



L'anodisation de l'aluminium

Maurice Duval, ing. Ph.D

12 février 2018

L'anodisation de l'aluminium

Maurice Duval, ing. Ph.D.

Introduction

Les alliages d'aluminium sont utilisés dans une multitude de produits avec ou sans protection de surface. À la suite des procédés de mise en forme de départ (laminage, extrusion, usinage, moulage), l'aspect de surface du métal est très variable et dépend de l'outillage et des variantes de ces procédés. Lorsque les tôles, les extrusions, les pièces usinées ou moulées subissent d'autres transformations (pliage, emboutissage, soudage), l'aspect initial des surfaces et la microstructure du métal sont plus ou moins altérés (frottement au contact des outils, déformation plastique). La dureté de l'aluminium, variable d'un alliage à l'autre, est inférieure aux aciers et nombre de matériaux ou de particules abrasives sont susceptibles de rayer les surfaces. Aussi, lorsque les pièces sont manipulées en production ou dans le transport, elles peuvent subir des altérations de surface (encoches, rayures) affectant leur aspect. L'aspect de surface et la microstructure du métal vont avoir une incidence sur la qualité visuelle après anodisation.

L'aluminium mis à nu réagit instantanément avec l'oxygène de l'air en se recouvrant d'une couche d'oxyde très mince, environ 3 nanomètres (0.00000012 pouce), soit de l'ordre de 3 couches moléculaires. C'est cette couche hermétique d'alumine (Al_2O_3) très dure, transparente, qui protège l'aluminium contre la corrosion et la poursuite de l'oxydation. Elle est très mince et fragile mais se renouvelle spontanément lorsqu'elle est enlevée. On s'est rendu compte, en 1857, que cette couche d'oxyde pouvait se former sur une anode d'aluminium dans une cellule d'électrolyse, d'où le terme anodisation (figure1).

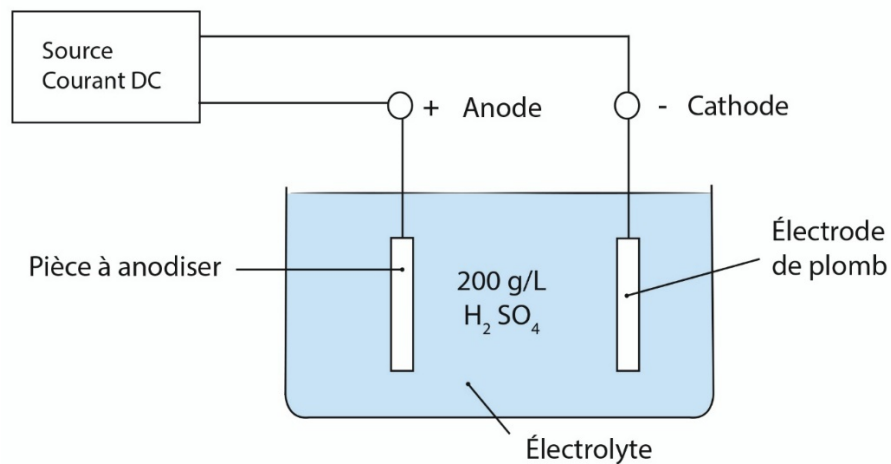


Figure 1 – Schéma d'une cellule d'électrolyse

Par la suite, de nombreux procédés ont été développés afin d'augmenter l'épaisseur de cette couche de protection, sa résistance, ses caractéristiques et son aspect. Les objectifs poursuivis sont de répondre aux principaux besoins (protection, décoration) pour tous les alliages avec la meilleure productivité et la plus faible empreinte environnementale. Les variantes principales portent sur la composition de l'électrolyte, le courant électrique, la température d'opération et la coloration. On connaît aujourd'hui de nombreux procédés avec acide sulfurique, chromique, phosphorique, oxalique et des combinaisons d'acides. L'anodisation sulfurique, brevetée en 1937, est la plus répandue dans l'industrie en raison de son faible coût d'opération (électrolyte, contrôle des paramètres) et son large domaine d'utilisation. La mise en œuvre de ce procédé est décrite plus loin dans le document.

Avantages de l'anodisation ou pourquoi anodiser

Augmentation de la résistance à la corrosion

La couche d'oxyde, qui se forme sur l'aluminium, offre une barrière contre l'érosion et l'attaque des polluants atmosphériques. Celle-ci est d'autant plus efficace lorsque la couche est épaisse. L'aluminium reste protégé par son oxydation naturelle, mais sans l'anodisation, en environnement extérieur, sa surface va se ternir avec le temps et se couvrir de piqûres de corrosion. Les familles d'alliage, 1000, 3000, 5000 et 6000, présentent naturellement une bonne résistance à la corrosion atmosphérique. Pour ces alliages, la profondeur des piqûres, qui varie de 100 à 500 μm selon les alliages, tend vers ce maximum après 2 ans. On peut voir, à la figure 2, l'influence de l'épaisseur de la couche d'oxyde sur l'apparition de ce phénomène. Pour la protection architecturale, où la qualité d'aspect doit être durable, on recommande une épaisseur minimale de 15 à 20 μm (6 à 8 dix-millièmes de pouce) pour la couche d'oxyde. Pour une protection et une décoration courante (en intérieur), une épaisseur de 5 à 8 μm est suffisante. L'aluminium, anodisé ou non, présente un net avantage par rapport à l'acier et à l'acier galvanisé pour sa résistance à la corrosion contre les embruns marins ou routiers (figure 3), (référence 1, page 233).

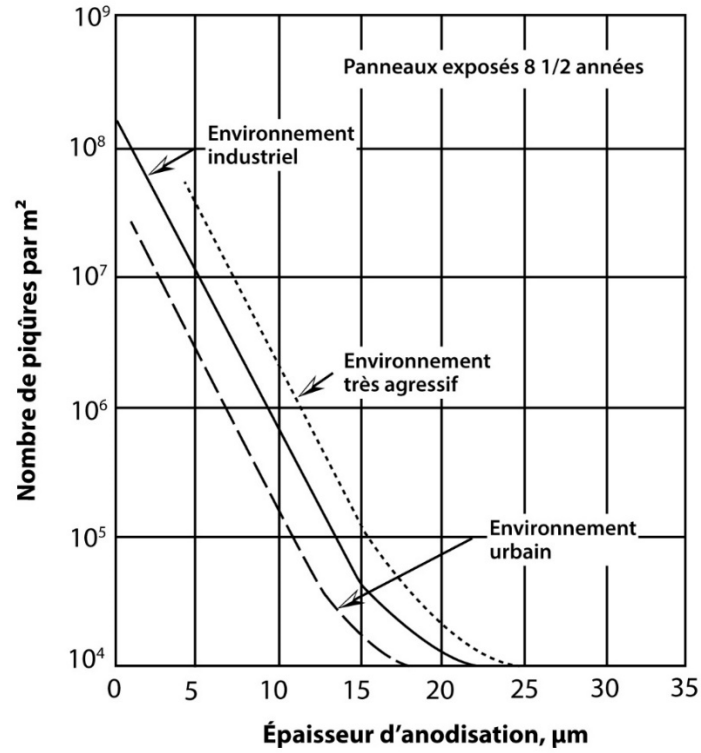


Figure 2 – Densité de piqûres en fonction de l'épaisseur d'anodisation sur un alliage 1100 exposé 8.5 années en atmosphères industrielles

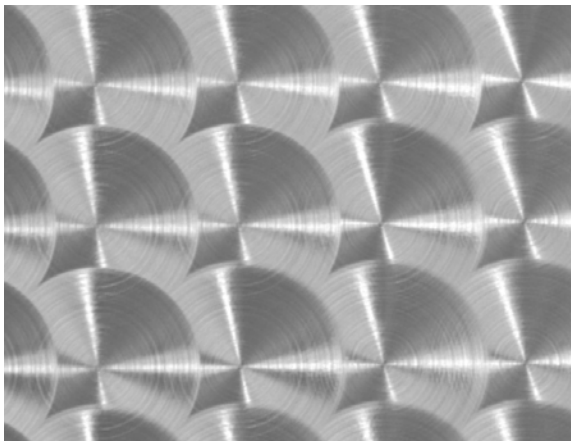


Figure 3 – Poteau d'éclairage de ville; acier galvanisé, acier peint et aluminium

Il faut cependant signaler que l'anodisation est inefficace pour contrer la corrosion galvanique, Par exemple, certains caoutchoucs noirs, chargés en carbone, (joints de fenêtres, rondelles) peuvent provoquer une corrosion galvanique, et ce même sur les tôles anodisées.

Lustre et coloration

L'aluminium anodisé présente une surface lustrée, dont l'aspect dépend de l'état de la surface de base avant anodisation. Cet état de surface peut être produit mécaniquement pour créer des motifs décoratifs ou par une attaque chimique pour produire un aspect mat ou brillant (voir figure 4). Il faut noter que les marques de surface indésirables, produites par l'outillage ou la manipulation, ne disparaissent pas à l'anodisation et vont même être amplifiées visuellement. Dans le domaine du bâtiment, les bains de décapage utilisés avant l'anodisation produisent un fini satiné décoratif après l'anodisation. Il faut tenir compte du fait que ce décapage va faire disparaître le fini obtenu par un polissage mécanique. Pour conserver cet aspect brillant ou le produire chimiquement, on utilise des bains qui vont niveler les rugosités de surface. Ces prétraitements de surface (brillantage chimique et électrolytique) sont souvent utilisés après un polissage mécanique.



a)



ALMECO
PRE-ANODIZED ALUMINIUM

b)

Figure 4 – a) Motif bouchonnage b) Surface polie

La couche d'oxyde produite par l'anodisation est poreuse et peut absorber des colorants organiques (figures 5 et 6). L'opération de colmatage subséquente va les emprisonner. C'est la transparence de la couche d'oxyde entre les pores, combinée à la réflectivité du métal sous-jacent, qui conserve cet éclat métallique particulier à la surface colorée.

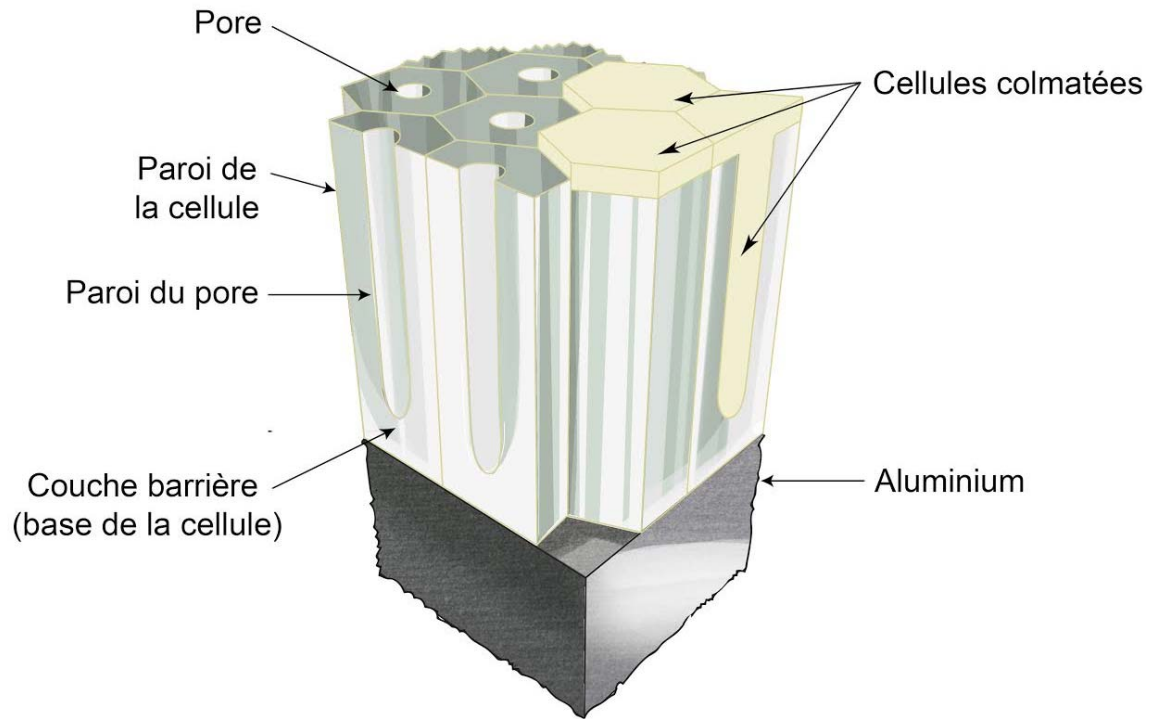


Figure 5 – Schéma de la couche anodique



Figure 6 – Échantillons de couleur (Almaho)

On peut comprendre que la porosité doit avoir une structure régulière sur toute la surface de la pièce, sinon la couleur ne sera pas uniforme. Cette structure poreuse, de l'ordre de 50 milliards de pores par centimètre carré, varie avec la nature du métal (composition, microstructure) et le contrôle du procédé lui-même, ainsi que d'autres facteurs, tels que mentionnés précédemment, sont susceptibles de la modifier localement (pliage, formage, soudage). Par exemple, dans l'architecture, il faut s'accommoder de cette variabilité entre les lots de production en répartissant les couleurs (figure 7) comme on le fait pour l'installation de grandes surfaces en matériaux naturels, comme le bois et la pierre.



Figure 7 – Exemple de la variabilité des couleurs (anodisation autocolorée)

Vu la taille des pores ($< 1 \mu\text{m}$), les pigments minéraux, impliquent la précipitation de la pigmentation dans les pores. Ces pigments, en général des oxydes métalliques, offrent une coloration nettement plus stable que les colorants organiques (résistance aux UV) et peuvent être utilisés dans le domaine architectural. De nombreux procédés ont été développés pour produire une coloration pendant l'anodisation (anodisation autocolorée). Les constituants de l'alliage, étant incorporés dans l'oxyde, la coloration est sensible à la composition de l'alliage. Les couleurs qu'on peut obtenir avec ces procédés se situent dans des teintes qui vont du jaune bronze à noir. Ce procédé, dont le contrôle des couleurs est affecté par la provenance du métal, tend à être remplacé par la coloration électrolytique où les pigments minéraux se déposent au fond des pores. Cette coloration électrolytique, qui offre une meilleure qualité architecturale, est une étape qui s'ajoute dans le processus d'anodisation conventionnelle.

De nombreux procédés de coloration électrolytique ont été développés en utilisant des sels de nickel, de cobalt et d'étain dans le bain. Les couleurs obtenues sont dans les teintes de bronze clair à bronze foncé. On a réussi à obtenir des teintes dans le rouge et la couleur or en utilisant d'autres sels métalliques.

La couche d'oxyde poreuse permet de retenir une émulsion photographique. Après exposition sous l'action du révélateur et du fixateur, l'image du procédé argentique se forme au fond des pores. Connu sous le nom *Metalphoto*, ce procédé offre une haute résolution d'image (qualité photo) et une grande résistance aux atmosphères agressives pour les plaques d'identification.

Il faut souligner que la bonne résistance à la corrosion atmosphérique des couches, colorées ou non, va dépendre de la qualité du colmatage. Le colmatage consiste à produire une réaction d'hydratation des surfaces exposées de la couche d'alumine ($\text{Al}_2\text{O}_3 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Le gonflement superficiel, qui résulte de cette transformation en pseudo-boehmite, va colmater les pores (figure 5).

Résistance à l'usure

Alors que les alliages d'aluminium les plus durs ont une dureté à peine comparable aux aciers courants (120 HB), la dureté de la couche d'oxyde d'aluminium (475 HB; environ 9 sur l'échelle de Mohs) est comparable à celle de l'alumine et des oxydes naturels, rubis, corindon (émeri) utilisés comme abrasif et dans la fabrication des meules. Pour augmenter la résistance à l'abrasion au-delà de ce qu'offre l'anodisation architecturale, on va produire, par anodisation sulfurique, des couches d'oxyde de 25 à 100 μm (voir *Propriétés mécaniques*, plus loin dans le texte). Plusieurs procédés exclusifs « propriétaires » ont été développés en vue d'augmenter la productivité et l'épaisseur de la couche d'oxyde où dans certaines conditions on peut atteindre jusqu'à 700 μm d'épaisseur (procédé *Lasser*).

Cette grande résistance à l'usure de l'anodisation dure est généralement requise pour les composantes en aluminium exposées au frottement et à l'abrasion (pièces coulissantes, articulations pivotantes, engrenages, cames, pistons, blindages).

Couche d'accrochage

La forte adhérence de la couche d'oxyde sur l'aluminium et l'adhérence des revêtements organiques sur couche non colmatée offrent un excellent support pour la plupart des systèmes de peinture et les adhésifs structuraux. La transparence de la couche d'oxyde en fait une sous couche idéale avant vernissage. Il n'est pas avantageux d'effectuer un colmatage et il faut prendre garde à l'hydratation naturelle de la couche anodique qui tend à diminuer l'adhérence (conditions de stockage et délais avant enduction) des revêtements et des adhésifs sur la couche d'oxyde. La transformation de la surface de

l'oxyde en pseudo-boehmite change les propriétés de surface et le colmatage vient diminuer la surface d'accrochage.

Les pièces en aluminium qui doivent être utilisées dans des environnements très agressifs sont normalement anodisées avant l'application des revêtements organiques. Dans ce cas le colmatage pourrait être préférable malgré que cela soit nuisible à l'adhérence du revêtement organique.

Isolation électrique

L'oxyde d'aluminium est un bon isolant (diélectrique) électrique. La tension de claquage varie de quelques volts à plusieurs milliers de volts selon les propriétés et l'épaisseur de la couche anodique. On exploite cette caractéristique électrique dans la fabrication des feuilles pour condensateurs électrolytiques en produisant une couche anodique (quelques dizaines de nanomètres) non poreuse de type barrière.

Pouvoir réflecteur et émissivité

L'épaisseur de la couche anodique doit être minimisée pour un bon pouvoir réflecteur. Par exemple, la lumière infrarouge réfléchi en provenance d'une source à 900° C est de 80 % pour une couche de 2 µm et de 40 % lorsque la couche atteint 20 µm. L'émissivité dans l'infrarouge est très faible (4 %) pour l'aluminium nu alors qu'elle est d'environ 80 % pour une couche de 10 µm, valeur qui peut être encore augmentée par une coloration noire électrolytique.

Propriétés mécaniques

La grande dureté de la couche anodique augmente la dureté de surface « apparente ». Il faut comprendre que la résistance mécanique de la couche est tributaire de son épaisseur et de la dureté du métal sous-jacent. Cette couche va fissurer et se fendiller si le métal se déforme au-delà de la capacité d'allongement de l'oxyde (pliage, choc thermique, forces de contact, etc.). En effet, cet oxyde a le comportement d'une céramique dure et fragile et l'allongement que peut supporter la surface anodique avant l'apparition des criques est de 0.3 à 0.4 % ; on est donc très près de la limite élastique conventionnelle de 0.2% des alliages d'aluminium. L'apparition et la présence de ce type de défauts, qui jouent un rôle d'amorce de fissures, va diminuer la durée de vie en fatigue des alliages d'aluminium anodisés. À titre d'exemple, la résistance en fatigue à 1 000 000 cycles de l'alliage 6061 passe de 105 MPa à 40 MPa. Les autres propriétés mécaniques ne sont pas affectées par l'anodisation. Par ailleurs, la résistance à la corrosion sera grandement affectée par la présence de ces criques.

Le procédé

Le procédé d'anodisation sulfurique est le plus courant. On en trouve une bonne description en pratique artisanale par S. Bertorello sur le deuxième lien Internet. Le procédé industriel est similaire pour la composition du bain d'anodisation :

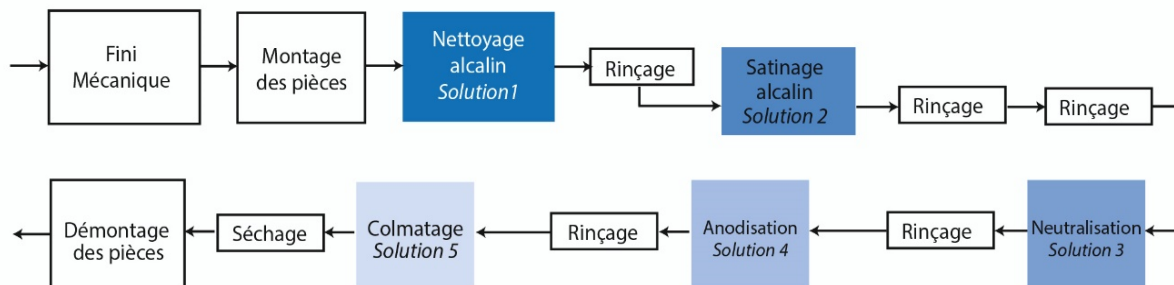
- Teneur en H₂SO₄ entre 180 et 200 g/L ;
- Teneur en aluminium dissous < 15 g/L ;
- Densité de courant de 0.9 à 1.2 A/dm² ;
- Refroidissement pour maintenir la température entre 20° C et 25° C ;
- Agitation du bain pour uniformiser la concentration et la température.

Le procédé complet comprend les étapes suivantes :

1. Montage des pièces
2. Dégraissage alcalin (2-4 minutes)
3. Rinçage
4. Satinage alcalin (2-20 minutes)
5. Rinçage
6. Neutralisation (2 minutes)
7. Rinçage
8. Anodisation (5-60 minutes)
9. Rinçage
10. Coloration (coloration chimique ou électrolytique), si souhaitée
11. Rinçage final
12. Colmatage à chaud, eau bouillante déminéralisée (5-20 minutes)
13. Démontage des pièces

Pour l'anodisation dure, on opère avec un bain entre 0° C et 10° C et une densité de courant entre 2 et 3.6 A/dm².

La qualité du colmatage est importante pour la résistance à la corrosion, la résistance à l'abrasion et l'imperméabilité de la couche qui, autrement, absorberait les liquides (huiles, colorants). Les surfaces colmatées offrent donc une résistance aux taches et aux empreintes digitales.



Solution #	Type de solution	Composition	Température		Temps (min)
			°C	°F	
1	Nettoyage alcalin	-	60-71	140-160	2-4
2	Satinage alcalin	NaOH 5 % en poids	50-71	120-160	2-20
3	Neutralisation	HNO ₃ 25-35 % de volume	Pièce	Pièce	2
4	Anodisation	H ₂ SO ₄ 15 % en poids	21-25	70-75	5-60
5	Colmatage	Eau (pH 5.5-6.5)	100	212	5-20

Figure 8 – Séquence des opérations pour l’anodisation sulfurique

Aptitude à l’anodisation

On retrouve dans le tableau 1 suivant l’aptitude à l’anodisation de différents alliages pour la protection (résistance à la corrosion) et pour la décoration (lustre et coloration).

ALLIAGES D'ALUMINIUM CORROYÉS	APTITUDES À L'ANODISATION	
	PROTECTION	DÉCORATION
1050A	4	4
2011	2	2
2014	2	1
2017A	2	1
2024	2	1
2030	2	2
2117	2	2
2618A	2	1
3002	4	4
3003	3	1
3004	3	1
3005	3	1
5005	4	4
5052	4	3
5083	4	1
5086	4	1
5150	4	4
5251	4	3
5454	4	3
5754	4	2
6060	4	4

6061	4	2
6081	4	2
6082	4	2
7020	3	2
7049A	2	1
7075	2	1

ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE	APTITUDES À L'ANODISATION	
	PROTECTION	DÉCORATION
160	4	4
201	2	2
206	2	2
296	1	0
308	2	0
356	4	0
357	4	0
359	4	0
380	1	0
B413	4	0
514	4	4
520	4	0
710	3	3

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

Tableau 1

Références

- 1- Corrosion de l'aluminium, C. Vargel, Dunod, 1999
- 2- Some observations on industrial sealing and autosealing-aging of anodized aluminium. V. Lopez, E. Otero, A. Bautista, J.A. Gonzalez. ALUMINIUM, vol74, p.398, 1998
- 3- Aluminum and Aluminum Alloys, Specialty Handbook, ASM International
- 4- Anodisation de l'aluminium et de ses alliages, J. S. Safrany, M 1 630v2, Éditions T.I.
- 5- Rainbow colours in Architecture and Carmaking, Henkel Surface Technologies, Aluminium International Today, July/August 2006
- 6- Le Protocole Almaho, Almaho inc., 2007

Liens Internet

http://www.aluminium.fr/wp-content/uploads/2013/10/vademecum_anodisation.pdf

<http://serge.bertorello.free.fr/anodstn/anodstn.html>

<https://books.google.ca/books?id=8v4kBQAAQBAJ&pg=PA164&dq=qualanod&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiIyoif5MfTAhUm6IMKHwBeB6cQ6AEIjAA#v=onepage&q=qualanod&f=false>

<https://metalphoto.com/>

Services d'anodisation au Québec

A. & D. Prévost inc.

305, 12^e Avenue, Richelieu

<http://prevost-architectural.com/>

Almaho inc.

575, rue des Calfats, Lévis

<http://www.almaho.com/>

Alumico Métal et oxydation inc.

4343, rue Hochelaga, bureau 100, Montréal

<http://alumico.com/>

Anacolor inc.

4290, rue St-Félix, Québec

<http://anacolor.com/>

Anodisation Verdun inc.

3971, rue de Verdun, Verdun

<http://www.verdunanodizing.com/index.php?lang=fr&>

A3 Surfaces

534, rue Jacques-Cartier Est, Chicoutimi

<https://www.a3surfaces.com/>

LP Tech

4747, boulevard Lite, Laval

<http://www.lptech.ca/fr/procedes.html>

Groupe Meloche inc

491, rue des Érables, Salaberry-de-Valleyfield

<http://www.melocheinc.com/services/traitement-de-surface>

Groupe Altech inc.

2455, rue Halpern, Montréal

http://www.groupaltech.com/altech_processes_fr.php

Finition Ultraspec inc.

2600, rue de Miniac, Montréal

<http://anodisation.ca/fr/capabilities.html>

Anodisation Québec
306, avenue Galilée, Québec
<http://www.anodisationquebec.com/>

Anodisation & Peinture T.N.M. Inc.
21, chemin de l'Aviation, Pointe-Claire
<http://www.tnminc.ca/EPage.aspx?id=8>

Placage Granby Inc.
300, rue Saint-Urbain, Granby
<https://granby-industriel.com/en/businesses/placage-granby-inc/>