

adal

VADE-MECUM ANODISATION



ACCREDITATION
N° 5-008/97
PORTEE
COMMUNIQUEE
SUR DEMANDE

Association déclarée de la loi du 1^{er} juillet 1901
17 rue Hamelin – 75783 PARIS Cedex 16
Tél. : +33 1 42 25 26 44 – Fax : +33 1 53 75 02 13
Site Internet : www.adal.asso.fr – e-mail : adal@adal.asso.fr



SOMMAIRE

1. Aluminium - Caractéristiques et propriétés
2. Traitements mécaniques
3. Accrochage
4. Dégraissage
5. Décapage et satinage
6. Neutralisation
7. Anodisation en acide sulfurique
8. Electrocoloration
9. Colorations par absorption
10. Nouvelles colorations
11. Colmatage
12. Schéma d'une installation d'anodisation
13. L'eau dans les installations d'anodisation
14. L'épuration des eaux de rejet et des vapeurs
15. Consommation énergétique d'une installation d'anodisation
16. Directives QUALANOD
17. Annexes

Chapitre 1

Aluminium et oxyde : Caractéristiques et propriétés

Aluminium et oxyde

Caractéristiques et propriétés

Propriétés physiques de l'aluminium

L'aluminium est l'un des métaux les plus répandus sur la surface de la terre : plus que le fer et le cuivre qui sont réputés être les métaux les plus communs.

Bien que cet élément ait une grande diffusion (plus de 7% des composants de la lithosphère), à cause de sa forte réactivité, surtout avec l'oxygène, il est présent d'une façon trop dispersée et jamais à l'état élémentaire. Le seul minéral à partir duquel il est aujourd'hui rentable d'extraire de l'aluminium métallique est la BAUXITE, un oxyde d'aluminium hydraté ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), qui est normalement joint à des oxydes de fer et de titane.

Le métal s'obtient par électrolyse à l'état de fusion de son oxyde Al_2O_3 , appelé ALUMINE.

L'aluminium appartient à la famille des métaux légers. Son poids atomique est égal à 27 u.m.a.

L'aluminium a une grande conductibilité électrique, inférieure uniquement à celle de l'argent et du cuivre. Cette propriété en permet l'usage comme conducteur de courant pour différentes applications. Pour faire une comparaison avec d'autres métaux, en admettant que le titane a une valeur de conductibilité égale à 1, nous obtenons les valeurs approximatives suivantes :

Métal	Conductibilité électrique
Titane	1
Or	2,4
Plomb	2,5
Etain	3,8
Inox 316	4
Platine	5
Aluminium	19
Cuivre	32
Argent	33

D'un point de vue alimentaire, l'aluminium est un métal non toxique. En effet, il est présent en concentration non négligeable dans beaucoup de légumes et d'autres éléments (oignons, épinards, viande, oeufs, etc...).

L'aluminium trouve une place importante dans la formulation de certains médicaments (anti-acides pour l'estomac) et il est devenu d'usage courant pour la fabrication de récipients divers et utilisé couramment sous forme de papier pour la conservation d'aliments.

Sa faible densité (2,7) permet à ce métal d'être le plus léger de la métallurgie à grande consommation (densité de l'acier : 7,8) : on peut, ainsi, fabriquer en atelier des éléments de grandes dimensions pouvant être manutentionnés et mis en place sans moyen de levage important.

Son pouvoir réflecteur à l'état brut est faible, il devient fortement amélioré après polissage et anodisation.

	Aluminium	Acier	Inox 18/8	Cuivre
Masse volumique g/cm ³	2,7	7,8	7,9	8,9
Température de fusion °C	658	1 450	1 424	1 083
Coefficient de dilatation x 10 ⁻⁶	24	12	17	16,5
Chaleur spécifique J.kg.°K	960	420	500	376
Conductivité thermique W/m.°K	220	46	16	385
Résistivité électrique μΩ cm	2,75	11	70	1,7
Charge de rupture MPa	100	420	630	235
Limite de proportionnalité MPa	40	265	280	70
Allongement %	40	40	55	45
Dureté Brinell HB	20	120		50
Module d'élasticité MPa	70 000	210 000	200 000	120 000

Propriétés chimiques de l'aluminium

L'aluminium est un métal de couleur argent qui a la remarquable caractéristique, s'il est convenablement traité, de transformer sa surface en une couche d'oxyde d'aluminium poreux, transparente, non friable comme le fer (rouille), mais dure, compacte, colorable, et presque inerte aux agents atmosphériques.

Cette transformation superficielle de l'aluminium par voie électro-chimique prend le nom de ANODISATION après que le matériau ait été relié à l'anode ou pôle positif d'un système électro-chimique adéquat.

Il ne faut pas comparer l'anodisation de l'aluminium avec d'autres traitements de surface comme le laquage, le chromage, le nickelage, etc... En effet, tous ces traitements sont caractérisés par un apport de matériaux différents sur le matériau de base, tandis que l'anodisation est une réelle modification superficielle du métal.

On a l'habitude de dire que, tandis que les autres traitements de surface sont un gant sur le métal, l'anodisation est une nouvelle peau du métal qui met ainsi en valeur les caractéristiques principales d'adhérence et de compacité entre la couche superficielle et le métal sous-jacent.

La couche d'oxyde sur aluminium a de très bonnes caractéristiques de résistance à la corrosion.

Les alliages d'aluminium

Les éléments d'addition et, en particulier, les éléments d'addition non ferreux, jouent un rôle primordial dans la métallurgie de l'aluminium, et l'on peut même affirmer que, sans eux, l'aluminium n'aurait jamais eu les nombreuses applications actuelles qui couvrent les domaines les plus variés et les plus étendus.

L'importance de ces éléments d'addition peut être illustrée par l'exemple suivant concernant les niveaux de résistance mécanique : alors que l'aluminium non allié présente une limite élastique comprise entre 30 et 140 MPa et une charge de rupture comprise entre 70 et 150 MPa, suivant qu'il a été plus ou moins durci par écrouissage, l'aluminium, renforcé de façon judicieuse par certains métaux, est susceptible de présenter une limite élastique pouvant aller jusqu'à 600-650 MPa et une charge de rupture pouvant atteindre 650-700 MPa, voire 750 MPa, soit des valeurs 5 à 10 fois plus élevées que celles de l'aluminium non allié.

Les éléments d'addition ajoutés en faible quantité pour ne pas augmenter la densité sont :

- le magnésium,
- le silicium,
- le zinc,
- le cuivre,
- le manganèse...

Les principaux alliages utilisés dans le secteur du bâtiment et en architecture sont des alliages du type Al-Mg, Al-Mg-Mn et Al-Si-Mg.

Ces alliages, outre le fait d'avoir une fourchette bien définie de chacun des composants, font l'objet de traitements particuliers dans le but d'améliorer leur aptitude à l'anodisation :

- répartition uniforme des composants dans l'alliage,
- absence d'inclusions et de porosité,
- absence de défauts de surface.

La couche que l'on obtient sur de l'aluminium très pur est incolore, très dure et transparente.

La présence des liants et des impuretés joue un rôle différent sur les caractéristiques de la couche d'oxyde en fonction du cycle thermique auquel l'alliage est soumis.

Ils peuvent être en solution solide dans le métal de base ou bien sous forme de séparations hétérogènes.

Dans le premier cas, les liants passent dans le bain pendant l'oxydation et n'affectent pas la transparence de la pellicule d'oxyde, mais ils peuvent provoquer une importante porosité et, donc, rendre la couche d'oxyde moins dure.

Les séparations hétérogènes des composants de l'alliage ou des impuretés peuvent, pendant l'oxydation, rester inaltérées, s'oxyder en partie ou en totalité, ou bien passer complètement en solution. Dans chaque cas, elles nuisent à l'homogénéité de la couche d'oxyde.

Suivant le degré de dispersion et la quantité, l'opacité peut être légère ou intense.

Les pourcentages maximum des différents éléments d'addition ou d'impuretés tolérés pour l'anodisation sont :

- fer	0,5%
- silicium	4 - 5%
- cuivre	2 %
- manganèse	0,5 - 0,8%
- magnésium	7 %
- zinc	6 - 8%
- chrome	0,3%
- titane	0,3%

Des pourcentages trop élevés de ces éléments peuvent donner les défauts suivants sur l'aluminium anodisé :

fer

C'est l'impureté principale, sous forme de séparation hétérogène, qui provoque, même en petites quantités, une diminution de la brillance dans les alliages de grande pureté. Des ajouts de fer dans un aluminium à 99,99 %, par exemple, provoquent la formation d'un oxyde gris foncé ou à bandes noires. Ceci peut également se passer dans d'autres alliages lorsque le rapport fer/silicium est très élevé, par exemple de l'ordre de 7/1.

silicium

Cet élément provoque une opacité laiteuse quand il n'est pas en solution solide mais quand il reste dispersé à environ 0,8%. Le silicium a un effet bénéfique lorsque le fer est présent comme impureté. Dans les alliages aluminium-magnésium, le silicium passe en solution plus facilement. Pour des valeurs de 5 % l'oxyde obtenu est gris foncé ou noir. Il est à noter des difficultés d'anodisation sur les pièces de fonderie.

cuivre

Jusqu'à des valeurs de 2%, les couches que l'on obtient avec des alliages traités sous certains paramètres sont transparentes. Des valeurs plus élevées donnent un oxyde moins transparent : l'oxydation devient plus difficile et la couche résultante est plus tendre avec une efficacité de protection inférieure.

manganèse

Jusqu'à des valeurs de 1 %, la couche d'oxyde reste transparente ou bien grise, marron ou marbrée, suivant l'historique métallurgique et les dimensions des particules. Avec des épaisseurs importantes d'oxyde, une concentration de 0,3-0,5% peut provoquer une coloration marron sur tous les alliages qui contiennent cet élément d'addition.

magnésium

Le magnésium est l'élément le plus approprié pour l'anodisation. Jusqu'à des valeurs de 3%, il peut donner une couche d'oxyde claire et transparente. Cela est probablement dû au fait que le magnésium a un indice de réfraction (1,736) très proche de celui de l'oxyde d'aluminium (1,69).

zinc

Jusqu'à des valeurs de 5%, on peut avoir une couche d'oxyde protectrice qui peut être transparente lorsque le zinc est en solution ou bien marron s'il est sous forme hétérogène.

chrome

Une valeur de 0,3% donne une coloration jaune à la couche d'oxyde.

titane

Il a une influence négative sur la brillance de la même façon que le fer.

Voir, en annexe :

- les tableaux récapitulatifs des principaux alliages corroyés et de fonderie,
- la symbolisation et la désignation conventionnelles de l'aluminium et de ses alliages.

Propriétés de l'oxyde

Les propriétés de la couche d'oxyde peuvent varier beaucoup suivant les conditions opératoires de l'électrolyse et des autres paramètres qui interviennent dans la formation de la couche d'oxyde.

Propriétés physiques

- Poids spécifique : 4
- Densité apparente : de 2,8 à 3,2 suivant la porosité.
- Porosité :

Elle varie de 20 à 30 % suivant les conditions d'oxydation. Elle diminue lorsque la tension augmente. Les couches obtenues en courant alternatif sont plus poreuses que celles obtenues en courant continu.

- Allongement :

L'allongement mesuré jusqu'à l'apparition de la première crique varie avec le métal et les conditions d'électrolyse. En moyenne, il est de 0,3 à 0,4 % pour les couches obtenues en acide sulfurique ou oxalique.

- Dureté :

Elle est celle de l'alumine, c'est -à- dire 7 à 8 de l'échelle de Mohs, ou bien de 500 Brinells suivant la nature du métal et le procédé d'anodisation utilisé.

- Module d'élasticité : $E = 5000 \text{ Kg} / \text{mm}^2$.

Propriétés thermiques

- Point de fusion :
2000 °C au lieu de 658 °C pour l'aluminium. L'alumine monohydratée perd son eau de cristallisation à environ 350 °C.
- Coefficient de dilatation linéaire :
 5×10^{-6} °C au lieu de 23×10^{-6} °C de l'aluminium.
- Conductibilité thermique :
21 à 63 W/m.°C entre 0 et 60°C au lieu de 220 W/m.°C pour l'aluminium.
- Pouvoir d'émission :
de 1,8 à 4 cal/m².h.°K suivant l'épaisseur de l'oxyde, au lieu de 0,2 à 0,3 cal/m².h.°K de l'aluminium poli et de 4,9 cal/ m².h.°K d'un corps noir.

Propriétés électriques

- Constance électrique : 8
- Résistivité :
pour une couche non hydratée de 50 microns d'épaisseur :
 - 4×10^{15} ohms.cm²/m à 20 °C.
 - 8×10^{15} ohms. cm²/m à 100 °C.
- Tension de claquage :
de 20 à 40 volts/micron suivant le procédé utilisé.



Chapitre 2

Traitements mécaniques

Traitements mécaniques

L'aspect visuel de l'aluminium anodisé pour l'utilisation bâtiment est défini sur la base de la norme ISO 7599 (AFNOR 91450) "Spécifications générales pour couches anodiques sur aluminium".

On distingue 4 aspects visuels :

- aluminium anodisé industriel n'ayant subi aucun pré-traitement de surface de type mécanique ou chimique,
- aluminium anodisé ayant subi un pré-traitement de polissage,
- aluminium anodisé ayant subi un pré-traitement de brossage mécanique,
- aluminium anodisé ayant subi un pré-traitement de satinage chimique.

Les traitements mécaniques préliminaires ont pour but d'éliminer d'éventuels défauts physiques superficiels dus à différentes causes (lignes de filage, transport, manutention).

Ce "polissage mécanique" peut être effectué par différents types de machines :

- a) polisseuse ou meuleuse manuelle,
- b) polisseuse semi-automatique à tables,
- c) polisseuse semi-automatique à transfert.

Toutes ces machines ont comme principe de fonctionnement le "frottement" de la surface de l'aluminium par des disques, bandes ou brosses circulaires.

Suivant le type d'aspect que l'on souhaite obtenir, on emploie des roues avec des disques en feutre, en toile de coton, en sisal aérés, à fibres végétales, Mils métalliques, à polymères organiques avec abrasifs incorporés (Scotch-Brite).

A - Les polisseuses manuelles

Les polisseuses manuelles appelées communément "tourets", sont utilisées surtout pour des petites pièces, des profils coupés en morceaux très courts et pour des pièces ayant des formes spéciales non adaptées aux polisseuses semi-automatiques.

L'approvisionnement de l'abrasif sur les disques sous forme de liquide ou de pâte en pain peut se faire manuellement ou par des distributeurs automatiques. Suivant le type de pâte utilisé, on obtient des résultats différents.

B - Les machines à polir à tables

Les machines à polir à tables fonctionnent en disposant les profilés d'aluminium à polir, alignés sur des tables prévues à cet effet, sur lesquelles les disques ou les brosses en rotation ont un mouvement de va-et-vient. Ces machines sont spécialement conçues pour des produits extrudés en longueur entière et pour des quantités importantes de matériels standardisés.

L'approvisionnement de la pâte abrasive se fait automatiquement. Le type de finition que l'on obtient est fonction du type de disque employé, de sa vitesse de rotation et de la pression que le disque tournant exerce sur l'aluminium. Avec des disques en Scotch-Brite, il est conseillé d'exercer une pression plus faible sur l'aluminium pour avoir un polissage plus régulier et une durée de vie des brosses plus importante.

Pour ce qui est de la vitesse de rotation des disques ou des brosses, elle dépend du diamètre des disques. Comme celui-ci varie dans le temps en se réduisant au fur et à mesure que le matériau se consomme, il n'est pas très correct de parler de tour/mn. Il est plus raisonnable de parler de vitesse périphérique en m/s : qui varie

normalement de 15 à 30 m/s. Il est préférable d'effectuer les opérations avec humidification.

C - Les machines à polir à transfert

Les machines à polir à transfert ont comme principe, l'insertion des profilés à polir à l'intérieur d'une série de brosses qui tournent face à face ou l'une sur l'autre. Le profilé voyage horizontalement, entraîné par les brosses et par des rouleaux d'entraînement. A la fin du traitement, il sort du côté opposé de la machine. Ces machines de transfert ont eu un très grand succès auprès de beaucoup d'anodiseurs depuis une décennie. En effet, elles ont certains avantages désormais confirmés par l'usage, qui sont les suivants :

- utilisation de brosses (normalement en acier) de très longue durée.
- lubrification par eau (absence d'huile et pâtes) avec réduction des problèmes de dégraissage (c'est-à-dire réduction des problèmes de pollution).
- grande productivité horaire (0,8 à 1 tonne).
- utilisation possible pour du matériel coupé (au-dessus de 50 cm de longueur environ).
- aspect superficiel facilement accepté.
- économie relative par rapport aux machines à tables que ce soit en prix d'achat ou en coût exploitation.



Chapitre 3

Accrochage

Accrochage

Le procédé d'oxydation anodique de l'aluminium consiste à faire passer un courant électrique adapté à travers le matériel à traiter.

Il en découle que ce dernier doit être étroitement lié à la barre anodique par des conducteurs de courant appropriés. Nous appelons soutiens ou descentes ces matériels qui ont une fonction de support et de contact entre les pièces à anodiser et la barre anodique.

Ces descentes sont normalement réalisées en alliage d'aluminium du fait de la très bonne conductibilité électrique du métal, de son aptitude à être facilement usiné, de sa légèreté et de son affinité avec les pièces à anodiser (très importante dans le cas de l'électrocoloration). On en utilise de toutes les formes suivant le type de matériel à traiter. Elles peuvent être à section rectangulaire, carrée, circulaire, pentagonale régulière ou à côtés inégaux, à râteaux, etc...

Les caractéristiques principales d'une bonne descente sont les suivantes :

- aptitude à rester étroitement uni d'un côté, à la barre anodique, de l'autre aux pièces à oxyder, pendant tout le cycle de traitement.
- aptitude à permettre le passage de la quantité de courant électrique nécessaire à toutes les pièces fixées (section utile).
- réaliser le contact avec les pièces si possible, par des points ou des arêtes, plutôt que par des surfaces planes (pour avoir un rendement plus élevé en passage de courant).

Liaison support - barre anodique

Elle se fait normalement au moyen de serre-joints en métal ou en acier, munis d'une vis ou d'une came excentrique ou d'autre autre type de serrage mécanique. Les supports, dans leur partie supérieure, peuvent être droits ou repliés pour pouvoir s'appuyer sur la barre anodique (qui a généralement une section en forme de "H"). La longueur des supports doit leur permettre d'arriver, une fois fixés sur la barre anodique, à 15 - 20 cm du fond des cuves de traitement.

Les supports en aluminium s'oxydent, eux aussi, avec les pièces à traiter et doivent être désoxydés par décapage après chaque cycle de travail. Cette désoxydation des supports est absolument indispensable parce que l'oxyde qui se forme est un isolant électrique et, comme tel, empêcherait, s'il n'est pas enlevé, leur réutilisation comme conducteur électrique dans le cycle de travail suivant. Ce décapage doit être approfondi même s'il cause inévitablement une usure progressive des descentes jusqu'à un amincissement les rendant inutilisables aussi bien en tant que supports physiques que conducteurs électriques.

Le nombre de cycles qu'un outillage peut supporter ne peut pas être prévu parce que les variables concernées sont trop nombreuses (type d'alliage, traitement thermique, temps d'oxydation, type de décapage, température, etc...).

Il est de toute façon conseillé, pour avoir de bons résultats en oxydation, de ne pas jouer l'économie en réduisant trop le nombre de supports par barre anodique et surtout leur section. La circulation du courant électrique pendant l'anodisation peut s'assimiler à la circulation du sang dans le corps humain. Elle ne doit pas rencontrer d'interruption et encore moins de goulots d'étranglement. Les supports sont les artères qui amènent le sang (courant électrique) aux différents organes (différentes pièces du chargement). Une bonne "circulation" est fondamentale pour la bonne santé, pour l'uniformité de la couche d'oxyde que l'on veut obtenir.

Normalement on conseille, pour les supports, une section de 0,5 mm²/A de courant passant dans le bain. Nous pensons qu'il est plus opportun, compte tenu de l'expérience et des ampérages toujours plus élevés employés aujourd'hui, d'adopter des sections de 1 mm²/A. Parce que la section utile va au fur et à mesure s'amenuisant après chaque cycle de travail, il est bon de démarrer avec des dimensions légèrement supérieures. En utilisant des supports de section insuffisante, on provoque une réduction du rendement en courant, une surchauffe des pièces et une formation de couche d'oxyde plus réduite.

Liaison support - pièces à anodiser

C'est cette partie qui est plus spécifiquement appelée "accrochage". Les méthodes et les matériaux utilisés sont très nombreux. Avec des supports à rateaux, on peut accrocher différents types de profilés ouverts simplement par torsion et des profilés fermés par flexion contrastée; tout cela sans besoin d'autre matériel ou d'autre équipement pour le blocage. Les matériaux les plus répandus pour l'accrochage sont les suivants :

- fils en aluminium APS, diam. 2 à 4 mm, écrous type H 30 pour utilisation universelle. Ils ont le désavantage de ne pouvoir être employés que pour un seul cycle.
- pinces en plastique résistant aux acides, aux bases et aux températures élevées.
- anneaux en rond d'aluminium en alliage spécial, diamètre 8 à 10 mm. On peut s'en servir pour plusieurs cycles de travail (quelques dizaines).
- serre-joints en plastique thermo-résistants, avec âme métallique.

- embouts en forme de L ou Y pour profilés de grandes dimensions (socles, ridelles de camion, etc...).

Pour des pièces de petites dimensions et pour lesquelles on ne demande pas d'épaisseur de couche importante, on peut utiliser des supports et des crochets en titane (sauf si les pièces doivent être électrocolorées). Ce métal a le grand avantage de ne pas s'oxyder superficiellement et donc de ne pas devoir être décapé entre chaque cycle. Il reste presque inaltéré pendant très longtemps, mais à côté de cet aspect positif, son emploi est limité par les restrictions suivantes :

- mauvaise conductivité électrique (environ 20 fois inférieure à celle de l'aluminium), et donc nécessité d'avoir des sections utiles beaucoup plus importantes et économiquement inintéressantes pour des valeurs de courant élevées.
- prix très élevé.
- inaptitude à produire de l'aluminium électrocoloré après oxydation. En effet, le titane, du moment qu'il ne s'oxyde pas superficiellement, provoque des zones plus claires (il vole la couleur) autour des endroits où il y a contact avec l'aluminium. Ces défauts en déconseillent complètement l'utilisation pour ce type de traitement.



Chapitre 4

Dégraissage

Dégraissage

Le but de ce traitement est d'éliminer de la surface de l'aluminium toutes traces de substances organiques, huiles, produits gras, pâtes qui sont dues au pré-traitement mécanique de polissage et aux différentes manipulations que le matériau a subi auparavant (emballage, déchargement, accrochage, etc...). Il est d'importance capitale que l'aluminium arrivé à la phase d'oxydation avec une surface très propre pour éviter des lignages, des tâches et d'autres réactions au traitement électrochimique qui augmenteraient le nombre des rebuts de production.

Types de Dégraissage

Les principaux types de dégraissage sont les suivants :

- 1) Dégraissage alcalin.
- 2) Dégraissage acide.

1. Le dégraissage alcalin

C'est la méthode la plus utilisée pour l'aluminium employé dans le bâtiment.

Les spécifications auxquelles une bonne solution de dégraissant doit satisfaire, sont les suivantes :

- bien mouiller la pièce pour entrer en contact avec la salissure.
- dissoudre la salissure (par émulsion et saponification).
- détacher la salissure grasse de la pièce et la mettre en solution.

- être active mais ne pas attaquer l'aluminium.
- éliminer la dureté de l'eau (sels de Ca, Mg) pour accroître l'action du dégraissage.

Il est évident que toutes ces fonctions ne peuvent être accomplies par un seul produit et donc les dégraissants sont généralement un mélange de produits chimiques, dont chacun a un rôle bien défini dans ce traitement. Nous allons répertorier quelques catégories de produits chimiques entrant dans la formulation des dégraissants, en y joignant leurs caractéristiques.

Soude caustique : Très bon saponifiant des matières grasses, forte agressivité chimique sur l'aluminium. Pouvoirs mouillant et détergent limités.

Carbonate de soude : Moins agressif que la soude caustique. Bon adoucisseur de l'eau.

Phosphates : Bons adoucisseurs et séquestrants pour le calcium et le magnésium se trouvant dans l'eau. Certains sont de très bons dégraissants et des tensio-actifs efficaces. Bons tampons.

Savons et détergents synthétiques : Ils se comportent en tensio-actifs, c'est-à-dire qu'ils baissent la tension superficielle sur la pièce et en facilitent le mouillage. Ils ne doivent pas créer trop de mousse pour ne pas causer des tâches sur les pièces. Les détergents peuvent être cationiques, anioniques ou non ioniques (anioniques : ex.= Alkylsulfonates ; non-ioniques: ex. = teepol). Les plus utilisés sont les anioniques et les non-ioniques. Ces derniers ont l'avantage de ne pas ressentir l'acidité ou la basicité de la solution.

Silicates de sodium : Ces produits sont de bons tampons pour le Ph ; ils ont un fort pouvoir émulsionnant vis-à-vis des matières grasses et sont d'excellents inhibiteurs. Attention cependant de ne pas les entraîner dans les bains d'anodisation, il faut bien les éliminer par différents rinçages et, en particulier, on peut immerger les pièces dans le bain de blanchiment à l'acide nitrique après dégraissage et avant anodisation.

Borates, Gluconates, Ethanolamines : Ils augmentent l'efficacité du dégraissage, en réduisent les temps, et sont des inhibiteurs d'attaque du métal. Ils ont une forte action complexante et séquestrante.

Conditions d'utilisation

L'aluminium doit être immergé dans une cuve à une température de 45 à 65 °C. Le pH de la solution est compris entre 9 et 11. Le temps de traitement est fonction du degré de pollution en substances grasses ou en huile sur le métal : il varie de 2 à 15 mn.

L'introduction du polissage mécanique avec brosse en acier lubrifiée à l'eau a amené, pour ce type de finition, l'avantage de la disparition des pâtes de polissage en simplifiant ainsi le dégraissage (qui peut être fait à des températures inférieures).

2. Le dégraissage acide

La mise au point plus récente de ces bains a permis de réaliser de substantielles économies d'énergie.

Ce type de bain s'utilise à température ambiante (15 à 25 °C) sur des pièces destinées à subir un traitement de satinage, ce qui est le cas le plus couramment rencontré dans les ateliers travaillant sur des profilés destinés au "bâtiment".

Il est nécessaire d'utiliser des cuves résistant aux produits acides, acier inoxydable ou P.V.C

L'action de nettoyage est double :

- a) Elimination des corps gras par émulsion à l'aide de tensioactifs appropriés.

b)Élimination de la couche d'oxyde naturelle, garantissant ainsi l'élimination de toutes les particules étrangères au métal, poussières diverses, graphites, etc... par la base acide de type phosphorique utilisée.

L'utilisation à basse température permet un "égouttage" maximum des pièces dégraissées, limitant les pertes par entraînement et consécutivement la pollution des rinçages.

Les conditions d'utilisation de ces bains sont généralement les suivantes :

- Concentration : 3 à 6 % en volume.
- Température : 15 à 25 °C.
- Temps d'immersion : 5 à 15 mn.

Une légère agitation du bain par air comprimé ou surpressé est nécessaire.

Contrôle chimique

Dégraissage Alcalin

Prélever 5 ml de bain, titrer par de l'acide chlorhydrique (HCl) N/2 en présence de méthylorange. Au virage de l'indicateur du jaune au rose, relever le volume d'HCl versé. Soit A le nombre de ml d'HCl N/2 versés.

La concentration en dégraissant en g/l = $A \times F$

où F est le facteur de titration indiqué par le fournisseur.

Dégraissage acide

Prélever 50 ml de bain, titrer par de la soude (NaOH) N/2 en présence de méthylorange. Au virage de l'indicateur, relever le volume de NaOH versé. Soit A le nombre de ml de NaOH N/2 versés.

La concentration en dégraissant en g/l = $A \times F$

où F est le facteur de titration indiqué par le fournisseur.

La fréquence conseillée pour les contrôles chimiques est une fois par semaine.



Chapitre 5

Décapage et satinage

Décapage et satinage

Nous avons choisi d'examiner dans une seule fiche ces deux traitements, pour les raisons suivantes :

- la composition des bains est similaire.
- les contrôles chimiques sont les mêmes.
- dans quelques installations moins bien équipées, les deux traitements sont effectués dans la même cuve.

Nous allons faire une description séparée des deux procédés.

Décapage alcalin

Le but principal du décapage alcalin est de désoxyder (enlever la couche d'oxyde) les supports des pièces en aluminium, le matériel servant à l'accrochage (anneaux embouts, etc..), et aussi des chargements complets de pièces aluminium inacceptables et devant être soumis à un nouveau cycle de traitement. Il est très important que la désoxydation se fasse de la façon la plus complète possible parce que l'éventuelle couche d'oxyde restante étant diélectrique (électriquement isolante), empêcherait un bon passage du courant pendant l'anodisation. Le décapage se fait généralement dans une cuve en acier dans laquelle se trouve une solution de soude caustique (NaOH) concentrée entre 40 et 70 g/l (généralement 50 g/l). La température est comprise entre la température ambiante et 70 °C.

Dans ces conditions, l'aluminium en surface est dissous et passe en solution en se transformant en aluminate de sodium.

La réaction entre l'aluminium et la soude caustique est fortement exothermique.

Si la concentration de soude caustique descend en dessous de 20 g/l ou si le taux d'aluminium en solution monte au-dessus de certaines valeurs (environ 40 g/l), l'aluminate de sodium se décompose et précipite sous forme d'hydroxyde d'aluminium.

Un kilogramme d'aluminium correspond à environ 3 kgs d'hydroxyde d'aluminium. Ce précipité génère d'abord des floccs, mais ceux-ci, se déposant sur les serpentins, durcissent très vite à cause d'une déshydratation partielle due à la haute température, jusqu'à devenir avec le temps une vraie pierre sur le fond de la cuve et sur les serpentins de chauffage.

Ceci provoque de graves inconvénients parmi lesquels :

- réduction de l'échange thermique entre les serpentins et la solution ; les incrustations qui se sont déposées sont mauvaises conductrices de chaleur.
- difficultés pour éliminer les incrustations du fond de la cuve, après transvasement du bain. (On doit souvent avoir recours au marteau pneumatique).

Pour empêcher la formation d'incrustations dures on ajoute à la solution de soude caustique des produits (gluconate de sodium) en concentration de quelques grammes/litre. Ces produits ont la fonction de maintenir en solution l'aluminate de sodium et donc d'empêcher le précipité d'hydroxyde d'aluminium.

Il ne faut pas excéder dans l'ajout des produits empêchant la formation d'incrustations dures parce que leur présence a aussi un côté négatif: ils diminuent l'agressivité de la soude caustique par rapport à l'aluminium et rallongent donc le temps de décapage.

Il est conseillé de maintenir la cuve de décapage en condition telle que les temps de désoxydation soient réduits au minimum puisqu'ils représentent une phase "passive" du cycle de travail.

Il faut rappeler qu'un décapage trop poussé a les désavantages suivants :

- plus grande consommation de produits chimiques.
- plus forte érosion des supports, d'où une réduction du nombre de cycles de travail qu'ils pourront effectuer.
- durée de vie du bain de décapage inférieure à cause d'une pollution très importante en aluminium dissous.

Un décapage trop lent nécessite un nombre de supports plus important et une plus grande quantité de matériels d'accrochage pour satisfaire le cycle de production.

Satinage chimique

Le but essentiel du traitement de satinage est esthétique :

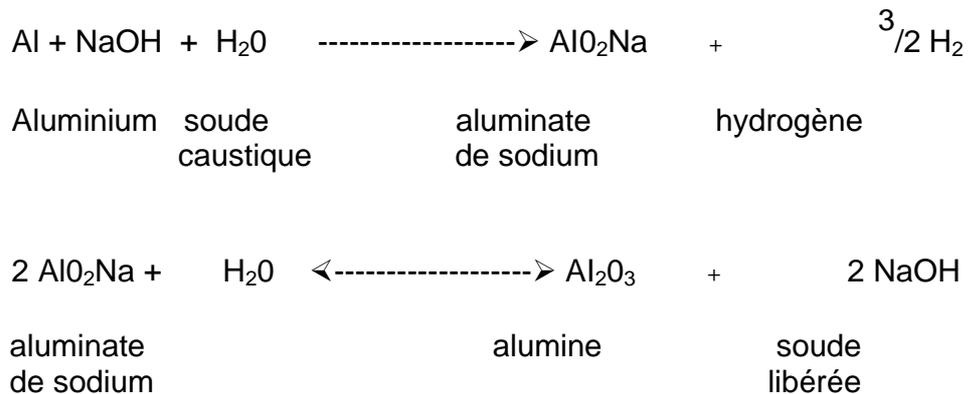
- élimination des défauts de filage ou de laminage.
- recherche d'une matité plus ou moins prononcée.

Dans l'opération de satinage, il y a dissolution du métal et élimination des oxydes naturels recouvrant la surface: il y a donc changement d'aspect. Ce changement d'aspect dépend de la structure du métal (discontinuité métallurgique : joints de grains, impuretés hors solutions, ségrégations) et aussi de la solution de satinage. Il existe sur le marché des formulations donnant des aspects différents :

- Satiné plus ou moins brillant.
- Satiné plus ou moins mat.
- Satiné pour les filés.
- Satiné pour les laminés.

Mais la formulation de base est généralement conçue à partir de soude et de complexants.

La soude attaque l'aluminium et les complexants évitent la formation d'alumine à partir d'aluminate de sodium. La réaction est la suivante :



Pour suivre un bain de satinage, il faut suivre les rapports soude libre sur aluminium et complexants sur aluminium.

Les paramètres de traitement sont, en général, les suivants :

- Temps : 10 à 25 mn.
- Température : 55 à 65 °C.

On trouve sur le marché des produits complets (soude + complexants) et des additifs seuls à ajouter à la soude.

Les produits complets ainsi que les additifs peuvent être poudreux ou liquides.

Actuellement, la tendance chez les anodiseurs est d'obtenir un aspect de satinage mat avec des bains contenant de hautes teneurs en aluminium dissous (supérieures à 120 g/l). Ces bains sont dits permanents ; la teneur en Al se stabilise car l'entraînement du bain de satinage par les pièces compense l'apport de métal dû à la dissolution.

Contrôle du bain

Titrer régulièrement la concentration en soude libre et en aluminium dissous comme suit :

- prélever 5 ml de bain de satinage ,
- ajouter 50 ml d'eau,
- titrer par H_2SO_4 N/2 en présence de phénolphtaléine jusqu'au virage à l'incolore : soit "a" ml d' H_2SO_4 versés,
- ajouter 5 à 10 g de fluorure de potassium, selon la quantité d'aluminium dissous dans le bain ; la solution redevient rouge. Remettre la burette à zéro. Titrer par H_2SO_4 N/2 jusqu'à décoloration : soit "b" ml d' H_2SO_4 N/2 versés.

Résultats

Soude total en g/l : 4a

Soude libre en g/l : 4a - 1,33b

Aluminium dissous en g/l : b

L'expérience nous montre que, sur les bains de satinage à haute teneur en aluminium, le dosage avec l'acide sulfurique (H_2SO_4) est meilleur sur le plan de la teneur en aluminium et sur la netteté du virage qu'avec l'acide chlorhydrique (HCl).

Fréquence des contrôles

En général, il est conseillé de faire le dosage de la soude libre et de l'aluminium une fois par jour (une fois par équipe si la quantité de métal satiné est importante). Le dosage de l'additif doit être effectué au moins une fois par semaine.

N.B : Il existe également des bains de satinage acides adaptés à des cas particuliers.



Chapitre 6

Neutralisation

Neutralisation

Les pièces à anodiser après avoir subi le traitement alcalin de satinage chimique (suivi des rinçages correspondants), sont immergées dans la cuve de neutralisation acide. Les buts de ce traitement sont les suivants :

- éliminer de la surface de l'aluminium les hydroxydes qui se sont formés lors des prétraitements alcalins et dont la présence provoquerait des défauts pendant l'oxydation anodique. En effet, la présence d'hydroxydes des métaux d'alliage (Mg, Mn, Fe, Cu) sur l'aluminium pourrait donner des différences de couleur et d'autres défauts qui seraient visibles et difficilement éliminables après anodisation. Ces composés n'étant pas des métaux amphotères, comme l'aluminium, ils se dissolvent uniquement en milieu acide.
- neutraliser la basicité du métal qui, bien que rincé, garde des résidus des traitements alcalins précédents. Une neutralisation incomplète de la basicité se trouvant sur le métal causerait une plus grande consommation d'acide sulfurique et une accumulation d'éléments d'alliage dans la cuve d'oxydation qui en serait polluée.
- passiver l'aluminium mis à nu pour le protéger lors du séjour dans les rinçages précédant l'anodisation.

Cette neutralisation se fait en milieu nitrique ou sulfurique.

D'autre part, ce bain a un très bon pouvoir émollient par rapport à l'oxyde anodique et à certains oxydes qui ne sont pas éliminés par l'attaque dans la soude. 11 est donc très efficace comme pré-traitement dans la désoxydation des supports ou même des chargements complets qui sont à refaire parce qu'inacceptables.

Acide nitrique

Le plus souvent, la cuve de neutralisation contient une solution d'acide nitrique (HNO_3). En général, on travaille avec une concentration allant de 150 à 250 g/l.

Acide sulfurique

il est aussi possible d'utiliser de l'acide sulfurique, à condition d'y adjoindre des additifs spécifiques qui apportent dans le bain les agents oxydants indispensables à son efficacité. Les conditions d'utilisation sont généralement :

- H_2SO_4 : 40 à 60 g/l.
- Additifs : 15 à 40 g/l.
- Température : 15 à 25 °C.
- Temps de contact : 3 à 15 mn.

Contrôle des bains

Bain à base d'acide nitrique

Prélever avec une pipette jaugée 25 ml de bain, les mettre dans un bêcher de 250 ml et compléter le volume avec de l'eau distillée. Bien agiter la solution. Prélever 25 ml de cette solution et les mettre dans un bêcher de 250 ml. Diluer avec environ 50 ml d'eau distillée. Ajouter environ 2g de fluorure de potassium et quelques gouttes d'indicateur bleu de thymol. Titrer avec NaOH 1N jusqu'au virage de l'indicateur du rouge au bleu. Appeler A les ml de NaOH utilisés.

$$A \times 25.2 = \text{g/l de } \text{HNO}_3$$

Bain à base d'acide sulfurique**Détermination de la concentration en H_2SO_4** **Réactifs nécessaires**

- Indicateur phénolphtaléine.
- Solution de soude normale NaOH (N).
- Solution de fluorure neutre de potassium.

Préparation

- Réaliser une solution concentrée de fluorure de potassium à 100 g/l.
- Préparer la solution de fluorure neutre de potassium par dilution dans un litre d'eau déminéralisée de 450 cm³ de la solution de KF à 100 g/l. En fonction de la réaction acide ou basique de cette solution à la phénolphtaléine, neutraliser soit par de la potasse, soit par de l'acide sulfurique.

Mode opératoire

- Effectuer une prise d'essai de 5 cm³ du bain à analyser et les verser dans un erlenmeyer.
- Ajouter 50 cm³ de la solution de fluorure neutre de potassium puis environ 50 cm³ d'eau distillée et 3 gouttes d'indicateur phénolphtaléine.
- Titrer avec la solution de NaOH (N) jusqu'au virage au rose : soit A cm³ de solution de NaOH (N) versés.

Concentration en H_2SO_4 = 9,8 x A en g/l

Détermination du pouvoir oxydant

Réactifs nécessaires

Tous les réactifs doivent être d'une pureté analytique reconnue.

- Sulfate ferreux : $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,1 N).
- Nitrate d'argent : AgNO_3 (0,1 N).
- Acide sulfurique 96 % : H_2SO_4 $d = 1,84$.
- Bichromate de potassium : $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (0,1 N).

Préparation

- Solution de bichromate de potassium 0,1 N :

Dissoudre dans de l'eau distillée 4,903 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ préalablement séché à 110 °C durant 2 heures. Compléter à 1 litre dans une fiole jaugée.

- Solution de sulfate ferreux en milieu sulfurique 0,1 N :

Dissoudre 27,8 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dans de l'eau. Ajouter 20 ml de H_2SO_4 et compléter à 1 litre avec de l'eau distillée. Cette solution étant instable, il faut la refaire à chaque dosage.

- Solution de nitrate d'argent 0,1 N :

Dissoudre 16,99 g d' AgNO_3 dans de l'eau distillée. Compléter à 1 litre en fiole jaugée. Conserver ce réactif à l'abri de la lumière.

- Solution de diphenyl amine sulfonate de baryum 0,5 % :

Dissoudre 1 g de diphenyl amine sulfonate de baryum dans 200 cm³ d'eau distillée.

Mode opératoire

Dans un bêcher, prélever environ 50 cm³ de bain. Effectuer une prise d'essai de 20 cm³ que l'on introduira dans un flacon de titration. Ajouter 50 cm³ de solution de sulfate ferreux 0,1 N puis 20 cm de solution de nitrate d'argent 0,1 N. Ajouter 10 cm³ de H₂SO₄(6N). Agiter et doser l'excès de sulfate ferreux par la solution de bichromate de potassium 0,1 N en présence de 2 ml d'indicateur diphényl amine sulfonate de baryum (au virage, la solution passe du vert au violet) : soit B cm³ de solution de K₂Cr₂O₇ 0,1 N versés.

$$\text{Pouvoir oxydant} = q - p \times B$$

où :

q et p sont deux coefficients donnés par le fournisseur de produits.

Ces bains doivent être suivis régulièrement au moins une fois par semaine pour l'acidité libre. De plus, pour les bains à base d'acide sulfurique, il est important de contrôler le pouvoir oxydant.



Chapitre 7

**Anodisation
en acide sulfurique**

Anodisation en acide sulfurique

Il s'agit du type d'oxydation anodique le plus utilisé dans le cas de l'aluminium destiné au bâtiment. Le traitement se fait généralement en immergeant dans une cuve contenant une solution d'acide sulfurique l'aluminium relié au pôle positif (anode) d'un générateur de courant continu adapté. Il existe aussi des anodisations réalisées à l'aide de courant alternatif, de courant pulsé ainsi que continu et alternatif associés.

Caractéristiques de la cuve

La cuve d'anodisation doit être habillée intérieurement avec un matériau anti-acide (généralement du PVC). Son volume devrait théoriquement être de 3 litres/ampère de courant injecté. Mais de nos jours cette valeur varie entre 2 et 2.5 l/Ampère, du moment que les générateurs et les systèmes de refroidissement des bains sont beaucoup plus puissants. Les cathodes (électrodes négatives) sont en aluminium ou en plomb. Les cathodes en plomb ont l'avantage de se passiver (devenir chimiquement inertes) dans la solution, car elles se recouvrent d'une très mince couche de sulfate de plomb insoluble. Elles ont donc une grande durée de vie si leur montage est fait dans les règles de l'art (étamage de la barre cathodique en cuivre et, par la suite, application de la bande en plomb avec soudure à la goutte).

Les cathodes en aluminium ont l'avantage d'avoir une plus grande conductibilité électrique (environ 7 fois supérieure à celle du plomb) et donc de nécessiter une surface immergée plus réduite. Le poids spécifique est aussi favorable à l'aluminium. Le seul aspect négatif concernant l'emploi de ce matériau, est sa réactivité dans l'acide sulfurique sous certaines conditions. Si la température dépasse les 30°C (ce qui peut se passer si on ne prend pas toutes les précautions nécessaires pendant la préparation du bain), les cathodes en aluminium peuvent être corrodées en très peu de temps et de cisailier

à la hauteur du niveau du liquide dans la cuve. Concernant le montage du bain, il est impératif de préparer tout nouveau bain d'oxydation en ajoutant en dernier l'acide dans l'eau et de ne jamais inverser l'opération. La réaction entre l'acide sulfurique et l'eau développe beaucoup de chaleur : il faut donc opérer de telle sorte que l'acide soit tout de suite dilué dans la plus grande quantité d'eau possible pour annuler cet effet thermique. Il est de plus conseillé de faire fonctionner le système de refroidissement de la cuve pour que la température ne dépasse jamais les 30°C.

Classes d'épaisseur de la couche d'oxyde

L'épaisseur de la couche d'oxyde est exprimée en microns (symbole μ/m), c'est-à-dire en millième de mm.

La norme internationale I.S.O. prévoit pour le moment 5 classes d'épaisseurs moyennes :

- 5 microns : pour application intérieure.
- 10 microns : pour application intérieure.
- 15 microns : pour application extérieure.
- 20 microns : pour application extérieure.
- 25 microns : pour application extérieure.

Le choix des épaisseurs doit être défini avec l'utilisateur et est fonction du degré d'agressivité du climat dans lequel le matériau doit être installé. La classe 25 a été introduite dernièrement sur demande de la Grande Bretagne qui l'a jugée nécessaire pour des zones à climat marin ou pour des zones industrielles à haut taux de pollution.

La couche d'oxyde est transparente, poreuse, di-électrique et devient presque inerte aux agents atmosphériques après qu'elle ait subi un traitement de colmatage adéquat. La qualité et les propriétés de cette couche sont fonction de différentes variables qui peuvent en modifier ses caractéristiques :

- 1) concentration en acide sulfurique.
- 2) densité de courant.
- 3) durée du traitement.
- 4) température du bain.
- 5) teneur en aluminium dissous dans la cuve.
- 6) agitation du bain.
- 7) ajout d'additifs dans la solution.
- 8) présence d'impuretés.

Nous allons maintenant examiner en détail ces différents facteurs.

I) Concentration de l'acide sulfurique

La concentration de l'acide sulfurique est normalement choisie entre 150 et 220 g/l. Plus l'acide sulfurique est concentré meilleur est la conductibilité électrique du bain, avec une économie de tension électrique à parité de densité de courant suivant la loi d'Ohm.

$$\text{Loi d'Ohm : } I = V/R$$

(I = intensité du courant, V= tension appliquée, R = résistance du bain)

En baissant la résistance du bain (c'est-à-dire en augmentant sa conductibilité), on a une intensité de courant supérieure pour la même tension appliquée. Mais le choix d'une concentration élevée peut être désavantageux parce que l'acide sulfurique, tout en aidant à former la couche d'oxyde, en même temps l'attaque chimiquement et en dissout une partie. Si la concentration est inférieure, la conductibilité du bain baisse, ainsi que son pouvoir dissolvant par rapport à la couche d'oxyde. Le choix de la concentration optimale doit se faire en évaluant ces 2 facteurs, sans oublier bien sûr les autres caractéristiques de l'installation (refroidissement etc...).

2) Densité de courant

Le courant moyen qui passe dans les pièces à anodiser varie normalement de 1.2 à 2 ampère/dm². Le choix de la densité de courant à employer est fonction de trois facteurs :

- la puissance du redresseur par rapport à la surface d'aluminium montée.
- la capacité de refroidissement du bain.
- la classe d'épaisseur.

Une densité de courant élevée provoque un développement de chaleur supérieur dans le bain. Si le refroidissement n'est pas assez performant, on peut avoir des "brûlures" sur le métal avec une désagrégation de la couche qui devient friable et laiteuse.

Pour une tension appliquée donnée, la densité de courant est fonction de la variation de la température du bain.

Vérification de la densité de courant par "surface témoin"

Mettre dans le bain d'oxydation quelques morceaux de tôle correctement accrochés, de surface totalement connue et égale à environ 1 m² pour 2000 litres de bain (pour les matériaux normaux on peut utiliser l'alliage 1050). Appliquer ensuite une tension permettant d'avoir la densité de courant choisie. Après 20 mn, on enregistre la tension du redresseur qui peut être retenue comme tension normale de travail.

NOTA : Cet essai n'est valable que si la température et la concentration du bain sont constantes dans le temps.

Exemple :

surface de tôle : $S = 10 \text{ m}^2 = 1000 \text{ dm}^2$

densité de courant choisie $d = 1.5 \text{ Ampère/dm}^2$

$I = d \times S = 1.5 \times 1000 = 1500 \text{ Ampères}$

1500 Ampères est le courant total qui doit passer. On met maintenant en marche le redresseur et on fait monter la tension jusqu'à ce que l'ampèremètre du tableau de commande se stabilise à 1500 Ampères. La tension qui correspond à 1500 Ampères est la tension de travail pour une densité de courant $d = 1.5 \text{ A/dm}^2$

Le marché propose des appareils électroniques qui, une fois préfixées la densité de courant et l'épaisseur de couche voulue, coupent automatiquement le traitement quand on a obtenu la couche d'oxyde recherchée. Ces appareils nécessitent une constance et une identité des conditions électriques, thermiques et chimiques dans chaque point du chargement pour donner des résultats satisfaisants.

3) Contrôle de l'épaisseur oxydée**a) Par la durée du traitement :**

L'épaisseur de couche augmente progressivement pendant l'anodisation durant une certaine période de temps (environ 2 heures). Au-delà de ce temps, l'épaisseur reste presque constante parce que la couche d'oxyde complémentaire qui se forme est complètement détruite par l'acide. La formule empirique permettant de calculer, à priori, l'épaisseur de la couche d'oxyde est la suivante :

$$e = 0,3 \times d \times t$$

où :

e = épaisseur de couche en microns.

d = densité de courant en Ampère/dm².

t = temps en minutes.

0,3 = facteur de proportionnalité.

Cette formule permet de trouver les temps d'anodisation nécessaires pour différentes épaisseurs de couche.

Par exemple, en travaillant à une densité de courant de 1,5 Ampère/dm² et comme :

$$t = e / 0,3 \times 1,5 = e / 0,45$$

Il faut :

11 mn pour obtenir 5 microns

25 mn pour obtenir 10 microns

35 mn pour obtenir 15 microns

45 mn pour obtenir 20 microns

55 mn pour obtenir 25 microns

b) Par comptage d'Ampère heure

A partir de la même formule de base que précédemment, on peut écrire :

$$e = 0,3 \times d \times T \times 60$$

$$e = 0,3 / S \times I \times T \times 60$$

on exprime alors : $I \times T = e \times S / 18$

où :

$I \times T$ est le nombre d'Ampère / heure

S est la surface à traiter en dm²

e est l'épaisseur de la couche d'oxyde.

Pour une surface de 1000 dm², il faut :

277	A.h pour obtenir	5 microns
555	A.h pour obtenir	10 microns
833	A.h pour obtenir	15 microns
1110	A.h pour obtenir	20 microns
1378	A.h pour obtenir	25 microns

On s'assure du fonctionnement à une densité de courant donnée par la méthode de la surface témoin (détermination de la tension de travail correspondant à une densité de courant donnée).

4) Température du bain :

L'anodisation est une réaction fortement exothermique, c'est-à-dire qu'elle développe une grande quantité de chaleur que l'on peut évaluer approximativement avec la formule suivante :

$$Q = 0,95 \times A \times V = \text{kcalories/heure.}$$

où :

A = courant en Ampère.

V = tension en Volts.

Q = quantité de chaleur développée.

Toute cette chaleur doit être éliminée par un système de refroidissement approprié, pour que le bain travaille à une température de 19 +/- 2 °C.

Le refroidissement du bain peut se faire de différentes façons :

- circulation de l'eau froide dans des serpentins installés sur les parois de la cuve.

- circulation de l'acide dans un groupe frigorifique refroidi par air ou par eau.

La deuxième solution est la plus appropriée et la plus répandue dans les installations modernes. Une température globale ou locale trop élevée dans le bain d'anodisation provoque les inconvénients suivants :

- couche d'oxyde avec des pores trop ouverts et donc plus difficiles à colmater.
- danger de "brûlures" sur l'aluminium.
- variations de densité de courant.
- augmentation du pouvoir de dissolution du bain sur la couche et donc diminution du rendement.

Une température trop basse au démarrage ne doit pas être trop prise en considération puisqu'il suffit d'anodiser un premier chargement pour que la température atteigne la valeur de consigne.

5) Teneur en aluminium dissous :

Nous avons vu que l'acide sulfurique dissout une partie de la couche d'oxyde en même temps que celle-ci se forme. Quand la teneur en aluminium dissous dans le bain atteint 15 g/l il faut régénérer le bain. Normalement, il n'est pas changé en totalité; seuls les 4/5 de son volume sont purgés. En effet, pour qu'un bain d'anodisation puisse donner de bons résultats, il faut qu'il contienne 3 à 4 g/l d'aluminium dissous.

Dans certaines installations, on emploie un système de filtration en continu du bain sur des résines échangeuses d'ions pour maintenir constamment bas le taux d'aluminium dissous.

Quand l'aluminium dissous dépasse 15 g/l on a les inconvénients suivants :

- diminution du rendement d'anodisation.
- difficulté à obtenir des épaisseurs de couches importantes (20 microns).

- difficulté à colorer après anodisation.
- diminution de la conductibilité du bain et donc augmentation de la puissance nécessaire.
- diminution de la transparence de la couche.

6) Agitation du bain :

Le bain d'anodisation doit constamment être en agitation par le passage d'air surpressé distribué uniformément sur tout le fond de la cuve.

L'agitation par air a les buts suivants :

- rendre homogène la solution d'acide sulfurique.
- éliminer la chaleur qui se développe sur la surface de l'aluminium pendant l'anodisation.
- rendre uniforme la température dans chaque point de la cuve. Des interruptions dans l'agitation, même momentanées, causeraient des problèmes de qualité.

Des différences de températures dans différents points de la cuve provoqueraient :

- des densités de courant différentes.
- un pouvoir de dissolution sur la couche non constant.
- des épaisseurs de couche différentes.

7) Ajout d'additifs à l'acide sulfurique :

L'additif le plus connu est l'acide oxalique. Cet acide organique ajouté à l'acide sulfurique à la concentration de 7 à 10 g/l donne les avantages suivants :

- il réduit le pouvoir dissolvant de l'acide sulfurique par rapport à la couche d'oxyde.
- il permet de travailler à des températures plus élevées (jusqu'à 24°C) sans avoir de "brûlures" sur l'aluminium.
- il permet d'adopter des densités de courant plus importantes.
- il donne une couche d'oxyde plus dure.

L'aspect négatif qui dérive de l'ajout d'acide oxalique est la légère coloration jaune de la couche d'oxyde après anodisation sur certains types d'alliages.

L'ajout d'acide oxalique à l'acide sulfurique est d'habitude pratiqué dans les installations qui rencontrent des difficultés à travailler en dessous de 21 °C. Il existe d'autres additifs.

8) Présence d'impuretés

La présence de chlorures supérieure à 0.1 g/l provoque sur l'aluminium l'apparition de nombreuses piqûres. Des huiles et des graisses peuvent se déposer sur le métal et en empêcher l'oxydation à certains endroits en provoquant des tâches.

Des matières solides en suspension peuvent donner des marbrures.

Pour empêcher que les huiles et les matières grasses présentes dans les compresseurs d'air viennent polluer le bain, on utilise couramment des surpresseurs d'air à turbine, sans parties lubrifiées, pour l'agitation de ces bains. Ces machines ont l'avantage de ne pas réchauffer l'air et donc de ne pas réchauffer le bain d'oxydation, du moment qu'elles ne le compriment pas, mais l'insufflent seulement. Dans les bains d'oxydation on trouve souvent des agents mouillants qui forment une légère couche de mousse qui empêche l'acide sulfurique de passer dans l'atmosphère, entraîné par l'hydrogène gazeux se formant au niveau des cathodes.

9) Contrôles chimiques :

Il est nécessaire d'effectuer les analyses suivantes :

- acide sulfurique libre.
- aluminium dissous.
- additifs.

a) Préparation de la solution d'essai

Prélever 50 ml de solution du bain avec une pipette jaugée, les mettre dans un bêcher jaugé de 250 ml et mettre à volume avec l'eau distillée.

b) Détermination de l'acide sulfurique libre

Réactifs nécessaires :

- fluorure de potassium (KF) pour analyse, solide.
- solution alcoolique 0.1 % de bleu de thymol.
- solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) 1 N.

Méthode

Mettre 10 ml de bain dans un bêcher de 250 ml. Diluer avec environ 100 ml d'eau distillée, et ajouter 107 g de fluorure de potassium ($\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Rajouter 1 ml de solution de bleu de thymol comme indicateur. Titrer avec NaOH 1N jusqu'au virage du jaune au bleu, en appelant A les ml de NaOH utilisés.

$A \times 24,5 = \text{g/l d'acide sulfurique libre.}$

c) Détermination de l'aluminium

Réactifs nécessaires :

- indicateur bleu de thymol.
- solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) 1 N.
- solution d'acide nitrique (HNO₃) 1 N.

Méthode

Prélever 25 ml du bain et les mettre dans un bêcher de 250 ml. Ajouter 1 ml de solution de bleu de thymol, et avec une burette 45 ml exacts de NaOH (la couleur devient bleue). Titrer avec HNO₃ 1 N jusqu'au virage du bleu au jaune. Appeler B les ml d'acide nitrique utilisés : A sont les ml utilisés pendant la détermination de la concentration en acide sulfurique.

$$((45-B) \times 1.8) - (4.5 \times A) = \text{g/l d'aluminium.}$$

Lorsque la concentration en aluminium atteint 15 g/l le bain doit être renouvelé, totalement ou en partie.

d) Détermination de l'acide oxalique

Réactifs nécessaires :

- solution d'acide phosphorique concentré (H₃PO₄ de densité 1.7).
- solution d'acide sulfurique dilué à 50 %
- solution de permanganate de potassium (KMnO₄) 0.1 N.

Méthode

Prélever avec une pipette jaugée 50 ml du bain et les mettre dans un bêcher de 250 ml. Diluer avec environ 100 ml d'eau distillée.

Ajouter 1 ml de H_3PO_4 concentré et 20 ml de H_2SO_4 à 50 %. Réchauffer la solution de KMnO_4 0.1 N jusqu'à environ 70 °C. Titrer à chaud avec la solution de KMnO_4 0.1 N jusqu'à avoir une légère couleur rose persistante pendant 1 mn. Appeler A les ml de permanganate utilisés.

$$A \times 0.63 = \text{g/l d'acide oxalique.}$$

NOTA : La formule de l'acide oxalique est : $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

La concentration de l'acide oxalique doit être d'environ 15 g/l de bain. Les consommations d'acide oxalique prévues sont d'environ 60 g/m² anodisé.

e) Fréquences des contrôles

Acide Sulfurique libre :	1 fois par jour.
Aluminium dissous :	1 fois par jour.
Acide oxalique :	1 fois par jour.

f) Autres méthodes

Il est possible de déterminer les concentrations par pH-métrie. La concentration en acide sulfurique est déterminée avec un pHmètre en titrant avec l'hydroxyde de sodium jusqu'au pH = 3,6. En continuant la titration jusqu'au pH = 10, on obtient le taux d'aluminium par différence entre les deux valeurs.

Réactifs nécessaires

- solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) 1 N.

Méthode

Prélever avec une pipette jaugée 5 ml du bain d'anodisation, les mettre dans un bêcher de 400 ml et diluer avec environ 200 ml d'eau distillée. Titrer avec la solution de NaOH 1 N jusqu'à ce que le pH atteigne la valeur de 3,6. Appeler A les ml utilisés. Continuer la titration jusqu'à ce que le pH atteigne la valeur 10. Appeler B les ml totaux de NaOH 1 N utilisés.

$A \times 9.8 = \text{g/l d'acide sulfurique libre.}$

$(B-A) \times 1,35 = \text{g/l d'aluminium dissous.}$

Il existe maintenant sur le marché des appareils automatiques qui réalisent le dosage suivant cette méthode.



Chapitre 8

Electrocoloration

Electrocoloration

Avec l'appellation d'électrocoloration (ou coloration électrolytique), on désigne normalement un procédé de coloration de l'aluminium anodisé qui a connu un énorme succès pendant ces 15 dernières années en Europe. Le traitement se fait en soumettant l'aluminium anodisé à un courant électrique alternatif adapté dans un bain contenant une solution de sels métalliques et d'autres additifs chimiques. Sous l'effet du courant, les particules métalliques se déposent au fond des pores de l'oxyde d'aluminium. Avec le traitement de colmatage qui suit (fermeture des pores), on obtient une coloration très résistante. Le type de couleur est fonction du métal utilisé. Le ton (clair, foncé, noir) est fonction de la durée du traitement. On a expérimenté, en laboratoire, beaucoup de formulations de bains en mesure de donner une palette de couleurs très étendue.

Il nous semble utile de nous étendre sur les formulations qui sont utilisées, pratiquement, au niveau industriel. Les couleurs les plus répandues sont celles de la palette des bronzes (champagne, bronze clair, moyen, foncé, jusqu'au noir).

Ces couleurs sont obtenues avec des solutions à base de sels de cobalt, nickel ou étain.

Les bains d'électrocoloration à base de nickel ont été les premiers à être proposés sur le marché, tout comme ceux à base de cobalt. Ensuite, ils ont été remplacés par l'électrocoloration à base de sels d'étain. La palette des couleurs rouges peut être obtenue avec des solutions à base de sels de cuivre, d'or ou de sélénium. On peut obtenir un ton couleur OR avec un bain d'électrocoloration à base de sels d'argent, cobalt ou manganèse.

Depuis quelques années, des recherches sont effectuées pour obtenir certaines couleurs très demandées par les marchés, comme le blanc laiteux, le vert, le bleu clair mais jusqu'à aujourd'hui, ces recherches n'ont pas débouché sur des procédés industriellement valables.

Pour entrer dans les détails de ce type de traitement, nous allons nous pencher sur l'électrocoloration à base de sels d'étain, qui est actuellement la plus répandue.

Examinons-en les éléments fondamentaux.

Type d'alliage

Tous les alliages pour anodisation peuvent être électrocolorés. Le ton de la couleur obtenue n'est pas influencé de façon déterminante par la composition de l'alliage ni par les traitements thermiques auxquels il a été soumis. De toute façon, il est conseillé de monter, chaque fois que cela est possible, des chargements homogènes (par exemple tôles, parcloses, etc.).

L'épaisseur

Un des grands avantages de l'électrocoloration est que le ton de la couleur est moins influencé par l'épaisseur de la couche d'oxyde, qui joue par contre un grand rôle dans les colorations par absorption.

Ceci peut s'expliquer par le fait que l'électrocoloration se fait en partant du fond des pores de l'oxyde et n'est donc pas influencé par son épaisseur, à condition que l'épaisseur soit suffisante pour retenir la quantité de métal qui doit être déposée. Même les couleurs les plus foncées, y compris le noir, peuvent être obtenues avec une épaisseur minimum de couche d'environ 15 microns (tandis que pour le noir organique, il faut au moins 20 microns).

La cuve

Elle est en matériau anti-acide. Sur les côtés, on installe des électrodes qui peuvent être de différentes matières : graphite, métal du même type que celui en solution dans le bain, acier inox. Leur forme aussi peut être différente : ronde, à bandes lisses etc... . Pour augmenter la productivité, il est possible d'adopter une électrode centrale dans la cuve, ce qui permet de charger une plus grande quantité de profilés (en 2 nappes distinctes).

Equipement électrique

On utilise normalement un transformateur de courant de 20 volts avec un ampérage d'environ 60 % de celui du redresseur d'anodisation. L'électrocoloration se fait avec une tension de 16 à 18 volts et une densité de courant de régime de 0,3 - 0,5 A/dm³.

Le courant a une valeur croissante et atteint son maximum avant la première minute de traitement, pour descendre ensuite et se stabiliser à la valeur de régime.

Les transformateurs traditionnels pour électrocoloration ont une montée de la tension programmée et différents temporisateurs pour pré-fixer la durée du traitement. Récemment, le marché a proposé des équipements électriques ayant des programmes tension-courant plus sophistiqués (variation de l'amplitude d'ondes, utilisation de courant continu + alternatif).

Ces machines, tout en ayant des programmes de travail plus complexes à définir, permettent de colorer une surface d'aluminium plus importante, sans problème d'écran et avec de très bons résultats d'uniformité de couleur.

Accrochage

Les pièces doivent être fortement accrochées aux supports. Si, après oxydation, le contact se déplace sur un point oxydé (non conducteur), pendant l'électrocoloration, la pièce risque de rester de couleur plus claire ou même, de ne pas se colorer du tout. Les supports en titane ne sont généralement pas utilisés pour les pièces électrocolorées.

Composition chimique du bain

Le bain d'électrocoloration à l'étain est normalement composé par une solution de sulfate stanneux (SnSO_4) dans de l'acide sulfurique et par d'autres additifs.

La concentration en sulfate stanneux varie de 14 à 20 g/l.

Les additifs ont différentes fonctions :

- Stabiliser le bain en conservant l'étain dans sa forme bivalente.
- En régler la déposition à l'intérieur de la couche,
- Complexer l'aluminium dissous en solution,
- Rendre inerte les autres métaux (Fer, Ca, Mg) en provenance de l'eau ayant servi à la composition du bain et à sa maintenance.

Les produits chimiques utilisés à ces fins sont nombreux ; nous allons répertorier les plus courants.

Acide sulfamique, acide tartrique, acide crésosulfonique, acide ferrosulfonique, acide sulfophtalique, acide sulfosalicylique, phénols substitués, crésols, glycols, glycérine, urée, etc.

Le choix des additifs n'a pas de répercussion sur le ton de la couleur. Mais, un bon additif améliore la pénétration de la couleur, la durée de vie du bain et la constance des résultats entre une correction et la suivante à la suite des contrôles chimiques.

L'analyse du bain permet de déterminer le taux de sulfate d'étain et d'acide sulfurique libre. Pour la détermination des additifs, il faut des appareils sophistiqués, qui sont normalement disponibles uniquement auprès des laboratoires d'analyses spécialisées. Un problème que la majorité des bains d'électrocoloration à base de sels d'étain présentent, est la tendance du métal à s'oxyder et à se transformer en étain tétravalent qui précipite sous forme d'oxyde blanc et insoluble. Cette tendance peut être freinée mais pas complètement stoppée. A ce propos, il faut absolument éviter de soumettre le bain à une agitation par air, qui faciliterait l'oxydation et la précipitation du métal.

Il est conseillé de filtrer le bain avec une pompe filtre anti-acide appropriée pour éliminer l'oxyde d'étain insoluble en suspension ou se trouvant sur le fond de la cuve sous forme de boue. Un bain trop trouble peut avoir une mauvaise influence sur l'uniformité et la pénétration des sels métalliques.

Temps de coloration

Le ton de la couleur (clair, moyen, foncée, noir) est fonction de la durée du traitement. Nous donnons à ce propos des temps indicatifs :

- | | |
|-----------------|------------------|
| - Champagne | 45 secondes |
| - Bronze clair | 1 minute |
| - Bronze moyen | 3 minutes |
| - Bronze foncée | 6 minutes |
| - Noir | 12 à 15 minutes. |

Il est donc conseillé de travailler avec des chargements de surface moyenne, la plus constante possible pour ne pas devoir intervenir fréquemment sur les temps de coloration. Si la couleur obtenue est trop claire, on peut la foncer en prolongeant le temps de coloration. Si la couleur, par contre, est légèrement foncée, on peut l'éclaircir en laissant le chargement pendant un laps de temps (de 30 secondes à 1 minute) dans le bain, sans courant électrique.

Température

Le bain d'électrocoloration fonctionne correctement pour des températures comprises entre 15 et 25 °C. Il est conseillé de travailler autour de 20 °C parce que des variations de température importantes provoquent des variations dans la conductivité de la solution et donc dans les temps de coloration.

Le courant utilisé étant faible, l'effet thermique est normalement négligeable et la température varie peu pendant le traitement. Si pendant l'hiver, la température du bain descend au-dessous de 12-15°C, il est nécessaire de la remettre aux valeurs optimales par chauffage. Une fois la température de régime atteinte, la solution garde cette température presque constante tant que le bain travaille.

Vérification de la couleur

Elle peut se faire avec des appareils récemment disponibles sur le marché, mais compliqués si on veut s'en servir dans chaque situation. Il est donc conseillé de surveiller la couleur avec une teinte échantillon. A ce propos la suggestion pratique suivante peut être utile : pendant la coloration, il est suggéré de faire un ton toujours un peu plus foncée que l'échantillon car on réduit de façon importante l'écart de couleur possible sur une même charge et entre des chargements différents.

Contrôles chimiques

Détermination du sulfate stanneux

Réactifs nécessaires

- Acide chlorhydrique (HCl) concentré (37 %) pur pour analyse,
- Solution d'iode 0,1 N ,
- Empois d'amidon comme indicateur.

Méthode

Mettre environ 100 ml d'eau distillée dans un bécher de 400 ml. Ajouter avec une pipette jaugée 10 ml de solution du bain, 5 ml d'HCl concentré et 2 ml d'empois d'amidon. Titrer avec la solution d'iode 0,1 N jusqu'à ce que la solution devienne bleue-noire. Appeler A les ml utilisés.

Calcul

$$A \times 1.07 = \text{g/l de sulfate stanneux}$$

La valeur conseillée varie entre 14 et 20 g/l.

Détermination de l'acide sulfurique

Mettre 50 ml d'eau distillée dans un bécher de 400 ml. Ajouter avec une pipette jaugée 50 ml de solution du bain. Mettre dans la solution l'électrode du pH mètre préalablement étalonnée avec une solution tampon à pH = 3 ou pH = 4.

Titre en agitant avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) 1 N jusqu'à ce que le pH atteigne la valeur de 2,1.

Appeler A les ml de NaOH utilisés.

Calcul

$$A \times 0.98 = \text{g/l d'acide sulfurique}$$

La valeur conseillée est de 15 à 35 g/l

Fréquence des contrôles : tous les jours.



Chapitre 9

**Colorations par
absorption**

Colorations par absorption

Il s'agit de colorations que l'on obtient simplement en plongeant l'aluminium anodisé dans certaines solutions de colorants, sans application de courant électrique.

Suivant le type de substance qui donne la couleur, on distingue :

1. Colorations organiques,
2. Colorations inorganiques.

Colorations organiques

On emploie, pour ce type de traitement, des colorants organiques, solubles dans l'eau, ayant une grande tenue à la lumière (au dessus de l'échelle 8 de référence). Ces produits chimiques entrent dans les pores de la couche d'oxyde (non colmatés) et donnent des liens chimiques de différents types :

- a) Ils se substituent avec des anions, les oxydrilles se trouvant dans la couche d'oxyde,
- b) Ils forment des liens covalents,
- c) Ils sont absorbés par des forces électrostatiques (type Van Der Waals).

La qualité du résultat que l'on obtient avec ce type de traitement est fonction de différents paramètres :

- 1) Epaisseur de couche
- 2) Solidité à la lumière du colorant employé

3) Conditions de traitement (concentration, pH, temps, température).

1. Epaisseur de couche

Pour effectuer ces colorations, surtout dans les tons les plus foncés, il faut avoir des épaisseurs de couche élevées, normalement au-dessus de 20 microns. Ceci parce que le produit de coloration, en entrant dans le pore, arrive difficilement à le remplir complètement, devant prendre la place de la solution aqueuse qui s'y trouve déjà.

2. Solidité du colorant à la lumière

Les colorants organiques, utilisables pour l'aluminium employé en bâtiment ou en décoration pour des applications extérieures, ne sont pas très nombreux. Le plus connu et le plus expérimenté est certainement le noir MLW de Sandoz. Certains autres colorants Sandoz apparus ces dernières années (série Sanodal) offrent eux-aussi de très bonnes garanties quant à la tenue à la lumière et à la résistance aux agents atmosphériques.

Pour l'aluminium utilisé à l'extérieur, on demande une tenue à la lumière supérieur à 8.

3. Conditions d'utilisations

Concentration

Elle peut varier suivant le colorant de 3 à 30 g/l. Il est important de maintenir la concentration autour de sa valeur optimale conseillée par le fournisseur. Le contrôle de la concentration peut se faire par colorimétrie en comparant dans un cylindre gradué de 500 ml, 100 ml de bain avec 100 ml de solution témoin, à concentration optimale connue. Si cette dernière révèle avoir une couleur plus foncée on la dilue avec de l'eau distillée jusqu'à obtenir la même couleur que le bain. En partant de la variation en volume (eau rajoutée), on trouve la quantité de colorant qu'il faut rajouter. Par exemple si on a dû doubler avec de l'eau le volume de la solution témoin pour avoir la même couleur que celle du bain, cela signifie que la concentration de colorant dans les bains est moitié de la valeur optimale. Attention, le pouvoir peut être affecté par les impuretés du bain.

pH

Il est très important parce qu'il a de l'influence et sur la quantité de colorants absorbés et sur sa tenue. Beaucoup de colorants organiques ont une très petite plage de pH dans laquelle ils se comportent correctement. En dehors de cette plage, leur action chute rapidement jusqu'à ne plus colorer du tout ou à donner une couleur dont la tenue à la lumière est insuffisante. Pour le noir MLW Sandoz, le pH conseillé est 4.2.

Temps

S'il est trop court, on a une absorption insuffisante (juste superficielle) avec des conséquences sur la tenue à la lumière. S'il est trop long, on n'a généralement pas d'effets négatifs, si l'on exclut une perte de productivité, et des pertes d'intensité par effet de redissolution de la couche.

Température

Si elle est trop basse, on a une absorption insuffisante avec des effets négatifs sur la tenue à la lumière et sur le ton de la couleur. Si, par contre, on colore à une température trop élevée, on peut créer un colmatage partiel de la couche avec fermeture des pores qui deviennent inertes et donc, on a une absorption de colorants non correcte.

Pour le noir MLW Sandoz, on conseille les paramètres opératifs suivants :

- Concentration = 10 g/l
- pH = 4.2 + 0.2
- Température = 60° +/- 5°C
- Temps = environ 30 mn

Nota

La correction du pH s'apporte en prélevant 1 litre de bain, en le laissant refroidir et en y plongeant l'électrode du pH mètre

précédemment étalonnée avec une solution tampon à pH = 4. Le pH est ensuite augmenté ou baissé jusqu'à la valeur optimale en ajoutant respectivement une solution d'ammoniaque ou d'acide acétique. En multipliant le volume d'acide ou de base par le volume en litre de la cuve, on calcul la quantité de réactifs nécessaires pour la correction de tout le bain.

Le colorant organique, plutôt que par immersion peut être aussi utilisé par pulvérisation. Si l'installation est correctement faite, les résultats sont aussi satisfaisants.

Colorations inorganiques

Le principe sur lequel elles se basent est la précipitation de composés métalliques (généralement des hydroxydes) à l'intérieur des pores de la couche d'oxyde. Ces colorations ne permettent pas d'avoir une gamme de tons de couleurs aussi étendue que celle des colorants organiques, mais elles ont normalement une meilleure tenue à la lumière et à la chaleur. Les colorations inorganiques les plus répandues pour l'aluminium utilisé en bâtiment et en décoration pour des applications extérieures, sont les suivantes :

Or : Ferri-oxalate d'ammonium et de sodium

Bronze : Cobalt et permanganate

Or

Le bain de coloration est formé par une solution aqueuse à 15 à 25 g/l de ferri-oxalate d'ammonium : $(\text{NH}_4)\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)3\text{H}_2\text{O}$.

Cette solution est plutôt délicate pour les raisons suivantes :

- Elle est photosensible, donc elle tend à se décomposer par effet de la lumière. La cuve de colorant doit être tenue couverte quand on ne s'en sert pas,

- Elle est stable jusqu'à pH 5.5 environ,
- A pH supérieur, elle se décompose en précipitant de l'hydroxyde de fer et des oxalates basiques de fer,
- A pH inférieur à 4, la coloration est difficile parce que la trop forte acidité fait obstacle à la précipitation de l'hydroxyde ferrique (qui donne la couleur or) à l'intérieur des pores de la couche,
- Des températures trop fortes (supérieures à 60°C) décomposent le sel et endommagent la solution,
- La présence d'ions calcium dans l'eau (eau très dure) fait précipiter l'oxalate de calcium en rendant trouble la solution. Pareillement, une forte concentration en ions phosphate dans l'eau donne des inconvénients pendant la coloration, en favorisant la décomposition du bain.
- L'utilisation d'une cuve en fer non habillée intérieurement peut amener à une rapide décomposition de la solution.

En tenant bien présente ces observations, les meilleures conditions pour pratiquer la coloration or avec du ferri-oxalate d'ammonium sont les suivantes :

1. Cuve en fer habillée intérieurement avec du PVC 2.
2. Solution préparée avec de l'eau déminéralisée 3.
3. Concentration de 15 à 25 g/l
4. pH 4.5 à 5.
5. Température 35 à 45 °C
6. Temps de 1 à 10 mn suivant le ton de la couleur or que l'on recherche.

Pour réajuster éventuellement le pH du bain, on effectue la correction sur 1 litre de solution en se servant d'acide oxalique, d'acide sulfurique ou d'ammoniaque dilués pour baisser ou augmenter sa valeur.

La quantité utilisée pour cette correction permet de retrouver la quantité totale à ajouter dans la cuve en la multipliant par son volume en litre. La coloration or avec du ferri-oxalate d'ammonium, si elle est bien faite, est presque inaltérable au soleil et aux agents atmosphériques.

Contrôles chimiques

Détermination du taux de ferri-oxalate d'ammonium

Principe de la détermination

L'acide oxalique est oxydé avec du KMnO_4 . On titre ensuite le fer avec de l'EDTA en présence d'acide sulfosalicylique comme indicateur.

Réactifs nécessaires

- Solution de permanganate de potassium (KMnO_4) 1N,
- Acides sulfurique dilué (H_2SO_4) à 50 %,
- Gluconate de sodium pur et solide,
- Hydroxyde d'ammonium (NH_4OH) dilué à 50 %,
- Solution à 5 % d'acide sulfosalicylique dans de l'eau,
- EDTA 0.1 N (sel bisodique de l'acide éthylène diamine tétracétique).

Méthode

Prélever 20 ml de bain et les mettre dans un bécher de 400 ml. Ajouter 10 ml de H_2SO_4 à 50 % et environ 50 ml d'eau distillée. Réchauffer la solution jusqu'à 90 °C et titrer à chaud les oxalates avec une solution de permanganate de potassium (KMnO_4) 1N jusqu'à obtenir une légère coloration rose persistante pendant au moins 30 secondes.

Rajouter 2 à 3 grammes de gluconate de sodium pour complexer l'aluminium se trouvant dans le bain : la coloration rose due au KMnO_4 disparaît. Refroidir la solution mettre le pH à 2.5 environ avec de l'hydroxyde d'ammonium (NH_4OH) a 50%. Ajouter 1 ml d'acide sulfosalicylique a 5 % et titrer avec EDTA 0,1 N jusqu'au virage de la couleur du rouge au jaune. Appeler A les ml de EDTA utilisés.

Calculs

$$A \times 2.14 = \text{g/l de ferri-oxalate d'ammonium}$$

Fréquence du contrôle : 2 fois par semaine (si le bain travaille)

Bronze inorganique

Avant d'exécuter cette coloration il faut complètement éliminer l'acide sulfurique des pores du matériel anodisé.

Pour cela, on plonge pendant quelques minutes le chargement dans une cuve qui contient une solution à 10 g/l de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) pH 8 a 9, à température ambiante.

Ensuite, on rince et on plonge le chargement dans une solution de 5 à 10 g/l d'acétate de cobalt, à pH 6-7 et température ambiante, durant environ 1 à 2 minutes. On rince et on rentre le chargement dans une solution de permanganate de potassium à 10 g/l, pH 6-7, température ambiante pendant environ 1-5 mn.

Le temps d'immersion dans les solutions de cobalt et de permanganate est fonction de l'intensité de la couleur bronze que l'on souhaite obtenir. Si le ton obtenu est trop clair, on peut répéter le cycle avec les mêmes modalités de telle sorte que la dernière immersion soit toujours dans le permanganate de potassium. Pour avoir une bonne coloration bronze, il est nécessaire d'avoir une épaisseur de couche d'au moins 20 microns. La coloration est obtenue par la précipitation des hydroxydes de cobalt et de manganèse a l'intérieur des pores de la couche. La concentration des 2 solutions de cobalt et de permanganate doit être maintenue le plus près possible des valeurs nominales admises.

De cette façon, tout en ayant le désavantage de devoir allonger le temps d'immersion ou de devoir multiplier le nombre de cycles pour obtenir des couleurs foncées, on a les avantages suivants :

- Plus grande facilité à viser correctement une certaine tonalité de couleur
- Réduction du danger de coulures, d'effets de bord ou des différences de couleurs entre une extrémité et l'autre du chargement à cause des temps différents d'immersion. Tout cela est lié à la lenteur du pont roulant, à l'immersion et à l'extraction du chargement du bain de coloration (la partie la plus basse du chargement entre la première et sort en dernier : elle peut donc devenir plus foncée).

Ce type de coloration, à la différence de la coloration électrolytique, est influencé par l'épaisseur de la couche d'oxyde. Des différences importantes à plusieurs endroits du chargement peuvent donner des différences dans les tons des couleurs obtenues.

Au lieu de l'acétate de cobalt, on peut employer le sulfate de cobalt avec des résultats équivalents. Le fait de chauffer les solutions au-dessus de la température ambiante peut réduire les temps de coloration mais ne garantit pas de bons résultats.

De même, l'agitation par air des solutions de cobalt et de permanganate peut causer des défauts en mettant en suspension des précipités dûs à une pollution ou à une décomposition partielle des produits chimiques. Les bains de cobalt et de permanganate, s'ils sont utilisés correctement, ne doivent pas être filtrés et ont une durée de vie importante.

Quant à la tenue de ce type de coloration, tout en reconfirmant qu'elle est fonction de la qualité du colmatage il faut noter que les tons moyens sont normalement plus résistants que les tons foncés.

De toute façon, une grande partie des difficultés qui peuvent se manifester pendant la phase de coloration est le plus souvent explicable par des problèmes d'anodisation (épaisseurs et forme de la couche d'oxyde par rapport aux variables en jeu). La correction éventuelle du pH des 2 solutions de cobalt et de permanganate se fait avec de l'acide acétique ou de l'ammoniaque diluée avec la même méthode utilisée que pour la cuve de coloration or.

Contrôles chimiques

Détermination de l'acétate de cobalt: $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2, \text{H}_2\text{O}$

Réactifs nécessaires

- Indicateur : muréxide (mélanger 99 g de chlorure de sodium finement moulu avec 1 g de muréxide),
- Solution d'EDTA 0,1 N
- Solution d'hydroxyde d'ammonium (NH_4OH concentrée), densité 0.9.

Méthode

Introduire avec une pipette jaugée 10 ml de bain dans un bécher de 400 ml. Diluer avec environ 100 ml d'eau distillée. Ajouter rapidement en agitant 30 ml de NH_4OH et 0.1 g. environ de muréxide. Titrer lentement avec EDTA et 0,1N jusqu'au virage violet pourpre persistant pendant 5 mn. Appeler A les ml d'EDTA 0.1 N utilisés.

Calculs

$$A \times 249 = \text{g/l d'acétate de cobalt}$$

La concentration conseillée est de : 5 à 10 g/l

Détermination du permanganate de potassium

Sa formule chimique est KMnO_4

Réactifs nécessaires

- Solution d'acide oxalique ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0.1 N
- Solution d'acide sulfurique dilué (H_2SO_4) à 50%

Méthode

Prélever avec une pipette jaugée 20 ml d'acide oxalique 0,1 N et les mettre dans un bécher de 250 ml. Diluer avec environ 100 ml d'eau distillée et ajouter 20 ml de H₂SO₄ à 50 %. Réchauffer jusqu'à environ 90°C. Titrer à chaud la solution de permanganate du bain en la faisant couler d'une burette graduée jusqu'à obtenir une légère coloration rose persistante pendant 2-3 mn. Appeler A les ml de permanganate utilisés.

Calculs

63.22 : A g/l de permanganate de potassium

La concentration conseillée est de : 10 g/l

Fréquence des contrôles : 2 fois par semaine

En plus de ces 2 analyses, il faut aussi vérifier le pH des 2 solutions de coloration et celui de la cuve de bicarbonate de sodium. Une valeur approximative peut être obtenue en utilisant des bandelettes indicateur de pH. La valeur exacte se trouve, par contre, en se servant d'un pH mètre préalablement étalonné avec une solution tampon à pH = 7.



Chapitre 10

Nouvelles colorations

Nouvelles colorations

Colorations "mixtes"

Il s'agit de types de colorations qui intéressent de plus en plus de monde, parce qu'elles offrent la possibilité d'élargir la gamme de couleurs qu'on peut obtenir, tout en conservant de bonnes garanties de résistance. La recherche de nouveaux tons chromatiques a toujours été souhaitée par les architectes et a donc attiré l'attention des anodiseurs. Cette "volonté d'innover" est due aussi à la nécessité de pouvoir répondre efficacement, quant à la variété des couleurs, à l'aluminium laqué. Les colorations mixtes s'obtiennent en additionnant, à l'intérieur de la couche d'oxyde, 2 colorations différentes de façon à atteindre, comme effet final, la coloration qui résulte de ces 2 phases. Nous pouvons partager les colorations mixtes en 2 familles :

1. Electrocoloration + Electrocoloration

2. Electrocoloration + Coloration organique

1. Electrocoloration + Electrocoloration

On fait d'abord l'électrocoloration de l'aluminium dans une première cuve avec un bain à base d'étain pendant un temps de 1 à 3 mn. Ensuite, le métal est rincé minutieusement et plongé dans une cuve d'électrocoloration rouge (par exemple, à base de sels de cuivre). En changeant les temps de la première et de la deuxième électrocoloration, on obtient des tons de couleurs très originaux et différents des tons qu'on peut avoir avec chacun des 2 bains (bronze chaud, marron bois, bronze ancien, etc.). Pour exécuter ce type de coloration avec succès, il est indispensable d'avoir une bonne maîtrise du traitement d'électrocoloration et une organisation impeccable pour ce qui est des contrôles chimiques des bains et de la constance des différents paramètres (temps, température, conditions électriques).

L'expérience conseille d'exécuter d'abord, l'électrocoloration bronze parce qu'elle est plus facile à maîtriser.

En changeant les temps de la deuxième phase, on obtient les différents tons.

Le traitement, s'il est bien fait, est très intéressant du point de vue esthétique et satisfaisant au point de vue qualité.

L'investissement nécessaire est plutôt limité du moment qu'avec un seul appareil électrique on peut faire fonctionner alternativement les 2 cuves de coloration.

2. Electrocoloration + coloration organique

Ce traitement se réalise aussi en additionnant 2 colorations successives : la 1ère, obtenue par électrocoloration (bronze ou rouge), la 2ème, en passant dans une cuve qui contient un colorant organique. Ce procédé, dans son ensemble, est nommé, d'habitude, SANDALOR, du nom de la Société qui produit les colorants organiques à grande résistance nécessaires pour ce type de finition. La gamme des couleurs qu'on peut obtenir dans ce cas, est vraiment très vaste (rouge, vert, marron, noir, bleu, etc.). Pour faire quelques exemples, nous pouvons citer le noir profond qu'on obtient dans des temps très courts en colorant électrolytiquement le matériel pendant 4 à 6 mn dans un bain à l'étain et en le plongeant, après l'avoir minutieusement rincé, dans une cuve de noir MLW. Le fond en électrocouleur garantit que le pore de la couche est rempli à partir de son interface avec le métal de base et crée des conditions de pH telles que l'absorption du colorant organique est accélérée et favorisée. On peut avoir une belle coloration verte dans les conditions suivantes :

- a - Electrocoloration dans un bain à base d'étain pendant 2 mn.
- b - Immersion pendant 10 mn dans une solution de colorant organique bleu clair à concentration de 5 g/l et température de 40°C.

Ce traitement, nécessite aussi une certaine maîtrise et "connaissance du métier". Il faut souligner que la coloration en 2 phases additionne les aléas de la première phase à ceux de la deuxième. Ceci permet de se faire une idée de la complexité relative pour avoir un résultat final constant. De toute façon, ces colorations sont un très bon exercice pour l'anodiseur. L'intérêt qu'elles ont soulevé est dû à la possibilité que certains anodiseurs ont de personnaliser les couleurs offertes aux clients, en se démarquant ainsi de la concurrence.



Chapitre 11

Colmatage

Colmatage

Cette opération finale est très importante dans le cycle d'anodisation de l'aluminium.

Un bon colmatage est fondamental pour la bonne qualité du produit fini.

La résistance dans le temps du métal soumis à l'oxydation anodique est fonction de l'efficacité de ce traitement. Un mauvais colmatage débouche inévitablement sur un vieillissement prématuré du métal surtout si celui-ci a subi aussi une coloration.

Théorie du colmatage

Le colmatage se caractérise par la fermeture des pores de la couche d'oxyde qui est, soit hydratée à haute température, soit imprégnée de sels métalliques et hydratée. L'hydratation de la couche transforme l'alumine (Al_2O_3) en pseudo-boémite qui a la formule suivante : $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ avec n compris entre 1,5 et 2,5.

Dans le cas de l'hydratation à chaud, la réaction commence sur la surface de l'oxyde et se développe vers l'intérieur.

Avec l'hydratation, on a une augmentation du volume de l'oxyde qui ferme au fur et à mesure les pores de la couche qui, finalement, devient solidement hermétique. Le cas du colmatage par imprégnation s'appuie sur des réactions chimiques plus complexes.

Les principales conséquences sur les caractéristiques de l'aluminium sont les suivantes :

- disparition de la capacité d'absorption par rapport aux produits colorants, aux huiles, et aux liquides. L'aluminium devient donc insensible aux empreintes digitales et aux différentes tâches.
- augmentation importante de la résistance à la corrosion et aux agents atmosphériques, et donc, au vieillissement.
- augmentation de la résistance électrique de la couche anodique.
- augmentation de la dureté et de la résistance à l'abrasion.

Différents types de colmatage

Le colmatage de la couche d'oxyde peut se faire de différentes façons :

- Colmatage à l'eau bouillante.
- Colmatage à la vapeur saturée.
- Colmatage avec des sels de nickel.
- Colmatage à basse température.

Colmatage à l'eau bouillante

Pour ce traitement, on plonge le métal anodisé dans une cuve d'eau déminéralisée ou distillée, proche de la température d'ébullition.

Les conditions de traitement sont les suivantes :

Cuves

En acier inox AISI 316 avec des serpentins de chauffage sur les parois intérieures ou sur le fond. La capacité de chauffage doit être suffisante pour que l'aluminium soit à la température finale en 10 mn à compter de l'instant de l'immersion.

Température

Elle ne doit pas être inférieure à 96 °C. Il est conseillé de recouvrir la surface des cuves de colmatage à haute température avec une couche de sphères en plastique. Ces sphères jouent le rôle d'un couvercle mobile, réduisent l'évaporation et apportent une économie importante de chaleur. Il faut noter que si la température du bain de colmatage à chaud descend en dessous de 95°C, la vitesse d'hydratation de la couche se réduit fortement et la qualité du traitement devient mauvaise (pouvoir d'absorption et résistance à la corrosion).

Temps

Environ 3 mn par micron de couche et généralement jamais inférieur au temps d'anodisation.

pH

De 5,5 à 6,5. Si le pH descend trop bas, on peut avoir une décoloration partielle de l'aluminium. Des valeurs trop fortes de pH réduisent le rendement d'hydratation des pores. La correction du pH se fait d'abord sur 1 litre de bain refroidi et ensuite sur toute la cuve. Pour l'augmenter, on utilise de l'ammoniaque diluée pour le baisser, de l'acide acétique.

Impuretés dans l'eau

Le colmatage en eau déminéralisée est influencé négativement par toute une série d'ions pouvant se trouver dans la solution. Les limites admises pour chacun d'eux sont les suivantes :

- Phosphates : $(\text{PO}_4)^{3-}$ = 5 mg/l
- Silicates : $(\text{SiO}_3)^{2-}$ = 10 mg/l
- Fluorures : F^- = 5 mg/l
- Cuivre : Cu^{2+} = 10 mg/l
- Fer : Fe^{3+} = 10 mg/l

Tandis que l'effet négatif dû à la présence de métaux est normalement esthétique (tâches) les anions (phosphates, fluorures, silicates) provoquent une complète inhibition du processus d'hydratation et donc de la fermeture des pores, en préjudice de la qualité du résultat. Pour éviter que des impuretés s'accumulent dans la cuve de colmatage à l'eau déminéralisée bouillante, il est conseillé d'adopter les consignes suivantes :

- recyclage en continu de l'eau avec filtration sur des résines échangeuses d'ions.
- utilisation d'eau déminéralisée pour les rajouts.
- nécessite d'un rinçage avant le colmatage dans une cuve avec de l'eau déminéralisée.
- grande attention pour ne pas polluer le bain.

Colmatage à la vapeur saturée

Il s'agit d'une méthode très efficace qui présente certains avantages et quelques désavantages par rapport au colmatage à l'eau bouillante.

Avantages

- le colmatage n'est pas fonction du degré de pureté ni du pH de l'eau.
- l'action d'hydratation est beaucoup plus rapide, du moment que l'on travaille à des températures supérieures à 100 °C.
- tendance réduite à décolorer l'aluminium.

Désavantages

- installation plus coûteuse.
- nécessité de travailler dans des récipients fermés, qui doivent être ouverts uniquement pour introduire et sortir les pièces.

- possibilité de coulures dues à l'eau de condensation, pouvant laisser des tâches surtout sur des tôles colorées.

Les conditions d'utilisations peuvent être les suivantes :

Température : De 100 à 110 °C.

Temps : 3 mn par micron.

Pression : De 1 à 3 atmosphères.

Colmatage avec eau et sels de nickel

On se sert d'une cuve qui contient une solution aqueuse de sels de nickel à haute température, dans laquelle on plonge le chargement.

Dans ces conditions, en plus de l'hydratation des pores, on a une précipitation d'hydroxydes de nickel à l'intérieur de la couche avec une amélioration de sa fermeture. Le sel de nickel le plus utilisé est le sulfate $\text{NiSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$ ou bien $\text{NiSO}_4, 6\text{H}_2\text{O}$ à la concentration de 10 g/l.

Ce sel, tout en donnant de très bons résultats peut décolorer légèrement l'aluminium coloré avec des colorants organiques. Dans ce cas, au lieu du sulfate de nickel, on peut employer :

- l'acétate de nickel : $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO}), 4\text{H}_2\text{O}$ à 5 g/l

- le formiate de nickel : $\text{Ni}(\text{HCOO})_2$ à 5 ou 10 g/l

Le bain de formiate à l'avantage d'être plus stable, de ne pas précipiter ni se troubler. De toute façon, le pH ne doit pas dépasser 5,5 sinon le sel peut s'hydrolyser et se décomposer.

Le grand avantage de tous les colmatages aux sels de nickel est qu'ils ne sont pas influencés dans leur efficacité par certains ions polluants (phosphates, silicates, et fluorures), qui gênent le colmatage à l'eau déminéralisée. Les bains de colmatage au sulfate de nickel ne nécessitent donc pas l'emploi d'eau déminéralisée, et peuvent être préparés même avec de l'eau de puits à condition que la dureté (teneur en sels de calcium et de magnésium) ne dépasse pas 20° Français. Les conditions d'utilisation d'un colmatage au sulfate de nickel sont les suivantes :

Concentration du sel :

10 g/l

Température :

minimum 96 °C

Temps :

3 mn par micron

ph :

de 5,5 à 6,5. Si le pH sort des valeurs conseillées, on peut effectuer les corrections avec de l'ammoniaque diluée ou de l'acide acétique. Cette correction doit d'abord être faite sur un litre de solution refroidie et ensuite sur tout le bain.

Contrôles chimiques

(détermination du taux de sulfate de nickel : $\text{NiSO}_4,7\text{H}_2\text{O}$).

Réactifs nécessaires

- solution d'EDTA 0,1 N.
- solution d'ammoniaque concentrée (NH₄OH), densité 0,9.
- indicateur : muréxide (mélanger 99 g de chlorure de sodium moulu avec 1 g de muréxide).

Méthode

Mettre environ 50 ml d'eau distillée dans un bécher de 100 ml. Ajouter avec une pipette jaugée, 25 ml du bain de colmatage, préalablement refroidi à température ambiante.

Ajouter 30 ml de NH₄OH concentrée pour avoir un pH d'au moins 10 (vérifier avec des bandelettes indicateur de pH). Rajouter environ 1 g d'indicateur. La solution prend une coloration jaune intense. Si la solution prend une couleur orange, rajouter encore de l'ammoniaque (cela signifie que le pH est encore inférieur à 10). Titrer avec une solution d'EDTA 0,1 N jusqu'à la couleur rouge violet. Appeler A les ml EDTA 0,1 N utilisés.

Calculs

$$A \times 1,24 = \text{g/l de NiSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$$

ou bien

$$A \times 0,2348 = \text{g/l de nickel}$$

La concentration doit être de 10 g/l de sulfate de nickel, soit environ 2 g/l de nickel.

Fréquence des contrôles :

2 fois par semaine.

Double colmatage

Procédé récent, maîtrisé industriellement dans les années 80, dont le principe consiste à imprégner la couche d'oxyde par une solution complexe à base, notamment, de fluorures de nickel favorisant les réactions d'hydratation de celle-ci.

Le produit de la réaction est un complexe d'hydroxyfluorure d'alumine dont la formule générale est $Al(OH)_x \times F_y$.

De nombreux essais de vieillissement accélérés ont donné des résultats positifs aux différents tests normalisés.

L'utilisation du seul bain de colmatage par imprégnation nécessite un temps de réaction de 24 heures minimum avant de procéder aux tests de contrôle d'où, l'utilisation d'un deuxième bain, dit accélérateur de réaction, permettant un séchage rapide des surfaces traitées et un contrôlés de qualité immédiat.

Les conditions d'utilisation sont les suivantes

Précolmatage par imprégnation

- Température : 20 à 30 °C.
- Temps d'immersion : 0,5 à 1 mn par micron.
- pH : 6 +/- 0.5.

Accélérateur de réaction

- Température : 70 à 80 °C
- Temps d'immersion : 10 mn si $e < 20$ microns et 0.5 mn par micron si $e > 20$ microns (e = épaisseur de la couche d'oxyde).
- pH : de 5,8 à 6,2.

Les avantages de ce procédé par rapport au colmatage traditionnel sont :

- Réduction des temps.
- Température plus basse.
- Absence de vapeurs d'eau dans l'atelier.
- Très bonne tenue au vieillissement.

Les contraintes

- nécessité de disposer au niveau du laboratoire d'un matériel adapté au dosage des fluorures.
- manipulations supplémentaires des charges.

Poudre de colmatage

Il s'agit d'un effet involontaire, lié au colmatage à haute température. Il se présente sous la forme d'une couche poudreuse mince qui reste invisible jusqu'à ce que l'aluminium soit sec. Aux Etats-Unis et au Canada on l'appelle "poudre de craie". En France on a l'habitude de l'appeler "poudrage". Ce phénomène ne doit pas être confondu avec le "farinage" qui apparaît sur l'aluminium mal colmaté, après quelques

mois d'exposition. La poudre de colmatage est une forme d'oxyde hydraté qui se répand sur la partie extérieure des pores.

Elle ne dépasse pas 1 ou 2 % en poids de la couche avec laquelle elle fait corps unique. On pense qu'il s'agit tout simplement d'une forme d'oxyde différente. L'aspect positif de la formation de la poudre de colmatage est qu'elle n'apparaît jamais si le colmatage n'est pas bien fait et donc, elle est une garantie de bon colmatage. Par contre, la mauvaise présentation qu'elle provoque sur l'aluminium fait rechercher des solutions pour en empêcher la formation.

On peut la faire disparaître manuellement en frottant le métal avec un abrasif fin (oxyde de magnésium, alumine, poudre de pierre ponce).

Parfois, la poudre de colmatage est éliminée en immergeant le chargement dans de l'acide nitrique à température ambiante pendant environ 10 mn. De toute façon, toutes ces solutions sont très délicates parce qu'on pourrait arriver à endommager la couche et donc à rendre douteuse la qualité du traitement.

Il faut veiller à ce que le remède ne soit pas pire que le mal, surtout, si l'on utilise l'immersion dans l'acide nitrique.

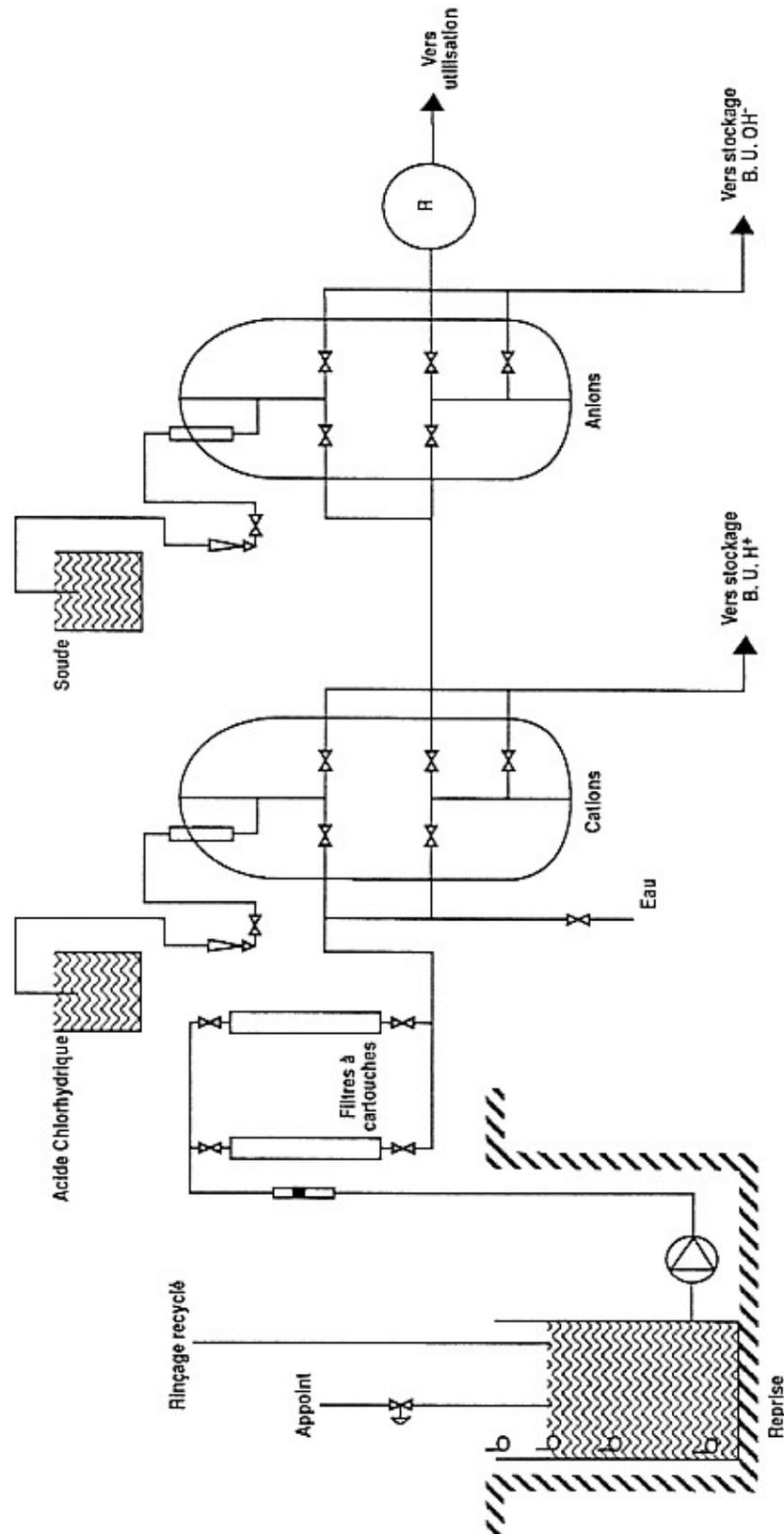
Des additifs peuvent être utilisés avec beaucoup de précaution, pour atteindre ce but : Ce sont des sels de sodium polycarboxyliques qui sont utilisés comme additifs dans l'eau déminéralisée ou comme prétraitement dans une cuve avant le colmatage à la vapeur (10 mn à 5 ou 10 g/l et 60 à 85 °C).

Il existe des additifs "spécifiques" dont la fonction est de limiter l'apparition du poudrage. Ces additifs doivent être utilisés avec précaution car un défaut ou un excès peuvent être nuisibles au bon fonctionnement du bain (diminution des performances du colmatage).

Il faut noter que les méthodes de colmatage à basse température ne provoquent pas de formation de poudre.



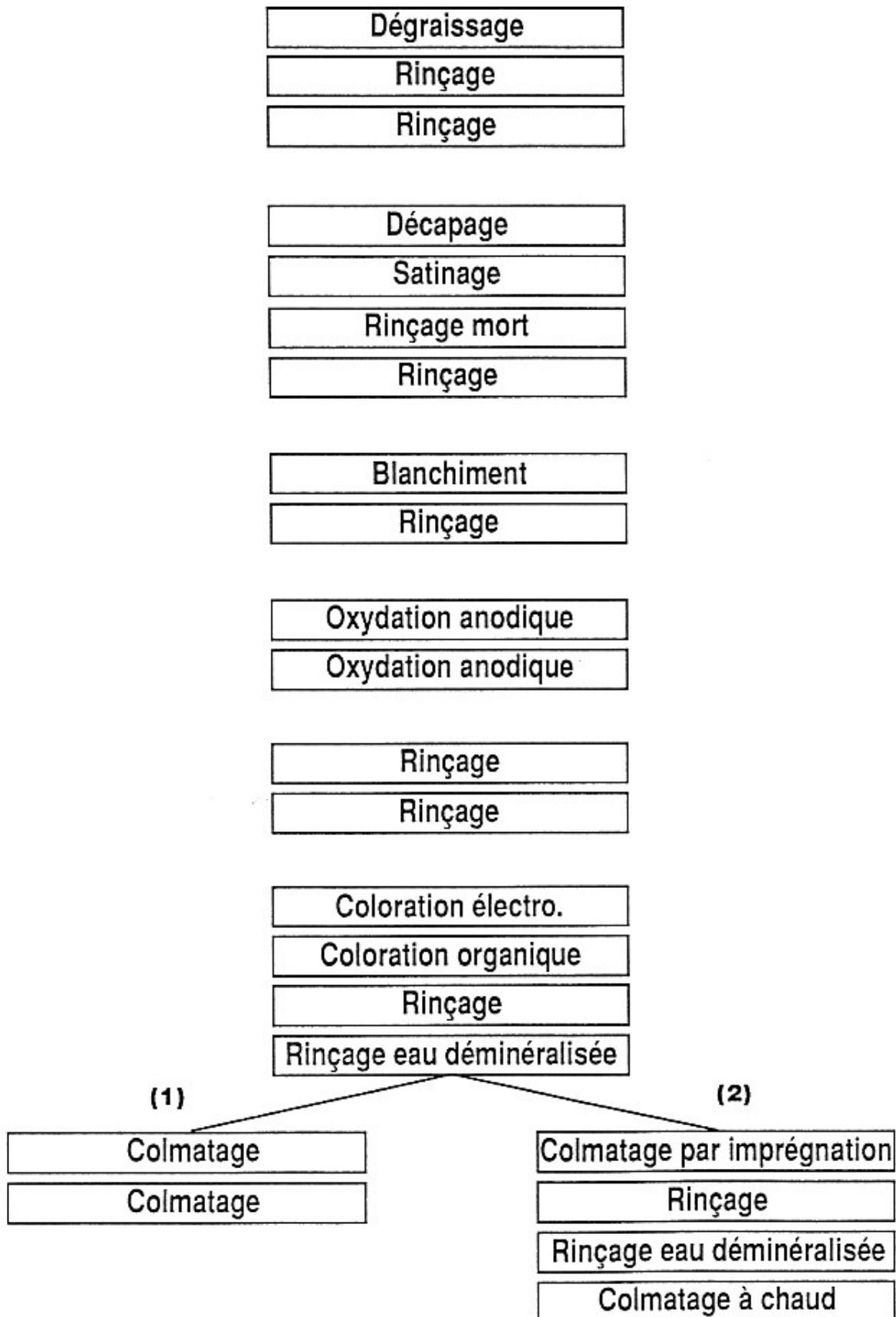
Déminéralisation - Recyclage schéma de principe



Chapitre 12

**Schéma d'une
installation d'anodisation**

Schéma d'une installation d'anodisation



Chapitre 13

**L'eau dans les
Installations d'anodisation**

L'eau dans les installations d'anodisation

L'eau est un élément important dans les installations d'oxydation anodique de l'aluminium. C'est sûrement le produit le plus employé ; sa quantité et sa qualité sont essentiels à la bonne marche de tous traitements.

Le type d'eau utilisée dans les installations d'anodisation peut être de 4 sortes :

- eau de puits,
- eau de rivière,
- eau potable (de ville),
- eau déminéralisée ou distillée.

Elle est employée dans les phase suivantes du process :

1. Alimentation des rinçages,
2. Préparation des solutions de traitement,
3. Alimentation des chaudières,
4. Refroidissement des machines.

Alimentation des rinçages

Un rinçage méticuleux de l'aluminium entre chaque traitement est indispensable pour le bon déroulement du process. En effet, il est très important d'empêcher que les produits se trouvant dans une cuve

aillent dans les cuves proches, en les polluant. Les caractéristiques spécifiques à certains produits chimiques les rendent incompatibles avec d'autres (par exemple, acide nitrique dans la cuve de coloration électrolytique, acide sulfurique dans le colmatage, sulfate d'étain dans le permanganate, etc.). De la même façon, un faible entraînement dû à un chargement mal égoutté, qui se déplace au-dessus des différentes cuves, peut donner dans le temps de graves problèmes qui nécessiteront de recomposer totalement les bains pollués.

Une grande partie des défauts visibles sur du matériel anodisé est souvent due à des rinçages mal faits. Il va de soi que pour pouvoir faire des rinçages efficaces, il faudrait pouvoir disposer d'une bonne eau dans la quantité voulue. Malheureusement, il faut penser aux économies des consommations de cet élément. Les raisons de ce rationnement sont :

- Diminution des ressources hydrogéologiques souterraines,
- Coût de pompage, d'épuration et de rejets.

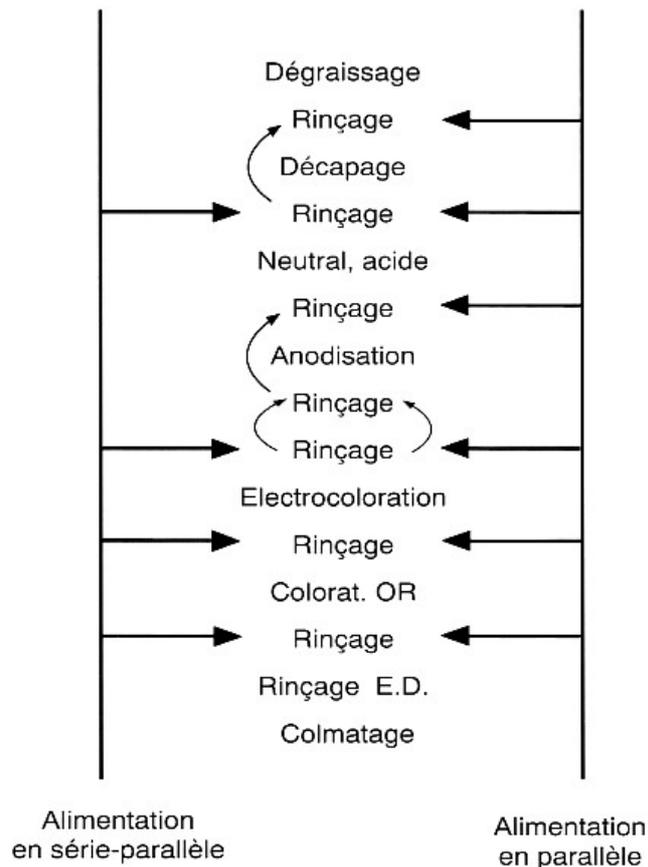
Pour cela, une norme impose une consommation normale de 81/m² et par rinçage.

La tendance future est d'utiliser, d'une façon toujours plus rationnelle et complète, les ressources en eau disponibles, en prévoyant son épuration et un recyclage partiel. Comme exemple, nous avons schématisé, dans la suite, 2 systèmes d'alimentation des cuves de rinçage dans une installation d'anodisation standard, comprenant l'électrocoloration et la coloration Or. Nous pouvons respectivement appeler les 2 schémas :

1. Alimentation d'eau en parallèle
2. Alimentation d'eau en série-parallèle

La solution "série-parallèle" est aujourd'hui préférable, même économiquement, parce qu'elle offre les avantages suivants :

- Réduction de la consommation d'eau (dans certains cas supérieure à 50 %),
- Dimensions plus réduites de l'installation d'épuration, à cause du volume d'eau à traiter inférieur,
- Meilleur rendement de l'épurateur à cause de la plus grande charge de pollution spécifique dans l'eau.



Pour réduire les consommations d'eau, on peut adopter des rinçages cascades associés à une aspersion finale en eau propre.

Préparation des solutions de traitement

Dans la préparation des différents bains, il serait souhaitable d'utiliser de l'eau déminéralisée ou bien de l'eau ayant un TH de 30° français maximum. Une eau "acceptable" pour les traitements anodiques devrait avoir la composition maximum suivante :

- SiO ₂ (silicates) :	5 mg/l
- H ₂ CO ₃ ⁻ (bicarbonates) :	75 mg/l
- Cl ⁻ (chlorures) :	40 mg/l
- F ⁻ (fluorures) :	3 mg/l
- (PO ₄) ³⁻ (phosphates) :	10 mg/l
- (SO ₄) ²⁻ (sulfates) :	75 mg/l
- S ²⁻ (sulfures) :	10 mg/l
- pH :	5,5 à 8,5

Naturellement, les bains de traitement sont sensibles à des impuretés différentes. Les bains d'anodisation sont très sensibles aux chlorures et au fer. Les colmatages sont gênés par les phosphates, les fluorures et les silicates. Les bains de coloration et les bains de colmatage doivent être préparés avec de l'eau déminéralisée.

Alimentation des chaudières

L'eau qui alimente les chaudières doit, elle aussi, être traitée pour en baisser la dureté, par adoucissement, à environ 10° français.

Un taux élevé en sels de calcium et de magnésium, (dureté de l'eau) donne des incrustations qui se déposent sur les échangeurs de chaleur et sur les parois intérieures de la chaudière en réduisant,

d'une façon, appréciable, le rendement de l'échange thermique. Un adoucissement trop poussé peut être dangereux par la forte alcalinité que l'eau pourrait atteindre ; son agressivité chimique envers la chaudière et les échangeurs en serait accrue, si l'on considère la haute température à laquelle on travaille. De la même façon, un taux élevé en sels de fer et de manganèse endommage la chaudière rapidement (dans ce cas, l'eau devrait d'abord être traitée).

Refroidissement des machines

Pour le refroidissement de certaines machines (redresseurs, installations frigorifiques, cylindres pneumatiques, etc...), ou des bains d'oxydation, on peut utiliser une eau qui sera ensuite envoyée dans le circuit de rinçage.

Quantité d'eau

La quantité d'eau nécessaire dans les installations d'anodisation, ayant les rinçages en série-parallèle et le refroidissement des cuves d'anodisation par groupes frigorifiques, peut s'estimer à environ $0,6 \text{ m}^3/\text{heure}$ (10 l/mm) par 1000 ampères d'anodisation installés.

Détermination de la dureté totale de l'eau

La dureté de l'eau est donnée par le taux en sels de calcium et magnésium s'y trouvant. Elle s'exprime d'habitude en degrés français (°F) ce qui correspondent aux mg/l de CaCO_3 présents dans 100 ml d'eau.

Réactifs nécessaires

- Solution d'EDTA 0.01 N
- Solution d'ammoniaque concentrée (NH_4OH), densité 0,9
- Comprimé indicateur-tampon

Méthode

Prélever avec une pipette jaugée 100 ml d'eau à analyser et les mettre dans un bécher de 250 ml. Ajouter 20 ml de NH_4OH concentrée et un comprimé d'indicateur-tampon après l'avoir mis en miettes et mélangé avec un agitateur en verre. Titrer avec la solution d'EDTA 0,01N jusqu'au virage du rouge violet au vert.

Calculs

Les ml d'EDTA 0.01N utilisés correspondent aux degrés français de dureté de l'eau. Par exemple, si l'on a utilisé 21,4 ml d'EDTA, l'eau aura une dureté de 21,4 degrés français.



Chapitre 14

**L'épuration des eaux de rejet
et des vapeurs**

L'épuration des eaux de rejet et des vapeurs

Epuraton des eaux

Les effluents en provenance des installations d'anodisation contiennent des éléments en concentration supérieure aux normes administratives, et ne peuvent donc pas être rejetés avant d'avoir subi un traitement d'épuration conforme. Le procédé ne présente pas de difficulté, se résumant à une neutralisation des effluents avec précipitation et séparation des matières polluantes.

A ce jour les principaux systèmes d'épuration sont les suivants :

- Epuration physico-chimique par décantation.
- Epuration chimique avec des résines échangeurs d'ions.

Seul le premier système est utilisé.

L'installation d'épuration physico-chimique par décantation est représentée dans ces éléments essentiels dans la figure N°1, en annexe à cette fiche.

Description du procédé

L'eau venant des rinçage est emmagasinée dans une cuve expressément prévue. A partir de cette cuve, elle est envoyée avec les solutions acides et alcalines mortes avec un dosage opportun dans la cuve de neutralisation où sous le contrôle d'une sonde de mesure, on a l'ajustement du pH avec ajout automatique de soude caustique ou d'acide sulfurique depuis leur réservoir de stockage. On utilise pour cela des vannes pneumatiques à membrane. L'eau neutralisée passe ensuite dans une cuve de floculation où l'on fait le dosage et le mélange du poly-électrolyte provoquant la floculation et la précipitation des impuretés.

La solution de poly-électrolyte nécessaire est envoyée avec une pompe doseuse à une concentration faible.

Ensuite la solution est envoyée dans une cuve de décantation dans laquelle les matières solides se déposent sur le fond et où l'eau épurée ressort par trop-pleins. L'eau épurée peut être rejetée ou partiellement recyclée en l'état au niveau de certains rinçages (un recyclage de 50 % de l'eau épurée est déjà un bon résultat) ou encore subir une dernière filtration dans un filtre à sable et charbon actif. La boue se trouvant sur le fond de la cuve de décantation est envoyée dans un filtre-presse ou dans un filtre-centrifuge pour la séparation de la partie solide et de la solution qui reprend le cycle d'épuration.

Quelques données

- La boue s'accumulant sur le fond de la cuve de décantation a un taux de matières solides allant de 1 à 3 % (97-99 % d'eau).
- Le filtre-presse réduit la quantité d'humidité à 70 %.
- La quantité de boues pressées produite dans une installation d'anodisation peut varier dans des limites très importantes et

est surtout fonction de la quantité d'aluminium satiné chimiquement (le satinage chimique, avec le décapage, constitue le traitement dissolvant la plus grande quantité d'aluminium). A titre d'exemple, on peut estimer que l'on obtient environ $1,5 \text{ kg/m}^2$ de boues pressées. Les boues, ayant un taux d'aluminium supérieur à 30 g/l, sont utilisés par les usines de produits chimiques, pour produire du sulfate d'aluminium. Ces boues sont presque neutres, non toxiques et passent sans difficulté les tests de cession par lavage.

Le séchage des boues, s'il est possible, réduit de façon importante leur poids et leur volume et augmente la teneur en aluminium.

De cette façon, le transport dans une éventuelle décharge est moins coûteux et la récupération des boues pour la production de sulfate d'aluminium est économiquement plus valable.

Conseils pour le bon fonctionnement de l'installation

- Nettoyage journalier de la sonde de pH se trouvant dans la cuve de neutralisation,
- Vérification des niveaux des réactifs dans les cuves de stockage pour éviter de rester sans produits,
- Préparation de la solution de poly-électrolyte,
- Vider, tous les jours, les boues du filtre- presse pour éviter leur accumulation,
- Effectuer le contre-lavage du filtre à sable et charbon actif dès que le tableau de commande en signale la nécessité,
- Étalonner périodiquement, au moins une fois par semaine, la sonde de pH,
- Effectuer périodiquement l'analyse des eaux de rejet (pH, M.E.S, aluminium, sulfates...).

Les eaux de rejet doivent rentrer dans les limites prévues par le tableau A de l'arrêté ministériel du 26 septembre 1985.

Nous reportons, ci-dessous, les limites prévues par cette norme concernant les paramètres et les produits pouvant se trouver dans une installation d'oxydation anodique de l'aluminium.

Tableau A : Arrêté du 26 septembre 1985

pH	: 6,5 à 9
Matières en suspension	: 30 mg/l
DB05	: 40 mg/l
DCO	: 150 mg/l
Aluminium	: 5 mg/l
Manganèse	: 5 mg/l
Nickel	: 5 mg/l
Fer	: 5 mg/l
Etain	: 2 mg/l
Sulfates	: 250 mg/l
Métaux totaux	: 15 mg/l

Pour des informations plus précises, il est nécessaire de consulter le texte de la loi et, en particulier, les arrêtés préfectoraux qui, dans certains cas, sont plus restrictifs que cet arrêté.

Épuration des vapeurs

Dans les installations d'anodisation de l'aluminium, pour que les lieux de travail restent salubres, il est indispensable d'adapter sur les cuves produisant des émanations nocives, des systèmes d'aspiration réduisant la diffusion des gaz polluants dans l'atmosphère.

Les principaux types de vapeurs que l'on retrouve sont :

- vapeurs d'hydroxyde de sodium au-dessus des cuves de traitement alcalin à chaud (décapage et satinage chimique),
- vapeurs acides sur les cuves d'anodisation,
- vapeurs d'eau sur les cuves de colmatage à chaud.

Pour atteindre des conditions optimales, il est nécessaire d'installer aussi, sur la toiture de l'atelier de traitement, des extracteurs assurant un échange d'air correct. L'installation de l'aspiration se compose des éléments suivants :

- bouches d'aspiration sur les bords des cuves,
- gaines en matériel adéquat,
- aspirateurs centrifuges adaptés au type de vapeurs à aspirer,
- appareils de soufflage d'air dans les cuves pourvues de systèmes push-pull,
- connections avec les tours de lavage.

L'installation de traitement des vapeurs est représentée dans ces éléments essentiels dans la figure N° 2 en annexe à cette fiche.

L'épuration des gaz nocifs en provenance des cuves de traitement se fait dans les tours de lavage.

L'épuration se fait en milieu humide à travers une masse filtrante formée par des anneaux spéciaux en matériel anti-acide. Avec ce système, on obtient un lavage égal à environ 95 % et l'air envoyé à l'extérieur ne donne pas de pollution atmosphérique.

La tour de lavage se compose d'une structure extérieure autoporteuse faite en PVC. A l'intérieur et sur la cuve qui contient la solution de lavage, sur des plateaux grillagés, se trouve la masse filtrante avec une ou plusieurs séries de diffuseurs du liquide de lavage. Un séparateur de gouttes qui a aussi fonction de filtre se trouve sur le plateau grillagé supérieur. Une pompe spéciale fait circuler la solution de lavage en permanence.

Pour abattre des vapeurs alcalines, utiliser de l'eau de réseau est suffisant. Pour abattre et neutraliser des vapeurs acides, on utilise une solution d'eau et soude. Le dosage de la soude est réglé automatiquement par pH-mètre.

Les solutions de lavage mortes sont déchargées périodiquement (environ 1 fois par semaine, en fonction de leur conductibilité spécifique) et envoyées dans l'installation d'épuration.



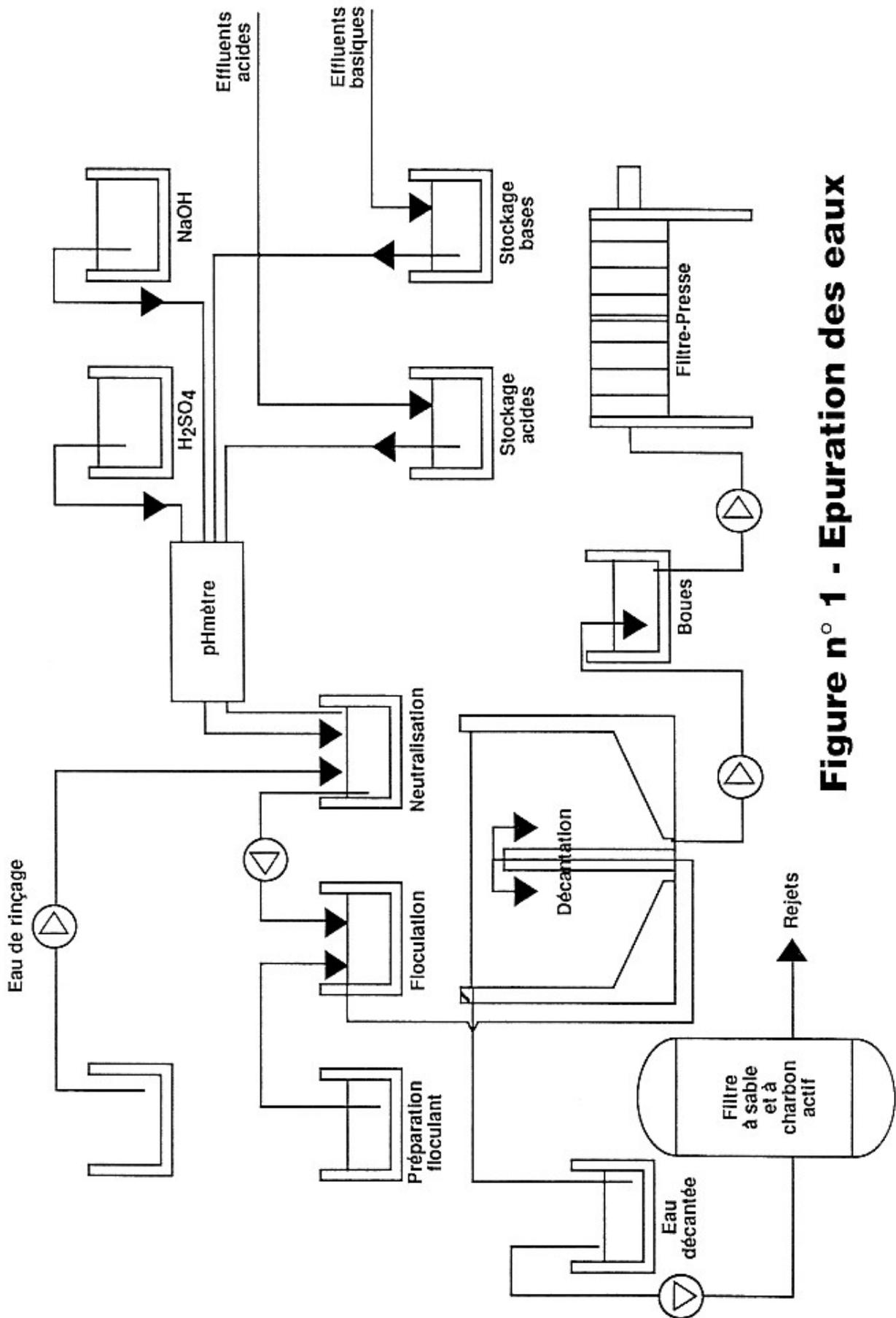


Figure n° 1 - Epuraton des eaux

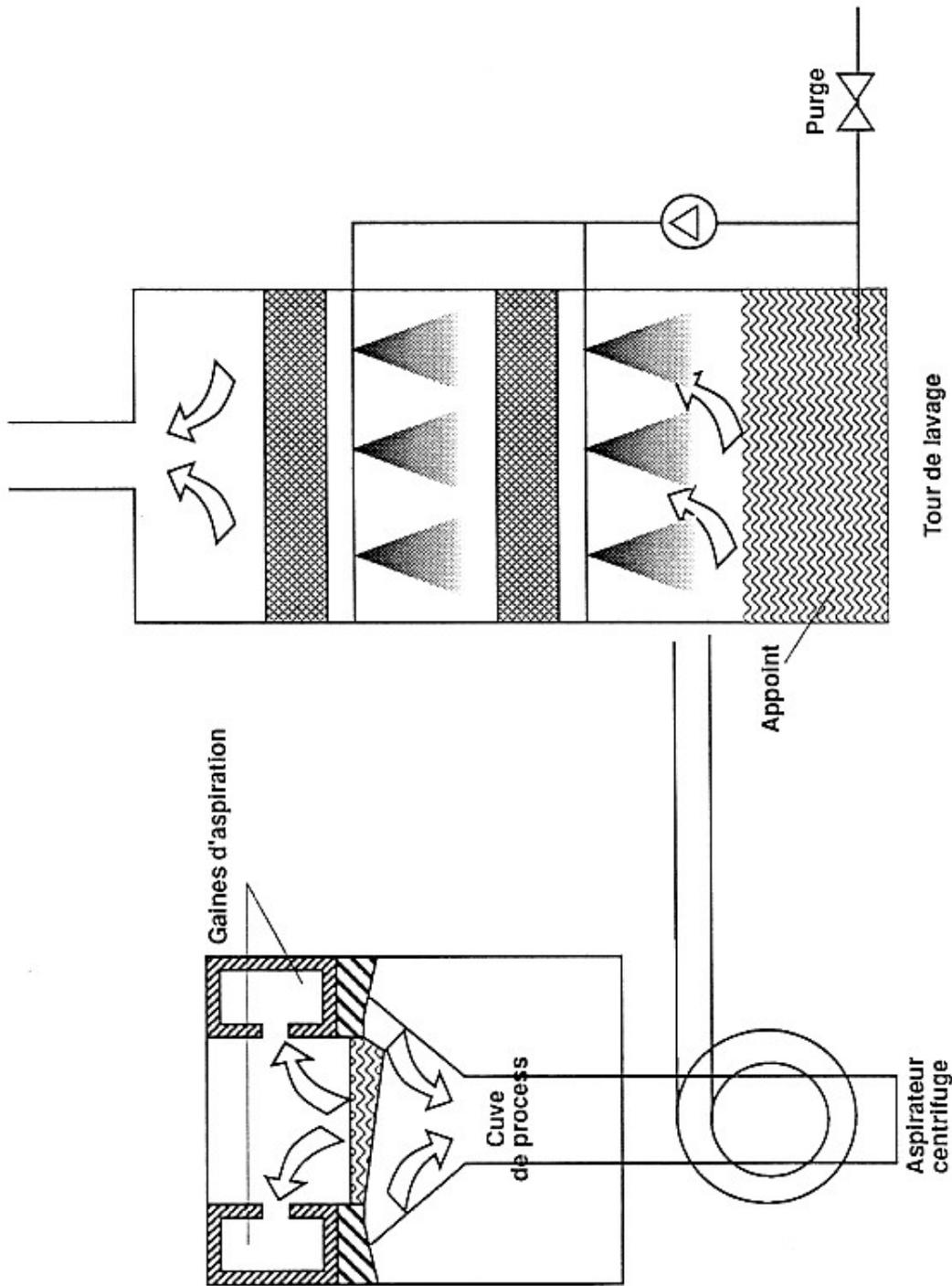


Figure n° 2 - Epuration des vapeurs

Chapitre 15

**Consommation énergétique
d'une installation d'anodisation**

Consommation énergétique d'une installation d'anodisation

1. Introduction

Depuis plusieurs années le poste "énergie", en raison des prix très élevés désormais atteints par n'importe quelle source énergétique, intervient de façon importante dans les bilans de toute Société.

Ce poste est d'autant plus important dans les installations d'oxydation anodique, que ces installations nécessitent de grandes quantités d'énergie électrique ou thermique pour les différents process électrochimiques pour chauffer et maintenir les bains à leur température d'utilisation, et pour le fonctionnement des machines (dont la consommation peut atteindre 25 à 30 % de la consommation totale d'énergie électrique).

Afin de connaître la répartition des consommations des diverses formes d'énergie, ce chapitre détaille les différentes méthodes qui permettent de calculer les consommations d'électricité et d'énergie thermique de ces installations en faisant abstraction des consommations des machines.

Le lecteur trouvera ensuite, un exemple de calcul sur un atelier type pour évaluer l'importance des déperditions.

2. Répartition des consommations d'énergie d'un atelier

Les ateliers d'oxydation nécessitent 3 formes d'énergie différentes :

ÉLECTRIQUE - FRIGORIFIQUE - THERMIQUE

Chaque phase de traitement nécessite, pour son bon fonctionnement, qu'il y ait une ou plusieurs de ces énergies.

Examinons dans le détail quelle en est leur répartition.

a) Énergie électrique

Pour cette énergie, il faut faire une distinction entre la partie nécessaire aux process électro-chimiques et celle qui sert pour le fonctionnement des machines ; dans ce chapitre, nous envisagerons uniquement le besoin d'énergie électrique lié au process électro-chimique.

Les phases durant lesquelles l'énergie électrique est indispensable sont :

L'oxydation anodique et l'électro-coloration.

La quantité d'énergie demandée par ces 2 bains est très différente :

- Le premier travaille en courant continu avec une tension de 12 à 20 volts, une densité de courant de 120 à 200 ampères/m² et pendant des temps qui varient jusqu'à un maximum de 55 minutes ; l'énergie moyenne dissipée est de 2 500 Wh/m².
- Le 2ème bain travaille avec une tension qui peut atteindre 25 volts suivant l'intensité de la couleur, une densité de courant initiale de 70 à 100 ampères/ m² qui descend très vite

à environ 20 à 30 ampères/m² et pendant des temps qui varient, toujours en fonction de l'intensité de la couleur, jusqu'à un maximum de 15 à 20 minutes.

L'énergie dissipée peut atteindre au maximum 300 Wh/m².

A ces consommations dues au process, il faut ajouter les pertes du redresseur et du transformateur qui ont des rendements moyens respectifs de 0,87 et 0,97.

Le total des consommations devient ainsi d'environ 3300 Wh/m².

A cela, il faut encore ajouter l'énergie électrique utilisée par le groupe frigorifique (égale à environ 40 % de l'énergie utilisée par le bain d'anodisation), et celle consommée par les différents systèmes d'extraction des vapeurs (égale à environ 50 % de l'énergie des bains d'oxydation).

En résumé, l'énergie électrique consommée durant la phase d'oxydation est égale à environ 5700 Wh/m².

b) Énergie thermique

Cette forme d'énergie est nécessaire à tous les bains travaillant à une température supérieure à la température ambiante.

Le besoin énergétique est lié à la nécessité d'amener les bains à la température de travail et de compenser les pertes de chaleur à travers les différentes surfaces de la cuve. Dans l'annexe A on peut trouver les méthodes utilisées pour calculer ces déperditions.

Les bains pour lesquels il est nécessaire de fournir de l'énergie thermique sont les bains de : DÉGRAISSAGE - DECAPAGE - SATINAGE - COLORATION et COLMATGE.

c) Energie frigorifique

Dans les ateliers d'oxydation, cette énergie est nécessaire pour les bains d'anodisation ; Il est impératif d'empêcher une augmentation trop importante de la température qui nuirait à la qualité de la couche d'oxyde.

Cette augmentation est principalement due à l'énergie dissipée par effet Joule (égale à environ 2500 Wh/m²) en négligeant la part d'énergie transformée en énergie chimique.

Il faut aussi ajouter la chaleur de formation de l'oxyde d'aluminium égale à environ 3,92 kcal/ g d'oxyde formé, c'est-à-dire environ 10 kcal/microns/m².

Dans l'hypothèse d'un temps de traitement de 55 minutes, cette chaleur correspond approximativement à 300 Wh/m², c'est-à-dire 12 % de l'énergie dissipée par l'effet Joule.

Les recommandations EWAA/EURAS donnent la formule suivante pour calculer l'énergie thermique à éliminer :

$$0,86 \times \text{ampères} \times (\text{Volts} + 3) = \text{kcal/h. } (^1)$$

Pour thermostatier le bain, il est donc nécessaire d'avoir un système de réfrigération capable d'enlever cette énergie thermique en excès.

Cette installation est composée d'un échangeur de chaleur qui peut être à l'intérieur ou à l'extérieur du bain, dans lequel le fluide de réfrigération est normalement de l'eau éventuellement pompée dans des puits, à condition que la quantité et la température soient conforme au besoin.

Pour avoir une idée des débits nécessaires, nous avons noté dans le tableau n° 1 quelques valeurs avec pour hypothèse de l'eau à une

température d'entrée qui varie entre 11 et 14 °C et une température de sortie d'environ 16 °C.

Sur ce tableau, on peut voir qu'il est nécessaire de disposer de quantités d'eau très importantes et que de petites variations dans la température d'entrée peuvent provoquer une augmentation importante du débit.

Par exemple, si la température d'entrée de l'eau varie de 11 à 13 °C le débit nécessaire augmente de 67 %. Il est donc conseillé de se servir d'un groupe frigorifique. Il en existe de plusieurs types :

Par exemple :

- avec condensation par air
- avec condensation par eau...

Ce dernier modelé nécessite beaucoup d'eau pour condenser le fluide du circuit frigorifique (normalement du fréon). En effet, les calories à éliminer proviennent à la fois du bain d'oxydation et du cycle de compression.

Un débit d'eau important n'est pas nécessaire dans le modèle avec condensation par air, puisque le refroidissement s'obtient par une circulation forcée d'air provenant de l'extérieur. Ce type de "frigo" doit être capable de fonctionner avec des températures ambiantes pouvant atteindre 40 °C pour éviter que son rendement soit trop bas pendant la période d'été.

Par contre, dans les bains d'électro-coloration, il n'est pas nécessaire d'avoir des systèmes de réfrigération compte tenu des valeurs très petites des puissances mises en jeu.

3. Consommation dans un atelier d'oxydation type

Pour calculer les consommations d'énergie, nous avons imaginé un atelier type d'oxydation, pour architecture, avec 2 cuves d'anodisation de 8000 ampères chacune, et avec les caractéristiques indiquées ci-après :

Caractéristiques de l'installation

CUVE DE	DIMENSIONS INTÉRIEURES	DIMENSIONS EXTÉRIEURES	TEMPÉRATURES DE FONCTIONNEMENT
DÉGRAISSAGE	8000x1000x 2100 h mm	8240x1240x 2250 h mm	50 - 65 °C
DÉCAPAGE	“	“	50 - 65 °C
SATINAGE	“	“	55 - 70 °C
NEUTRALISATION	“	“	ambiante
ANODISATION	8000x1400x 2100 h mm	8240x1640x 2250 h mm	20 °C
ELECTRO-COLORATION	8000x1000x 2100 h mm	8240x1240x 2250 h mm	ambiante
COLORATION ORGANIQUE	“	“	40 °C
COLMATAGE (2 cuves)	“	“	99 °C

La production moyenne de l'atelier est d'environ 465 kg de profils. anodisés/heure, répartie en 3 charges de 155 kgs chacune avec une surface traitée de 51 m².

Examinons la répartition du besoin en énergie thermique et frigorifique

a) Énergie thermique

Les formules et les diagrammes de l'annexe A nous permettent de calculer les calories totales qu'il faut fournir pour atteindre les températures de travail et pour thermostatier les bains.

Dans les tableaux 2 et 3, nous avons résumé les résultats obtenus. Ceux-ci ne prennent pas en compte, par manque de données, les calories développées dans la réaction de décapage et de satinage entre l'hydroxyde de sodium et l'aluminium.

Dans le bain de décapage, en supposant que la chaleur de la réaction soit suffisante pour chauffer le bain, le résultat final peut varier d'environ 10 %.

Dans le bain de satinage, la réaction étant fortement exothermique, le bain est refroidi par circulation d'eau.

Du tableau 3 nous pouvons ressortir une donnée très importante : en isolant thermiquement toutes les surfaces d'échange, et surtout la surface à l'air libre, l'économie d'énergie est très importante: la puissance thermique consommée passe d'environ 619 000 à 190 000 kcal/heure soit une économie de 429 000 kcal/ h ce qui correspond à environ 51 kg/h de fuel (avec un pouvoir calorifique inférieur de 9500 kcal/kg et un rendement de la chaudière égal 0,88).

Pour une journée de travail de 16 h ces économies peuvent donc atteindre 816 kg de gasoil.

La consommation la plus importante d'énergie thermique est due aux bains de colmatage du fait de leur température de fonctionnement (96°C).

En pourcentage, l'énergie consommée par ces bains est d'environ 70 % tandis que les autres bains demandent respectivement :

DEGRAISSAGE = 16 %,

DECAPAGE = 10 %,

COLORATION = 4 %

Les valeurs qui se trouvent dans le tableau 2 sont nécessaires pour connaître la puissance de la chaudière à installer.

Pour dimensionner une installation, il faut surtout prendre en compte les calories nécessaires pour monter les bains à la température de fonctionnement : dans l'hypothèse d'un temps de chauffe de 7 h, ces calories sont égales à environ 9 000 kcal/h.

Les anciennes normes QUALANOD imposaient une puissance de la chaudière telle qu'on pouvait atteindre la température d'utilisation du bain de colmatage dans un maximum de 3 h, tandis qu'actuellement, ces normes exigent qu'après l'immersion de chargements complets le bain puisse atteindre les 96 °C en moins de 10 minutes. Il est facile de noter que pour des chargements ayant un poids d'environ 155 kgs la variation de température dans le bain de colmatage est d'environ 0,2°C.

Les tableaux 2 et 3 permettent aussi de voir que la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer les bains à leur température d'utilisation est bien supérieure à la chaleur nécessaire pour le maintien de cette température.

Puisque les temps de mise en route absorbent des quantités d'énergie thermique très importantes, il est nécessaire de gérer de façon optimale le cycle de travail en essayant d'utiliser le plus continuellement possible les cuves qui travaillent à des températures supérieures à la température ambiante.

b) Energie frigorifique

Dans l'atelier pris comme exemple, les calories développées dans les 2 cuves d'anodisation par effet Joule sont d'après la formule (1) d'environ 350 000 kcal/h. A cela il faut ajouter ou soustraire, en fonction de la température ambiante, les calories échangées avec l'extérieur ; normalement cette quantité est négligeable en considérant que le bain d'anodisation travail à 20 °C.

N.B. On ne tient pas compte de l'énergie frigorifique nécessaire pour refroidir le bains de satinage.

c) Énergie électrique

Les hypothèses que nous avons retenues donnent une consommation de 1 100 kWh/h.

4. Bilan

Nous pouvons résumer les observations précédentes en disant que dans un atelier d'oxydation pour maintenir les bains à leur température de fonctionnement, il faut fournir au minimum environ 190 000 kcal/h et au maximum environ 619 000 kcal/h, tandis qu'il faut éliminer des bains d'oxydation au maximum 350 000 kcal/h.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons calculé la répartition des besoins énergétiques dans un atelier d'oxydation type.

Nous avons examiné les différentes formes de déperditions thermiques que l'on trouve dans une cuve de process travaillant à une température supérieure à la température ambiante, et nous avons utilisé les résultats pour évaluer les déperditions totales d'un atelier d'oxydation.

Ces résultats ont fait ressortir qu'il est possible d'avoir une économie d'énergie très importante simplement en isolant thermiquement toutes les surfaces de la cuve ; il paraît surtout indispensable d'isoler thermiquement la surface libre des bains ayant une température proche de l'ébullition (colmatage).

Nous avons aussi mis en évidence la possibilité d'utiliser la chaleur enlevée des bains d'oxydation pour réchauffer les bains ayant une température de travail très élevée, par l'utilisation de pompes à chaleur.

Tableau 1

Débit d'eau nécessaire en fonction de la température d'entrée, pour le refroidissement du bain d'anodisation

Ampères installés	Calories à extraire (1) (kcal/h)	Débit d'eau nécessaire pour le refroidissement du bain d'anodisation suivant la température d'entrée (2)			
		11 °C (1/h)	12 °C (1/h)	13 °C (1/h)	14 °C (1/h)
1000	16150	3200	4000	5400	8100
2000	32300	6500	8100	10800	16200
3000	48450	9700	12100	16200	24200
4000	64600	13000	16200	21500	32300
5000	80750	16200	20200	27000	40400
6000	96900	19400	24200	32300	48450
7000	113000	22600	28300	37700	56500
8000	129200	25800	32300	43100	64600
9000	145350	29100	36300	48500	72700
10000	161500	32500	40400	53800	80800

1. Calcul d'après la formule EURAS :

$$Q = 0,86 (V+3)A \text{ en Kcal/h}$$

On a supposé que la tension d'anodisation est de 17 V.

2. En supposant que l'eau ait une température de sortie de 16 °C.

Tableau 2

Calories à fournir pour monter les bains à leur température de fonctionnement (pour les formules, voir ANNEXE A partie a).

	DEGRAISSAGE	DECAPAGE	COLORATION ORGANIQUE	COLMATAGE (2 CUVES)	ELECTRO-COLORATION	TOTAL
Températures	80°C	65°C	40°C	99°C	22°C	
ΔT	65°C	50°C	25°C	84°C	7°C	
Volume du bain (m ³)	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	
Masse de la charpente (kg)	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	

Calories totales à fournir

a) Calories pour le bain (kcal/h)	1.092.000	840.000	420.000	2.822.400		5.174.400
b) Calories pour la charpente Cp fer : 0,12 (kcal/h)	17.200	13.200	6.600	44.400		81.400

Calories/h à fournir pour atteindre la température de fonctionnement en 7 heures

a) Calories pour le bain (kcal/h)	156.000	120.000	60.000	403.200		739.200
a2) Calories pour la charpente (kcal/h)	2.460	1.890	940	6.340		11.630
a3) Perte par évaporation (kcal/h)	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable		négligeable
a4) Perte par évaporation (kcal/h)	41.800	23.850	6.600	76.300		148.550
Total	200.260	145.740	67.540	485.840		899.380

Tableau 3

Calories nécessaires pour maintenir les bains à leur température de fonctionnement (pour les formules, voir l'ANNEXE A/b).

	DEGRAISSAGE (extraction)	DECAPAGE (extraction)	COLORATION (extraction)	COLMATAGE 2 cuves (extraction)	TOTAL kcal/h Thermique- ment isolé	TOTAL kcal/h Thermique- ment non-isolé
Températures	80°C	65°C	40°C	99°C		
ΔT bains	65°C	50°C	25°C	84°C		
Volume bain(m ³)	16,8	16,8	16,8	16,8		
Surface base(m ³)	8	8	8	8,8		
b1)Évaporation (kcal/h)	83.600	47.700	13.200	427.400		571.900
b1*) Evaporation avec surface libre recouverte par des flotteurs thermo- isolants (kcal/h)	25.100	14.300	4.000	116.600	160.000	
b2) Pertes surfaces latérales et fond non thermiquement isolé (kcal/h)	3.100	2.300	900	8.800		15.100
b2*) Pertes surfaces latérales et fond thermiquement isolé (kcal/h)	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable
b3) Pertes par entraînement et remise au niveau (kcal/h)	1.800	2.300	500	1.600	6.200	6.200
b4) Pertes par immersion des bains (kcal/h)	7.500	5.700	2.900	9.700	25.800	25.800
Total (kcal/h)					190.100	619.000

ANNEXE A

Dans cette annexe, sont fournies les méthodes pour évaluer les besoins thermiques nécessaires :

- a) pour amener les bains aux températures de régime
- b) pour maintenir les bains à la température de fonctionnement.

a) Calories nécessaires pour amener la solution à la température de fonctionnement

Dans ce cas l'énergie nécessaire se partage de la façon suivante :

a1) Calories/h nécessaires pour amener le bain de la température ambiante (T_{amb}) à la température de fonctionnement (T_e) :

$$Q = \text{masse du bain} \times \text{chaleur spécifique} \times (T_e - T_{amb})/h$$

N'ayant pas toutes les données à disposition pour les calculs, nous allons faire l'hypothèse que le bain a une densité et une chaleur spécifique égale à 1.

a2) Calories/h absorbées par la charpente métallique de la cuve :

Elles sont égales à :

$$Q = \text{masse de la charpente} \times \text{chaleur spécifique du métal} \times (T_e - T_{amb})/h$$

La chaleur spécifique du fer est égale à 0,12 kcal (kg x°C).

a3) Déperditions à travers les parois de la cuve :

Elles sont égales à :

$$Q = \text{surface extérieure} \times \text{coefficient de déperdition thermique} \times (T_e - T_{amb})$$

Le coefficient de déperditions thermiques se trouve sur des tables.

Dans notre exemple (tableau 2), nous avons retenu l'hypothèse que ce type de déperditions est négligeable par rapport aux autres.

a4) Pertes de chaleur par évaporation :

Elles sont égales à :

$Q = \text{surface libre} \times \text{coefficient de déperditions thermiques moyen}$

Pour évaluer cette quantité se pose le problème de la température à laquelle il faut définir le coefficient; la bibliographie indique que cette déperdition est environ égale à la moitié de la quantité de chaleur perdue en marche normale par évaporation, s'il n'y avait pas extraction.

b) Quantité de chaleur nécessaire pour maintenir les bains à leur température de travail :

Les calories nécessaires pour maintenir les bains à leur température de régime doivent compenser les déperditions suivantes :

- b1) Pertes de chaleur par évaporation de la surface libre
- b2) Pertes de chaleur par les parois latérales et par le fond
- b3) Pertes de chaleur par entraînement du bain
- b4) Pertes de chaleur pour réchauffer les pièces immergées.

b1) Pertes de chaleur par évaporation :

Cette perte est sans nul doute la plus importante, d'autant plus que les températures de fonctionnement sont élevées ; le phénomène d'évaporation est d'ailleurs intensifié par la nécessité d'une extraction des vapeurs nocives qui se dégagent des bains.

Pour évaluer cette quantité, il existe de nombreux tableaux et diagrammes.

Pour nos calculs, nous avons utilisé les diagrammes trouvés dans le GRAHAM (1) et nous en avons extrait les valeurs suivantes :

TEMPERATURES °C	RAPIDITÉ SPÉCIFIQUE D'ÉVAPORATION kcal/h/m ² (le m ² est celui de la surface libre)	
	Sans extraction	avec vitesse d'extraction de 1,5m/seconde
40	732	1652
50	1355	2081
60	2195	4829
65	2710	5962
70	3306	7273
80	4750	10450
90	6640	18592
99	8672	24282

Le moyen pour limiter ces pertes est de recouvrir la surface libre avec 1 ou 2 couches de sphères flottantes plastiques thermoisolantes et résistant à n'importe quel type de bain.

Les économies dans ce cas, peuvent atteindre, suivant la température, 70 à 80 % ; pour nos calculs nous avons pris une économie de 70 %.

b2) Pertes de chaleur par les parois latérales et par le fond :

La déperdition de chaleur par les parois latérales et par le fond se fait par convection et par rayonnement. Pour calculer la chaleur totale perdue, il faut connaître le coefficient d'échange thermique de la surface avec l'extérieur ; la quantité de chaleur Q est en effet égale à :

$Q = h \times S \times \Delta T$ ou h est le coefficient d'échange thermique,

S la surface d'échange et ΔT la différence de température.

Le coefficient d'échange thermique (h) est donné par la formule suivante :

$$h = K \times \Delta T^{0.25} \text{ kcal/h/m}^2/\text{°C}$$

ou $K = 0,301$ pour des surfaces horizontales

et $K = 0,407$ pour des surfaces verticales

tandis que ΔT est le saut thermique. Pour réduire les consommations, il faut donc isoler thermiquement, les surfaces latérales et le fond de la cuve. De cette façon on peut réaliser des économies sur les pertes de chaleur supérieur à 90 %.

b3) Pertes de chaleur par entraînement :

Les bains sont entraînés pendant le travail par les profils et remplacés par de l'eau de réseau à une température de 15 C°. La quantité entraînée est fonction de la surface immergée dans chaque chargement, de la forme du profil, du bain lui-même et des conditions de travail.

Ces 3 dernières caractéristiques peuvent se regrouper dans un seul paramètre T_s qui est calculé expérimentalement. La quantité de chaleur prévue est donc égale à:

$$Q = T_s \times S \times (T_e - 15)$$

Ci-dessous nous indiquons les valeurs de T_s pour différents types de bain :

	ENTRAÎNEMENT SPÉCIFIQUE ml/m ² (valeurs approximatives)
DÉGRAISSAGE	150 ml/m ²
DÉCAPAGE	250 ml/m ²
SATINAGE	700 ml/m ²
COLORATION	100 ml/m ²
COLMATAGE	100 ml/m ²

b4) Pertes de chaleur par immersion des profils :

Une certaine quantité de chaleur est aussi absorbée par les pièces à traiter lors de leur immersion dans les bains de process ; on peut la quantifier, avec la formule suivante :

$$Q = M C_p \Delta T \quad \text{où } M \text{ est la masse immergée}$$

C_p la chaleur spécifique de l'aluminium
(0,23 kcal /kg/°C)

ΔT la chute de la température.



Bibliographie

- 1) A.K. Graham "Electroplating Engineering Handbook" 3° Edizione.
- 2) Pittator "Guida alla progettazione di impianti di pretrattamento e di verniciatura" Parte VII. La Rivista del Colore -Verniciatura Industriale 10, n.107, Marzo 1977.
- 3) Von D. Scherf "Hochtemperature-Wärmepumpen für die Galvanotechnik". Galvanotechnik D 7S68 Sanlgan 70 (1979) n.II.

Chapitre 16

Directives QUALANOD

[Télécharger les directives QUALANOD](#)

Chapitre 17

Annexes

ANNEXES

- A. Anodisation de l'aluminium et de ses alliages
Normes ISO et AFNOR publiées au 1^{er} juillet 1990.**
- B. Principaux marchés de l'aluminium et de ses alliages.**
- C. Symbolisation et désignation conventionnelles de l'aluminium et de ses alliages.**
- D. Principaux alliages d'aluminium corroyés.**

Anodisation de l'aluminium et de ses alliages
Normes ISO et AFNOR publiées au 1^{er} juillet 1990
(1)

Normes ISO	Normes AFNOR	Contenu de la norme
2085 - 1976	91410 - 1966	Contrôle de la continuité des couches anodiques minces – Essai au sulfate de cuivre
2106 - 1982	91406 - 1985	Détermination de la masse par unité de surface (masse surfacique) des couches anodiques – Méthode gravimétrique
2128 - 1976	91403 - 1985	Détermination de l'épaisseur des couches anodiques – Méthode non destructive par microscope à coupe optique
2135 - 1984	91412 - 1982	Essai accéléré de solidité à la lumière artificielle des couches anodiques colorées
2143 - 1981	91409 - 1987	Appréciation de la perte de pouvoir absorbant des couches d'oxydes anodiques après colmatage – Essai à la goutte de colorant avec action acide préalable
2376 - 1972	91405 - 1983	Contrôle de l'isolement par mesurage de la tension de claquage
2767 - 1973	91420 - 1988	Réflectivité spéculaire à 45 degrés – Réflectivité totale – Netteté d'image
2931 - 1983	91414 - 1981	Evaluation de la qualité des couches anodiques colmatées par mesurage de l'admittance ou de l'impédance
2932 - 1981	91407 - 1981	Contrôle du colmatage par mesurage de la perte de masse après immersion en solution acide
3210 - 1983	91416 - 1982	Evaluation de la qualité des couches anodiques colmatées par mesurage de la perte de masse après immersion en solution phosphochromique
3211 - 1977	91413 - 1981	Evaluation de la résistance des couches anodiques à la formation de criques par déformation
5190 - 1984	N'existe pas	Contrôle de l'homogénéité d'aspect des couches anodiques colorées – Mesurage de la diffusance et de la réflectance

Anodisation de l'aluminium et de ses alliages
Normes ISO et AFNOR publiées au 1^{er} juillet 1990
(2)

Normes ISO	Normes AFNOR	Contenu de la norme
6581 - 1980	91415 - 1981	Détermination de la solidité à la lumière ultraviolette des couches anodiques colorées
6719 - 1986	91421 - 1988	Mesurage des caractéristiques de réflectivité des surfaces d'aluminium à l'aide d'instruments intégrateurs sphériques
7583 - 1986	91400 - 1987	Vocabulaire
7599 - 1983	91450 - 1981	Spécifications générales pour couches anodiques sur aluminium
7668 - 1986	91422 - 1988	Mesurage des caractéristiques de réflectance et de brillant spéculaires à angle fixe de 20 degrés, 45 degrés, 60 degrés ou 85 degrés
7669 - 1986	91423 - 1988	Mesurage de la réflectivité totale à l'aide d'un réflectomètre photoélectrique
7759 - 1983	N'existe pas	Mesurage des caractéristiques de réflectivité des surfaces d'aluminium à l'aide d'un goniophotomètre simplifié ou normal
8125 - 1984	91424 - 1988	Détermination de la couleur et de la différence de couleur des couches anodiques colorées
8251 - 1987	91430 - 1988	Détermination de la résistance à l'usure des couches d'oxyde anodiques par essai à la roue abrasive
8252 - 1987	N'existe pas	Détermination de la résistance spécifique moyenne des couches d'oxyde anodiques à l'abrasion par essai au jet abrasif
8993 - 1989	N'existe pas	Système de cotation de la corrosion par piqûres – Méthode reposant sur des images-types
8994 - 1989	N'existe pas	Système de cotation de la corrosion par piqûres – Méthode de quadrillage
N'existe pas	91451 - 1988	Qualification des produits d'entretien

PRINCIPAUX MARCHÉS DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES

L'aluminium est partout présent dans notre vie quotidienne. Ses principaux domaines d'application en Europe en sont témoins. Alors que la production mondiale était de 25 tonnes en 1886, elle dépasse aujourd'hui 15 millions de tonnes par an. Ce succès de l'aluminium repose sur trois raisons principales

- un ensemble de propriétés exceptionnelles ;
- une grande facilité de mise en œuvre ;
- des ressources minières abondantes.

■ Des propriétés exceptionnelles

La combinaison de caractéristiques multiples et la mise au point d'alliages durs à haute résistance expliquent ce succès rapide.

Chacun sait que l'aluminium est léger. Son utilisation la plus connue est l'aéronautique : l'aluminium représente 70 % des matériaux d'une cellule d'avion.

Les industries aéronautiques et spatiales ont toujours été un puissant moteur de progrès technique pour l'industrie de l'aluminium. Pour répondre à ces impératifs sévères, de nouveaux produits ont été mis au point, qui ont trouvé ensuite d'autres domaines d'application.

Le programme européen Airbus a été l'incitateur de nouveaux et importants investissements dans l'industrie de l'aluminium. Légèreté et solidité ont permis à l'aluminium de prendre une place importante dans la construction automobile.

Depuis le début du siècle, les pistons sont en aluminium. Aujourd'hui, un nombre toujours croissant de culasses et même de blocs moteurs sont en aluminium moulé. Chaque automobile européenne contient environ 40 kg d'aluminium, l'allègement ainsi réalisé permet une économie substantielle de carburant pendant toute la durée de vie du véhicule.

L'aluminium résiste à la corrosion et

aux intempéries, il est idéal pour les fenêtres, portes et façades de nos immeubles d'habitation ou de bureaux.

Tous les câbles électriques de lignes aériennes sont en aluminium. Parce qu'il est à la fois très bon conducteur électrique, léger, résistant aux contraintes mécaniques et à la corrosion, l'aluminium est le meilleur choix technique et économique.

En électronique, les profilés à ailettes en aluminium jouent un rôle primordial pour le refroidissement des composants. On en trouve un bon exemple dans l'informatique.

Les radiateurs de notre voiture, et même de nos appartements, sont de plus en plus souvent en aluminium.

Dans l'emballage, une feuille mince

d'aluminium de quelques millièmes de millimètres suffit pour créer une barrière infranchissable qui protège les aliments contre l'humidité, la lumière, l'oxygène et les micro-organismes et garde intacts leur fraîcheur, leur goût et les vitamines.

Grâce aux nouvelles techniques d'emballage, dans lesquelles l'aluminium a un rôle capital, le transport et le stockage des produits alimentaires sont grandement facilités, ce qui permet une réduction des pertes et une amélioration de la qualité des produits achetés par le consommateur.

Les produits d'usage courant sont plus attrayants dans un emballage en aluminium qui offre de belles présentations durables.

■ Facilité de mise en œuvre

L'aluminium présente de nombreuses possibilités de mise en œuvre. Il peut être laminé, filé, moulé ou forgé.

Il peut être transformé en boîtes rigides aussi bien qu'en tubes souples.

L'aluminium est découpé, estampé, usiné ou percé plus rapidement que l'acier. Il peut aussi être soudé, brasé, rivé et même collé.

Le traitement de surface classique et spécifique de l'aluminium est l'anodisation consistant à former une couche superficielle d'alumine très dure et transparente, qui peut être colorée de façon attrayante et permanente.

On peut aussi peindre, laquer ou vernir l'aluminium dans toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

■ Des ressources minières importantes

L'aluminium n'existe pas dans le sol à l'état natif, mais sous forme de composés minéraux ; l'écorce terrestre contient près de 8 % d'aluminium-métal, ce qui en fait l'élément le plus répandu après le silicium. Aujourd'hui, l'aluminium est presque exclusivement extrait de la bauxite, minerai qui tient son nom du village des Baux-de-Provence où il fut découvert.

Les réserves mondiales recensées et prouvées de bauxite sont évaluées à 22 500 millions de tonnes. Pendant les dix dernières années, on a extrait 900 millions de tonnes, soit chaque année 0,5 % seulement des réserves prouvées, alors que de nouveaux gisements sont découverts à un rythme deux fois plus important (figure 2).

De nombreux autres minerais peuvent être utilisés pour la fabrication d'aluminium. Des expérimentations ont été conduites dans des unités pilotes et des recherches dans ce domaine se

poursuivent en différents points du monde.

En bref, les ressources en minerais d'aluminium sont pratiquement illimitées.

■ L'aluminium et l'environnement

Comme toute activité industrielle, la production d'aluminium a une incidence sur l'environnement. Pour la plupart, les pays ont établi des règlements que respecte l'industrie de l'aluminium. A vrai dire, ses performances sont souvent meilleures que les standards ne l'exigent.

Après exploitation des mines de bauxite, le sol est réhabilité et l'équilibre hydrologique rétabli. Le site peut alors recevoir des activités nouvelles.

Des recherches importantes ont été constamment menées et de lourds investissements engagés pour contrôler et réduire la pollution aux différents stades de la production.

Ces efforts ont permis, entre autres, une diminution considérable des émissions fluorées des usines d'électrolyse. Les cuves sont munies de capots pour collecter les gaz qui sont traités dans des stations d'épuration.

■ L'aluminium et l'énergie

L'électrolyse de l'aluminium primaire nécessite beaucoup d'énergie électrique. Cependant, des progrès incessants ont permis de réduire l'énergie nécessaire à la production de 1 kg d'aluminium de 25 kWh à moins de 14 kWh en l'espace de 30 ans... et les progrès continuent.

Quand, par exemple, on utilise l'aluminium dans un moteur d'automobile, un emballage alimentaire ou de nombreux autres produits, l'énergie investie est remboursée plusieurs fois sous forme d'économie de carburant, d'augmentation de la durée de conservation, de réduction des frais de manutention et d'entretien.

Deux exemples :

Voiture de métro

Poids d'aluminium par voiture	3 000 kg
Poids d'acier remplacé	6 000 kg
Supplément d'énergie dû au remplacement de l'acier par l'aluminium	- 30 000 kWh
Economie d'énergie en 30 ans	540 000 kWh
Economie nette d'énergie pendant 30 ans de service	510 000 kWh

Benne basculante

Gain de charge utile	1 500 kg
Supplément d'énergie dû au remplacement de l'acier par l'aluminium	- 70 000 kWh
Economie d'énergie annuelle	50 000 kWh
Economie d'énergie en 5 ans	250 000 kWh

■ L'aluminium et le recyclage

En fin de service, moyennant une très faible dépense d'énergie, les pièces en aluminium peuvent être recyclées pour entamer une nouvelle vie. Près du quart de l'aluminium consommé en Europe est du métal recyclé, appelé métal d'affinage.

Le recyclage n'est pas une activité nouvelle pour l'industrie de l'aluminium, qui a toujours été consciente de l'importance de ses enjeux :

- économiser l'énergie : le recyclage de l'aluminium ne consomme que 5 % de l'énergie nécessaire à la production de métal primaire ;
- économiser les matières premières : près de 25 % des besoins globaux étant couverts par l'aluminium d'affinage, les matières premières correspondantes sont sauvegardées ;
- la valeur commerciale des déchets d'aluminium beaucoup plus élevée que pour la fonte ou l'acier est un facteur incitatif à l'accroissement du recyclage.

L'industrie de l'aluminium apporte son soutien actif au recyclage. La production d'aluminium d'affinage en Europe a augmenté de 30 % au cours des 10 dernières années.

L'aluminium est l'un des matériaux les plus utilisés pour le conditionnement des boissons en boîtes. Grâce au recyclage, la boîte en aluminium peut être considérée comme un emballage retournable. Des systèmes complets de récupération sont déjà développés dans certains pays européens ; le potentiel de recyclage en Europe est donc considérable.

■ **L'industrie de l'aluminium en Europe**

L'Europe de l'Ouest est le second consommateur mondial après l'Amérique du Nord.

Notre industrie de l'aluminium, qui s'étend de l'Italie à la Norvège, de l'Espagne à la Suède, de Grèce en Grande-Bretagne, est pour une grande part en mesure de faire face à cette demande. L'Europe a besoin de maintenir une industrie de l'aluminium efficace, créatrice et suffisamment importante pour couvrir les besoins de ses industries manufacturières.

L'alumine a de nombreux autres usages que la production d'aluminium.

L'Europe est en position de leader mondial dans le domaine de ces « alumines spéciales ».

Le part européenne dans la production mondiale est de 10 % pour la bauxite, 20 % pour l'alumine, environ 25 % pour

l'aluminium primaire et sa consommation est légèrement supérieure à 25 %.

Comme la plupart des grandes zones économiques mondiales, l'Europe doit importer une partie des matières premières nécessaires à la production d'aluminium dont elle a besoin.

Même en tenant compte d'une forte dispersion entre différents pays européens, la consommation moyenne par tête, comparée à celle d'autres pays du monde, montre un fort potentiel de croissance pour l'aluminium.

Il est capital pour l'Europe d'avoir une industrie de l'aluminium compétitive.

Ses produits entrant dans les biens exportés par l'ensemble des industries européennes doivent être au moins aussi performants que ceux de ses concurrents internationaux.

Dépendre des autres pour des produits aussi vitaux ne manquerait pas d'avoir de graves répercussions sur notre qualité de vie.

L'industrie de l'aluminium exporte des produits transformés dans le monde entier, ce qui contribue au paiement des importations de matières premières. Mais beaucoup plus importantes sont les exportations de produits finis de haute technicité qui incluent des composants en aluminium.

Plus de 100 000 personnes sont directement employées en Europe par l'industrie de l'aluminium ; c'est important, mais bien peu à côté des millions d'emplois offerts par les industries qui dépendent d'une source sûre d'approvisionnement en métal.

Les progrès rapides accomplis en moins d'un siècle résultent d'une politique de recherche et de développement inlassablement poursuivie. Les efforts de R et D seront encore plus décisifs dans l'avenir, tant pour lancer de nouveaux produits que pour accroître encore les performances de l'industrie.

■ Symbolisation et désignation conventionnelles de l'aluminium et de ses alliages

L'aluminium et ses alliages ont reçu dans tous les pays une symbolisation ou désignation conventionnelle :

- d'une part, au niveau de la composition chimique ;
- d'autre part, sur les modes d'obtention et sur les états de livraison.

La normalisation française est actuellement double : l'une pour les produits de fonderie, l'autre pour les aluminiums et alliages de transformation.

Produits de fonderie

Normes AFNOR :

NF A 02-200 – Désignation conventionnelle des modes d'obtention et d'état de livraison de métaux et alliages non ferreux moulés.

NF A 02-004 – Aluminium, zinc et alliages de fonderie – Magnésium et ses alliages. Désignation conventionnelle des matériaux.

Symbolisation chimique

Aluminiums non alliés : « A » suivi de la pureté

Exemples :

- A5 = aluminium à 99,5 %
- A4 = aluminium à 99,0 %
- A7 = aluminium à 99,7 %
- A9 = aluminium à 99,9 %

Alliages : « A » suivi de la symbolisation des métaux d'addition

- A = aluminium
- U = cuivre
- M = manganèse
- S = silicium
- G = magnésium
- Z = zinc
- T = titane
- Be = béryllium
- C = chrome
- E = étain, etc.

Exemples :

A-U5GT = alliage préparé à partir d'aluminium à 99,5 %. Élément d'alliage principal : le cuivre à environ 5 %. Puis deuxième élément d'alliage : le magnésium à environ 1 % ou moins. Enfin troisième élément : le titane à un pourcentage inférieur à celui de l'élément précédent.
A-S7G03 = alliage à 7 % de silicium et 0,3 % de magnésium.

Mode d'obtention et état de livraison

Le symbole chimique est suivi de la lettre Y (produit moulé) et de deux chiffres. Le premier chiffre indique le mode de moulage :

- Y2 = moulage en sable
- Y3 = moulage en coquille
- Y4 = moulage sous pression
- Y7 = coulée continue
- Y8 = moulage par centrifugation
- Y9 = suivant prescription.

Le deuxième chiffre indique le traitement effectué sur la pièce moulée :

- 0 = pas de traitement
- 1 = recuit
- 3 = trempé et revenu
- 4 = trempé et mûri
- 5 = stabilisé
- 6 = trempé et stabilisé
- 9 = suivant prescription

Exemples :

A-S7G06 Y33 = alliage à 7 % de silicium et 0,6 % de magnésium, moulé en coquille puis trempé et revenu.

A-S9U3 Y 40 = alliage à 9 % de silicium et 3 % de cuivre, moulé sous pression.

Produits corroyés

Normes AFNOR :

NF A 02-006 – Aluminium et alliages d'aluminium – Désignation conventionnelle des états de livraison.

NF A 02-104 – Désignation numérique des aluminiums et alliages de transformation.

Symbolisation chimique

Elle est donnée par un nombre de 4 chiffres.

Le premier chiffre indique la famille :

- 1 = aluminiums non alliés
- 2 = alliages au cuivre
- 3 = alliages au manganèse
- 4 = alliages au silicium
- 5 = alliages au magnésium
- 6 = alliages au magnésium et silicium
- 7 = alliages au zinc
- 8 = autres

• **Pour les aluminiums** : les deux derniers chiffres sont ceux de la pureté en aluminium au-delà de 99,00 %.

Le deuxième chiffre est un 0 si les impuretés de l'aluminium ne font pas

L'objet de contrôle individuel, et de 1 à 9 si l'une au moins des impuretés à une limite spéciale.

• **Pour les alliages** : les deux derniers chiffres n'ont pas de signification particulière, c'est un numéro d'enregistrement.

Le deuxième chiffre, de 0 à 9, est réservé aux modifications et sert à signaler des teneurs particulières, notamment en impuretés.

Nota : le nombre de 4 chiffres peut être suivi d'une lettre : A, B, C, etc. variante nationale, X composition expérimentale.

Etats de livraison

Il est indiqué soit par l'indice de résistance, soit par l'état métallique, de loin le plus employé.

L'indice de résistance fait suivre la lettre R d'un nombre représentant la charge de rupture minimale garantie en hbar.

Exemple : 6060-R22 est un alliage magnésium-silicium traité pour une charge de rupture minimale de 22 hbar (220 Mpa).

Si des traitements permettent pour une même charge de rupture, d'obtenir soit une limite élastique élevée, soit des allongements élevés, ou spécifie ce traitement par les lettres E ou A après l'indice de résistance.

Exemples :

- barre 1050 R 10 A : barre en aluminium à 99,5 % traité pour une charge de rupture de 100 MPa et des allongements élevés (9 %) au détriment de la limite élastique (65 MPa) ;
- barre 1050 R 10 : barre en aluminium à 99,5 % traité pour une charge de rupture de 100 MPa, sans privilège pour la limite élastique (70 MPa) ni les allongements (7 %) ;
- barre 1050 R 10 E : barre en aluminium à 99,5 % traité pour une charge de rupture de 100 MPa et une limite élastique élevée (75 MPa) au détriment des allongements (5 %).

L'état métallurgique est défini par une lettre majuscule qui caractérise l'état fondamental (traitement mécanique ou thermique) suivie éventuellement de chiffres complémentaires pour subdiviser cet état quand nécessaire.

F = brut de fabrication
 O = état recuit
 H = état écroui et éventuellement partiellement adouci
 T = état obtenu par durcissement structural

Subdivisions de l'état H

Le symbole H est toujours suivi d'au moins 2 chiffres.

Le premier chiffre indique le mode de durcissement :

H1 = durci par déformation, donc écrouissage, jusqu'au niveau visé de caractéristiques mécaniques, sans adoucissement ultérieur ;

H2 = durci par déformation jusqu'à un niveau supérieur à celui visé puis adouci partiellement par maintien à une température appropriée ;

H3 = durci par déformation puis stabilisé. Ce traitement s'applique aux alliages qui s'adoucisent avec le temps à la température ambiante (alliages au magnésium) et qu'un maintien à une température appropriée stabilisent aux caractéristiques visées.

Le deuxième chiffre indique le degré de durcissement :

8 = 4/4 dur (correspond à la charge de rupture obtenue par réduction de section de 75 % d'une tôle de 1 mm à l'état 0) ;

6 = 3/4 dur (équidistant de 8 et 4) ;

4 = 1/2 dur (équidistant de 8 et 0) ;

2 = 1/4 dur (équidistant de 4 et 0) ;

9 = extra dur (charge de rupture supérieure à l'état 8).

Les chiffres impairs sont aussi utilisés, exemples :

H11 = 1/8 dur ;

H111 et H112 pratiquement l'état recuit plané ou dressé ;

H274 = tôle à l'état H26 avec un léger écrouissage supplémentaire donné par une opération de gravage, gaufrage ou mise en forme.

Subdivision de l'état T

Le premier chiffre indique le traitement de base (voir tableau ci-après).

Le deuxième chiffre indique une variante du traitement, exemples :

T61 = trempé et revenu « doux » (allongements privilégiés) ;

T66 = trempé et revenu « dur » (limite élastique privilégiée) ;

T73 = trempé et sur revenu permettant une bonne résistance à la corrosion tension.

Note : le chiffre 5 est réservé aux traitements diminuant les contraintes résiduelles.

Ce chiffre 5 est suivi d'un autre chiffre indiquant le traitement subi :

51 = contraintes résiduelles atténuées par traction ;

52 = contraintes résiduelles atténuées par compression ;

53 = contraintes résiduelles atténuées par traitement thermique.

Exemples :

T351 = mis en solution, trempé, tractionné ;

T651 = mis en solution, trempé, tractionné, revenu ;

T73652 = mis en solution, trempé, comprimé, sur-revenu spécial.

Traitement de base			Symbole
Avec mise en solution séparée	Sans Écrouissage	Mûri	T4
		Revenu	T6
		Sur - revenu	T7
	Avec Écrouissage	Écroui mûri	T3
		Écroui revenu	T8
		Revenu Écroui	T9
Sans mise en solution séparée	Sans Écrouissage	Mûri	T1
		Revenu	T5
	Avec Écrouissage	Écroui mûri	T11
		Écroui revenu	T12
		Revenu écroui	T10

Correspondance avec les anciennes désignations

Aluminiums et alliages	NF A 02-004	NF A 02-104	Séries
Aluminiums de pureté $\geq 99,00$ %	A9 A8 A7 A5 A45 A4	1199 1080 A 1070 A 1050 1100 1200	1000
Alliages aluminium-cuivre	A-U2G A-U2GN A-U4G A-U4G1 A-U4SG A-U4Pb U5Pb Bi	2117 2618 A 2017 A 2024 2014 2030 2011	2000
Alliages aluminium-manganèse	A-M1 A-M1G A-MG0,5	3003 3004 3005	3000
Alliages aluminium-magnésium	A-G0,6 A G2M A-G3M A-G4MC A-G4MC A-G4,5M	5005 5251 5754 5086 5086 A 5052 5083	5000
Alliages aluminium-magnésium-silicium	A-SG A-SGM0,3 A-SGM0,7 A-GS	6005 A 6181 6081 6082 6060 6061	6000
Alliages aluminium-zinc-magnésium	A-Z3G2 A-Z5G A-Z5GU A-Z8GU	7051 7020 7075 7049 A	7000

Tableaux récapitulatifs

Principaux alliages d'aluminium corroyés

Formes commerciales	Symbole	Etat		Caractéristiques mécaniques moyennes						Aptitudes technologiques						Propriétés physiques			Composition chimique (approximative) (%)		
				R _{po.2} (MPa)	R (MPa)	A %	Pliage à 180° *	HB	Module élasticité (MPa)	Résistance à l'action de		Soudure TIG et MIG	Usinage	Emboutissage	A l'anodisation de		Masse Volumique (g/cm ³)	Conductibilité thermique (W/mK)			Coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 100°C
										Atmosphère	Air marin Eau de mer				Protection	Décoration					
Tôles Bandes Barres Fils - Tubes Profilés	1050 A	Recuit 1/4 dur 1/2 dur 3/4 dur dur	0 H 12 H 14 H 16 H 18	30 85 100 120 140	80 100 120 140 165	45 14 11 8 7	0 1 2 3 4	20 30 35 40 45	69 000	4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	1 1 2 2 2	4 4 4 3 1	4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	2,70	222	23,3 X 10 ⁻⁶	Al = 99,50	
Barres Tubes	2011	Trempé écroui	T 3	250	300	10		100	70 000	2	0	0	4		2	2	2,82	146	22,9 X 10 ⁻⁶	Cu = 5,0 - 6,0 Pb = 0,2 - 0,6 Bi = 0,2 - 0,6	
Tôles Bandes Barres Tubes Profilés	2014	Recuit Trempé mûri Trempé revenu	0 T 4 T 4 T 6	100 280 430	200 420 480	20 18 12	0 105 135	45 105 135	74 000	2 2 1	0 0 0	0 0 0	2 3 3	3 0 0	2 2 2	1 1 1	2,80	155	22,2 X 10 ⁻⁶	Cu = 3,9 - 5,0 Mn = 0,4 - 1,2 Mg = 0,2 - 0,8 Si = 0,5 - 1,2	
Tôles Barres Fils - Tubes Profilés	2017 A	Recuit Trempé mûri	0 T 4	100 280	200 420	20 18	0 105	45 105	74 000	2 2	0 0	0 0	2 3	3 0	2 2	1 1	2,79	129	22,6 X 10 ⁻⁶	Cu = 3,5 - 4,5 Mn = 0,4 - 1,0 Mg = 0,4 - 1,0	
Tôles Barres Fils Profilés	2024	Recuit Trempé mûri	0 T 4	100 320	200 460	20 18	0 120	45 120	73 000	2 2	0 0	0 0	2 3	3 0	2 2	1 1	2,77	121	22,8 X 10 ⁻⁶	Cu = 3,8 - 4,9 Mn = 0,3 - 0,9 Mg = 1,2 - 1,8	
Barres Tubes	2030	Trempé mûri	T 4	280	420	12		105	71 000	2	0	0	4		2	2	2,85	138	23,5 X 10 ⁻⁶	Cu = 3,5 - 4,5 Mg = 0,5 - 1,3 Pb = 0,8 - 1,5	
Tôles	2117	Trempé mûri	T 4	150	250	22	1	70	72 000	3	1	2	2	3	2	2	2,74	155	23,1 X 10 ⁻⁶	Cu = 2,2 - 3,0 Mg = 0,2 - 0,5	
Tôles Barres	2618 A	Trempé revenu	T 6	400	460	10		125	72 000	2	1	0	3	0	2	1	2,75	140	22 X 10 ⁻⁶	Fe = 0,9 - 1,4 Cu = 1,8 - 2,7 Mg = 1,2 - 1,8 Ni = 0,8 - 1,4 Si = 0,15 - 0,25	
Tôles Disques	3002	Recuit 1/4 dur 1/2 dur 3/4 dur dur	0 H 22 H 24 H 26 F 18	35 90 130 145 170	85 115 145 175 205	45 20 16 10 8	0 1 2 3 4	25 30 35 40 50	69 000	4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	1 1 2 2 2	4 4 3 4 4	4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	2,73		23 X 10 ⁻⁶	Mn = 0,10 - 0,25 Mg = 0,05 - 0,20	
Tôles Bandes Barres Fils - Tubes Profilés	3003	Recuit 1/2 dur dur	0 H 14 H 18	40 140 190	115 160 220	40 8 7	0 2 4	30 40 60	69 000	4 4 4	3 3 3	4 4 4	1 2 2	4 3 1	3 3 3	1 1 1	2,73	192 155	23 X 10 ⁻⁶	Mn = 1,0 - 1,5 Cu = 0,05 - 0,2	
Tôles	3004	Recuit 1/2 dur 3/4 dur	0 H 14 H 36	70 200 230	180 240 260	22 8 7	0 3 4	45 64 70	69 000	4 4 4	3 3 3	4 4 4	1 2 2	4 3 3	3 3 3	1 1 1	2,72	163	23 X 10 ⁻⁶	Mn = 1,0 - 1,5 Mg = 0,8 - 1,3	
Tôles Bandes	3005	Recuit 1/2 dur	0 H 14	55 160	130 190	30 7	0 3	40 50	69 000	4 4	3 3	4 4	1 2	4 3	3 3	1 1	2,70		23 X 10 ⁻⁶	Mn = 1,0 - 1,5 Mg = 0,2 - 0,6	
Tôles Barres Fils Tubes Profilés	5005	Recuit 1/4 dur 1/2 dur 3/4 dur dur	0 H 12 H 14 H 36 H 18	40 110 140 150 180	120 140 160 180 210	30 13 8 7 5	0 1 2 3 4	30 35 40 45 50	70 000	4 4 4 4 4	3 3 3 3 3	4 4 4 4 4	1 1 2 2 2	4 4 3 2 1	4 4 4 4 4	4 4 4 4 4	2,70	200	23,4 X 10 ⁻⁶	Mg = 0,50 - 1,1	
Tôles Barres Tubes	5052	Recuit 1/2 dur	0 H 24	90 200	190 250	24 12	0 2	50 70	70 000	4 4	4 4	3 3	1 2	4 3	4 3	3 3	2,68	138	23,5 X 10 ⁻⁶	Mg = 2,2 - 2,8 Cr = 0,15 - 0,35	

0 : impropre - 1 : à éviter, précautions à prendre - 2 : possible - 3 : bon, utilisable sans problème - 4 : excellent, à recommander

* Rayon intérieur de pliage, en nombre de fois l'épaisseur

Principaux alliages d'aluminium corroyés

Formes commerciales	Symbole	Etat		Caractéristiques mécaniques moyennes						Aptitudes technologiques						Propriétés physiques			Composition chimique (approximative) (%)	
				R _{po,2} (MPa)	R (MPa)	A %	Pliage à 180° *	HB	Module élasticité (MPa)	Résistance à l'action de		Soudure TIG et MIG	Usinage	Embou-tissage	A l'anodisation de		Masse Volumique (g/cm3)	Conduc-tibilité thermique (W/mK)		Coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 100°C
										Atmo-sphère	Air marin Eau de mer				Protec-tion	Déco-ration				
Tôles Barres Tubes Profilés	5083	Recuit 1/4 dur	0 H22	140 240	300 330	18 12	2 3	70 85	71 000	3 3	2 2	4 4	2 2	3 2	4 4	1 1	2,63	117	23,5 X 10 ⁻⁶	Mn = 0,4 - 1,0 Cr = 0,05 - 0,25 Mg = 4,0 - 4,9
Tôles - Fils Tubes Tôles	5086	Recuit 1/2 dur	0 34	120 250	270 330	22 8	1 3	65 85	71 000	4 4	3 3	4 4	2 2	3 1	4 4	1 1	2,65	125	22,9 X 10 ⁻⁶	Mg = 3,5 - 4,5 Cr = 0,05 - 0,25 Mg = 0,2 - 0,7
Tôles	5150	Recuit 3/4 dur	0 H26	0 190	150 210	25 8	0 3	35 60	69 000	4 4	4 4	4 4	1 2	4 2	4 4	4 4	2,69	188	23,4 X 10 ⁻⁶	Mg = 1,3 - 1,7
Barres Fils - Tubes Profilés	5251	Recuit dur	0 H18	0 200	190 240	14 2	1	40 60	69 000	4 4	4 4	3 3	1 2	4 1	4 3	3 3	2,68	146	23,5 X 10 ⁻⁶	Mn = 0,1 - 0,5 Mg = 1,7 - 2,4
Tôles Barres Fils - Tubes	5454	Recuit 1/4 dur 1/2 dur	0 H22 H24	80 180 200	240 280 300	19 9 8	1 2 3	60 70 80	70 000	4 4 4	4 4 4	4 4 4	1 2 2	3 2 2	4 4 4	3 3 3	2,68	134	23,6 X 10 ⁻⁶	Mn = 0,5 - 1,0 Cr = 0,05 - 0,2 Mg = 2,4 - 3,0
Tôles - Fils Barres Tubes Profilés	5754	Recuit 1/2 dur	0 H34	100 190	220 270	23 10	0 3	50 70	71 000	4 4	4 4	4 4	1 2	3 1	4 4	2 2	2,66	125	23,5 X 10 ⁻⁶	Mg = 2,6 - 3,6 Mn = 0,1 - 0,5
Barres Fils - Tubes Profilés	6060	Trempé revenu	T 4 T 5	90 170	150 220	22 14	3	65	69 000	4 4	3 3	3 3	2 3	2 3	4 4	4 4	2,70	200	23,2 X 10 ⁻⁶	Si = 0,3 - 0,6 Mg = 0,35 - 0,6
Tôles Barres Fils - Tubes Profilés	6061	Recuit Trempé Trempé revenu	0 T 4 T 6	60 130 270	120 230 310	28 23 13	1 3	30 65 95	69 000	4 4 4	2 2 2	3 3 3	1 2 3	4 2 4	4 4 4	2 2 2	2,71	155	23,6 X 10 ⁻⁶	Cr = 0,04 - 0,35 Si = 0,4 - 0,8 Mg = 0,8 - 1,2 Cu = 0,15 - 0,4
Tôles	6081	Recuit Trempé revenu	0 T 6	50 280	110 320	30 14	1	30 90	70 000	4 4	3 3	3 3	1 3	4 3	4 4	2 2	2,71	163	24 X 10 ⁻⁶	Si = 0,7 - 1,1 Mn = 0,1 - 0,45 Mg = 0,6 - 1,0
Barres Fils - Tubes Profilés	6082	Trempé revenu	T 6	280	320	14		90	70 000	4	3	3	3		4	2	2,71	163	24 X 10 ⁻⁶	Si = 0,7 - 1,3 Mn = 0,4 - 1,0 Mg = 0,6 - 1,2
Tôles Barres Fils - Tubes Profilés	7020	Trempé revenu	T 6	320	380	12		95	72 000	3	2	3	3		3	2	2,80	121	23,5 X 10 ⁻⁶	Mg = 1 - 1,4 Zn = 4,0 - 5,0 Ti + Zr = 0,08 - 0,25 Mn = 0,05 - 0,5
Barres	7049A	Trempé revenu	T 6	530	610	5		160	73 000	1	0	0	4		2	1	2,80	121	23,5 X 10 ⁻⁶	Cu = 1,2 - 1,9 Mg = 2,1 - 3,1 Zn = 7,2 - 8,4 Cr = 0,05 - 0,25
Tôles Barres Tubes Profilés	7075	Trempé revenu	T 6	480	540	10		145	72 000	1	0	0	4	0	2	1	2,80	121	23,5 X 10 ⁻⁶	Cu = 1,2 - 2,0 Mg = 2,1 - 2,9 Zn = 5,1 - 6,1 Cr = 0,18 - 0,28

0 : impropre - 1 : à éviter, précautions à prendre - 2 : possible - 3 : bon, utilisable sans problème - 4 : excellent, à recommander

* Rayon intérieur de pliage, en nombre de fois l'épaisseur

Principaux alliages d'aluminium de fonderie

Symbole	Etat	Caractéristiques mécaniques moyennes					Aptitudes technologiques						Propriétés physiques			Composition chimique (approximative) (%)	
		R (MPa)	R _{po.2} (MPa)	A %	HB	Module élasticité (MPa)	Au moulage	Résistance à l'action de		Soudure TIG et MIG	Usinage	A l'anodisation de		Masse Volumique (g/cm ³)	Conductibilité thermique (W/mK)		Coefficient dilatation linéaire entre 20 et 100°C
								Atmo-sphère	Air marin Eau de mer			Protec-tion	Déco-ration				
A-5/LR	Y 30	75	25	40	25	67 500	2	4	3	3	1	4	4	2,70	210	24 X 10 ⁻⁶	Fe = 0,17 - 0,28 Si ≤ 0,08 - 0,13
	Y 40	75	25	40	25		2	4	3	1	1	4	1				
A-G3T	Y 20	180	85	12	60	69 000	2	4	4	4	3	4	4	2,67	145	24 X 10 ⁻⁶	Mg = 2,7 - 3,3 Ti = 0,08 - 0,13
	Y 30	180	85	16	65		2	4	4	4	3	4	4				
A-G6Be	Y 20	195	115	6	65	69 000	2	4	4	4	3	4	3	2,64	125	24 X 10 ⁻⁶	Mg = 5,5 - 6,5 Be = 0,005 - 0,01
	Y 30	220	120	9	70	69 000	2	4	4	4	3	4	3				
A-G10SBe	Y 40	200	120	2	80	69 000	2	4	4	1	3	4	0	2,55	90	24 X 10 ⁻⁶	Si = 0,7 - 1,0 Fe = 0,3 - 0,5 Mg = 9,3 - 10,7 Be = 0,005 - 0,01
A-U5GT	Y 23	420	395	3	125	72 000	3	1	0	1	4	2	2	2,80	140	23 X 10 ⁻⁶	Fe = 0,12 - 0,23 Cu = 4,3 - 4,9 Mg = 0,25 - 0,35 Ti = 0,17 - 0,23
	Y 24	400	265	14	110		3	1	0	1	4	2	2				
	Y 33	420	380	8	125		2	1	0	1	4	2	2				
	Y 34	400	250	21	110		2	1	0	1	4	2	2				
A-U8S	Y 20	160	125	0,5	85	70 000	3	0	0	3	4	1	0	2,85	110	23 X 10 ⁻⁶	Si = 2,2 - 3,8 Cu = 6,3 - 8,2
	Y 30	190	130	0,5	90		3	0	0	3	4	1	0				
A-Z5G	Y 25	205	140	6	70	72 000	2	3	3	4	3	3	3	2,80	140	23 X 10 ⁻⁶	Mg = 0,55 - 0,70 Cu = 0,17 - 0,33 Zn = 4,7 - 5,3
	Y 29	205	120	9	65		2	3	3	4	3	3	3				
A-S2GT	Y 30	180	90	9	55	70 000	2	3	3	3	3	4	4	2,70	160	22 X 10 ⁻⁶	Si = 1,7 - 2,3 Mn = 0,33 - 0,47 Mg = 0,50 - 0,65
	Y 33	300	240	12	90		2	3	3	3	3	4	4				
A-S7G	Y 20	170	90	4	55	74 000	3	3	3	3	2	4	0	2,68	160	21,5 X 10 ⁻⁶	Si = 6,7 - 7,3 Mg = 0,30 - 0,40 Fe ≤ 0,27
	Y 23	250	200	3	90		3	3	3	3	3	4	0				
	Y 30	190	90	10	55		3	3	3	3	2	4	0				
	Y 33	280	200	11	90		3	3	3	3	3	4	0				
A-S7G03	Y 23	270	200	5	90	74 000	3	3	3	3	3	4	0	2,68	160	21,5 X 10 ⁻⁶	Si = 6,7 - 7,3 Mg = 0,30 - 0,40 Fe ≤ 0,14
	Y 30	190	90	14	55		3	3	3	3	2	4	0				
	Y 33	280	200	16	90		3	3	3	3	3	4	0				
A-S7G06	Y 23	275	250	1,5	100	74 000	3	3	3	3	3	4	0	2,68	160	21,5 X 10 ⁻⁶	Si = 6,7 - 7,3 Fe ≤ 0,14 Mg = 0,50 - 0,60
	Y 33	330	290	9	110		3	3	3	3	3	4	0				
A-S10G	Y 20	170	95	4	60	76 000	3	3	3	3	2	4	0	2,65	160	20,5 X 10 ⁻⁶	Si = 9,3 - 10,3 Mg = 0,25 - 0,35 Mn = 0,25 - 0,4
	Y 23	260	215	2	95		3	3	3	3	3	4	0				
	Y 30	195	95	9	60		3	3	3	3	2	4	0				
	Y 33	290	215	10	95		3	3	3	3	3	4	0				
A-S13	Y 20	165	80	7	55	76 000	4	3	3	4	1	4	0	2,65	165	20 X 10 ⁻⁶	Si = 12,2 - 13,2 Fe = 0,35 - 0,55
	Y 30	180	80	10	55		4	3	3	4	1	4	0				
A-S5U3	Y 20	180	150	0,5	75	72 000	3	1	0	4	3	2	0	2,75	120	22 X 10 ⁻⁶	Si = 4,7 - 5,3 Cu = 2,9 - 3,5 Mg = 0,15 - 0,25
	Y 30	220	150	1,5	75		3	1	0	4	3	2	0				
A-S9U3	Y 40	200	150	1	80	76 000	3	1	0	1	3	1	0	2,76	105	21 X 10 ⁻⁶	Fe ≤ 1,3 Zn ≤ 1,2 Si = 7,5 - 10 Cu = 2,5 - 4,0

0 : impropre - 1 : à éviter, précautions à prendre - 2 : possible - 3 : bon, utilisable sans problème - 4 : excellent, à recommander

* Rayon intérieur de plage, en nombre de fois l'épaisseur