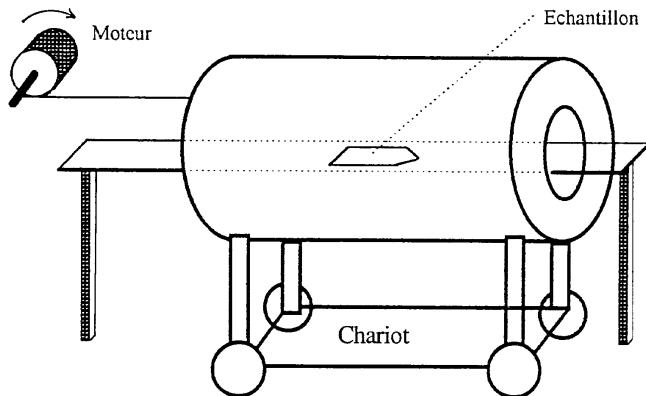


Figure 3 : Schéma du montage d'élaboration d'un monocristal d'aluminium.

Risques et précautions particuliers

Aucun sinon l'utilisation d'un four. Il faut veiller à ce que le déplacement du four se fasse le plus régulièrement possible, sans vibration.

Expérience

Tailler en pointe une extrémité de la plaque d'aluminium. Poser la plaque sur le support réfractaire, introduire le tout dans le four que l'on porte à 700-800°C.

L'aluminium fond dans sa «peau» d'alumine qui sert ainsi de nacelle (voir le chapitre 4 de cet article). Déplacer ensuite lentement le four, à la vitesse maximale de 3 cm à l'heure, afin de solidifier l'aluminium à partir de sa pointe. Le premier cristal qui se forme dans la pointe grossit en même temps que se déplace le four jusqu'à consommation totale de l'aluminium liquide.

L'état monocristallin de l'aluminium peut être caractérisé par diverses méthodes simples à mettre en œuvre :

- comparer sa résistance à la déformation avec une plaque de départ polycristalline : elle est nettement plus faible (voir l'article «*Une vie de cuivre*» dans ce numéro),
- traiter la surface de l'aluminium à l'aide d'acide chlorhydrique (voir l'expérience suivante) : on n'observe qu'un seul grain si l'expérience est réussie.

2.2. **Élaboration d'aluminium polycristallin de taille de grain variable**

Nous allons montrer que des sollicitations mécaniques associées à des traitements thermiques peuvent modifier les dimensions des grains.

Un métal peut être déformé de façon irréversible, par étirement (traction), écrasement (laminage), enfoncement (emboutissage), torsion... Ces déformations sont appelées «écrouissage» et le métal ainsi déformé est dans un état dit «écroui». L'écrouissage se traduit à l'échelle atomique par la création d'un grand nombre de défauts, principalement des dislocations (voir l'article «*Une vie de cuivre*» dans ce numéro).

Le chauffage, appelé recuit, d'un métal écroui, apporte de l'énergie aux atomes qui tendent ainsi à éliminer les défauts créés lors de l'écrouissage. Le recuit permet au métal de revenir à un état plus stable par élimination de l'excès de dislocations introduit lors de l'écrouissage.

Illustration expérimentale

Matériel et produits

- Quatre lames d'aluminium A5 (pureté $\geq 99,5$ %) de dimensions approximatives suivantes : longueur 10 cm, largeur 1,5 cm, épaisseur 1 mm pour les expériences de traction.
- Une plaque d'aluminium A5, carrée de 5 à 10 cm de côté pour les expériences d'emboutissage.
- Acide chlorhydrique 6 mol.L⁻¹.
- Appareil de traction ou/et d'emboutissage (figure 4).
- Four (600°C).

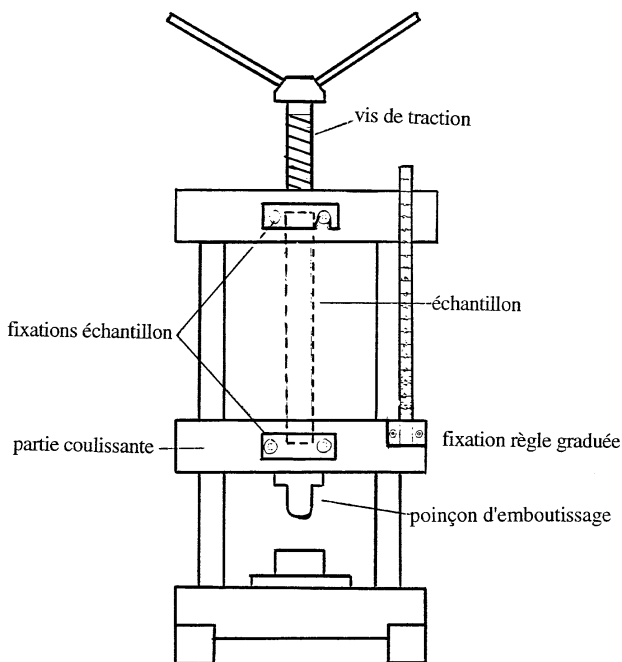


Figure 4 : Schéma de l'appareillage de traction - emboutissage.

Risques et précautions particuliers

Aucun sinon l'utilisation d'un four et d'acide chlorhydrique concentré.

Expérience

– *Écrouissage par traction* : tracer à l'aide d'une pointe, deux repères distants de 8 cm, sur chaque lame. Porter les lames pendant environ trente minutes à 600°C, en évitant la fusion de l'aluminium. Après refroidissement, étirer les lames de 2, 4, 6, 8 %.

– *Écrouissage par emboutissage* : porter une plaque pendant environ trente minutes à 600°C puis, après refroidissement, l'emboutir.

Porter les lames étirées ou la plaque emboutie de nouveau à 600°C, pendant une heure. Après refroidissement, à l'aide d'un coton trempé dans l'acide et maintenu par une pince, attaquer la surface du métal jusqu'à apparition des grains. Rincer abondamment et sécher.

Les dimensions des grains obtenus en fin d'expérience sont d'autant plus réduites que le taux d'écroutissage a été plus important. Les grains les plus petits correspondent à l'étirement de 8 %. Dans le cas de l'emboutissage les grains les plus fins sont obtenus dans les parties les plus déformées : point d'inflexion du creux, angle vif entre partie plane et creux.

Interprétation

Le premier chauffage est destiné à éliminer les effets de l'écroutissage initial des lames et plaques, créé lors du laminage industriel du métal.

Le traitement à l'acide chlorhydrique, en dissolvant l'alumine initialement présente permet l'observation des grains du métal. La nouvelle alumine se formant à l'air après traitement acide a une orientation qui est celle des grains sous-jacents et donc ne gêne pas leur examen visuel. Les grains possédant des orientations d'atomes différentes réfléchissent diversement la lumière et donnent un «effet mosaïque».

Plus la déformation et donc l'écroutissage sont importants, plus la longueur des dislocations produites est grande et plus la structure cristalline est perturbée. A chaud, à l'état solide, les défauts s'éliminent, en partie, lentement (environ une heure) en créant de nouveaux grains au détriment des anciens. Plus le nombre de défauts est initialement important plus le nombre de nouveaux grains créés sera grand. Ce phénomène est appelé recristallisation (voir la figure 3 de l'article «*Une vie de cuivre*» dans ce numéro). Pour que cette recristallisation ait lieu, il faut fournir une énergie de désordre minimale, par écroutissage qui est appelé écroutissage critique : il est d'environ 1,8 % pour l'aluminium A5. Ce taux d'écroutissage dépend en particulier de la pureté du métal, la présence d'impuretés ou la formation d'alliages favorisant la germination.

3. LA CORROSION ATMOSPHÉRIQUE DE L'ALUMINIUM

3.1. La protection de l'aluminium par l'alumine

L'aluminium qui est thermodynamiquement très oxydable, présente, dans la pratique, une excellente résistance à la corrosion. En effet, en présence de l'air atmosphérique, la surface de l'aluminium est immédiatement recouverte d'une couche très fine (2 à 5 nm) d'alumine compacte, de structure amorphe, qui protège fortement l'aluminium de la poursuite de l'oxydation. Toutefois, la présence de quelques défauts dans la couche d'alumine permet, à travers elle, la diffusion de quelques ions Al^{3+} qui, en surface, forment de l'alumine hydratée, $AlO(OH, nH_2O)$, souvent peu protectrice. Cette couche a une faible épaisseur (quelques nanomètres). Un traitement thermique de recuit peut accroître ces couches, jusqu'à quelques dizaines de

nanomètres d'épaisseur (voir le chapitre sur le comportement à chaud). Pour donner un ordre de grandeur, la vitesse de corrosion de l'aluminium est de l'ordre de $1 \mu\text{m}/\text{an}$ en atmosphère marine. L'alumine ne peut protéger l'aluminium que tant qu'elle n'est pas elle-même dissoute. Il faut, en particulier, que le pH des précipitations soit compris entre 4 et 9. Par exemple, des pluies acides, chargées en dioxyde de soufre, peuvent dissoudre l'alumine.

La présence de la couche protectrice d'alumine confère à l'aluminium des propriétés anticorrosion très intéressantes qui alliées à sa faible masse volumique en font un matériau très utilisé dans l'aéronautique et les transports. L'aluminium, bon conducteur de l'électricité, est également utilisé, en remplacement du cuivre, pour le transport de l'électricité. En effet, du fait de sa masse volumique nettement plus faible que celle du cuivre, 1 kg d'aluminium assure les mêmes fonctions de transport électrique que 2 kg de cuivre. Dans ce type d'utilisation, l'alumine protège favorablement contre la corrosion atmosphérique (les câbles sont utilisés nus, sans isolant, pour les hautes et très hautes tensions) mais pose des problèmes de contact entre conducteurs du fait de sa résistivité électrique élevée. Pour cette raison, pour les contacts des lignes haute ou moyenne tension, il faut éliminer l'alumine par brossage, enduire le métal d'une graisse éventuellement chargée de particules conductrices et exercer une pression de serrage élevée sur une grande surface de contact. Pour des applications intérieures, l'aluminium peut être étamé ou nickelé. Par exemple, dans les Airbus des tresses de fil fin nickelé apportent un gain de poids substantiel.

Observations expérimentales de la présence de l'alumine

Lors d'une attaque acide de l'aluminium, on constate un temps «d'incubation» plus ou moins important avant que la réaction, parfois vive, se produise (voir le paragraphe 5.2.). L'«incubation» correspond à la dissolution de l'alumine qui a lieu lentement, sans dégagement gazeux.

Lors du chauffage d'un fil d'aluminium à une température supérieure à la température de fusion de l'aluminium (660°C) on constate que, en surface, l'alumine (température de fusion = 2040°C) forme une gaine réfractaire qui contient l'aluminium fondu (voir le paragraphe 4.).

3.2. L'oxydation d'un amalgame d'aluminium

La présence de mercure à la surface de l'aluminium entraîne, dès la température ambiante, la formation d'un alliage (appelé amalgame dans le cas du mercure). Cette formation d'amalgame est, en général, pour les métaux, extrêmement préjudiciable à leurs propriétés. Le cas de l'or est bien connu : il se forme un alliage qui entraîne,

outre le changement de couleur de l'or (il blanchit) la perte de ses propriétés mécaniques : il peut se transformer en poudre. Un chauffage modéré, à l'air, permet de récupérer l'or par distillation du mercure (température d'évaporation = 356,7°C). Cette technique a été, jusqu'à la fin du XIX^e siècle, employée pour extraire l'or finement dispersé dans des minerais.

Dans le cas de l'aluminium, la présence sur sa surface d'un amalgame, empêche la formation de la couche d'alumine protectrice. L'aluminium, très réducteur, serait très rapidement oxydé en l'absence d'une couche protectrice. C'est ce qui se produit lorsque du mercure est déposé à la surface de l'aluminium.

Illustration expérimentale [9]

Matériel et produits

- Mercure ou solution aqueuse de sel mercurique (acétate...) à 0,1 mol.L⁻¹.
- lame d'aluminium.
- Solution aqueuse d'hydroxyde de sodium, environ 1 mol.L⁻¹.

Risques et précautions particuliers

Les sels minéraux de mercure sont des poisons violents et le mercure, s'évaporant lentement à l'air, atteint une concentration dans l'air qui peut dépasser les normes permises. En conséquence, les sels de mercure doivent être manipulés avec précaution et récupérés par précipitation, par exemple sous forme de sulfure. Surtout ne pas les jeter dans l'évier. Le mercure liquide doit également être soigneusement récupéré et stocké dans des récipients étanches pour être régénéré ou éliminé par des entreprises spécialisées.

Expérience

L'expérience peut être réalisée en plongeant la lame d'aluminium dans du mercure mais il est plus spectaculaire de procéder à partir d'une solution de sel mercurique.

Plonger pendant moins d'une minute la lame d'aluminium dans la solution de soude afin de dissoudre l'alumine naturelle. La formation de bulles de dihydrogène caractérise l'attaque de l'aluminium après celle de l'alumine. Rincer soigneusement à l'eau distillée puis plonger la lame dans la solution de sel mercurique. On observe le ternissement de la surface de l'aluminium et si le traitement est prolongé, le dépôt de mercure liquide. On peut également observer, en prolongeant le traitement, la formation, dans la solution, d'alumine insoluble. Rincer la lame en récupérant les eaux de lavage et laisser à l'air dans un cristalliseur qui permettra de récupérer, éventuelle-

ment, le mercure en excès. On constate la formation, très rapide, de filaments d'alumine, perpendiculairement à la surface de l'aluminium. La température de la lame s'élève fortement, celle-ci ne peut plus être maintenue entre les doigts.

Interprétation

Lorsqu'une lame d'aluminium est plongée dans la solution de sel mercurique une réaction d'oxydoréduction a lieu en accord avec les potentiels standards :



L'aluminium est oxydé, les ions mercuriques sont réduits, du mercure se dépose sur l'aluminium. L'utilisation directe de mercure revient au même. Dès la température ambiante, il se forme au contact Al-Hg, un alliage. La solubilité de l'aluminium, dans le mercure, à la température ambiante, est en masse, d'environ 0,005 %, c'est-à-dire que les atomes d'aluminium sont fortement dispersés au sein du mercure. Le mercure étant liquide, le déplacement des atomes est rapide, continuellement, des atomes d'aluminium arrivent en surface, au contact du dioxygène et de la vapeur d'eau atmosphérique, ils s'oxydent en formant de l'alumine hydratée. La densité, en surface des atomes d'aluminium étant très faible, l'alumine formée ne peut pas être compacte : on observe la formation de filaments qui croissent perpendiculairement à la surface. Par oxydation, la concentration en aluminium du mercure tend à diminuer, mais celle-ci est immédiatement rétablie par diffusion d'aluminium provenant de la surface de la plaque. En définitive, en quelques heures, l'oxydation de la lame d'aluminium peut être totale.

Le dégagement de chaleur observé est conforme aux données thermodynamiques concernant l'oxydation de l'aluminium ($\Delta H^{\circ} = -1672 \text{ kJ.mol}^{-1}$). Cette expérience est utilisée par des charlatans qui abusent de la crédulité de certaines personnes. Ils demandent à ces personnes prétendument «fétichées» de leur fournir des objets appartenant au «féticheur» supposé. Ils placent ces objets dans une feuille d'aluminium, ils ajoutent discrètement une goutte de mercure et demandent aux «patients» de serrer fortement dans leur main la boule d'aluminium ainsi formée. Les «patients» constatent l'élévation de température dans leur main : «les mauvais esprits quittent leur corps» [10].

3.3. L'anodisation de l'aluminium

La couche d'alumine protège l'aluminium de l'oxydation. Cette couche naturelle, de très faible épaisseur, est sujette à détérioration par diverses agressions mécaniques et chimiques, ce qui entraîne un aspect décoratif non permanent dans le temps. L'anodisation a pour objet de former une couche plus épaisse, de qualité contrôlée, qui

peut atteindre 15 à 20 μm , garantissant une dureté superficielle, une protection contre la corrosion et un aspect décoratif constant dans le temps. Lors des agressions atmosphériques, l'alumine superficielle subira une abrasion mais il en restera suffisamment pour que l'aluminium ne soit pas mis à nu. L'épaisseur de la couche est ajustée pour que cela soit le cas. Cette croissance importante de la couche d'alumine est effectuée artificiellement par oxydation anodique. L'aluminium ainsi traité est appelé anodisé.

Illustration expérimentale [8 et 9]

Matériel et produits

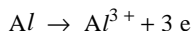
- lame en plomb.
- lame d'aluminium à anodiser.
- Un bécher de 250 mL.
- Acide sulfurique environ 2 mol.L^{-1} .
- Batterie 6 V.
- Colorant : par exemple solution aqueuse à 10 % d'alizarine.
- Solution aqueuse d'ammoniac environ $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$.

Risques et précautions particuliers

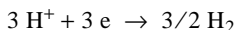
Aucun sinon l'utilisation d'acide sulfurique.

Expérience

Placer les lames métalliques dans l'acide sulfurique. Relier la lame d'aluminium à la borne positive de la batterie et la lame de plomb, inattaquable en milieu sulfurique, à la borne négative. A l'anode l'oxydation de l'aluminium se produit :



A la cathode, on observe un dégagement de dihydrogène provenant de la réduction des ions H^+ :



Poursuivre l'électrolyse pendant environ quinze minutes. Récupérer la lame d'aluminium, la rincer abondamment, la plonger dans la solution d'ammoniac pour neutraliser l'acide restant. Rincer puis plonger la lame dans la solution d'alizarine de telle sorte que le niveau du colorant dépasse celui de l'électrolyte. On constate une

coloration de la plaque seulement sur la surface qui a subi l'électrolyse. Enfin plonger pendant quelques minutes la plaque dans de l'eau bouillante.

Interprétation

Les ions Al^{3+} , en présence de l'eau présente dans l'acide, donnent de l'alumine hydratée qui croît perpendiculairement à la surface de l'aluminium sous forme de cellules creuses de forme hexagonale (voir les figures 5a et 5b). Au cours de l'électrolyse, en milieu acide, une partie de l'alumine formée est dissoute, mais la vitesse de croissance est supérieure à celle de dissolution. L'épaisseur de la couche formée dépend alors de la durée d'électrolyse. Les pigments apportés par la solution de coloration entrent dans les pores. Lorsque la lame d'aluminium est plongée dans l'eau bouillante, l'alumine cristallise en böhmite, $Al_2O_3 \cdot H_2O$, qui par croissance, colmate les pores, en emprisonnant les pigments colorés (figures 5c et 5d).

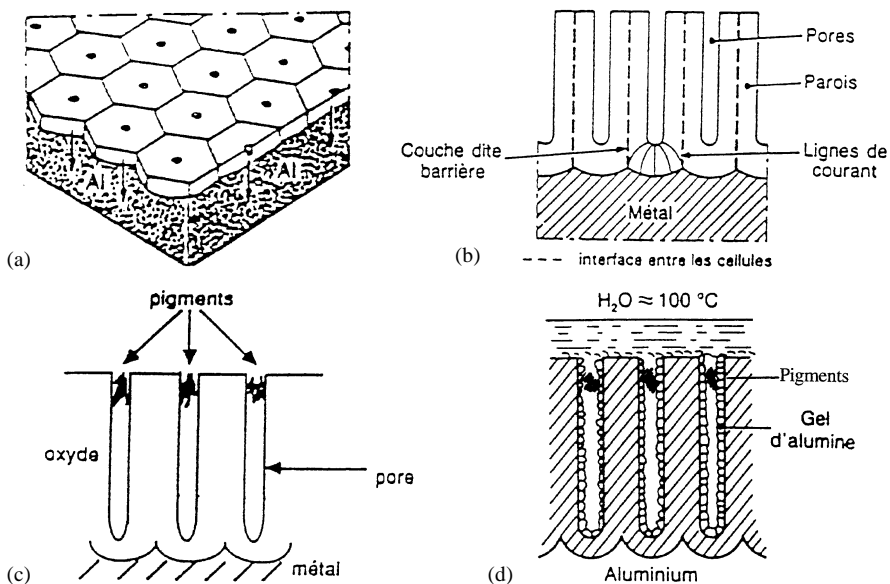


Figure 5 : Schéma de l'anodisation de l'aluminium :

- croissance des cellules hexagonales,
- vue en coupe,
- imprégnation par les pigments,
- colmatage des pores à l'eau bouillante.

Remarques : Pour une utilisation dans le bâtiment, une anodisation en milieu sulfurique est généralement employée. Des colorants divers peuvent être employés et donner des colorations bronze, noire... [3]. Dans le cas d'une utilisation en aéronautique, et en particulier lorsque les tôles sont collées, des anodisations chromiques ou phosphoriques sont réalisées et l'alumine formée n'est pas colmatée afin de permettre à la colle d'entrer dans les pores et ainsi de «s'ancrer» fortement sur la surface métallique.

4. COMPORTEMENT AU CHAUFFAGE À L'AIR

Lors d'un chauffage à l'air, l'épaisseur de la couche d'alumine augmente sensiblement puis, lorsque à 660°C la température de fusion de l'aluminium est atteinte, celui-ci fond. Mais, la présence tout autour de l'alumine qui ne fond qu'à 2040°C, empêche l'aluminium de couler : il est maintenu dans une gaine réfractaire.

Illustration expérimentale

Matériel et produits

- Fil d'aluminium.
- Pince métallique.
- Bec Bunsen.

Risques et précautions particuliers

Aucun sinon l'utilisation d'un bec Bunsen et d'un métal chauffé.

Expérience

Porter une extrémité d'un fil d'aluminium maintenu à l'aide d'une pince métallique dans la flamme d'un bec Bunsen. Dès qu'une température suffisante est atteinte, le fil se plie brusquement à angle droit : l'aluminium qui a fondu ne possède plus les propriétés d'un solide et en particulier il n'a plus de résistance mécanique : il ploie sous son propre poids. Mais il ne coule pas, la gaine d'alumine maintient le métal liquide.

5. COMPORTEMENT DANS DES SOLUTIONS ACIDES OU BASIQUES

5.1. Attaque de l'aluminium par des solutions basiques

Matériel et produits

- Deux tubes à essais.

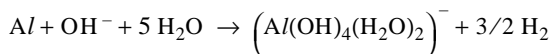
- Une pipette non graduée.
- Aluminium en grenaille.
- Solution aqueuse d'hydroxyde de sodium $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$.
- Allumettes ou briquet.

Risques et précautions particuliers

Utilisation d'une solution de soude.

Expérience

Placer environ 1 g de grenaille d'aluminium dans l'un des tubes à essais. Ne pas utiliser de poudre fine car elle est difficilement mouillée par les solutions aqueuses. Ajouter environ 5 mL de solution de soude. On observe un dégagement gazeux immédiat qui peut être caractérisé à l'aide de la flamme d'une allumette, une légère explosion se produit avec le dioxygène de l'air. L'aluminium est oxydé sous forme d'ion aluminate AlO_2^- hydraté.



Cette réaction a une utilisation pratique très intéressante dans la fabrication du béton cellulaire. Elle peut être utilisée pour illustrer le comportement de l'aluminium en milieu basique [11].

Remarque expérimentale

La formation des ions aluminates ne peut être observée qu'avec des bases fortes suffisamment concentrées. En présence d'une solution aqueuse d'ammoniac concentrée, la concentration en ions OH^- n'est pas suffisante et il se forme un précipité d'hydroxyde d'aluminium.

5.2. Attaque de l'aluminium par des solutions acides

Nous nous proposons de décrire et d'interpréter les phénomènes qui se produisent lors de l'expérience classique d'attaque de l'aluminium par l'acide chlorhydrique.

Matériel et produits

- Trois tubes à essais.
- Un support de tubes à essais placé dans un bac de rétention.

- Aluminium en grenaille.
- Solution aqueuse d'hydroxyde de sodium $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$.
- Acide chlorhydrique 2 mol.L^{-1} .
- Allumettes ou briquet.

Risques et précautions particuliers

Manipulation d'acide chlorhydrique 2 mol.L^{-1} .

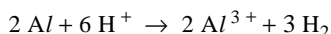
Expérience

Placer environ 1 g de grenaille d'aluminium dans le premier tube à essai. Ajouter environ 5 mL de solution de soude. Sitôt que des bulles gazeuses sont observées, éliminer la solution de soude et rincer abondamment à l'eau du robinet puis à l'eau distillée sans sécher. Placer la grenaille d'aluminium ainsi traitée dans le deuxième tube et de la grenaille non préalablement traitée dans le troisième tube, en présence de quelques gouttes d'eau afin que la grenaille soit en présence, sensiblement de la même quantité d'eau que celle du deuxième tube. Ajouter dans chaque tube, placé dans son support, environ 5 mL d'acide chlorhydrique 2 mol.L^{-1} . Il faut absolument éviter de tenir les tubes dans la main.

Dans le deuxième tube, le dégagement gazeux est immédiat et la présence de dihydrogène peut être mise en évidence par la légère explosion produite, en présence d'une flamme, avec le dioxygène de l'air. Par contre, dans le troisième tube, aucun phénomène observable ne se produit pendant quelques minutes puis, brusquement, une réaction très vive démarre, la solution du tube pouvant déborder. La caractérisation du dégagement de dihydrogène peut être réalisée en début de réaction mais dès que la solution «monte» dans le tube, toute flamme présentée à l'ouverture du tube est soufflée sans explosion.

Interprétation

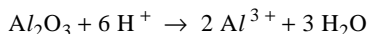
L'aluminium, très réducteur ($E^0 = -1,66 \text{ V}$), est facilement oxydé par les ions H^+ qui eux-mêmes donnent par réduction du dihydrogène :



Mais l'aluminium non préalablement traité n'est pas directement en contact avec la solution acide, l'alumine qui recouvre uniformément le métal joue un rôle de barrière du moins tant qu'elle-même n'est pas attaquée. Dans le paragraphe précédent, lors de

l'étude de l'attaque par une solution basique, nous n'avions pas pris en compte la présence de la couche d'alumine car elle ne perturbait pas l'interprétation des phénomènes observés. Tant que l'aluminium décapé par la soude reste dans l'eau froide, l'alumine qui se forme par oxydation par l'eau, n'est pas protectrice et dès que cet aluminium est mis en présence d'acide, l'oxydation de l'aluminium démarre et le dégagement de dihydrogène se produit.

Par contre, la dissolution de l'alumine présente naturellement à la surface de l'aluminium est beaucoup plus lente dans les solutions acides. Tant que de l'alumine protège l'aluminium il ne se passe aucun phénomène observable, bien que progressivement, l'alumine se dissolve, ce processus se faisant sans dégagement gazeux :



La dissolution des quelques nanomètres d'alumine peut durer plus de cinq minutes. Lorsque le métal est mis à nu, l'oxydation de l'aluminium démarre brutalement et le dégagement de dihydrogène se produit. Il peut être mis en évidence à l'aide d'une flamme. La réaction, très exothermique, élève rapidement la température de l'acide qui entre en ébullition : la solution «monte» dans le tube. Le dihydrogène qui se dégage du tube est alors dilué dans de la vapeur d'eau et du chlorure d'hydrogène, sa combustion, à l'air, ne se produit plus.

Remarques expérimentales

Les réactions observées seront d'autant plus vives et rapides que la concentration de l'acide sera élevée.

L'ajout des quelques gouttes d'eau dans le troisième tube est destiné à montrer que si l'attaque est immédiate dans le deuxième tube cela n'est pas dû à la présence de l'eau qui par dissolution élèverait la température de l'acide.

Après attaque à la soude il est nécessaire de conserver l'aluminium dans de l'eau froide, il se forme à la surface de l'aluminium de l'hydroxyde, la bayérite, $\text{Al}(\text{OH})_3$, peu protecteur. Par contre, si l'aluminium est conservé dans de l'eau chaude, par exemple à l'ébullition, il se forme une couche d'alumine hydratée, la böhmite, $\text{AlO}(\text{OH})$, nettement plus protectrice. C'est d'ailleurs par un traitement dans l'eau bouillante que l'on termine le traitement d'anodisation de l'aluminium (voir paragraphe 3.3.).

Après chauffage à haute température ($> 1200^\circ\text{C}$), l'alumine obtenue, variété α de Al_2O_3 , totalement déshydratée, n'est pas soluble dans les acides et les bases.

6. LES PRINCIPAUX ALLIAGES D'ALUMINIUM : PROPRIÉTÉS ET APPLICATIONS

6.1. Les principaux alliages d'aluminium

Le développement de l'aluminium et sa contribution aux grandes évolutions techniques sont dues à ses propriétés exceptionnelles.

Sa masse volumique de $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ en fait un matériau léger : l'industrie aéronautique lui doit son essor actuel.

Il est excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité : la quasi totalité des câbles pour le transport et la distribution de l'énergie électrique, en France, est en aluminium ou en alliage. De même, la quasi-totalité des échangeurs thermiques automobiles est en alliage d'aluminium.

Grâce à sa couche naturelle d'alumine, il résiste à la corrosion de l'air et de l'eau. Son utilisation dans le bâtiment et en construction navale en apporte la preuve.

Son inertie chimique, son imperméabilité à la lumière et aux gaz en font un métal bien adapté à l'emballage.

L'aluminium forme avec les principaux métaux : cuivre, manganèse, silicium, magnésium, zinc... des alliages qui présentent des propriétés spécifiques aptes à répondre à la plupart des applications. La résistance mécanique est obtenue soit par durcissement par écrouissage, c'est-à-dire par déformation plastique à froid, soit par durcissement structural obtenu par des traitements thermiques de mise en solution, trempe, revenu durcissant.

	Système	Désignation	Phases principales	Résistance mécanique (MPa)
Durcissement par écrouissage	Al	1000	Al	0 à 170
	Al-Mn	3000	Al_6Mn	40 à 250
	Al-Mg	5000	Mg_2Al_3	40 à 330
Durcissement structural	Al-Mg-Si	6000	Mg_2Si	150 à 300
	Al-Cu	2000	Al_2Cu , Al_2CuMg	260 à 440
	Al-Zn-Mg	7000	$MgZn_2$	Sans Cu : 230 à 370
				Avec Cu : 420 à 650

Tableau 1 : Principales familles d'alliages d'aluminium de transformation.

Les alliages avec addition principale de silicium (famille 4000) sont des alliages privilégiés pour les applications en fonderie de moulage.

6.2. Les utilisations de l'aluminium et de ses alliages

Du fait des possibilités d'adaptation, par constitution d'alliages, de ses propriétés aux caractéristiques d'emploi, l'aluminium est présent dans la plupart des marchés industriels et des objets de la vie quotidienne.

Le secteur des transports constitue le premier débouché de l'aluminium en Europe. En aéronautique, les alliages à haute résistance mécanique (familles 2000 et 7000) sous la forme de tôles, profilés et pièces forgées, matricées, constituent aujourd'hui la majeure partie de la cellule des appareils (70 %). Les voitures comptent, en moyenne, 70 kg d'aluminium essentiellement sous forme de produits moulés (carter, culasse, bloc-moteur, jantes...). Les véhicules industriels (citernes, bennes), les transports publics routiers et ferroviaires (autocars, rames de métro, wagons) font largement appel à l'aluminium pour bénéficier d'un allègement conséquent. Les alliages des familles 3000, 5000 et 6000 sont utilisés pour leur résistance mécanique, leur facilité de mise en forme, leur soudabilité et leur résistance à la corrosion. Le développement de l'aluminium en construction navale est fondé sur la mise au point d'alliages avec additions de magnésium (famille 5000), légers, résistants à la corrosion en milieu marin et soudables. Un catamaran en aluminium a battu, en 1991, le record de traversée de la Manche.

Le bâtiment représente le second marché en Europe. Si les plus anciennes menuiseries métalliques sont celles du Rockefeller Center et de l'Empire State Building à New York, chaque année en France, environ le tiers des fenêtres fabriquées sont en aluminium. Les alliages de la famille 6000 aptes à la réalisation de profilés complexes à faible coût de transformation sont les plus utilisés. Sous forme de tôles, les alliages d'aluminium (familles 3000 et 5000) se retrouvent en bardages et couverture. Les produits en aluminium peuvent être colorés par anodisation ou par laquage.

L'emballage constitue le premier marché de l'aluminium en Amérique du Nord : il représente 21 % de la consommation d'aluminium en Europe et plus de 35 % en Amérique du Nord (consommation de trois cent soixante-dix-neuf boîtes-boisson par habitant et par an aux États-Unis contre vingt-cinq en France). L'aluminium (familles 1000, 3000, 5000 et 8000) est utilisé dans l'emballage souple sous forme de feuille mince utilisée seule (emballage ménager) ou en association avec d'autres matériaux (opercules de yaourt, conditionnement de biscuits, briques pour jus de fruits...) et dans l'emballage rigide : boîtiers pour aérosols, boîtes pour appertisés (conserves) et surtout boîtes-boisson qui constituent le débouché majeur de l'aluminium. Cent soixante

milliards de boîtes-boisson sont produits annuellement dans le monde ; la quasi-totalité de ces boîtes aux États-Unis et la moitié environ en Europe sont en aluminium. La compétitivité de l'utilisation de l'aluminium dans ce segment de marché est confortée par une recherche d'allègement constant de la boîte (de 30 g d'aluminium par boîte en 1970 à 12 g en 1995).

L'aluminium se retrouve également dans notre vie quotidienne, en compétition avec divers autres matériaux : soit à la maison (ustensiles de cuisine, appareils électroménagers, radiateurs...) soit dans nos loisirs (camping, ski, tennis, golf, cyclisme...).

7. LE RECYCLAGE DE L'ALUMINIUM

Sa température peu élevée (660°C) de fusion, fait que l'énergie nécessaire à la production de 1 tonne d'aluminium recyclé n'est que de 650 à 750 kWh (contre 13 000 kWh pour 1 tonne d'aluminium primaire).

La valeur contenue dans les déchets et la facilité de refusion font que l'aluminium recyclé constitue une seconde source très importante : en France, 30 % des besoins en aluminium sont couverts par ce canal. Les alliages de deuxième fusion, dits «d'affinage» sont principalement utilisés en fonderie de moulage pour le marché automobile, dont ils assurent les deux tiers des besoins (blocs-moteurs, culasses, carters...).

L'aluminium contenu dans les emballages usagés et, en particulier, les boîtes-boisson, fait l'objet d'une valorisation importante aux États-Unis. Dans ce pays, en 1995, 63 milliards de boîtes ont été recyclées, pour une consommation de 101 milliards. On estime qu'une boîte est, en moyenne, recyclée quatre fois par an.

En France la valorisation des emballages est en train de se mettre en place par le canal de France Aluminium Recyclage. Actuellement, les emballages en aluminium ne représentent que 1,5 % de la masse des emballages ménagers usagers contre 52 % pour le verre, 17 % pour les plastiques, 11 % pour l'acier. Une récupération automatique des emballages d'aluminium peut être réalisée à l'aide de courants de Foucault comme cela est le cas à Lille, Montpellier et Lons-le-Saunier.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier pour leur aide, les techniciens du département de chimie de l'ENS de Cachan.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.-L. VIGNES, G. ANDRÉ et F. KAPALA : «*Données industrielles, économiques, géographiques sur des produits chimiques (minéraux et organiques), métaux et matériaux*», sixième édition, 1994, Union des Physiciens et Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie : Économie et Industrie - EXC-1 - ENS de Cachan.
- [2] «*Regards sur une industrie : l'aluminium*», Chambre Syndicale de l'Aluminium - 30, avenue de Messine - 75008 PARIS.
- [3] A. BENARD, A. MICHEL, J. PHILIBERT et J. TALBOT : «*Métallurgie générale*», deuxième édition, Masson, 1991.
- [4] J. WALKER : «*Expériences d'amateur*», Pour la Science, octobre 1986, p. 112.
- [5] V. FENEUIL, M. PAGIS et P. PAGIS : «*Trente-et-une expériences de chimie*», Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie : Économie et Industrie - EXC-1 - ENS de Cachan, 1987, p. 47.
- [6] A. GUINIER : «*La structure de la matière*», Hachette-CNRS, 1980.
- [7] A. GUINIER et R. JULLIEN : «*La matière à l'état solide*», Hachette-CNRS, 1987.
- [8] J. SARRAZIN et M. VERDAGUER : «*L'oxydoréduction*», Ellipses, 1991.
- [9] M. CHÂTELET et R. GUIHAUME : «*Chimie expérimentale*», Armand Colin, 1972.
- [10] Rapporté par Gérard MAJAX au cours d'une émission de télévision, le 9 mai 1989 sur France 2.
- [11] J.-L. VIGNES, M. MORANVILLE et J.-P. BOURNAZEL : «*Une vie de ciment*», B.U.P. n° 780, janvier 1996.