

NACELLES

Numéro / issue : 8 (Printemps / Spring 2020)

Les Matériaux de l'aéronautique : approches historiques et patrimoniales | Aeronautical Materials: Historical and Heritage Approaches

Christian Degrigny

L'Aluminium patrimonial : un métal moderne et pourtant méconnu

Résumé

L'aluminium est omniprésent autour de nous. Sa présence dans notre vie de tous les jours ne doit pas faire oublier qu'il est aussi patrimonial. Les propriétés qui le caractérisent : légèreté, résistance à la corrosion ont assuré son succès industriel mais d'autres comme son aptitude au recyclage a conduit à la disparition de nombreux témoins de l'évolution technologique du métal. Au travers de l'examen d'un certain nombre d'objets patrimoniaux, en particulier du secteur aéronautique, cet article vise à cerner les acquis mais aussi les lacunes qui entourent la connaissance historique du métal et de ses alliages. Les formes de corrosion auxquelles ces matériaux sont sujets sont pour certaines relativement bien connues, alors que d'autres sont encore mal maîtrisées. Le manque de connaissances sur la nature des objets en aluminium et leur état de conservation rend tout diagnostic délicat, remettant ainsi en cause la conservation à long terme des objets associés. Des propositions sont faites pour remédier à cet état de fait.

Abstract

Aluminium is omnipresent around us. Its presence in our daily lives should not make us forget that it is also part of our heritage. The properties that characterize it: lightness, corrosion resistance have ensured its industrial success, but others, such as its ability to recycle, have led to the disappearance of many witnesses to the technological evolution of the metal. Through the examination of a number of heritage objects, in particular in the aeronautics sector, this article aims to identify the achievements but also the gaps in historical knowledge of the metal and its alloys. The forms of corrosion to which these materials are subject are in some cases relatively well known, while in others they are still poorly controlled. The lack of knowledge about the nature of aluminium objects and their state of conservation makes any diagnosis difficult, thus jeopardizing the long-term conservation of the associated objects. Proposals are being made to remedy this situation.

Introduction

1 L'aluminium est méconnu dans le domaine du patrimoine. Les professionnels se réfèrent rarement à sa composition exacte et aux nombreuses familles d'alliages existants. Étant par ailleurs considéré comme relativement inaltérable par le monde industriel et la société civile, les éventuelles formes de corrosion qu'il développe sont peu étudiées.

2 L'aluminium est un métal moderne inventé dans la seconde moitié du XIX^e siècle. Il n'est donc pas surprenant que l'intérêt récent pour ce métal accompagne celui, croissant, pour le patrimoine industriel. On dispose, par ailleurs, de toute la littérature technique et scientifique relative à son développement. Ce large savoir devrait faciliter tout diagnostic sur l'état de conservation des objets en aluminium patrimoniaux. Pourtant il n'en est rien. Si de nombreux objets en aluminium sont répertoriés dans les collections publiques, ils sont rarement exposés. Souvent stockés en réserve, ils sont peu documentés et leur état de conservation est mal maîtrisé.

3 Le secteur aéronautique échappe quelque peu à ce constat. L'implication, dans les années 1980, de chercheurs en conservation-restauration dans l'examen des matériaux issus de structures d'avion et la possibilité de mener plus facilement des examens invasifs sur des objets / structures de grandes dimensions font que la connaissance du métal est plus développée. Il n'en reste pas moins que la matérialité des artefacts n'est pas toujours appréciée à sa juste valeur à l'opposé de la plus ou moins grande rareté de l'objet qu'ils constituent.

4 Dans la suite, et après un bref historique sur le matériau et son développement, nous décrivons combien la bonne connaissance du domaine d'application des matériaux permet d'appréhender qualitativement la nature chimique des matériaux. L'accès à leur composition requiert toutefois certains moyens qui restent relativement accessibles. Nous reprenons également les connaissances sur les formes habituelles de corrosion rencontrées sur les alliages d'aluminium afin de spécifier celles observées plus particulièrement sur les objets patrimoniaux, dont ceux du secteur aéronautique. L'article se termine par quelques recommandations pour diagnostiquer au mieux les objets en alliage d'aluminium dans le but d'assurer leur conservation à long terme.

Rappel historique sur l'aluminium

5 L'invention tardive de l'aluminium (Al) est due à sa très forte affinité pour l'oxygène, empêchant toute opération traditionnelle de réduction à température élevée par le carbone. En 1807, H. Davy fait des essais infructueux de production

par décomposition électrolytique de l'alumine. La source d'énergie est malheureusement trop faible et durant presque quatre-vingt ans il faudra compter sur le procédé chimique et onéreux mis au point par H. Sainte-Claire Deville, limitant d'abord l'utilisation du métal à la réalisation de bijoux et de pièces d'orfèvrerie. Après C. Oersted (1825), puis F. Wöhler (1827), c'est donc bien H. Sainte-Claire Deville, en 1854, qui parvient à produire du métal et à développer industriellement son invention grâce au soutien financier de Napoléon III : le procédé est basé sur la réduction du chlorure d'aluminium par du potassium puis du sodium. Le nouveau métal a des propriétés étonnantes : il est très léger, malléable et quasi inaltérable. Son coût diminuant, on l'utilise pour des objets phares de la société de la Belle Époque : surtout de table de Christofle pour Napoléon III (1858)¹, la pyramide sommitale du Monument de Washington (1884)².

⁶L'année 1886 est marquée par la découverte quasi simultanée par P. Héroult (France) et C.-M. Hall (États-Unis) de la production électrolytique de l'aluminium³. Celle-ci a été rendue possible par l'invention par Z. Gramme de la dynamo (1871), permettant de produire du courant continu en grande quantité, et la meilleure connaissance de la réactivité des composés de l'aluminium dont l'alumine et la cryolite (fluorure double d'aluminium et de sodium). Leur mise en solution à 960 °C permet l'obtention de l'aluminium par réduction. Le procédé s'industrialise immédiatement et le coût de l'aluminium chute brutalement. De nouveaux débouchés sont donc rendus possibles ou doivent être trouvés à ce métal⁴.

⁷Le domaine des transports s'approprie très vite le nouveau métal en raison de sa légèreté⁵. La construction des yachts de course à l'extrême fin du XIX^e siècle constitue une première tentative. Mais cette épopée ne durera guère que quelques années en raison de la présence importante de cuivre (Cu) dans l'alliage qui induit des piles galvaniques, rendant le métal impropre à cette utilisation⁶. Puis les nouvelles industries automobiles et aéronautiques multiplient l'utilisation de pièces en fonte d'aluminium⁷. Après la Première Guerre mondiale, l'aluminium s'impose définitivement dans le domaine aéronautique et gagne petit à petit du terrain dans le domaine de l'emballage⁸.

Domaines d'utilisation de l'aluminium et de ses alliages

⁸Les premiers alliages d'aluminium (période chimique), qu'il s'agisse de pièces corroyées ou de fontes, contiennent invariablement du fer (Fe) et du silicium (Si,

jusqu'à 10 % en masse), mais également du cuivre de 2 à 4 % en masse⁹. Plus tard et jusqu'au premier quart du XX^e siècle, on trouve associé aux éléments précédents l'étain (Sn) qui tend à fragiliser le matériau qui se fissure¹⁰. À la même période, des alliages aux compositions bien définies sont mis en œuvre tels le Duralumin inventé en 1906 par A. Wilm et obtenu par durcissement structural et contenant du Cu (3-5 %), du magnésium (Mg) et du manganèse (Mn) en concentrations moindres¹¹, et l'Alpax en 1920, alliage de fonderie Al-Si (12 %) indispensable aux secteurs de l'automobile et de la chimie. Progressivement, l'industrie a mis en place les grandes familles d'alliages (aluminium peu allié – 1XXX, Al-Cu – 2XXX, Al-Mn – 3XXX, Al-Si – 4XXX, Al-Mg – 5XXX, Al-Mg-Si – 6XXX, Al-zinc (Zn) – 7XXX) devant répondre aux nombreux besoins de la société moderne et dont les désignations au niveau international ne seront adoptées qu'en 1970¹².

9L'utilisation de tel ou tel alliage d'aluminium est basée sur sa composition et sur ses propriétés physiques. Aussi, les experts, tout comme les fournisseurs de matière première, associent telle ou telle nuance à un emploi préconisé (tab. 1).

Tableau 1. Exemples d'application des alliages d'aluminium corroyés.

Désignation	Domaine d'application	Articles
1050A	Bâtiments	Assemblage
	Chimie, produits alimentaires	Capsules, boîtes de conserve, emballages, aérosols
	Sport	Articles de camping
1090 ; 1095 ; 1098 ; 1099	Luminaires, décoration	Articles divers
1110	Chimie	Équipements de traitements chimiques, pales de ventilateurs
1200	Chimie, produits alimentaires	Cuves d'acide nitrique, échangeurs
	Transport	Échangeurs, radiateurs, cryogénie
1370	Électricité	Câbles haute tension

2014	<i>Aéronautique et armement</i>	<i>Structures d'avions, tôles de fuselage</i>
2017A	Mécanique générale	Pièces de machines
2024	<i>Aéronautique et armement</i>	<i>Munitions, structures d'avions, tôles de fuselage</i>
2219	Mécanique générale	Baguettes de soudure
2618A	<i>Aéronautique et armement</i>	<i>Structures d'avions, tôles de fuselage</i>
3003	Bâtiments	Assemblage
	Chimie, produits alimentaires	Ustensiles de cuisine, cuves d'acide nitrique, échangeurs, tubes d'irrigation
	Sport	Articles de camping, meubles de jardin
	Transport	Caravanes, habillage de camions et d'autocars, échangeurs, radiateurs, cryogénie
3004	Produits alimentaires	Canettes
3105	Bâtiments	Assemblage
	Chimie, produits alimentaires	Capsules, boîtes de conserve, emballages, aérosols
4006	Chimie, produits alimentaires	Ustensiles de cuisine
4043	Mécanique générale	Baguettes de soudure
5005	Matériaux anodisés	Tous types d'objets
5086	Transport	Ridelles, bennes, citernes, échangeurs, radiateurs, cryogénie
5154	Emballage	
5251	Mécanique générale	Panneaux, matériaux résistant à la corrosion

5754	Mécanique générale	Visserie, boulonnerie, rivets
6005A	Transport	Voitures de chemin de fer
6060	Électricité	Ossature d'armoires électriques
	Transport	Panneaux de signalisation
6101	Électricité	Méplats conducteurs
6106	Électricité	Culots de lampes, pylônes
7010	Sport	Mousquetons d'alpinisme
7020	<i>Aéronautique et armement</i>	<i>Munitions</i>
	Sport	Cannes de ski, inserts dans les semelles de ski
7049	Aéronautique et armement	Munitions
7075	Mécanique générale	Visserie, boulonnerie, rivets, moules pour la plasturgie, semelles d'outillage de découpe
	Sport	Cannes de ski, inserts dans les semelles de ski, mousquetons d'alpinisme
	<i>Aéronautique et armement</i>	<i>Structures d'avions, tôles de fuselage</i>

Les désignations en italique sont spécifiques au domaine aéronautique.

Euralliances.com: www.euralliance.com/alliage.html (consulté le 18/04/2020) / TALAT - Training in Aluminium Technologies : <https://aluminium-guide.com/en/talat-lectures/> (consulté le 18/04/2020) / Aluminium Association. 2009. International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys, Registration Record Series, Teal sheets / DAVIS Joseph R., « Aluminium and Aluminium Alloys », in *Alloying: Understanding the basics*, ASM International, 2001, p. 351-416 / REBOUL Max, « Corrosion des alliages d'aluminium », *Technique de l'ingénieur*, COR325, 2005, p. 1-19.

¹⁰Sur cette base, il est intéressant d'étudier la manière dont ces mêmes matériaux ont effectivement été utilisés et ont évolué durant toute la période de développement de l'industrie de l'aluminium. L'aptitude au recyclage de

l'aluminium fait que de nombreux objets historiques ont disparu, à la fois durant la période chimique (avant 1886) et la période électrolytique (de 1886 à nos jours). Aussi les objets patrimoniaux sont essentiels à l'étude de l'évolution technologique du métal et de ses alliages, surtout s'ils sont datés. Pour disposer d'une vision d'ensemble et éviter toute erreur d'attribution, il est important de prendre en compte l'évolution des dénominations et des désignations avec le temps, au sein d'un même pays. Ainsi en France, le duralumin est également appelé dural et les désignations AU4G, AU4G1 et AU4SG sont devenues 2017, 2024 et 2014 lors de la normalisation internationale de 1970. Aux États-Unis, Alcoa a créé en 1920 un alliage équivalent au duralumin dénommé 17S qui a été optimisé en alliage 24S dans les années 1930¹³.

¹¹Quelques-uns des premiers objets en aluminium (période chimique) ont survécu, tel le fléau de la balance des frères Collot (1855) du musée des Arts et Métiers de Paris, ou la chaudière de l'hélicoptère coaxial à vapeur de G. de Ponton d'Amécourt (1863) du musée de l'Air et de l'Espace du Bourget. Leur analyse par méthode PIXE (accélérateur de particules) a montré qu'ils contiennent, en dehors des éléments silicium et cuivre, les éléments fer, manganèse et plomb en proportions suffisamment importantes pour les distinguer de l'aluminium électrolytique¹⁴. D'importantes collections patrimoniales ont par ailleurs été constituées comme la collection privée de Jean Plateau¹⁵ et celle de l'Espace Alu de Saint-Michel-de-Maurienne¹⁶. L'Institut pour l'histoire de l'aluminium créé en 1986 apporte, grâce à ses archives, d'importantes informations historiques sur ces objets et contribue également à leur valorisation (cas de la collection Plateau) mais aucune analyse systématique des matériaux n'a été menée jusqu'à aujourd'hui.

¹²Un travail récent réalisé sur quatre collections suisses (collections techniques, scientifiques et ethnographiques) datant principalement du xx^e siècle a permis d'appréhender l'utilisation de l'aluminium et de ses alliages en fonction des domaines d'emploi¹⁷. Ainsi on trouve majoritairement les alliages très peu alliés (1050, 1110, 4006)¹⁸ pour les ustensiles de cuisine et les activités de plein air. Les objets techniques requérant des composants aux propriétés mécaniques particulières utilisent plutôt des alliages Al-Cu, Al-Si, Al-Mg et Al-Mg-Si. Une proportion non négligeable d'alliages complexes contenant les éléments majoritaires Cu, Zn, Fe, Si mais également les éléments minoritaires Sn, plomb (Pb) et Mn est également identifiée. En dehors des aluminiums peu alliés, les autres alliages ne correspondent que rarement aux désignations établies par les normes internationales. Les matériaux recyclés entrent également dans cette catégorie d'objets difficilement classables.

13 L'analyse élémentaire par fluorescence des rayons X d'une série de timbales et de gourdes conservées au Musée national suisse (fig. 1) et produites entre 1900 et 1983 nous a permis d'observer une nette diminution de la concentration en silicium avec le temps (tab. 2), sauf entre les deux guerres mondiales (recyclage juste après la Première Guerre, pénurie avant la Seconde ?), faisant passer au cours du siècle le métal de la famille 4XXX à la famille 1XXX.

Fig. 1. Ensemble de gourdes et timbales.



(Musée national suisse)

Tableau 2. Évolution de la composition de timbales en aluminium durant le xx^e siècle.

Date / n° inventaire	Al	Si	Fe	Autres	Date / n° inventaire	Al	Si	Fe	Autres
1900 FD	98,4	1	0,5		1935 G /+S	98,7	0,6	0,7	
1909 MZ / +E	97,7	1,5	0,8		1935 BAG /+S	99	0,5	0,3	
1913 Merker	98,5	0,9	0,5		1937 SIGG /+T	98,5	1	0,4	
1916 MZ /KX	98,1	1,1	0,8		1937 MZ/KI	97,5	1,5	0,6	
1919 MZ /+S	96,6	2,1	0,9	Zn 0,2	1939 agG /+E	98,5	0,6	0,8	

1921 MZ /T+	97,2	0,9	0,5	Ti 0,9	1940 BAG /+E	98,9	0,4	0,5	
1923 Merker	98	1,4	0,6		1940 agG / KI	98,3	0,7	0,7	
1925 MZ /K VII	97,2	1,3	0,5		1941 BAG /+T	98,9	0,5	0,6	
1925 MZ /K IX	98,2	1,2	0,5		1942 agG /+S	98,8	0,4	0,7	
1927 MZ /+T	98,1	0,7	0,9	Zn 0,1	1944 agG /+T	98,5	0,6	0,8	
1927 MZ +S	97,8	1,2	0,7	Zn 0,2	1950 agG /+T	98,8	0,3	0,9	
1930 MZ /+S	98,5	0,6	0,6	Sn 0,1	1963 SIGG	99,5	0,1	0,3	
1933 G / K I	99,2	0,3	0,4		1983 JE	99	-	0,3	Mn 0,4 ; Cr 0,1 ; Ti 0,1
1934 G /+S	98,8	0,8	0,3						

(Musée national suisse)

¹⁴À l’opposé, les matériaux aéronautiques semblent correspondre à des désignations bien répertoriées^{19 20}. On trouve ainsi le duralumin utilisé très tôt pour certains éléments du Bréguet 14 (1914), puis plus largement pour le Junkers 14 (1917). Donner une composition précise au duralumin n’est pas chose facile car rien qu’en France cinq alliages correspondent à cette dénomination dans les années 1950, la concentration en cuivre variant de 3 à 5,6 %²¹. Ce métal universel a su s’adapter à des environnements agressifs. Ainsi lorsque les hydravions se sont développés entre les deux guerres mondiales, les fuselages en duralumin étant fortement sensibles aux chlorures des milieux subaquatiques, on a protégé le métal sur ces deux côtés par colaminage de fines tôles d’aluminium pur : le Védal était né²².

¹⁵Les vestiges aéronautiques n'ont pas échappé à la destruction. Des tonnes d'épaves ont été ferrillées suite à la seconde guerre mondiale, à tel point qu'aujourd'hui certains modèles d'avion ont totalement disparu (tab. 3). Ils sont autant de lacunes dans l'histoire du développement de l'aluminium et de ses alliages.

Tableau 3. Quelques exemples d'avions de la Seconde Guerre mondiale qui ont totalement disparu.

Fabricant / modèle	Emploi	Période de service	Production totale
Dornier 17/215 (Luftwaffe)	Bombardier	1937-1942	1700
Dornier 217 (Luftwaffe)	Bombardier	1941-1944	1905
Junkers 86 (Luftwaffe)	Reconnaissance	1936-1942	1000
Junkers 188 (Luftwaffe)	Chasseur de nuit	1943-1945	1100
Short Stirling (RAF)	Bombardier	1941-1946	2374

(HOLYOAK Vince, SCHOFIELD John, *Military Aircraft Crash Sites, Archaeological guidance on their significance and future management*, English Heritage, London, 2002, 13 pages)

Les formes d'altération des alliages d'aluminium

¹⁶Les recherches en ingénierie sur la résistance à la corrosion de l'aluminium visent à évaluer le comportement du métal envers différents milieux agressifs, dont des substances corrosives (acides et bases fortes) ou des sels minéraux (chlorures, phosphates et nitrates) et dans des conditions d'utilisation extrêmes (sous-pression et températures élevées)²³. L'objectif est de définir le matériau adapté à chaque sollicitation et chaque environnement. Des tendances de comportement général à la corrosion des matériaux des différentes familles d'alliages 1XXX à 7XXX ont ainsi pu être déterminées. Il apparaît que la résistance à la corrosion évolue comme suit : Aluminium pur > 3XXX-6XXX-5XXX > 7XXX sans Cu > 1XXX > 4XXX > 7XXX avec Cu > 2XXX^{24 25}.

¹⁷Les observations faites en ingénierie sur les diverses formes de corrosion développées sur les alliages d'aluminium peuvent servir de référence aux conservateurs-restaurateurs, mais l'approche est biaisée puisqu'elle ne permet pas la prise en compte des modifications d'utilisation des objets au cours de leur histoire, ni les changements d'environnement qu'ils ont subis et qui ont entraîné

l'évolution de la corrosion observée. Force est de constater que les connaissances sur la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium, issues de l'expertise industrielle, s'adaptent mal aux altérations observées sur les objets patrimoniaux du fait de la méconnaissance de l'historique de l'utilisation des objets. Dans la suite on rappelle quelques informations de base sur les principales formes de corrosion rencontrées sur les alliages d'aluminium puis celles couramment visualisées sur les objets patrimoniaux sont détaillées afin de préciser leur spécificité.

Passivation naturelle spontanée et ternissement

¹⁸L'aluminium se recouvre naturellement et dans un milieu de pH compris entre 4 et 9 d'une couche d'oxyde d'aluminium. Bien qu'extrêmement fine (entre 50 et 100 Å d'épaisseur), cette dernière forme une barrière très adhérente, passivante et protectrice entre le métal et un environnement potentiellement corrosif. Cet oxyde se compose de deux couches : l'une barrière et amorphe, en contact avec le métal, et faisant 25 Å et la seconde, extérieure, qui est constituée de boehmite²⁶ et de bayérite²⁷ [28](#). Cette double couche renferme de nombreuses microfissures²⁹. L'anodisation électrolytique permet de former une couche plus épaisse, plus régulière (5 à 25 µm), parfois colorée, protégeant davantage l'alliage d'aluminium contre la corrosion et l'abrasion pour les couches dures (max. 500 à 600 Vickers pour l'anodisation en milieu sulfurique)³⁰. D'autres traitements de finition sont appliqués dans le domaine du bâtiment comme l'électrodéposition, les revêtements par conversion chimique et les revêtements organiques³¹.

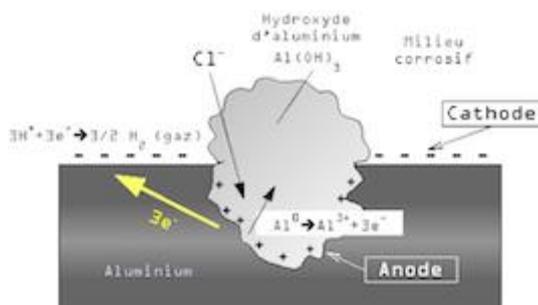
¹⁹Si le milieu environnant est chargé d'humidité ou si le métal est mis en contact prolongé avec de l'eau, le film d'oxyde naturel s'épaissit progressivement pour atteindre quelques micromètres, absorbant par exemple les ions sulfates et chlorures présents dans le milieu humide et modifiant ainsi ses propriétés optiques. On parle alors de ternissement plus ou moins prononcé. Cette altération n'est autre que visuelle, car elle n'interfère pas avec les propriétés mécaniques du métal ni n'affecte, semble-t-il, sa résistance face à des phénomènes de corrosion ultérieurs. Certains ternissements peuvent prendre la forme d'un voile blanc, d'auréoles ou de taches sur la surface du métal³².

Corrosion par piqûres

²⁰Comme les métaux se passivant naturellement à l'atmosphère, l'aluminium a une propension à développer des corrosions localisées aux formes irrégulières (piqûres) dispersées à la surface du métal et causées par des ruptures et des faiblesses de la couche de passivation ou des défauts du matériau

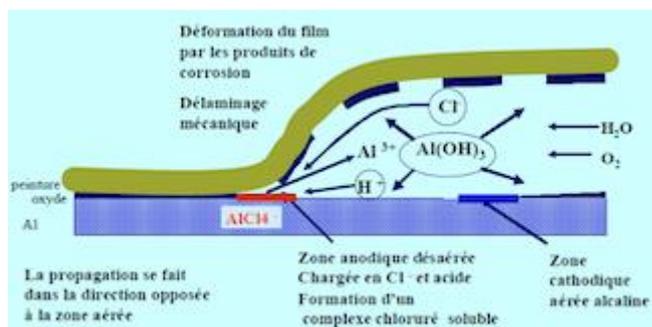
(intermétalliques, défauts accidentels)³³. Cette corrosion se produit d'autant plus si l'alliage est exposé de façon intermittente ou permanente à un environnement humide chargé en sels tels que les milieux marins. Bien que le diamètre des piqûres de corrosion soit souvent de l'ordre du micromètre, il s'agit d'une forme de corrosion qui ne passe pas inaperçue sur un objet en alliage d'aluminium, car elle s'accompagne souvent de pustules se formant au-dessus du cratère dans les stades avancés (fig. 2a). Ces pustules sont généralement volumineuses, d'aspect blanchâtre et gélatineux et sont composées de gel d'alumine $\text{Al}(\text{OH})_3$. La vitesse de développement de la corrosion, rapide à son démarrage, a tendance à ralentir à mesure que l'alumine se forme, empêchant ainsi les échanges entre le milieu corrosif et le métal et arrêtant peu à peu la progression de la corrosion. Les piqûres de corrosion se retrouvent ainsi comme « cicatrisées ». En revanche, la présence d'une corrosion initiée peut favoriser, selon la microstructure du métal support, l'expansion de la profondeur des cratères de corrosion, ou le développement d'une corrosion intergranulaire, voire feuilletante³⁴.

Fig. 2a. Représentation schématique du mécanisme de corrosion par piqûres.



(Vargel Christian, *Le Comportement de l'aluminium et de ses alliages*, Dunod technique, Paris, 1979, 541 pages)

Fig. 2b. Représentation schématique de corrosion filiforme sur support Al recouvert d'une peinture.



(Reboul Max, *op. cit.*)

Corrosion filiforme

²¹Il s'agit là aussi d'une attaque locale sur le substrat métallique, normalement recouvert d'un revêtement de composition organique. Cette altération est un phénomène complexe dépendant de l'humidité du milieu environnant, de la nature du revêtement, de l'interface métal-revêtement³⁵. La corrosion commence à un point de rupture du revêtement et progresse, sous forme de filament à l'interface revêtement-métal. On peut constater la séparation spatiale du filament, avec une tête active, qui est ainsi le site anodique et où l'aluminium se corrode, tandis que le reste du filament est le site cathodique se passivant en produit de corrosion, composé d'ions hydroxyle (fig. 2b). La corrosion filiforme dépend également du type d'alliage d'aluminium et du nombre de particules intermétalliques, de nature cathodique (alliages Al-Cu), qu'il contient. Souvent on limite la perception de la corrosion filiforme à son impact esthétique. Toutefois si elle n'est pas prise en compte suffisamment tôt elle peut dégénérer dans l'épaisseur du métal en corrosion par piqûres, voire intergranulaire³⁶.

Spécificité des aluminiums patrimoniaux

²²La compréhension des mécanismes de dégradation des alliages d'aluminium ne peut pas se baser exclusivement sur l'état de conservation des objets patrimoniaux car celui-ci dépend de la quantité et de la qualité des interventions subies au cours de leur histoire. Certains objets en alliage d'aluminium ont été entretenus, restaurés, voire transformés à plusieurs occasions. Ainsi les objets de la collection Jean Plateau – IHA, certains datant de la fin du XIX^e siècle, ont fait l'objet d'un entretien régulier (nettoyage, polissage, remise en forme, etc.) et sont de ce fait dans un bon état de conservation³⁷. Inversement, certains objets ont vu leur dégradation accélérée par des interventions malencontreuses. Par exemple l'élément sommital du monument à Washington réalisé en alliage Al – Fe (1,7 %) – Si (0,5 %) était dans un bon état de conservation jusqu'à l'ajout d'un cadre en alliage cuivreux à sa base qui a provoqué des phénomènes de corrosion galvanique aux zones de contact³⁸. La transformation des matériaux et leur détournement d'usage entraînent des altérations inexpliquées, parfois évolutives et qui nuisent au rendu de surface. Certaines parures africaines issues d'alliages d'aluminium réemployés et utilisées à même le corps (générateur de sudations chlorurées) en sont un bon exemple.

²³Les objets en alliages d'aluminium patrimoniaux stockés dans les réserves des musées portent souvent les traces de leur utilisation : déformation (fig. 3a), rayures, usure et ternissement (fig. 3b).

Fig. 3a. Marques de déformation sur un entonnoir.



Musée historique de Lausanne.
(HE-Arc CR)

Fig. 3b. Marques d'usure et de ternissement sur une timbale de gourde.



Musée national suisse.
(HE-Arc CR)

24 Ils présentent également de nombreux dépôts exogènes (fig. 4a), diverses formes de corrosion par piqûres plus ou moins prononcées (fig. 4b) et une sensibilité à la corrosion filiforme sous film organique (fig. 4c). Contrairement aux données de la littérature³⁹, cette dernière forme de corrosion est également observée sur des surfaces *a priori* non revêtues mais ternies (fig. 4d). L'hypothèse faite est que l'épaisseur du film d'oxyde formé sur le long terme (quelques micromètres) favoriserait le développement de la corrosion filiforme une fois la corrosion par piqûres initiée localement⁴⁰. Tout comme dans le cas des dépôts exogènes de surface⁴¹, cette forme de corrosion est insidieuse et peut induire des altérations profondes au cœur des matériaux (corrosion intergranulaire pouvant être traversante).

Fig. 4a. Dépôts exogènes sur une gourde.



Musée historique Lausanne.
(HE-Arc CR)

Fig. 4b. Piqûration généralisée sur un pot à lait.



Musée historique Lausanne.
(HE-Arc CR)

Fig. 4c. Corrosion filiforme sur une fiole à parfum.



Musée historique Lausanne.
(HE-Arc CR)

Fig. 4d. Corrosion filiforme à l'intérieur du couvercle d'une salière.



Musée national suisse.
(HE-Arc CR)

²⁵Ces formes de corrosion se retrouvent dans différents environnements. Ainsi Geindreau décrit la sensibilité à la corrosion par piqûres des éléments en alliage Al-Si (8,9 %) du générateur Cockroft-Walton de l'Institut de physique nucléaire de Lyon (1950)⁴². En extérieur, les structures bâties exposées en atmosphère marine sont particulièrement altérées, comme les tôles (toujours en alliage Al-Si) du mausolée Fracchia de Bargone, Italie⁴³.

²⁶Les alliages de la fin du XIX^e et du début du XX^e siècle, peu standardisés, peuvent induire des altérations inhabituelles liées à leur faible performance⁴⁴. Ainsi le carter en alliage d'aluminium Al-Cu (4,4 %)-Sn (4,5 %) avec traces de Pb, Si, Zn, et Fe du prototype de système d'embrayage du tricycle motorisé Béchler du musée du Tour automatique et d'histoire de Moutier, Suisse (1920), est fortement poreux et est de ce fait très fragile, comme le montre la présence de larges fissures à la surface du métal (fig. 5), validant ainsi la sensibilité des alliages Al-Cu-Sn à la fissuration à chaud évoquée par Davis⁴⁵. On retrouve cet alliage de fonderie sur d'autres pièces contemporaines comme certains éléments du train d'atterrissage de l'avion Dufaux ⁴⁴⁶ (1910), conservé au musée des Transports de Lucerne, sans trouver *a priori* ce même type d'altération⁴⁷, peut-être en raison de leur sollicitation limitée et seulement à température ambiante.

Fig. 5. Carter en alliage d'aluminium du système d'embrayage du tricycle motorisé Béchler du musée du Tour automatique et d'histoire de Moutier, Suisse (1920).



Des fissures traversantes s'étendent sur toute la partie haute du carter.
(HE-Arc CR)

²⁷Les vestiges aéronautiques de la Seconde Guerre mondiale sont depuis les années 1980 les objets techniques en alliages d'aluminium les plus étudiés dans la littérature spécialisée⁴⁸. Les chercheurs s'intéressant à ces alliages sont tous des corrosionnistes / électrochimistes et disposent pour leur travail d'investigation de suffisamment de matière pour effectuer des analyses invasives et plus poussées que celles habituellement menées sur les objets patrimoniaux. Les alliages répertoriés sont variés (Al-Cu, Al-Mn, Al-Mg-Si), les plus sensibles à toute forme d'altération étant les alliages Al-Cu. Dans leur nouveau milieu d'abandon (subaquatique pour la plupart), les matériaux ont développé des phénomènes de corrosion par piqûres qui évoluent après le sauvetage des pièces et leur exposition à l'atmosphère en corrosion intergranulaire, puis feuilletante dans le cas des tôles laminées. Toujours dans le milieu subaquatique, le contact avec des alliages base cuivre, plus nobles, induit des corrosions galvaniques alors que celui avec des alliages de magnésium, plus électronégatifs, provoque la corrosion cathodique⁴⁹ qui se traduit également par une intense piqûration de surface.

²⁸Ces quelques exemples montrent très clairement que contrairement aux idées reçues les objets en alliage d'aluminium sont rarement trouvés dans un « bon » état de conservation. La première conférence sur la conservation-restauration de l'aluminium (Aluminium 2014, Washington, États-Unis⁵⁰) a non seulement confirmé la vulnérabilité des alliages d'aluminium mais a également montré

combien le diagnostic des formes de corrosion développées est malaisé⁵¹. Le même constat a pu être établi lors du colloque de l'ANR⁵² CREALU (Création et aluminium) coordonné par l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS), « L'aluminium, matière à création, XIX^e-XXI^e siècles » qui s'est tenu à Paris en décembre 2014⁵³.

²⁹L'aspect poli ou satiné des matériaux, recherché par les fabricants et les commanditaires pour des raisons techniques (aérodynamisme), voire esthétique ou politique (l'aluminium fut promu par le régime de Mussolini), est souvent perdu et le ternissement de surface prime. Dans d'autres cas, le matériau est profondément altéré à cœur (fissuration) ou dans sa forme (perte de matière). Si différentes formes de corrosion ont été initiées au cours de l'usage des pièces, elles se développent et dégènèrent dans leur milieu de stockage, surtout si les conditions de conservation ne sont pas contrôlées. Selon le projet scientifique et culturel défini par le conservateur de la collection, le challenge des conservateurs-restaurateurs sera soit de retrouver un aspect proche de celui-ci d'origine (surface homogène et régulière) au travers d'interventions parfois invasives, soit de stabiliser les dégradations observées qui témoignent pour les unes des hésitations technologiques au début du XX^e siècle (alliages fragiles et fissurés), et pour les autres d'incidents marquants qui ont conduit à un changement drastique de conditions d'exposition devenues très agressives (vestiges aéronautiques submergés).

Diagnostiquer au mieux l'état de conservation des alliages d'aluminium

³⁰S'il est assez aisé d'attribuer le terme générique d'aluminium à un objet ou un élément d'objet métallique léger, de couleur gris clair, non magnétique et dont la surface présente des rayures brillantes, la détermination de sa composition requiert un investissement plus important. L'analyse semi-quantitative peut se faire à l'aide d'un analyseur par fluorescence des rayons X portable qui se révèle être particulièrement adapté pour les campagnes sur site⁵⁴, à l'opposé de l'analyse PIXE⁵⁵. Toutefois une analyse qualitative (identification des principaux éléments constitutifs) suffit souvent. Le nouvel outil dénommé DiscoveryMat⁵⁶ mis au point par l'unité de recherche en conservation-restauration de la Haute École Arc (UR-Arc CR) permet d'accéder à ce niveau d'information à un coût réduit. L'analyse est basée sur le suivi du potentiel de corrosion des matériaux au cours du temps (fig. 6) et la comparaison des tracés obtenus, *via* des algorithmes, à ceux des matériaux d'une base de données⁵⁷.

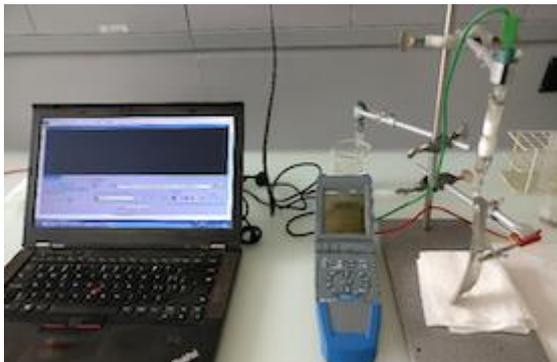
DiscoveryMat est une application en accès libre et participative. Son développement devrait se faire *via* l'implication motivée des professionnels concernés.

Fig. 6a. Chausse-pied en aluminium peu allié (famille 1XXX).



(Collection Tobias Schenkel)

Fig. 6b. Analyse du chausse-pied (fig. 6a) avec l'application DiscoveryMat menée de manière quasi non invasive sur sa tranche après un léger polissage de surface.



(Collection Tobias Schenkel)

³¹D'autres outils d'examen peuvent être recommandés: les mesures de colorimétrie (paramètre L*) associées à celles d'un capteur à courants de Foucault permettant de déterminer le niveau de ternissement et l'épaisseur de la couche d'oxyde formée⁵⁸. Sachant qu'au-delà d'une certaine épaisseur le risque de corrosion filiforme devient plus important, ces mesures, si elles sont effectuées régulièrement, pourraient constituer la base de stratégies de conservation préventive efficaces.

Conclusion

³²Si par le passé les responsables de collections et les professionnels de la conservation-restauration pouvaient se sentir démunis lorsqu'ils avaient à diagnostiquer l'état de conservation d'objets en aluminium, les connaissances accumulées ces dernières années permettent de mieux appréhender ceux-ci. L'aluminium ne doit plus être considéré comme un matériau générique et son inaltérabilité doit être remise en cause.

³³La nature chimique des matériaux influençant les formes de corrosion développées, sa détermination est requise. L'utilisation de l'application DiscoveryMat, identifiant les éléments majoritaires des alliages, est recommandée même si la base de données de l'outil est encore aujourd'hui peu fournie. Des mesures par courants de Foucault et colorimétriques sur la surface des métaux permettent, quant à elles, d'estimer l'épaisseur du film d'oxyde et le niveau de ternissement à l'origine du développement de formes de corrosion insidieuses comme la corrosion filiforme, initiée par des piqûres et pouvant engendrer des corrosions profondes, voire perforantes.

³⁴Ainsi grâce à une instrumentation relativement accessible que les professionnels doivent pouvoir rassembler, ceux-ci sont à même de développer des stratégies de conservation préventive devant assurer la conservation des objets sur le long terme.

Remerciements

³⁵L'auteur tient à remercier la HES-SO pour le financement du projet EtICAL dont certains résultats sont présentés dans cet article mais aussi les responsables des collections (publiques ou privée) mentionnées : en particulier, Markus Leuthard (Musée national suisse), Claude-Alain Künzi (Musée historique de Lausanne) et Tobias Schenkel.

Notes

¹ GRINBERG Ivan, *L'Aluminium, un si léger métal*, Découvertes Gallimard, Paris, 2003, 127 pages.

² RENAUX Thierry, *L'Aluminium au XIX^e siècle. Une industrie aux pieds d'argile, entre chimie et métallurgie (1854-1890)*, thèse de doctorat d'histoire, dir. L. Hilaire-Perez et F. Hachez-Leroy, EHES, 2017.

³ MOREL Paul, *Histoire technique de la production d'aluminium*, Grenoble, PUG, 1991.

⁴ GRINBERG Ivan, *op. cit.*

[5](#) HACHEZ-LEROY Florence, *L'Aluminium français, l'invention d'un marché, 1911-1983*, Paris, Éditions du CNRS, 1999.

[6](#) GRINBERG Ivan, *op. cit.*

[7](#) KÖSTER Roman, « Zeppelin, Carl Berg, and the Development of Aluminium Alloys for German Aviation (1890-1930) », *Cahiers d'histoire de l'aluminium*, 50, 1, 2013, p. 72-87.

[8](#) GRINBERG Ivan, *op. cit.*

[9](#) BOURGARIT David, PLATEAU Jean, « Quand l'aluminium valait de l'or : peut-on reconnaître un aluminium "chimique" d'un aluminium "électrolytique" ? » *ArchéoSciences*, 29, 2005, p. 95-105.

[10](#) DEGRIGNY Christian, « Conservation of historical objects – marine, terrestrial and industrial », in *Proceedings of Aluminium: History, Technology, and Conservation, International conference*, éd. C. Chemello, M. Collum, P. Mardikian, J. Sembrat and L. Young, Smithsonian Contributions to Museum Conservation, 9, 2019, p. 87-96.

[11](#) HARDOUIN DUPARC Olivier, « Alfred Wilm et les débuts du Duralumin », *Cahiers d'Histoire de l'Aluminium*, 34, 2005, p. 63-75.

[12](#) Aluminium Association. 2009. International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys, Registration Record Series, Teal sheets.

[13](#) SIMCOE Charles R. « Aluminium : the Light Metal-Part III », *Metallurgy Lane, Advanced Materials and Processes*, 2014, p. 30-31.

[14](#) BOURGARIT David, PLATEAU Jean, *op. cit.*

[15](#) PLATEAU Jean, GRINBERG Ivan, *Passion aluminium. Trésors de la Collection Jean Plateau-IHA*, Les éditions du Mécène, Paris, 2013, 189 pages.

[16](#) HACHEZ-LEROY Florence, « Aluminium : métal familier, patrimoine à découvrir », *Historiens et Géographes*, n° 405, 2009, p. 29-39.

[17](#) DEGRIGNY Christian, SCHRÖTER Julie, « Aluminium Alloys in Swiss Public Collections : Identification and Development of Diagnostic Tools to Assess Their Condition », in *METAL2019 proceedings of the ICOM-CC Metal WG interim meeting*, éd. C. Chemello, L. Brambilla, E. Joseph, Neuchâtel (Suisse), 2019, p. 408-415.

[18](#) Ces désignations ne sont données qu'à titre indicatif en raison de l'instauration tardive des normes internationales (1970).

[19](#) DEGRIGNY Christian, « La mise au point d'un traitement cathodique de stabilisation de vestiges aéronautiques immergés en alliages d'aluminium », in GRATTAN David (dir.), *Saving the Twentieth Century: the Conservation of Modern Materials*, CAN: Canadian Conservation Institute, Ottawa, 1993, p. 373-380.

[20](#) GUILMINOT Elodie, TISSIER Yolaine, « Étude des alliages aluminium pour la mise au point des traitements de conservation des avions », *Cahiers d'Histoire de l'aluminium*, 54, 1, 2017, p. 82-93.

[21](#) PUBELLIER Marcel, « Le début de la fabrication du Duralumin en France », *Revue de l'Aluminium*, 180, 1951, p. 335-338.

[22](#) BALLY Jacques, « Construction en Védal pour hydravions », *Revue de l'Aluminium*, 78, 1936, p. 55-60.

[23](#) VARGEL Christian, *Le Comportement de l'aluminium et de ses alliages*, Dunod technique, Paris, 1979, 541 pages.

[24](#) DAVIS Joseph R., « Aluminium and Aluminium Alloys », in *Alloying: Understanding the basics*, ASM International, 2001, p. 351-416.

[25](#) SUKIMAN N. L., ZHOU X., BIRBILIS N., HUGHES A. E., MOL A., GARCIA S. J., THOMPSON E., « Durability and Corrosion of Aluminium and Its Alloys: Overview, Property space, Techniques and Developments », in AHMAD Z. (dir.), *Aluminium Alloys – New Trends in Fabrication and Applications*, In Tech, 2012, p. 47-97.

[26](#) Oxyde monohydraté $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

[27](#) Oxyde trihydraté $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

[28](#) VARGEL Christian, *op. cit.*

[29](#) REBOUL Max, « Corrosion des alliages d'aluminium », *Technique de l'ingénieur*, COR325, 2005, p. 1-19.

[30](#) VARGEL Christian, *op. cit.*

[31](#) FLANDRO Xsusha, THOMAS-HANEY Helen M., « A Survey of Historic Finishes for Architectural Aluminium, 1920-1960 », *APT bulletin, Journal of Preservation Technology*, 46:1, 2015, p. 13-21.

[32](#) DE LA FUENTE D., OTERO-HERTA E., MORCILLO M., « Studies of Long-term Weathering of Aluminium in the Atmosphere », *Corrosion Science*, 49, 2007, p. 3134-3148.

[33](#) VARGEL Christian, *op. cit.*

[34](#) ROCCA Emmanuel, BARCHICHE Chems-Eddine, MIRAMBET François, DUBUS Michel, TILATTI Christian, « Étude de la corrosion des matériaux du patrimoine en aluminium », *Techné*, hors-série, 8, 2008.

[35](#) MOL Arjan, « Filiform Corrosion of Aluminium Alloys. The Effect of Microstructural Variations in the Substrate », mémoire de thèse du LMS – Delft University of Technology, 2000.

[36](#) FLANDRO Xsusha et THOMAS-HANEY Helen M., *op. cit.*

[37](#) PLATEAU Jean, « La Naissance de l'aluminium », *Techné*, 18, 2003, p. 37-42.

[38](#) BINCZEWSKI George J., « The Point of a Monument: A History of the Aluminum Cap of the Washington Monument », *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society – JOM*, 47, 11, 1995, p. 20-25.

[39](#) MOL Arjan, *op. cit.*

[40](#) DEGRIGNY Christian, SCHRÖTER Julie, « Aluminium Alloys in Swiss Public Collections [...] », *op. cit.*

[41](#) FLANDRO Xsusha et THOMAS-HANEY Helen M., *op. cit.*

[42](#) GEINDREAU Rémi, « Étude préalable à la restauration d'un objet technico-scientifique contemporain », *CeROArt*, EGG 5, 2016 : <https://journals.openedition.org/ceroart/4933> (consulté 18/04/2020).

[43](#) BIASO Marta, COMINO Lorenza, PEDRONI Marghareta, « Il Mausoleo Fracchia a Bargone. Conoscenza per la conservazione di un rivestimento in lastre di alluminio », *Scienza et Beni Culturali*, 2015, p. 161-172.

[44](#) DEGRIGNY Christian, « Conservation of historical objects [...] », *op. cit.*

[45](#) DAVIS Joseph R., « Aluminium and Aluminium Alloys », *op. cit.*

[46](#) Le Dufaux 4 a battu le record de distance en vol, quelques mois après la traversée de la Manche par Louis Blériot, en doublant la distance réalisée par ce dernier.

[47](#) Voir la base de données MiCorr (micorr.org) pour la description des formes de corrosion (consultée le 18/04/2020).

[48](#) MACLEOD Ian, « Stabilization of Corroded Aluminum », *Studies in Conservation*, 28, 1983, p. 1-7 ; DEGRIGNY Christian, « Stabilisation de moteurs d'avions immergés », *Studies in Conservation*, 40, 1995, p. 10-18 ; DEGRIGNY Christian, « La Mise au point d'un traitement cathodique [...] », *op. cit.* ; DEGRIGNY Christian, *Mise au point d'un traitement cathodique de stabilisation de pièces en alliages d'aluminium dégradées par corrosion en milieu aqueux. Etude des risques de corrosion associée ; étude du mécanisme de la corrosion cathodique*, thèse de doctorat, dir. C. Fiaud, Université de Paris VI, 1990 ; ROCCA Emmanuel, *et al.*, *op. cit.* ; GUILMINOT Elodie et TISSIER Yolaine, *op. cit.*

[49](#) DEGRIGNY Christian, *Mise au point d'un traitement cathodique de stabilisation de pièces en alliages d'aluminium dégradées par corrosion en milieu aqueux*, *op. cit.*

[50](#) https://smithsonian.figshare.com/articles/Aluminum_History_Technology_and_Conservation_Proceedings_from_the_2014_International_Conference_/9761726 (consulté le 18/04/2020).

[51](#) DEGRIGNY Christian, « Conservation of historical objects [...] », *op. cit.*

[52](#) Agence nationale de la recherche.

[53](#) HACHEZ-LEROY Florence, FRIDENSON Patrick, *L'Aluminium, matière à création XIX-XXI^e siècles*, Presses universitaires François Rabelais, Tours, 2017, 362 pages.

[54](#) DEGRIGNY Christian, SCHRÖTER Julie, *op. cit.*

[55](#) WHITLOW Harry J., WANG Liping, GUIBERT Edouard, DEGRIGNY Christian, « Investigations of minor elements in early aluminium artefacts », *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 450, 2019, p. 291-293.

[56 http://157.26.64.17:8080/bilat-discoveryMat-user/index.html](http://157.26.64.17:8080/bilat-discoveryMat-user/index.html) (consulté le 18/04/2020).

[57](#) DEGRIGNY Christian, MENART Eva, ERNY Guillaume, « Easy to Use and Low-cost Electrochemical Open-source Hardware to Analyse Heritage Metals: Possibilities and Limits », *Current topics in Electrochemistry*, 20, 2018, p. 15-23.

[58](#) DEGRIGNY Christian, SCHRÖTER Julie, *op. cit.*

Pour citer ce document

Christian Degrigny, «L'Aluminium patrimonial : un métal moderne et pourtant méconnu», *Nacelles* [En ligne], Les Matériaux de l'aéronautique : approches historiques et patrimoniales, Dossier thématique / Thematic Section, mis à jour le : 29/05/2020, URL : <http://revues.univ-tlse2.fr/pum/nacelles/index.php?id=952>.

Quelques mots à propos de : Christian Degrigny

Haute École Arc Conservation-restauration, Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale, Campus Arc 2, Espace de l'Europe 11, 2000 Neuchâtel, Suisse, christian.degrigny@he-arc.ch