NRC·CNRC

NRC Publications Archive
Archives des publications du CNRC

Guide de solutions pratiques permettant de contrer la corrosion galvanique entre l'aluminium et l'acier dans le domaine du transport terrestre

Gagnon, Marie-Christine; Gallant, Danick; Amira, Sofiene; Charrow, Luc

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

https://doi.org/10.4224/16910695

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :
https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=40b0000b-e5bc-4a4f-b4f5-9d6532404308
https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=40b0000b-e5bc-4a4f-b4f5-9d6532404308

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at
https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright
READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site
https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits
LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

National Research Council Canada | Conseil national de recherches Canada

Canada

Conseil national de recherches Canada
Institut des matériaux industriels
Centre des technologies de l'aluminium

National Research Council Canada
Industrial Materials Institute
Aluminium Technology Centre

CNRC · NRC

Guide de solutions pratiques permettant de contrer la corrosion galvanique entre l'aluminium et l'acier dans le domaine du transport terrestre

Préparé pour l'*Association de l'aluminium du Canada*

Auteurs
Sofiene Amira, Ph.D.
Marie-Christine Gagnon, b.d.i., M.G.P.
Danick Gallant, Ph.D.

Avec la collaboration de Luc Charron, bibl. prof., M.S.I de l'ICIST

Décembre 2010

Table des matières

Sommaire 3
1. Introduction 4
1.1 Les autobus à fort contenu aluminium 5
2. Mise en contexte du projet 9
3. Formes de corrosion de l'aluminium rencontrées dans le domaine du transport 10
3.1. La corrosion galvanique 10
3.2. Autres formes de corrosion localisée 17
4. Les méthodes de protection contre la corrosion galvanique 19
4.1 La conception 19
4.2 Isolation électrique du contact aluminium-acier par l'intermédiaire de pièces non conductrices 24
4.3. Protection de l'acier par des revêtements d'aluminium 25
4.4. Autres revêtements métalliques 28
4.5. Utilisation d'un matériau de transition entre l'aluminium et l'acier 29
4.6. Protection de l'aluminium et de l'acier par des traitements de conversion chimique 29
4.7. Protection de l'aluminium et de l'acier par des peintures ou autres revêtements organiques 30
4.8. Diminution de la corrosivité des milieux conducteurs et corrosifs via les inhibiteurs de corrosion 34
5. Validation de l'efficacité : contrôle de qualité du design et méthodes de mise en œuvre 35
5.1. Sélection des matériaux et des revêtements à partir de mesures électrochimiques 35
5.2. Étude du comportement des assemblages à l'aide d'une chambre environnementale 40
6. Conclusion 44
7. Bibliographie 45

Sommaire

Qu'elles reposent sur des faits ou des croyances, certaines craintes relatives à l'apparition possible de la corrosion galvanique limitent actuellement l'assemblage de l'aluminium à l'acier pour la fabrication de véhicules terrestres tels que les autobus. L'objectif du présent document est de démontrer que la corrosion galvanique qui pourrait survenir lors du couplage de l'aluminium et de l'acier est un phénomène contrôlable du point de vue opérationnel.

La corrosion galvanique est une forme de corrosion qui se développe lorsque deux métaux dissimilaires sont mis en contact dans un électrolyte tel que l'eau salée. D'un point de vue pratique, une analyse de la littérature scientifique et technique démontre que les problématiques de corrosion galvanique sont contournables, et ce, même dans le contexte d'un environnement manufacturier. En effet, il existe une méthodologie éprouvée qui mène à l'adoption de solutions d'assemblage de l'aluminium à l'acier permettant d'éviter l'apparition et le développement de problématiques de corrosion galvanique. Ce savoir-faire est basé sur les étapes de conception suivantes :

- La sélection des matériaux, à partir de notions élémentaires d'électrochimie;
- L'établissement du design des assemblages, en visant l'élimination des crevasses et les zones enclines à l'accumulation d'eau;
- Le choix des méthodes d'isolation électrique des composantes métalliques, par les revêtements ou les pièces polymères, et ce, en fonction des contraintes de production et de coûts.

Au terme de cette démarche, l'étape essentielle de validation expérimentale permet de consolider, par des essais en laboratoire, les choix de conception de l'ingénieur.

De nos jours, des équipes multidisciplinaires entrent en jeu lorsque vient le temps de concevoir et de mettre en marché de nouveaux produits. L'ajout au portfolio étendu de compétences relatives aux assemblages aluminium-acier, soit par l'embauche d'un spécialiste ou le développement des connaissances nécessaires à l'interne, est tout à fait justifié dans un contexte où les produits doivent durer de plus en plus longtemps et nécessiter de moins en moins d'entretien lors de la mise en service de l'équipement. Bien que conscients que le savoir-faire pratique dans ce domaine est plutôt rare au Québec, nous pouvons toutefois affirmer que le développement des connaissances pointues en corrosion galvanique s'est échelonné sur plusieurs années ailleurs dans le monde afin de parvenir à sa maturité actuelle. L'ensemble des techniques pour prévenir la corrosion galvanique peut dorénavant servir l'entreprise manufacturière, et ce, sans craintes. Plusieurs manufacturiers du domaine du transport routier utilisent avec succès depuis quelques décennies des assemblages aluminium-acier dans les autobus, les camions et les voitures. Un grand nombre de manufacturiers d'autobus ont intégré l'aluminium dans leurs produits que l'on retrouve dans toutes les régions du globe.

En terminant, il apparait important de mentionner que la réalisation de ce document a permis de compléter une revue des développements des vingt dernières années et a, par le fait même, démontré que les barrières de perception ont été surmontées à maintes reprises dans le passé. À notre connaissance, il n'existe à l'heure actuelle aucun document, qu'il soit rédigé en français ou en anglais, qui s'attarde à l'ensemble des aspects relatifs à la corrosion galvanique tels qu'ils sont présentés dans ce guide. L'information, bien que disponible, est morcelée au gré des spécialités et domaines d'intérêts des auteurs et des scientifiques. Ceci rendant encore plus pertinent la réalisation de ce projet.

1. Introduction

Mondialement, le domaine du transport est celui où l'on consomme la plus grande quantité d'aluminium. En Amérique du Nord, cela représente 28,1 % de la demande totale, soit 6,2 milliards de livres d'aluminium. Il existe trois grands segments de marché qui sont, en ordre d'importance de consommation d'aluminium, les automobiles et les camions légers, les camions lourds et les autobus, les remorques et semi-remorques. En 2008, 822 millions de livres d'aluminium ont été intégrées dans les camions lourds et les autobus produits en Amérique du Nord, ceci représentant 16 % de l'utilisation de l'aluminium dans le domaine du transport routier, tel que le démontre la **Figure 1.** Malgré la chute de consommation d'aluminium qu'a connu ce domaine, le segment de marché des camions lourds et des autobus est le seul segment du domaine du transport qui, pour la période de 2001 à 2008, a connu un taux de croissance annuel composé positif pour l'utilisation de l'aluminium [1].

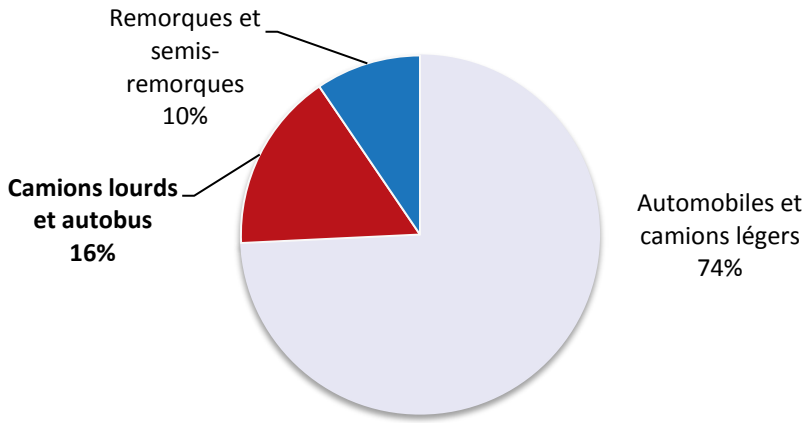


Figure 1. Utilisation de l'aluminium par segments de marché relatifs au transport pour l'Amérique du Nord

Utilisé pour la première fois dans un autobus parisien en 1910, l'aluminium n'a cessé de gagner du terrain dans les applications relatives aux véhicules routiers commerciaux telles que composantes de véhicules commerciaux, autobus, camions, camions-citernes, véhicules à bennes basculantes, fourgons, etc. Près de 100 ans plus tard, l'*European Aluminium Association* estime que cette croissance soutenue n'est pas terminée et qu'elle devrait continuer de manière significative.

Cette croissance à venir se justifie par l'augmentation des coûts de carburants et des besoins liés à l'augmentation des performances des véhicules, à l'efficacité énergétique, à la réduction des gaz à effets de serre, à la sécurité, etc.

À titre d'exemple, il est estimé que l'ajout de un kilogramme d'aluminium dans un autobus permet actuellement d'économiser, en moyenne, 45 kg de CO_2. Cette économie devient possible en raison de la réduction de poids (diminuant la consommation de carburant) et de l'augmentation de capacité de charge [2]. À cet effet, l'organisation américaine *Aluminum in Transportation* a rendu publique, en novembre 2010, une étude menée par Ricardo à propos des économies de poids grâce à l'utilisation de l'aluminium. Il en résulte que l'utilisation accrue d'aluminium permet d'alléger de plus de 11 % le poids d'un camion et de sa remorque [3, 4]. Le **Tableau 1** illustre cet exemple.

Tableau 1. Économies de poids possibles grâce à l'utilisation de l'aluminium pour un camion et sa remorque

	Camion (lb)	Économie de poids (%)	Remorque (lb)	Économie de poids (%)	Camion et remorque (lb)	Économie de poids (%)
Conventionnel	16 000		13 500		29 500	
Allègement traditionnel (roues, composantes de chauffage, ventilation, conditionnement d'air, structures de cabines, etc.)	15 500	3,1 %	12 500	7,4 %	28 000	5,1 % (1 500 lb)
Fort contenu aluminium (portes, plancher de cabines, longerons de cadres de châssis, toit de cabine, mur arrière de cabine, parois latérales de la remorque, portes arrières et leur cadrage, etc.	14 500	9,4 %	11 700	13,3 %	26 200	11,2 % (3 300 lb)

Source : *Aluminum's role in meeting future heavy truck fuel economy* standards (2010) p.11
et *The Aluminum Advantage : Commercial Vehicle Applications* (2009) p. 11 et 13

1.1 Les autobus à fort contenu aluminium

Il y a tout lieu de croire que le raisonnement concernant les avantages de l'aluminium a depuis longtemps germé dans la tête de plusieurs manufacturiers d'autobus. Certains de ces derniers tirent profit depuis de nombreuses années des particularités de l'aluminium. Internationalement, on dénombre plus de trente-huit manufacturiers d'autobus ayant intégré l'aluminium à leurs produits. Le **Tableau 2** recense ces manufacturiers d'autobus ayant selon leur pays d'origine et le climat d'utilisation. En cliquant sur l'hyperlien, il est possible d'atteindre le site Web des entreprises. Il y a lieu de croire que plusieurs autres entreprises utilisent également l'aluminium sans, pour autant, le mentionner expressément. Un grand nombre de manufacturiers ont conçu des produits qui sont utilisés dans le climat continental que l'on retrouve dans une grande partie de l'hémisphère nord.

Citons en exemple, les autobus de type *EcoRange* produits en plus de 400 exemplaires par la compagnie russe *Volgabus* depuis 2006. Les villes de Moscou et St-Petersburg ont d'ailleurs procédé à l'achat de 164 autobus de ce type en 2010 [5, 6]. *EcoRange* est un système fabriqué par *Alcan Extruded Products* ayant été vendu à plus de 45 000 exemplaires partout dans le monde [7].

Les autobus londoniens rouges à deux étages *RM1* baptisés « *Routemasters* » entièrement en aluminium ont été produits à 2876 exemplaires entre 1954 et 1968. Ces autobus, bien qu'ayant une durée de vie estimée de dix-sept années, ont été en service jusqu'en 2005 [8].

Dans la même veine, Mauri Bus System a lancé en 1966 un autobus (modèle 6.3) avec une carrosserie d'aluminium. Ces autobus auraient été en circulation plus de trente (30) années [9]. Alcoa a également œuvré sur un concept d'autobus d'aluminium en collaboration avec le manufacturier d'autobus chinois Yutong.

Tableau 2. Manufacturiers ayant intégré l'aluminium dans leurs autobus

Manufacturiers	Pays	Produits intégrant l'aluminium		Climats d'utilisation des produits	
Alexander Dennis	Royaume-Uni	Centro Enviro300 Primo	Enviro200 Enviro400	Continental	
CaetanoBus	Portugal	Nimbus Autobus électrique Doubledecker CB550	Slimbus	Continental Méditerranéen	Océanique
Caio Induscar	Brésil	Midi Urban Foz Super Micro Urban Foz Micro Tourism Foz Micro Executive Foz Giro 3200 Apache VIP Mondego H	 Apache S22 Millenium	Équatorial Aride Océanique	Tropical Continental
Caio North America	États-Unis	G3400 G3600		Continental Méditerranéen Chinois	Aride Océanique
Collins Bus Corporation	États-Unis	Bantam 422		Continental Océanique	Aride Méditerranéen
Contrac Cobus Industries	Allemagne	Cobus 3000 Cobus2700S	Cobus 2700 SCAN 3000	Continental Méditerranéen	Océanique
DesignLine	États-Unis	ECO-Smart I ECO-Saver IV Hybrid Electric		Continental Océanique Tropical	Aride Équatorial Chinois
ElDorado National	États-Unis	Escort RE-A		Continental	Aride
Elkhart Coach	États-Unis	ECII		Continental Méditerranéen Océanique	Aride Chinois
Gemilang Coachwork Sdn	Malaisie			Équatorial Méditerranéen Tropical	Aride Continental
Gillig	États-Unis	Low floor bus Trolley bus replica	BRT	Continental Méditerranéen	Aride Océanique
Girardin	Canada	Microbird G5	MBC-II	Continental	
Irizar	Espagne			Continental Océanique Tropical	Méditerranéen Équatorial Aride
Marcopolo S.A.	Brésil	Paradiso 1200 Viaggio 1050	Paradiso 1050 Viaggio 900	Continental Méditerranéen Chinois Tropical	Aride Océanique Équatorial
Mauri Bus Systems	Italie	Bravo I		Méditerranéen	Océanique
Motor Coach Industries	États-Unis	MCI D4005 MCI J4500 MCI D4500 CT Hybrid Commuter Coach MCI ISTV	MCI D4505 Commuter Coach	Continental Océanique Méditerranéen	Aride Chinois

Manufacturiers	Pays	Produits intégrant l'aluminium		Climats d'utilisation des produits	
North American Bus Industries, Inc.		60-BRT		Continental Méditerranéen Chinois	Aride Océanique
Optare	Royaume-Uni	Solo SR	Olympus	Océanique Continental Aride	Équatorial Méditerranéen Chinois
Orion International (Daimler)	Canada/ États-Unis	Orion VII		Continental Méditerranéen Chinois	Aride Océanique
Overland Custom Coach (2007) inc.	Canada	Synergy Titan	Apollo	Continental Méditerranéen Chinois	Aride Océanique
Plaxton	Royaume-Uni	Elite Profile Beaver	Panther Primo Centro	Océanique	
Scania	Suède	OmniCity	OmniLink	Océanique Méditerranéen	Continental
Setra	Allemagne			Océanique Aride Chinois Mousson	Continental Méditerranéen Montagnard
Shanghai Sunlong Bus	Chine	SLK6106 SLK6120 SLK6111 SLK6872	SLK6116 SLK6126 SLK6802	Continental Chinois	Aride
Shanghai Sunwin Bus Corporation	Chine	B10M		Continental Chinois	Aride
Silver Eagle Bus	États-Unis	Model 15	Model 25	Continental Méditerranéen Chinois	Aride Océanique
StarTrans	États-Unis	President FE	President RE	Continental Méditerranéen Chinois	Aride Océanique
Thomas Built Buses	États-Unis	Minotour	SAF-T-LINER C2	Continental Méditerranéen Chinois	Aride Océanique
Van Hool		A300K AG300 C2045E TD925	A300L AGG300 T2145	Océanique Continental Chinois	Méditerranéen Aride
VDL Berkhof Valkenswaard	Pays-Bas	Axial AH (50) Axial AD (100)	Axial AS (70)	Océanique Méditerranéen	Continental
VDL Bova	Pays-Bas	Magiq MHD Magnum		Océanique Méditerranéen	Continental
VDL Bus and Coach	Pays-Bas	Phileas		Océanique Méditerranéen	Continental

Manufacturiers	Pays	Produits intégrant l'aluminium	Climats d'utilisation des produits	
Vest-Busscar	Norvège	Center town bus Contrats coach Midline	Océanique	Continental
Volgabus	Russie		Continental	Aride
Volgren	Australie		Continental Aride Méditerranéen Océanique	Chinois Tropical Équatorial
Volvo Bus Corporation	Suède	Intercity Volvo 8500 Intercity Volvo 8900	Océanique Méditerranéen	Montagnard Continental
Wrightbus	Royaume-Uni	Double Deck Gemini HEV StreetCar RTV Eclipse SchoolRun	Continental	Océanique
Yutong	Chine	ZK6126HGE	Continental Chinois	Aride

[10-45]

Les principales qualités de l'aluminium telles que sa légèreté, sa résistance et sa durabilité servent déjà bien le domaine de la fabrication d'autobus sur plusieurs continents et que certains aspects liés au matériau, qui pourraient être jugés problématiques, sont désormais bien connus et maîtrisés.

À cet effet, la revue de littérature effectuée démontre que plusieurs documents importants dans le domaine de la corrosion galvanique ont vu le jour au début des années 1990 et que l'on compte de moins en moins de publications sur le sujet. Il est possible de croire que ce sujet est de mieux en mieux contrôlé par les manufacturiers et fabricants du domaine du transport puisque peu de nouveautés ont été répertoriées dans les documents publiés par la *Society of Automotive Engineers*.

2. Mise en contexte du projet

Il a été constaté que certains manufacturiers nord-américains de véhicules de transports terrestres, et plus spécifiquement les fabricants d'autobus, se montrent réticents à intégrer l'aluminium dans leurs véhicules. Cette réticence proviendrait principalement de craintes de voir la corrosion galvanique accroître les coûts d'entretien et compromettre la durée de vie des structures qui impliquent des assemblages d'aluminium et d'acier. On note du scepticisme envers la possibilité de marier efficacement l'aluminium et l'acier, et ce, sans risques de voir des phénomènes de corrosion galvanique apparaître. Cette méconnaissance des méthodes de protection et d'assemblage de ces matériaux dissimilaires représente actuellement un frein à l'utilisation de l'aluminium pour la fabrication des composantes structurales dans l'industrie du transport terrestre en Amérique du Nord.

L'objectif est de démontrer que la corrosion galvanique est un phénomène gérable du point de vue opérationnel dans le cadre de la fabrication de matériel roulant. Plus spécifiquement, ce document vise à démystifier la corrosion galvanique entre l'aluminium et l'acier, et expliquer quelles sont les méthodes qui permettent de contrer son apparition dans le contexte de la fabrication et de l'entretien de véhicules terrestres. Les méthodes privilégiées sont celles qui ne sont pas tributaires de la performance humaine nécessaire dans le cadre d'entretiens ultérieurs du véhicule.

Pour ce faire, une recherche de documentation concernant les pratiques de gestion de la corrosion galvanique, de façon générale, et plus spécifiquement dans le domaine des transports terrestres a été réalisée en collaboration avec l'*Institut canadien de l'information scientifique et technique* (ICIST). Par la suite, les résultats de recherche de documentation ont été analysés pour enfin rédiger ce guide technique qui définit des solutions viables et pratiques dans le cadre de l'assemblage de l'aluminium à l'acier pour l'industrie manufacturière du transport [46].

Ce document se veut, d'abord et avant tout, un guide d'information générale qui ne saurait se substituer à une démarche rigoureuse réalisée par un professionnel. Le concepteur qui œuvre en fonction des particularités de l'aluminium, et des règles de l'art relatives à la prévention de la corrosion galvanique sera en mesure d'optimiser de multiples éléments de conception. En plus d'avoir une meilleure prévention de la corrosion galvanique, il en résultera un allègement de poids, un plus petit nombre d'assemblages et moins de pièces dans le produit final.

3. Formes de corrosion de l'aluminium rencontrées dans le domaine du transport

Dans le domaine du transport terrestre, des designs appropriés de même que diverses précautions permettent de protéger efficacement l'aluminium des formes de corrosion les plus courantes, soit la corrosion galvanique, la corrosion localisée (crevasses ou piqûres), la corrosion filiforme, la corrosion par accumulation de débris humides, et la corrosion sous contrainte. Parmi celles-ci, la corrosion galvanique est celle qui doit être considérée avec le plus d'attention lors du mariage de matériaux dissimilaires. Puisque des phénomènes de corrosion localisée par crevasses ou piqûres peuvent se développer au point de jonction de métaux dissimilaires, ces formes de corrosion seront aussi brièvement décrites.

3.1. La corrosion galvanique

3.1.1. La corrosion : un phénomène électrochimique

La plupart des métaux obtenus par la transformation de minerais sont thermodynamiquement instables. Ainsi, spontanément, ils tendent à retourner dans leur état oxydé initial, c'est-à-dire à l'état corrodé. La corrosion, en faisant intervenir des processus d'oxydation et de réduction, témoigne de son caractère électrochimique. Lorsque l'aluminium est immergé dans un électrolyte, certaines portions de la surface agissent à titre d'anode et subissent une oxydation (ou corrosion). Tel que montré à la **Figure 2**, parallèlement à ces sites anodiques, sont retrouvés des sites cathodiques auxquels les réactions de réduction prennent place. Les réactions anodiques et cathodiques sont donc interdépendantes : si la consommation à la cathode des électrons issus du processus d'oxydation est interrompue, alors la réaction anodique de dissolution $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ est ralentie, voire arrêtée.

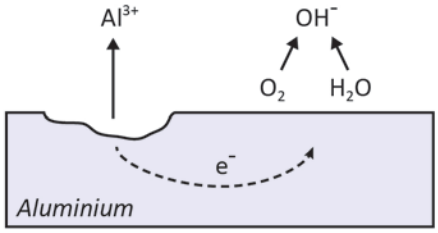


Figure 2. Réactions d'oxydation et de réduction se déroulant sur des zones adjacentes à la surface d'un métal.
Adapté de http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/01/Fe_corrosion.PNG

L'emplacement des zones cathodiques par rapport aux zones anodiques est dicté par des facteurs tels la rugosité de surface, la microstructure (présence d'inclusion, etc.), la présence de discontinuités dans le film passivant, la composition de l'environnement aqueux mis en présence du métal, etc.

3.1.2 Nature de la corrosion galvanique

La corrosion galvanique, aussi appelée corrosion bimétallique, se produit lorsque deux métaux dissimilaires sont mis en contact électrique en présence d'un électrolyte (ex. : eau salée) [47]. Avant de s'attaquer aux méthodes de protection contre la corrosion galvanique, il importe de connaître pourquoi et comment cette forme de corrosion se développe. Pour se produire, la corrosion galvanique nécessite trois conditions :

1. Deux métaux différents;
2. Continuité électrique entre les deux métaux (courant électronique);
3. Présence d'un électrolyte pour assurer un contact électrolytique (courant ionique).

Dès lors que ces trois conditions sont remplies, puisque les deux métaux sont caractérisés par des potentiels différents, un courant circulera entre les deux substrats mis en contact. Aussi, du point de vue de la protection, la corrosion galvanique peut être éliminée en supprimant l'une de ces trois conditions. Par exemple, l'expérience montre que dans l'atmosphère, l'assemblage d'aluminium avec des vis en acier inoxydable se comporte bien. Par contre, pour les parties immergées dans un milieu qui améliorera le contact électrolytique tel que l'eau salée, il est nécessaire d'isoler l'aluminium de tout autre métal.

La **Figure 3** présente de façon schématisée comment les trois conditions nécessaires au développement de la corrosion galvanique peuvent être rencontrées. Dans le cas présent, l'aluminium est mis en contact physique avec l'acier. Quant au contact électrolytique, il est assuré par la solution qui recouvre les deux métaux. Tel que présenté dans cette situation, un courant circule entre les deux métaux et accélère la corrosion de l'aluminium. Le mode de corrosion de l'aluminium qui sera rencontré sera généralement le même que celui qui se produirait en l'absence de l'acier. Dans la situation représentée, la présence de l'acier a pour effet d'accélérer la corrosion de l'aluminium. Le fait de coupler deux métaux dissimilaires augmente donc la vitesse de corrosion au site anodique et diminue ou élimine celle à la cathode, qui devient alors protégée ou immunisée.

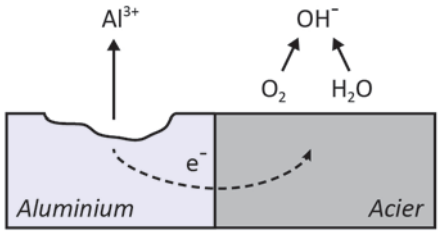


Figure 3. Représentation schématique d'un couplage galvanique entre deux métaux dissimilaires, l'aluminium et l'acier.

Adapté de http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/01/Fe_corrosion.PNG

En milieu naturel neutre ou légèrement alcalin, lors du couplage galvanique de l'aluminium avec l'acier, deux processus électrochimiques se déroulent en parallèle :

$$\text{Oxydation de l'aluminium : } Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$$
$$\text{Réduction de l'oxygène à la surface de l'acier : } O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$

D'autres réactions cathodiques peuvent aussi contribuer à la consommation des électrons issus du processus d'oxydation, compte tenu du pH et des conditions d'aération du milieu.

Dans certaines situations, la corrosion galvanique représente le mode de protection du matériau. Par exemple, dans le cas de l'acier galvanisé, la couche de zinc présente sur l'acier corrodera préférentiellement, assurant ainsi la protection du substrat d'acier sous-jacent.

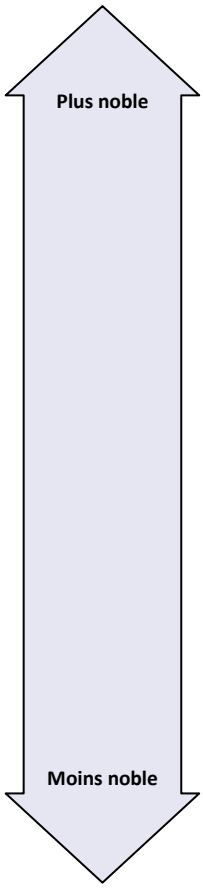
3.1.3. Facteurs qui influencent la corrosion galvanique

L'intensité d'un phénomène de corrosion galvanique est dictée par 4 facteurs :

1. La différence de potentiel entre les deux métaux mis en contact;
2. La nature de l'environnement dans lequel l'assemblage est exposé;
3. L'état de polarisation de chacun des métaux;
4. La géométrie des sites anodiques et cathodiques (formes, aire relative des surfaces, etc.).

3.1.4. La différence de potentiel entre les métaux

La série galvanique présentant le potentiel électrochimique de différents métaux et alliages immergés dans l'eau de mer permet d'apprécier, d'un point de vue thermodynamique, le couplage galvanique possible entre deux métaux. La **Figure 4** présente un exemple typique d'une telle série. Théoriquement parlant, plus deux métaux de cette série sont à des positions distantes l'une de l'autre, plus la force électromotrice de la pile de corrosion qui sera formée lors de leur couplage galvanique sera élevée. À l'inverse, deux métaux très rapprochés ne montreraient pas de risque de couplage galvanique intense. Cependant, dans la pratique, diverses nuances se doivent d'être considérées avant de pouvoir tirer des conclusions utiles de ce type de table. À titre d'exemple, le couplage de l'aluminium avec les aciers peut entraîner la corrosion de l'aluminium, et ce, même si ces deux classes de matériaux sont relativement rapprochées l'une de l'autre dans la série galvanique présentée à la **Figure 4**.



Graphite	
Platine	
Or	
Aciers inoxydables fortement alliés	Super austénitique Super duplex
Titane	
Alliages nickel-chrome-molybdène	625 ; C—276
Aciers inoxydables faiblement alliés (ex. : 316)	(Passif)
Alliages de nickel de la série 400 et K-500	
Argent	
Bronze au nickel aluminium	
Alliage de cuivre et de nickel (70/30 ; 90/10)	
Aciers inoxydables martensitiques (ex : 410, 416)	
Bronzes à canon/Bronzes d'étain	
Laiton	
Étain	
Plomb	
Fonte austénitique	
Aciers inoxydables faiblement alliés (ex. : 316)	(Actif)
Fonte	
Acier ordinaire	
Alliages d'aluminium	
Zinc	
Magnésium	

Figure 4. Série galvanique de différents métaux et alliages immergés dans l'eau de mer [48, 49].
Adapté de *Bimetallic Corrosion* (2000, p. 3) et *ASM Handbook — Corrosion : Materials*
Note : l'ordre des métaux peut légèrement selon les sources consultées

Cet écart entre la théorie et l'expérience pratique peut être expliqué de diverses façons. Premièrement, une série galvanique est établie à partir de valeurs de potentiels, qui sont des données thermodynamiques. Par conséquent, elles ne rendent pas compte de la cinétique de la réaction, c'est-à-dire de la vitesse à laquelle la corrosion se développera. Ainsi, une réaction peut être thermodynamiquement possible, mais cinétiquement défavorable (ex. : la transformation spontanée du graphite en diamant).

Aussi, les séries galvaniques ne prennent pas en compte l'état de passivité et la structure métallographique de certains métaux. Par exemple, le film d'oxyde présent à la surface des alliages d'aluminium a tendance à rendre ce métal plus électropositif, alors que la présence d'inclusion et de certains éléments d'alliages peut influencer dans l'autre direction le potentiel d'un alliage. Finalement, elles ne tiennent pas compte de la composition variable du milieu de corrosion (pH, espèces dissoutes, température, etc.). Ainsi, bien que la valeur pratique d'une série galvanique pour la prédiction des risques d'apparition de corrosion galvanique soit limitée, il est néanmoins recommandé d'éviter le couplage de métaux fortement séparés l'un de l'autre dans la série galvanique.

3.1.5. La nature de l'environnement

La composition et le pH de l'électrolyte influencent grandement les phénomènes de corrosion galvanique. Voici quelques règles générales :

1. La sévérité de la corrosion augmente souvent avec la conductivité électrique de la solution. Toutefois, la corrosion galvanique peut aussi être observée dans l'eau pure;
2. Dans le cas d'un milieu peu conducteur, la corrosion sera davantage concentrée autour du point de rencontre des deux métaux et pourra aussi être fortement développée. À l'inverse, dans le cas d'un milieu plus conducteur, la portée de la corrosion galvanique, en termes de distance à laquelle elle peut se produire par rapport au point de jonction, sera plus élevée;
3. La nature des espèces dissoutes influencera aussi l'intensité du phénomène de corrosion galvanique (bicarbonates, silicates, chlorures, sulfates, etc.);
4. Le pH de la solution influence le comportement en corrosion galvanique. L'aluminium étant un matériau amphotère, son activité en corrosion sera minimisée autour des pH neutres et augmentera en milieux acides et basiques (voir **Figure 5**).

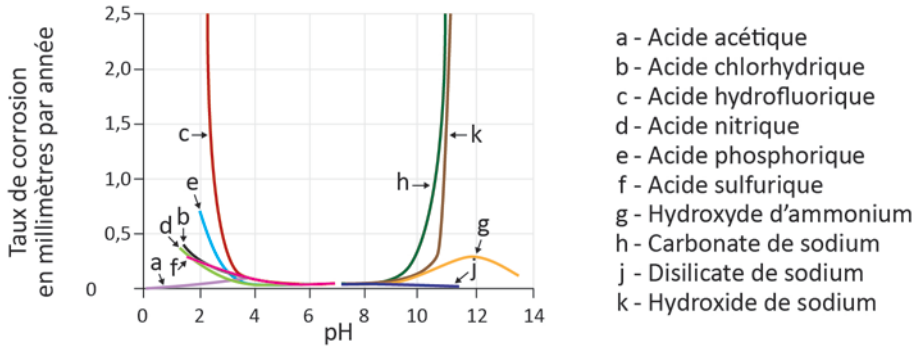


Figure 5. Vitesse de corrosion de l'aluminium et fonction du pH et de la nature des espèces dissoutes en solution [50].

Adapté de *Corrosion prevention and protection: practical solutions* (2007, p. 232)

3.1.6. L'état de polarisation des métaux

Lorsqu'un métal est immergé dans une solution, un courant se développe entre ces sites anodiques et cathodiques. Ce phénomène de polarisation du métal, illustré à la **Figure 6**, fait en sorte que les potentiels des deux sites (E_a et E_c), au départ bien distincts, sont polarisés vers un même potentiel E_{corr} lorsque la corrosion se produit et que le courant i_{corr} est développé.

Le phénomène de polarisation décrit ci-dessus se produit aussi entre deux métaux caractérisés par des potentiels différents. Dans ce cas, lorsque les deux métaux sont mis en contact dans un milieu conducteur, ils s'approchent aussi d'un même potentiel. Si la cathode est facilement polarisée pour se rapprocher du potentiel de l'anode, alors la corrosion à l'anode est mineure (ex. : couplage aluminium – acier inoxydable).

Dans le cas contraire où la polarisation de la cathode est plus difficile, alors l'anode corrode davantage (ex. : couplage aluminium – acier doux) [20]. Ainsi, l'ampleur du phénomène de corrosion galvanique ne dépend pas du potentiel de chacun des matériaux, mais est plutôt tributaire de l'étendue de leur polarisation.

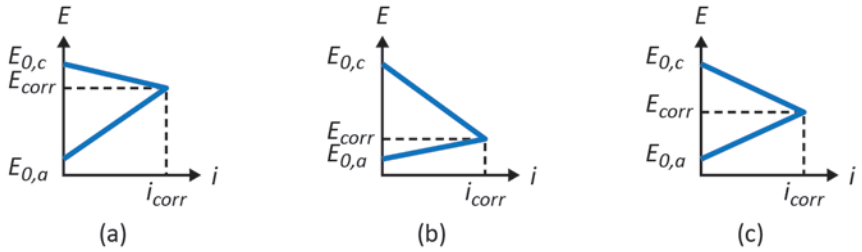


Figure 6. Diagrammes d'Evans montrant les modes de contrôle du courant de corrosion : (a) contrôle anodique; (b) contrôle cathodique; (c) contrôle mixte [51].

Adapté de http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-c02-corrosion.htm. Consulté le 3 décembre 2010

L'ampleur du phénomène de polarisation dépend de la nature des métaux mis en contact et de la composition de l'environnement. Seules des expériences en laboratoire permettent de quantifier ces phénomènes. Dans les électrolytes à pH neutre, la cathode est habituellement plus fortement polarisée que l'anode. La réaction cathodique de réduction de l'oxygène contrôle alors l'étendue du phénomène de corrosion galvanique.

Aussi, dans les conditions habituelles de contact entre l'aluminium et l'acier, l'aluminium joue le rôle d'anode et l'acier celui de cathode. Ainsi, l'aluminium corrodera de façon préférentielle. Toutefois, à des températures plus élevées (95°C), une inversion de polarisation peut se produire et l'aluminium devient alors la cathode [48]. Cette condition de haute température n'est toutefois pas remplie dans le contexte du mariage de l'aluminium et de l'acier dans le secteur du transport.

3.1.7. La géométrie des sites anodiques et cathodiques

Le contrôle de la géométrie des sites anodiques et cathodiques fait appel, entre autres, à des notions de design. D'un point de vue strictement géométrique, les designs appropriés qui feront en sorte de minimiser la corrosion galvanique sont ceux qui réduiront au minimum les possibilités d'accumulation d'électrolyte ou simplement d'humidité condensée à la jonction des deux métaux. Les notions d'optimisation du design en vue de contrer l'apparition de problématiques de corrosion galvanique sont abordées à la section 4.

D'un point de vue électrochimique, la géométrie des joints joue aussi un rôle primordial lorsque les tailles relatives des anodes (ex. : l'aluminium) et cathodes (ex. : l'acier) sont considérées. En considérant qu'un courant de corrosion dénoté *i* se développe lorsque l'aluminium et l'acier sont mis en contact, si la surface d'aluminium est plus petite que celle d'acier, alors la densité de courant *j* (en A/m^2) sera plus élevée à la surface de l'aluminium qu'à la surface de l'acier. Par conséquent, la vitesse à laquelle l'aluminium corrodera sera accrue et une corrosion sévère pourra être observée. À l'inverse, si la surface de l'anode (c.-à-d. l'aluminium) est grande par rapport à celle de la cathode (c.-à-d. l'acier), alors la densité de corrosion sur la surface d'aluminium sera faible, minimisant ainsi l'étendue du phénomène. Ainsi, il faut éviter les combinaisons petite anode – grande cathode.

Suivant ce qui est expliqué ci-dessus, supposons la situation suivante. L'aluminium doit être assemblé à un acier doux. Si, pour des raisons techniques, un seul des deux matériaux peut être peint, strictement du point de vue de la corrosion galvanique, lequel devrait être préférentiellement revêtu? Puisque l'aluminium représente l'anode qui risque de corroder, il serait « naturel » de vouloir le protéger plutôt que l'acier. Il s'agirait alors d'une erreur. Advenant un bris du revêtement appliqué sur l'aluminium, une petite anode (l'aluminium) sera alors mise en présence d'une grande cathode (l'acier). Dans cette situation, une forte densité de courant de corrosion circulera dans la section d'aluminium dénudée et une corrosion sévère sera observée sur ce site. À l'inverse, en prenant la décision de peindre la surface de l'acier, la réaction cathodique est inhibée et, par conséquent, la dissolution de l'aluminium n'est plus influencée par la présence de l'acier. Si des stries à la surface de la peinture venaient exposer l'acier, l'aluminium demeurerait intact puisque la densité du courant de corrosion qui le traverserait serait faible (petit courant réparti sur une très grande surface). En conclusion, à défaut de pouvoir se permettre de peindre l'anode et la cathode, mieux vaut alors seulement protéger la cathode.

La **Figure 7** montre que l'augmentation de l'aire de la cathode (l'acier) par rapport à celle de l'anode (l'aluminium) conduit à une augmentation du courant de corrosion galvanique. Aussi, puisque l'intensité du couplage galvanique entre l'aluminium et l'acier doux est sous contrôle cathodique, l'ajout d'air à la solution alimente la réaction cathodique de réduction de l'oxygène à la surface de l'acier. De cette façon, la sévérité du phénomène de corrosion augmente par rapport à celui constaté dans une solution seulement exposée à l'air, sans ajout délibéré d'oxygène par barbotage.

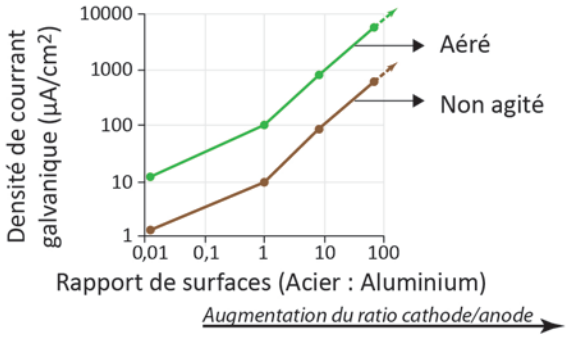


Figure 7. Influence sur le courant de corrosion galvanique du ratio de l'aire des surfaces d'acier (1008) vs aluminium (6111) et de l'agitation à l'air de la solution 3.5 % NaCl [52].

Adapté de *Galvanic corrosion : its principles and guidelines for prevention*

Dans une situation où l'aluminium et l'acier ne sont pas mis en contact direct, il est néanmoins important que le produit de corrosion qui pourrait se développer sur l'acier ne puisse aller se déposer à la surface de l'aluminium et ainsi créer un couplage galvanique important. Il s'agit là d'un phénomène de corrosion galvanique dit « sans contact » et qui, par conséquent, n'implique pas les matériaux de base.

3.2. Autres formes de corrosion localisée

L'assemblage de métaux dissimilaires tels que l'aluminium et l'acier crée la plupart du temps des joints munis de rivets ou boulons à moins que des adhésifs ne soient utilisés. Le design de ces joints, en plus d'être conçu pour empêcher la corrosion galvanique, doit aussi faire en sorte de ne pas favoriser l'apparition et le développement d'autres formes de corrosion. Parmi celles-ci, la corrosion localisée, et plus particulièrement celles par piqûres et par crevasses, sont les plus pernicieuses.

3.2.1. La corrosion par piqûres

En présence d'un électrolyte contenant des ions chlorures, l'aluminium est sensible à la corrosion par piqûres. Il est cependant important de mentionner que cette sensibilité est dépendante de la nature de l'alliage utilisé. En autres, les alliages de la série 5xxx, et plus particulièrement les 5052, 5083, 5086 et 5754 fréquemment utilisés à des fins structurales, possèdent une résistance exceptionnelle contre la corrosion par piqûres. Le mécanisme autocatalytique de piqûration est schématisé à la **Figure 8**.

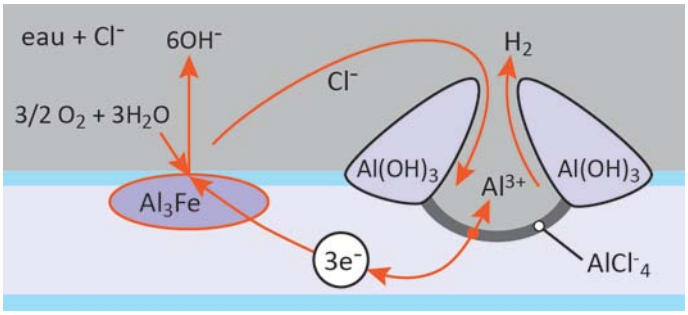


Figure 8. Mécanisme de propagation autocatalytique des piqûres.
Adapté de *Techniques de l'ingénieur*

Dans le cas d'un assemblage de matériaux dissimilaires tels que l'aluminium et l'acier, présenté à la **Figure 9**, la corrosion par piqûres peut se produire à la jonction des deux matériaux, et préférentiellement du côté de l'aluminium. Ainsi, afin d'éviter l'apparition de cette forme de corrosion, les pièces se doivent d'être isolées électriquement l'une de l'autre. Aussi, une fois l'assemblage réalisé, l'application d'un revêtement qui recouvre l'ensemble du point de jonction permet de minimiser les possibilités d'apparition de la corrosion par piqûres.

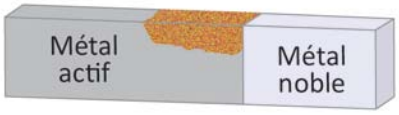


Figure 9. Développement de la corrosion par piqûres à l'interface aluminium-acier [50].
Adapté de *Corrosion prevention and protection : practical solutions* (2007, Fig. 6.15, p. 355)

3.2.2. La corrosion caverneuse (crevices corrosion)

La corrosion caverneuse est une forme de corrosion localisée qui se développe à l'intérieur de crevasses, typiquement entre des joints par recouvrement, sous des joints d'étanchéité, des rondelles, des rivets, etc. Elle est habituellement causée par la présence d'un électrolyte qui s'est infiltré dans l'espace (typiquement de l'ordre de 50 à 200 μm) laissé entre le métal et un autre métal (similaire ou non au premier) ou un matériau non conducteur.

Le moteur de développement de la corrosion caverneuse est basé sur l'établissement d'une pile d'aération différentielle. Lorsqu'un mince espace est laissé entre deux substrats et qu'un électrolyte peut s'y infiltrer, une couche de solution stagnante s'installe à l'intérieur de la crevasse. Tel que montré à la **Figure 10a**, au départ, la concentration en oxygène et en électrolyte est uniforme à l'intérieur et à l'extérieur de la crevasse. Cependant, puisque la solution à l'intérieur de la crevasse est stagnante et, par conséquent, non renouvelée, son contenu en oxygène s'épuise rapidement. Il s'en suit la mise en place d'un mécanisme d'aération différentielle qui catalysera la dissolution du métal à l'intérieur de la crevasse alors que la réaction de réduction se fera à l'extérieur de la crevasse, c.-à-d. dans la région la plus riche en oxygène.

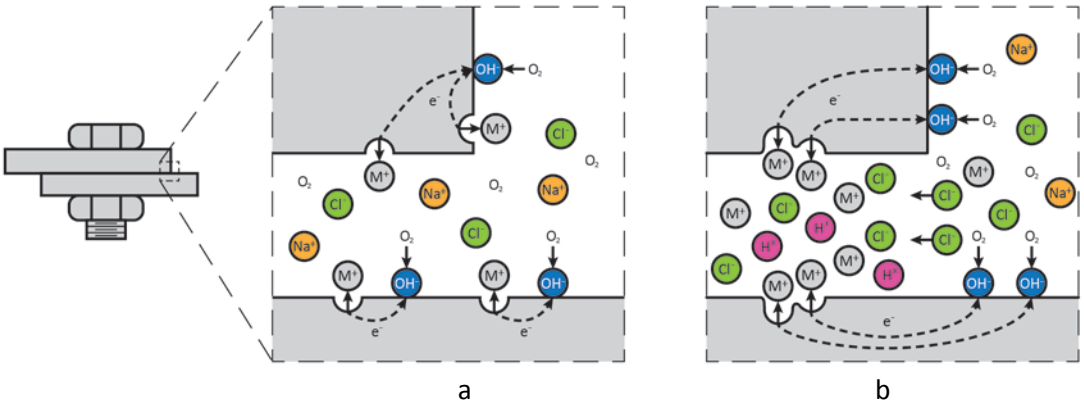


Figure 10. Mécanisme (a) d'établissement et (b) de propagation de la corrosion caverneuse [50].
Aadapté de *Corrosion prevention and protection : practical solutions* (2007, Fig. 6.21, p. 361].

4. Les méthodes de protection contre la corrosion galvanique

La corrosion galvanique se produit lorsque deux matériaux, ayant des potentiels électrochimiques différents, présentent un contact électrique tout en étant en contact avec un milieu conducteur et corrosif. Ce milieu peut être une solution dans laquelle sont immergés les deux matériaux, une (mince) couche de condensation, un solide contenant une certaine humidité tel que le sol, des dépôts de composés salins, ou des produits de corrosion. Généralement, la corrosion galvanique n'apparaît pas si la différence entre les potentiels électrochimiques des matériaux dissemblables est inférieure à 100 mV.

Étant donné que l'aluminium et l'acier possèdent des potentiels électrochimiques dont la différence dépasse largement les 100 mV dans la plupart des milieux, les applications impliquant des assemblages entre l'aluminium et l'acier doivent être considérées avec circonspection. Cependant, malgré l'apparente incompatibilité entre l'aluminium et l'acier, on rapporte plusieurs situations où des assemblages de ces deux matériaux ont été utilisés sans que soit engendrée la corrosion galvanique. En effet, les concepteurs disposent aujourd'hui d'une panoplie de méthodes leur permettant de contrer l'apparition de la corrosion galvanique dans les assemblages aluminium/acier. Ces méthodes partent du principe voulant que pour prévenir la corrosion galvanique, il faille empêcher l'apparition des conditions qui lui donnent naissance. Ainsi, si le concepteur ne peut pas modifier les potentiels électrochimiques des matériaux, il a cependant la capacité d'agir sur les autres conditions nécessaires à l'apparition de la corrosion galvanique. Il s'agit donc de supprimer le contact électrique direct entre les deux matériaux d'une part, et celui des deux matériaux avec un milieu conducteur et corrosif d'autre part. Il en ressort donc que la corrosion galvanique peut être prévenue, soit en isolant électriquement les deux matériaux, ou soit en isolant les deux matériaux des milieux conducteurs et corrosifs avec lesquels ils pourraient entrer en contact. La diminution de la corrosivité de ces mêmes milieux est une autre méthode de prévention de la corrosion cathodique.

Dans un contexte où une panoplie de méthodes de protection contre la corrosion galvanique est disponible et relativement simple, il est de plus en plus aisé de penser à utiliser l'aluminium lorsque ses propriétés sont requises. Pour ce faire, on évitera les substitutions et on misera sur des techniques de conception adaptées au matériau.

Les mesures de prévention de la corrosion galvanique appliquées aux assemblages aluminium-acier seront développées dans ce qui suit.

4.1 La conception

La conception est l'étape la plus importante dans la prévention de la corrosion. Anticiper les problèmes de corrosion permet de réaliser d'importantes économies en termes de coûts d'entretien ultérieur. Il est donc primordial de demeurer attentif dès le départ aux détails de conception pouvant mener à une détérioration précoce des pièces touchées par la corrosion galvanique. À cet effet, on doit envisager le processus de conception destiné à contrer la corrosion comme un des aspects essentiels du processus d'ingénierie global. Par la suite, les concepteurs devraient idéalement valider leurs concepts avec des corrosionnistes avant de préparer les dessins de détails.

Pour concevoir des produits en aluminium, il est nécessaire de penser en fonction du matériau pour tirer profit de toutes ses particularités et ainsi optimiser le concept en termes de poids, design et prévention de la corrosion. Il ne saurait être question d'une simple substitution de matériel.

4.1.2 Le processus de conception

Il est suggéré de suivre un processus en quatre étapes lors de la conception afin de prévenir la corrosion. La **Figure 11** illustre les grandes étapes de ce processus et identifie les activités inhérentes à chacune d'elles [53].

1.	Définition de la fonction désirée de la composante	Quelle est la fonction que la composante doit remplir? Comment cette fonction doit-elle s'accomplir? Quelles sont les propriétés requises et comment s'ordonnent ces propriétés en termes de priorités?
2.	Définition de l'environnement dans lequel la composante sera en service	Quelles sont les compositions chimiques, conductivités, températures, vélocités, stress liés à l'environnement? Est-ce que l'environnement en condition de démarrage, de fin de cycle ou lors d'événements imprévus est similaire aux conditions normales? Quelles sont les conditions relatives aux interruptions de service?
3.	Sélection du matériel, procédures de fabrication, détails de procédés	Cette étape en est une d'itération, et son but est de faire en sorte d'atteindre les objectifs définis lors de la conception. Lorsque les matériaux et procédés ont été déterminés, il y a alors lieu de préparer des instructions spécifiques simples et claires afin de s'assurer que les procédures de fabrication seront respectées.
4.	Inspection et suivi de surveillance	L'inspection et le suivi sont nécessaires afin de s'assurer que la stratégie de protection contre la corrosion a été bien implantée et est adéquate pour l'usage prévu. Les opérations de suivi permettront de mesurer l'efficacité du programme de prévention de la corrosion et de guider les opérations si des ajustements s'avéraient nécessaires.

Figure 11. Le processus de conception [53].
Source: *Corrosion – Understanding the basics* (2000)

4.1.3 La conception des joints

Afin de faciliter le processus de conception destiné à contrer la corrosion, il existe des solutions simples et relativement faciles à mettre en œuvre dans le cadre de l'élaboration d'un nouveau concept.

4.1.3.1 Quelques conseils de conception pour prévenir la corrosion

Les conseils et exemples que l'on retrouve dans les paragraphes suivants permettent de comprendre le rôle important que le design joue dans la prévention de la corrosion, quelle soit galvanique ou d'un autre type [54]. Une multitude de configurations de joints existe, les exemples fournis n'en représentent que quelques-uns.

Des rebords devraient protéger les joints aluminium-acier directement exposés aux éclaboussures. À cet effet, il importe que ces rebords soient à angle afin d'éviter de créer des zones pièges qui pourraient favoriser la corrosion tel que le démontre la **Figure 12**.

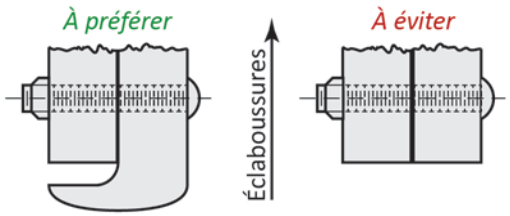


Figure 12. Protection des joints à l'aide de rebords [54].
Adapté de *Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material* (2001, p. 15)

Afin d'éviter la création de zones pièges, l'orientation des joints de panneaux de planchers ainsi que celle des panneaux latéraux doit faire en sorte que les éclaboussures ne peuvent s'immiscer entre l'aluminium et l'acier. La **Figure 13** démontre comment mettre en œuvre cette pratique avec un exemple relatif aux panneaux de planchers ainsi qu'un autre relatif aux panneaux latéraux.

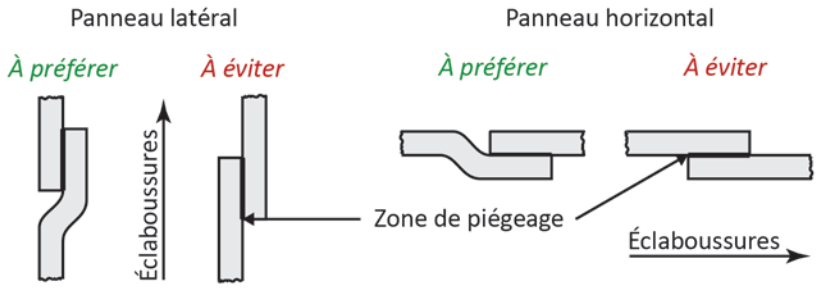


Figure 13. Orientation des joints en fonctions des éclaboussures possibles [54].
Adapté de *Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material* (2001, p. 15)

L'identification de la meilleure localisation des ouvertures dans les panneaux de bas de portes peut réduire les chances d'obstruction et améliorer le drainage. Un exemple de conception recommandée est offert à la **Figure 14**. L'utilisation d'un enduit d'étanchéité dans des assemblages très serrés peut également améliorer la résistance à la corrosion.

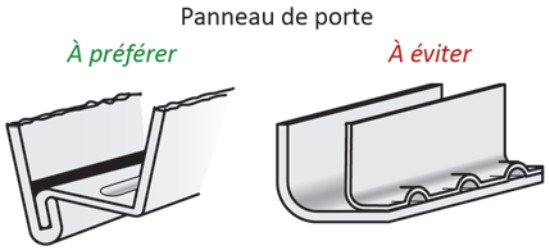


Figure 14. Planification d'ouvertures afin de réduire les chances d'obstruction et améliorer le drainage [54].
Adapté de *Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material* (2001, p. 16)

Le type de conception et l'orientation des membranes structurelles ainsi que de leurs renforts peuvent également avoir une influence dans la prévention de la corrosion galvanique. À cet effet, l'utilisation de profilés oméga ainsi que l'utilisation de renforts pour les poutres en H ou en I est considérée adéquate s'il est possible d'aménager des ouvertures dans le bas des profilés oméga afin de faciliter le drainage tel que montré à la **Figure 15**.

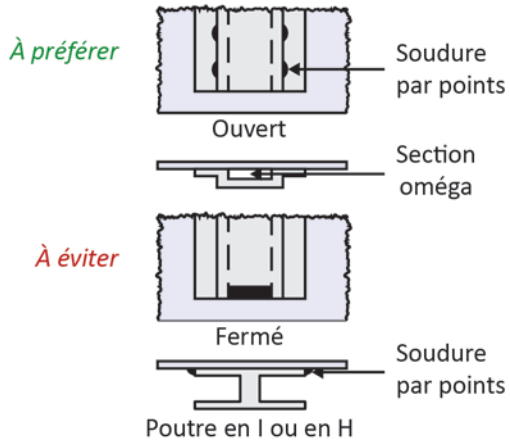


Figure 15. Conception de renforts avec dégagements pour des profilés oméga, en H et en I [54].
Adapté de *Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material* (2001, p. 16)

Lorsque l'on doit utiliser des sections fermées, telles que celles présentées à la **Figure 16**, il importe de planifier l'aménagement d'ouvertures assez grandes pour permettre l'application de revêtements protecteurs et, par le fait même, permettre un drainage efficace. Les flûtes de drains et les ouvertures persiennées devraient tendre vers le bas et vers l'arrière du véhicule.

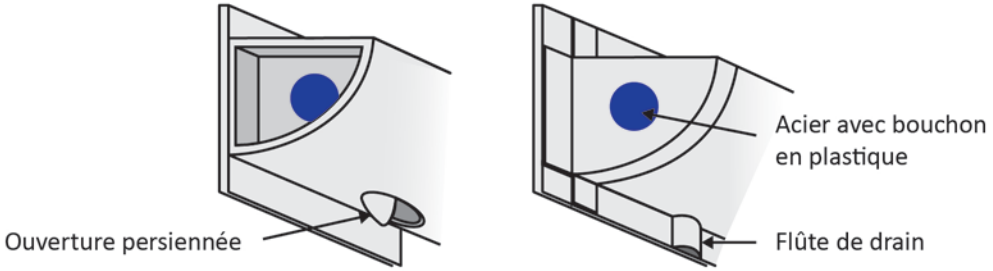


Figure 16. Aménagement d'ouvertures facilitant l'application de revêtements [54].
Adapté de *Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material* (2001, p. 15)

Il est également recommandé d'utiliser, lorsque possible, des montages dégagés tels que ceux montrés à la **Figure 17**. En environnement corrosif sévère, les sections en caissons et les espaces clos doivent être évités ou traités à l'aide d'un revêtement protecteur.

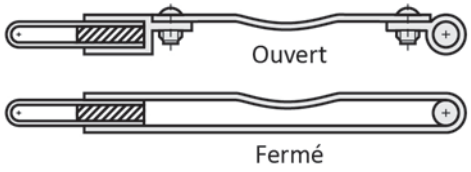


Figure 17. Réalisation de montages dégagés [54].
Adapté de *Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material* (2001, p. 15)

La mise en pratique de ces techniques de conception (les exemples précédents n'en sont que quelques-uns parmi tant d'autres) permettra de prévenir l'apparition de la corrosion galvanique et d'autres types de corrosion si le processus de conception relatif à la corrosion a été intégré de manière rigoureuse au processus global, et ce, dès le début du projet. Des exemples supplémentaires de types de joints sont disponibles dans les publications suivantes (en cliquant sur le lien hypertexte) : *Aluminum : The Corrosion Resistant Automotive Material* et *Corrosion control checklist*, respectivement publiés par *The Aluminum Association* et *The National Physical Laboratory* [54, 55].

4.1.4 Les procédés d'assemblages

Le choix du procédé d'assemblage ainsi que sa mise en œuvre ont également leur importance lorsqu'il s'agit de prévenir la corrosion galvanique. Que l'on opte pour des assemblages mécaniques, de l'assemblage par soudure ou par adhésifs, il y aura lieu de concevoir les joints de manière à éviter toutes zones problématiques.

Les procédés suivants peuvent jouer un rôle dans la prévention de la corrosion galvanique :

- Assemblage par boulonnage : Ce procédé consiste à assembler deux ou plusieurs pièces à l'aide de boulons et de leurs accessoires.

- Rivetage : On l'utilise pour réaliser des assemblages non démontables, à l'aide de rivets, de pièces métalliques.

- Soudage conventionnel : Plusieurs procédés tels que l'arc le MIG et le TIG entrent dans cette catégorie. On s'en sert pour réaliser des assemblages permanents dans une continuité de la matière.

- Soudage par friction malaxage : Procédé utilisé pour assembler du métal à l'état solide (deux métaux différents ou non) à l'aide d'une tige rotative.

- Assemblage par adhésifs structuraux : Procédé qui permet d'assembler, entre autres, des matériaux dissimilaires qui ne pourrait l'être autrement tout en éliminant les concentrations de contraintes et en maintenant l'intégrité des matériaux.

Indépendamment du procédé choisi, il importe de réaliser les activités d'assemblages selon les règles de l'art et de respecter les procédures mises en place afin de prévenir l'apparition de la corrosion galvanique. Un cordon de soudure non conforme, un assemblage boulonné avec une rondelle non adéquate ou un rivet d'un alliage non compatible peuvent générer de la corrosion galvanique. Il y a donc lieu de réaliser les opérations d'assemblage avec rigueur.

4.2 Isolation électrique du contact aluminium-acier par l'intermédiaire de pièces non conductrices

Dans le cas d'équipements simples impliquant des assemblages boulonnés, l'isolation électrique de l'aluminium de l'acier (ou l'inverse) peut être réalisée en isolant les boulons par rapport aux deux matériaux en présence [48]. À cette fin, on utilise des bagues dans les trous alésés et des rondelles sous les têtes des boulons et des écrous faits de matériaux plastiques non conducteurs tels que le nylon, le PTFE (polytetrafluoroethylene, Teflon), le caoutchouc naturel ou synthétique, etc. En présence d'une mise à la terre commune, les deux pièces doivent être isolées par un joint en caoutchouc pour éviter que l'aluminium ne se transforme en anode sacrificielle. Les joints en caoutchouc chargés avec du carbone ou du graphite doivent être évités, car le graphite provoque un couplage galvanique très important avec l'aluminium. Un exemple d'isolation électrique d'un assemblage boulonné d'un tuyau en aluminium et d'une valve en acier inoxydable est schématisé à la **Figure 18**.

Dans ce cas, le boulon et l'écrou, tous les deux en acier inoxydable sont isolés des deux pièces principales par des rondelles et une bague isolantes. Un joint d'étanchéité entre le tuyau et la valve complète l'isolation électrique des deux pièces.

L'efficacité de l'isolation électrique entre les deux matériaux (aluminium et acier) doit être confirmée avant la mise en service de l'assemblage [48]. La résistance électrique mesurée entre les deux matériaux lorsque l'assemblage est sec doit être aussi élevée que possible (de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'ohms).

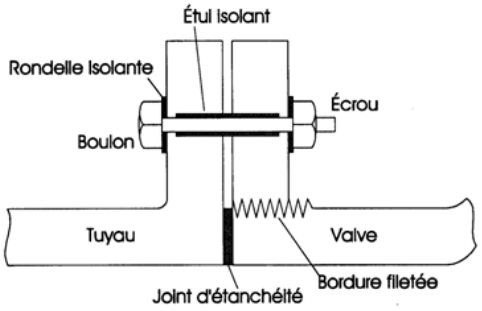


Figure 18. Utilisation de pièces en polymères afin de couper le contact électrique entre l'aluminium et l'acier.
Source : Notes de cours du Professeur Ghali (avec son autorisation)

4.3. Protection de l'acier par des revêtements d'aluminium

S'il est logique de penser que les concepteurs n'ont aucun contrôle sur les potentiels électrochimiques de l'aluminium et de l'acier, l'application d'un revêtement d'aluminium à l'acier permet néanmoins de changer la nature du contact au niveau de l'assemblage. Ainsi, le contact dissemblable aluminium-acier très susceptible à la corrosion galvanique est remplacé par un contact aluminium-aluminium qui plus résistant à la corrosion galvanique [48, 56]. Un revêtement en aluminium protège cathodiquement la structure en acier en cas d'endommagement. L'application préalable d'un revêtement d'aluminium à l'acier avant son assemblage à la pièce en aluminium a été pratiquée dans le cas de structures aluminium/acier travaillant dans la très agressive eau de mer, et la corrosion galvanique a pu être largement supprimée dans ce cas [56, 57].Plusieurs techniques d'application de revêtements d'aluminium à l'acier sont utilisées par l'industrie en fonction de la taille et de la complexité des pièces à protéger, ainsi que de l'épaisseur de la couche à déposer :

1. l'immersion dans un bain d'aluminium en fusion;
2. la projection thermique (thermal spray);
3. la déposition en phase gazeuse par voie physique (procédés PVD).

4.3.1. Déposition de revêtement d'aluminium par immersion dans un bain en fusion

L'application de revêtements d'aluminium sur des pièces ou structures en acier par immersion de ces derniers dans des bains d'aluminium en fusion est un procédé industriel très bien établi depuis des décennies [57]. Cette technique visait initialement à profiter de la haute résistance à la corrosion de l'aluminium dans certains milieux où des pièces ou structures en acier (notamment les aciers au carbone) devraient être utilisées [57, 58].

Il y a principalement deux types de revêtements à base d'aluminium appliqués à l'acier par immersion dans des bains fondus. Le premier est appliqué à partir de bains contenant des alliages d'aluminium avec 5 à 11 % de silicium [57]. Les produits obtenus de cette façon sont désignés comme des produits aluminisés de type 1. Le deuxième type de revêtement est appliqué à partir de bains contenant de l'aluminium pur et les produits obtenus de cette façon sont désignés comme des produits aluminisés de type 2. Les produits aluminisés de type 1 sont destinés aux applications aux hautes températures (jusqu'à 600 °C environ) [57]. Ces revêtements ont été largement utilisés ces dernières années sur de l'acier inoxydable (série 400) pour la fabrication d'une nouvelle génération de systèmes d'échappement ayant une plus longue durée de vie en service (environ dix ans). Les produits aluminisés de type 2 offrent une très bonne résistance à la corrosion et sont notamment utilisés dans les canalisations souterraines [57].

En général, les revêtements d'aluminium obtenus par immersion dans des bains fondus peuvent être appliqués sur une grande variété de pièces et structures en acier, telles que des tôles, des fils, des tuyaux, ainsi que les vis, écrous, boulons, etc. [57, 58]. La structure d'acier et ses composantes devenant ainsi protégées contre la corrosion et bénéficiant d'une augmentation de la durabilité.

4.3.2. Déposition de revêtement d'aluminium par projection thermique

Cette technique consiste à projeter le matériau de revêtement (l'aluminium) sous forme de gouttelettes très fines sur le substrat (l'acier) où il se solidifie rapidement. L'aluminium est introduit dans un pistolet sous forme de fil continu et une flamme à oxygène apporte l'énergie thermique nécessaire à la fusion [58, 59]. La **Figure 19** présente les principes derrière les procédés de projection thermique [59].

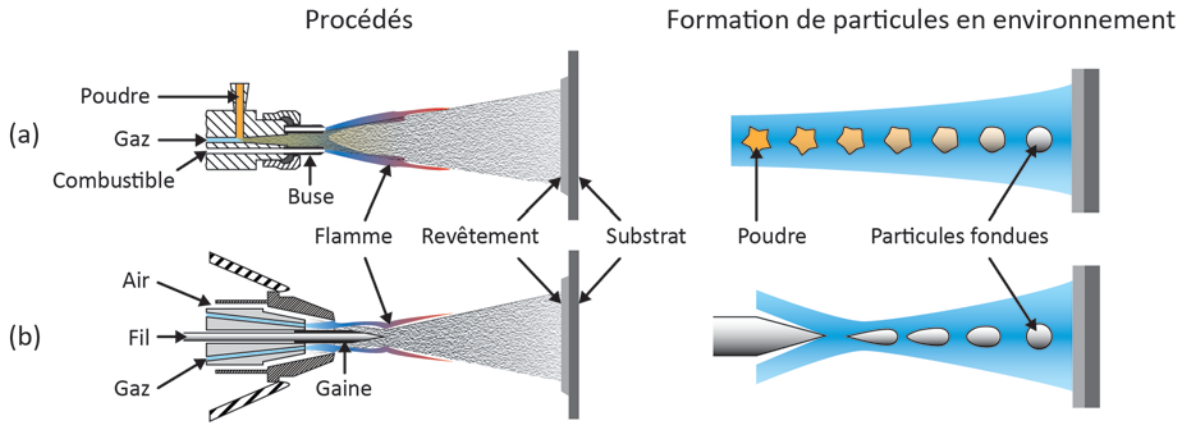


Figure 19. Présentations schématiques des procédés de projection thermique de l'aluminium en fonction du type de l'apport (a) sous forme de poudre, et (b) sous forme de fil.

Adapté d'*ASM Handbook*, Volume 13

L'application de revêtements d'aluminium (ou de ses alliages) à l'acier par projection thermique est une technique bien établie dans l'industrie, et vise essentiellement à protéger le substrat contre la corrosion. Plusieurs structures en acier sont protégées par cette méthode, telles que les réservoirs de stockage de certains produits pétroliers, les carters de pompes et de compresseurs, les échangeurs de chaleur, etc. En outre, plusieurs études montrent l'excellente résistance à la corrosion de structures d'acier protégées par des revêtements d'aluminium appliqués par projection thermique, et ce, dans divers milieux. Même si ces études s'intéressent essentiellement à la résistance à la corrosion générale de ces structures, une bonne résistance à la corrosion galvanique dans le cas d'assemblage avec des pièces en aluminium est à prévoir [58, 59].

4.3.3. Déposition de revêtements par procédés PVD (physical vapor deposition)

La déposition en phase gazeuse par voie physique (procédés PVD) est une variété de dépositions sous vide de films minces par condensation de vapeurs métallique (du matériau de revêtement) à la surface du substrat à couvrir [58, 60]. Les principaux procédés de déposition par PVD sont la métallisation par pulvérisation cathodique sous vide (sputtering), l'évaporation et le placage ionique (ion plating).

L'aluminium et ses alliages constituent les matériaux les plus déposés en phase gazeuse par voie physique, notamment par évaporation. Dans ce cas, l'aluminium est évaporé sous vide, soit par bombardement électronique, soit par conduction thermique. Afin d'assurer l'uniformité du revêtement, plusieurs sources d'évaporation sont habituellement utilisées et le substrat est animé de mouvements de translation et/ou de rotation afin d'exposer toutes les parties aux vapeurs métalliques [60]. Une représentation schématisée du procédé PVD par évaporation utilisant un faisceau d'électrons est montrée à la **Figure 20** [60].

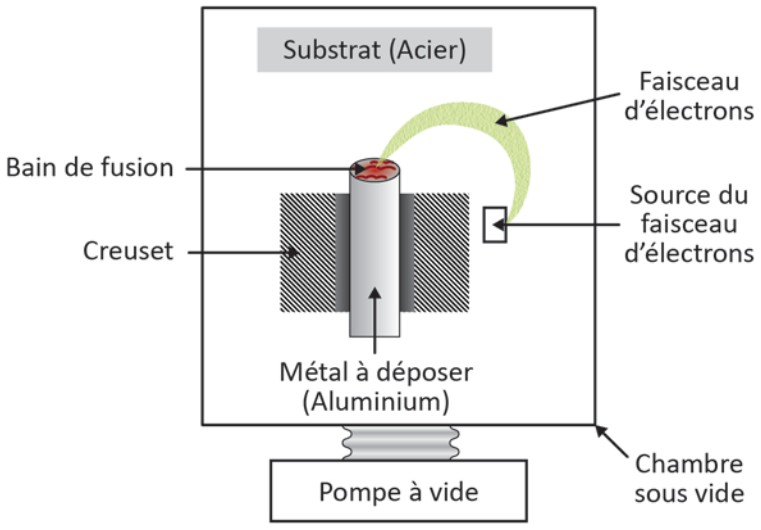


Figure 20. Représentation schématique du procédé PVD par évaporation utilisant un faisceau d'électrons
Adapté de *CVD and PVD coatings. ASM International.*

L'application de revêtements d'aluminium sur un substrat d'acier par PVD est également un procédé industriel bien établi qui commence à remplacer l'aluminisation dans des bains en fusion. En effet, les revêtements d'aluminium obtenus par PVD se caractérisent par une faible porosité et une densité élevée, ce qui entraîne une protection efficace du substrat (l'acier) contre l'attaque par des milieux corrosifs agressifs, et prévient l'apparition de la corrosion galvanique dans le cas de l'assemblage aluminium/acier [60].

4.3.4. Formation de revêtement d'aluminium par électrodéposition

Pour électrodéposer un revêtement métallique, le substrat est branché comme cathode dans une cellule d'électrolyse qui renferme un électrolyte contenant selon les cas, outre les ions du métal à déposer ainsi que plusieurs additifs. L'électrodéposition se fait principalement dans des solutions aqueuses, et offre plusieurs avantages, tels que la grande variété des métaux pouvant être déposés (Zn, Cd, Cr, Ni, Sn, Au, Ag, Pd), la versatilité des applications (petites pièces en vrac, déposition en continu et à grande vitesse sur des tôles, etc.), épaisseurs uniformes et facilité du contrôle du procédé. Cependant, l'électrodéposition de l'aluminium dans des solutions aqueuses est impossible à cause de la grande évolution de l'hydrogène à la cathode. L'emploi d'électrolytes organiques ou de sels fondus permet techniquement de déposer l'aluminium, mais ce type de procédé demeure à l'heure actuelle peu pratique et rarement utilisé.

4.4. Autres revêtements métalliques applicables à l'acier en vue de diminuer le risque de corrosion galvanique entre l'acier et l'aluminium

L'application d'un revêtement en zinc à la pièce en acier avant son assemblage à celle en aluminium peut constituer une solution permettant de diminuer le risque de corrosion galvanique entre les deux matériaux. Le choix du zinc comme matériau de revêtement découle de sa proximité de l'aluminium dans la plupart des séries galvaniques disponibles dans la littérature [48, 57-59].

De même, étant moins noble que l'acier, un revêtement en zinc protège cathodiquement l'acier en cas d'endommagement. L'autre matériau de revêtement possible pour l'acier, afin de diminuer le risque de la corrosion galvanique dans les assemblages aluminium-acier, est le cadmium. En effet, comme pour le zinc, le cadmium est proche de l'aluminium dans la plupart des séries galvaniques disponibles et la différence de potentiels électrochimiques des deux matériaux est de l'ordre de 100 mV [48, 57, 58, 61]. Ainsi, un revêtement en cadmium protège cathodiquement l'acier en cas d'endommagement.

Cependant, même si le cadmium a été déjà utilisé comme revêtement de l'acier inoxydable à cet effet (prévention de la corrosion galvanique), la tendance actuelle est la recherche d'alternative au cadmium à cause de sa toxicité.

L'application de revêtements de zinc sur l'acier peut être réalisée en utilisant sensiblement les mêmes techniques d'application de l'aluminium déjà décrites (sauf la déposition en phase gazeuse). Il s'agit donc de l'immersion dans un bain de zinc en fusion (la galvanisation), et de la projection thermique. Un revêtement en zinc peut être également appliqué à l'acier par électrodéposition (contrairement à l'aluminium).

4.5. Utilisation d'un matériau de transition entre l'aluminium et l'acier pour prévenir la corrosion galvanique

L'utilisation d'un matériau ou joint de transition dans les assemblages soudés aluminium-acier pour réduire la corrosion galvanique est une pratique répandue dans l'industrie maritime. Citons en exemple le soudage de structures en aluminium aux ponts en acier. Cette méthode commence également à être utilisée dans l'industrie automobile [48, 62]. Les joints ou matériaux de transition sont fabriqués par laminage à froid de pièces d'aluminium et d'acier, de même taille et superposées l'une sur l'autre, suivi d'un recuit [62]. L'utilisation du matériau de transition ainsi obtenu transforme l'assemblage dissemblable aluminium-acier en deux assemblages semblables aluminium-aluminium et acier-acier. Dans ce cas, la transition aura lieu à l'interface de la jonction aluminium-acier, et la protection contre la corrosion galvanique pourrait se limiter à la pièce de transition. La pièce de transition peut également jouer le rôle de pièce sacrificielle facilement remplaçable en cas d'attaque par corrosion galvanique. Des tests de laboratoire ont montré que l'utilisation d'un joint de transition aluminium-acier réduit le taux de corrosion de l'aluminium par un facteur de 10 [62]. Les **Figures 21.a** et **21.b** présentent deux configurations d'assemblage aluminium-acier utilisant un joint de transition, le premier assemblage étant soudé alors que le deuxième est boulonné.

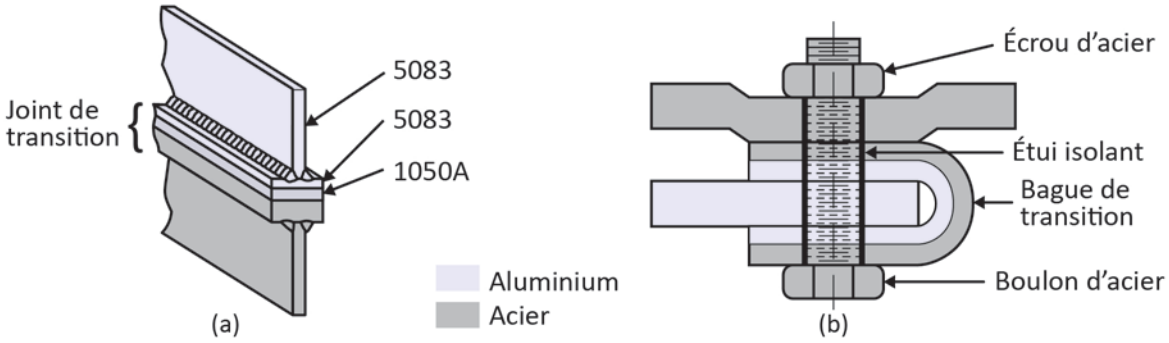


Figure 21. Représentation schématique de deux configurations de joints de transition aluminium-acier, (a) cas d'un assemblage soudé rencontré dans l'industrie maritime, et (b) cas d'un assemblage boulonné rencontré notamment dans l'industrie automobile [48, 62].

Adapté de *Bimetallic Corrosion* (2000) et *Joining aluminum to steel with transition* material (1999)

4.6. Protection de l'aluminium et de l'acier par des traitements de conversion chimique

4.6.1. La phosphatation

La phosphatation est un traitement de conversion utilisé pour former des couches obtenues par une réaction du substrat avec un milieu choisi. La phosphatation est appliquée notamment aux aciers au carbone, aux aciers galvanisés et inoxydables, et à un moindre degré à l'aluminium, le cuivre, le magnésium ainsi qu'à leurs alliages [58, 63, 64]. Dans le cas des structures en acier, la phosphatation sert essentiellement à renforcer l'adhésion des peintures.

On distingue les couches de phosphates minces (0.2-0.8 g/m^2) essentiellement composées de phosphates de fer, les couches de phosphates d'épaisseur moyenne (1.5-4 g/m^2) qui contiennent du phosphate de zinc, et les couches de phosphates lourdes (7-30 g/m^2). Ces dernières, constituées de phosphates de fer, de zinc et de manganèse peuvent servir comme revêtement anticorrosion, même en l'absence de peinture [58, 63, 64].

Dans le cas des assemblages aluminium-acier, la phosphatation mince et moyenne de la structure en acier offre une bonne adhésion de la peinture, ce qui devrait réduire le risque d'apparition de corrosion galvanique sur la pièce d'aluminium si le concepteur choisit de ne pas peindre l'ensemble [63, 64]. Cependant, l'idéal reste de traiter les deux structures par phosphatation, séparément puisque les procédés sont différents pour l'aluminium et l'acier, puis d'appliquer une couche de peinture protectrice à l'ensemble après assemblage.

4.6.2. L'anodisation

L'anodisation, pratiquée surtout sur l'aluminium, consiste à renforcer le film d'oxyde naturel par une oxydation anodique. L'anodisation peut servir comme base de peinture, mais dans ce cas, aucun traitement de colmatage ne doit être appliqué afin de préserver la rugosité de la couche d'oxyde et d'assurer l'adhésion de la peinture [58, 63, 65]. L'utilisation de l'anodisation comme base de peinture des structures en aluminium pourrait être employée dans des assemblages aluminium-acier à condition que l'ensemble soit peint.

4.6.3. La chromatation

Les couches de conversion réalisées par chromatation sont obtenues en immergeant le substrat dans une solution d'ions chromate ou dichromate. Les couches de chromatation obtenues sont d'une épaisseur variant entre 0.01 et 3 µm [58, 64, 66]. Ces couches sont appliquées notamment aux alliages d'aluminium, du zinc, du magnésium, de cadmium, ainsi qu'aux aciers. Les couches de chromatation renforcent l'adhésion des peintures et peuvent ainsi être utilisées comme base de peinture dans des assemblages aluminium-acier [64, 67].

4.7. Protection de l'aluminium et de l'acier par des peintures ou autres revêtements organiques

Les peintures et autres revêtements organiques adhérents sont recommandés pour protéger de la corrosion chacun des matériaux utilisés dans l'assemblage, de même que pour isoler des milieux conducteurs et corrosifs l'ensemble de l'assemblage aluminium-acier [67]. Il est toujours conseillé d'isoler l'ensemble de l'assemblage du milieu corrosif, c'est-à-dire aussi bien la pièce ou structure en aluminium que celle en acier. Si le concepteur juge, pour des raisons économiques ou d'ordre pratique (taille des pièces, complexité des formes, etc.), qu'il est impossible d'isoler l'ensemble de l'assemblage, la priorité doit être donnée à l'isolation de la pièce en acier (le matériau le plus noble) du milieu corrosif. En effet, le fait d'isoler la pièce en acier entraine la réduction de surface occupée par la cathode et, par conséquent, la chute du taux de la corrosion galvanique (c.-à-d. la quantité d'aluminium dissout par unité de temps).

L'utilisation de revêtements organiques pour isoler l'aluminium et l'acier des milieux conducteurs et corrosifs en vue de prévenir le risque de corrosion galvanique est une pratique très courante dans l'industrie [68, 69]. En effet, les revêtements organiques forment une barrière entre le substrat métallique et le milieu. Certaines peintures constituent en plus un réservoir d'inhibiteurs de corrosion. De nos jours, les concepteurs disposent d'une grande panoplie de revêtements organiques qui pourraient servir à isoler les assemblages aluminium-acier des milieux conducteurs et corrosifs avec lesquels ils pourraient entrer en contact, évitant ainsi l'apparition de la corrosion galvanique. Dans ce qui suit, les revêtements les plus communément rencontrés sont brièvement présentés [68, 69].

Les activités relatives au boulonnage doivent être réalisées selon les règles de l'art afin que les revêtements conservent leurs propriétés.

4.7.1. Revêtements de type peinture

Le contrôle de la corrosion de l'aluminium, et plus particulièrement de l'acier par l'application de peintures, est une méthode bien connue de protection contre la corrosion galvanique. L'application d'une peinture sur les matériaux avant leur assemblage permet de créer une barrière qui empêche le passage du courant entre les deux composantes assemblées (moyennant l'isolation du moyen d'attache). Les résines les plus utilisées dans la formulation des peintures sont :

1. les alkydes et époxys esters (séchés à l'air ou cuits afin de favoriser la réticulation du polymère);
2. les uréthanes bicomposantes;
3. les revêtements à base d'acrylique ou d'époxy;
4. les revêtements de latex tels les vinyles, acryliques, styrène.

Ces types de revêtements organiques sont des mélanges complexes formulés pour protéger les matériaux sur lesquels ils sont appliqués de même que pour améliorer leur apparence. Divers additifs tels les chromates et molybdates sont entre autres ajoutés aux formulations comme inhibiteurs de corrosion qui ne causent pas de problèmes de couplage galvanique avec l'aluminium ou l'acier. Toutefois, les additifs de plomb sont à éviter dans le cas de peintures à appliquer sur l'aluminium puisque ces deux métaux forment un couple galvanique important.

Quant au zinc, il est souvent ajouté aux peintures et joue un rôle sacrificiel qui apporte une protection supplémentaire contre la corrosion du métal sous-jacent, qu'il s'agisse de l'acier ou de l'aluminium [58, 68, 69].

Dans le meilleur des cas, l'application du revêtement de type peinture est précédée de l'application d'un traitement de conversion chimique de la surface métallique (ex. : phosphatation, chromatation), de l'application d'un E-coat (utilisée dans l'industrie automobile principalement, voir paragraphe 4.6.2.) et de l'application d'un apprêt compatible avec le traitement de conversion chimique et la chimie de la peinture.

Le concepteur doit cependant tenir compte de la conductivité électrique de certaines peintures, car des peintures conductrices appliquées sur des pièces devant être assemblées pourraient les mettre en contact électrique. Dans ce cas, le concepteur devrait opter pour un moyen d'isolation électrique (exemple : un joint isolant). De même, le concepteur doit être conscient que le boulonnage de pièces préalablement peintes pourrait endommager la couche de peinture et annuler son effet protecteur contre la corrosion galvanique. Dans ce cas, le concepteur pourra choisir de peindre l'assemblage après boulonnage.

4.7.2. Revêtements électrodéposés (E-coatings)

Les revêtements électrodéposés sont appliqués à partir de particules polymériques chargées en suspension dans l'eau. Sous l'influence d'un champ électrique, ces particules chargées migrent vers la surface de la pièce à protéger immergée dans le bassin de déposition et possédant une charge opposée. Les revêtements déposés possèdent une épaisseur de l'ordre de 10 à 38 µm. La pièce est ensuite retirée du bassin de déposition, rincée avec de l'eau pour enlever la peinture non déposée, puis cuit dans un four [68, 69].

Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie automobile et a l'avantage d'être automatisable, et de permettre la déposition de revêtements au même temps sur plusieurs pièces de différentes tailles et formes. Il permet également d'obtenir des revêtements d'épaisseurs uniformes même sur les bords et les parties difficilement accessibles pour les procédés de peinture conventionnels. L'électrodéposition permet d'obtenir des couches protectrices sur des pièces d'acier et d'aluminium.

4.7.3. Revêtements déposés électrostatiquement à partir de poudres

Ces revêtements sont des couches de peinture qui ont été appliquées sur des pièces ou structures sous forme de poudres sèches. Ces poudres sont principalement du même type que les polymères et les résines utilisés dans les peintures liquides (tels que l'acrylique, le vinyle, l'époxy, le nylon, le polyester et l'uréthane), avec l'exception qu'aucun solvant n'est utilisé dans ce cas. Ainsi, après l'application de la poudre à la surface à protéger, le film de peinture est formé en portant les particules en poudre au dessus de leur point de fusion [31,32].

Les trois méthodes principales d'application des revêtements en poudre sont l'application électrostatique, l'application utilisant un lit fluidisé, ainsi que l'application par lit fluidisé électrostatique. Après l'application de la poudre, une étape de cuisson est nécessaire pour former un revêtement complètement sec. La cuisson des revêtements déposés à partir de poudre se fait dans des fours à convection ou à radiation. Le temps et la température de cuisson sont déterminés par les propriétés de polymérisation de la peinture [31,32].

Les revêtements à base de poudres sont utilisés dans une grande gamme de produits incluant les meubles en métal, les appareils électroménagers, ainsi que des composantes automobiles. Les peintures à base de poudres ont montré une bonne adhésion sur l'aluminium et l'acier, ainsi qu'une bonne résistance à l'humidité [68, 69].

4.7.4. Revêtements à base de caoutchouc

Les revêtements à base de caoutchouc (rubber lining) constituent une autre méthode d'isolation des assemblages aluminium-acier des milieux conducteurs et corrosifs. Durant les dernières décennies, une gamme étendue de revêtements à base de caoutchouc synthétique a été développée, offrant aux concepteurs plusieurs possibilités de prévention de la corrosion galvanique. Parmi ces revêtements, il est possible de citer le néoprène, le butyle, le chlorobutyle, l'éthylène-propylène, le nitrile, et le styrène-butadiène. Les produits de revêtements à base de caoutchouc synthétique disponibles actuellement permettent de s'adapter aux exigences spécifiques de résistance aux différents milieux corrosifs à différentes températures, aux chocs, à l'abrasion, etc. [68, 70].

Les revêtements à base de caoutchouc sont généralement fournis sous forme de feuilles. Leur application sur les surfaces à protéger nécessite au préalable un nettoyage de ces dernières par sablage puis par un solvant afin d'éliminer les contaminants et augmenter la rugosité pour établir une bonne adhérence. Un adhésif est ensuite appliqué sur les surfaces puis les feuilles de caoutchouc sont installées et pressées contre les surfaces à protéger pour supprimer les poches d'air présentes et assurer une bonne adhésion. Une dernière étape de vulcanisation ou réticulation visant à améliorer les propriétés mécaniques des revêtements est réalisée [70].

4.7.5. Critères de sélection des revêtements organiques

Une recommandation précise concernant la sélection d'un revêtement pour protéger un assemblage aluminium-acier contre la corrosion galvanique est difficilement réalisable sans essais. Cependant, le concepteur peut se baser sur un ensemble de critères afin d'identifier les quelques revêtements susceptibles de protéger efficacement un assemblage aluminium-acier contre la corrosion galvanique [69] :

1. Le revêtement choisi doit être compatible avec l'aluminium et l'acier si le concepteur choisit d'isoler tout l'assemblage, ou avec l'acier si le choix est fait de protéger ce dernier seulement.

2. Idéalement, le revêtement doit isoler efficacement les deux structures du milieu corrosif avec lequel ils pourraient entrer en contact. Le concepteur doit définir les conditions d'utilisation de l'assemblage, à savoir :
    a. La température (minimale, moyenne et maximale);
    b. La nature du milieu (milieu sec, humide, atmosphère, immergé, milieu marin, contenant des bactéries, etc.);
    c. Le contact chimique (acides, bases, solvants, sels, fumée, etc.);
    d. L'exposition aux rayons solaires et aux intempéries (utilisation intérieure ou extérieure);
    e. L'exposition aux produits abrasifs;
    f. La présence de produits de contamination.

3. Le concepteur doit également prendre en considération le niveau de préparation de surface nécessaire avant l'application du revêtement (sablage, brossage, attaque chimique, etc.).

4. Le concepteur doit tenir compte de l'étape de réticulation, si elle existe, comme la température par exemple. Par exemple, si la réticulation doit se faire à haute température, le concepteur doit s'assurer que la bonne température soit uniformément atteinte sur toute la surface de l'assemblage. De même, le concepteur doit s'assurer que la température utilisée ne risque pas de provoquer des distorsions au niveau de l'assemblage ou des changements de phases dans l'alliage d'aluminium qui peuvent affecter ses propriétés mécaniques.

5. Le concepteur doit tenir compte des problèmes de sécurité reliés à l'application de certains revêtements, notamment les revêtements avec solvant (contact avec le produit, risque de feu, d'explosion, etc.).

6. Évaluation des coûts reliés au processus de protection par revêtement (le produit lui-même, la préparation de surface, l'application, la réticulation, etc.). Ces coûts doivent tenir compte de la durabilité de la protection. Généralement, la prise en compte des coûts se fait après avoir identifié les revêtements les plus aptes à protéger efficacement un assemblage aluminium-acier contre la corrosion galvanique [71, 72].

Les revêtements organiques représentent la nouvelle génération de finis résistants à la corrosion, appelés à remplacer définitivement les finis chromatés. Étant peu conducteurs, ils améliorent grandement la résistance à la corrosion galvanique des systèmes d'assemblage impliquant les aciers inoxydables, les alliages d'aluminium et les aciers au carbone. La méthode d'application d'une peinture ou d'un revêtement organique en général est propre à chaque produit. Communément, la marche à suivre qui comprend entre autres les techniques de préparation de surface en vue de l'application est fournie par le manufacturier du revêtement. L'analyse de l'ensemble des systèmes de revêtements disponibles commercialement dépasse bien sûr largement l'objectif de cet ouvrage.

4.8. Diminution de la corrosivité des milieux conducteurs et corrosifs en contact avec les assemblages aluminium-acier via les inhibiteurs de corrosion

La diminution de la corrosivité des milieux conducteurs et corrosifs en contact avec les assemblages aluminium-acier est réalisée par l'ajout d'inhibiteurs aux milieux en question. Cette solution est généralement limitée aux circuits fermés qui impliquent une recirculation d'eau ou d'un autre fluide. Dans ce cas, les inhibiteurs agissent par élimination de l'agent corrosif, c'est-à-dire l'oxygène dans la plupart des situations, en réagissant avec lui pour former un produit inoffensif.

5. Validation en laboratoire de l'efficacité de moyens de protection : contrôle de qualité du design et méthodes de mise en œuvre

La première solution pour contrer les phénomènes de corrosion galvanique consiste à sélectionner les matériaux appropriés et à les assembler suivant un design présentant une géométrie ne permettant pas les infiltrations ou accumulations d'électrolyte dans les joints. Toutefois, afin de maximiser les effets positifs apportés par le design optimisé des joints, différents moyens de protection par l'utilisation de revêtements et de pièces de polymères permettant de couper les ponts galvaniques, se doivent aussi d'être considérés. Les méthodes de mise en œuvre de ces approches ont été discutées en détail à la section précédente.

Si requis, ou jugé nécessaire, divers essais expérimentaux permettent d'effectuer une première sélection des combinaisons de matériaux les plus prometteuses. Aussi, suite à la sélection initiale des conditions d'assemblage des matériaux dissimilaires les plus susceptibles de mener à des résultats satisfaisants, des essais expérimentaux doivent impérativement être réalisés afin de valider l'efficacité des méthodes choisies.

Tel que montré à la section 3, les causes, de même que les conséquences de la corrosion galvanique, sont bien connues. Ainsi, les solutions de couplage galvanique de l'aluminium et des aciers, inoxydables ou non, se doivent d'être évaluées sur la base du « cas par cas » [48].

Certaines publications mentionnent que le couplage de l'aluminium aux aciers n'est pas risqué du point de vue de la corrosion galvanique (ex. : [73]) alors que d'autres font appel à la vigilance des concepteurs (ex. : [67]). Dans ce contexte, il importe de réaliser des activités de contrôle de la qualité lors de l'assemblage afin de vérifier si les solutions ou méthodes recommandées sont appliquées adéquatement. Les sections ci-dessous présentent diverses approches expérimentales qui permettent d'effectuer un contrôle de qualité rigoureux des solutions d'assemblages préconisées.

5.1. Sélection des matériaux et des revêtements à partir de mesures électrochimiques

Les mesures électrochimiques permettent de caractériser, en accéléré (à l'intérieur de quelques minutes à quelques heures), le courant galvanique qui se développe entre deux métaux dissimilaires, de même que la résistance à la corrosion d'une pièce sur laquelle a été déposé un revêtement protecteur tel qu'une peinture. Ces mesures nécessitent un équipement électrochimique de base et peu couteux. Aussi, des cours de base dispensés par des compagnies telles que *Gamry Instruments* et *Solartron Analytical* permettent à un ingénieur de rapidement devenir apte à effectuer l'acquisition et l'interprétation de mesures électrochimiques de base.

Puisque l'objectif de ce document n'est pas de discuter en détail des notions théoriques qui soutiennent la vaste gamme d'expériences de nature électrochimique, nous nous limiterons à donner un bref aperçu des concepts utiles à la justification de leur pertinence dans le contexte de la corrosion galvanique.

5.1.1. Mesures de polarisation

Le tracé d'une courbe de polarisation consiste à éloigner délibérément un matériau du potentiel de quasi-équilibre qui le caractérise lorsqu'il est immergé dans un environnement donné. Considérons à titre d'exemple l'aluminium immergé dans une solution saline (NaCl). Si une électrode de référence est branchée à l'électrode d'aluminium, il sera possible de mesurer le potentiel que l'aluminium adopte « naturellement » dans ce milieu. Par la suite, si une source de tension externe est utilisée pour modifier délibérément l'état de quasi-équilibre de l'aluminium immergé dans la solution, il est alors dit que l'aluminium est polarisé. Si l'aluminium est polarisé à un potentiel plus négatif que celui qui le caractérise en l'absence de tension externe appliquée (polarisation cathodique), la surface d'aluminium sera protégée de la corrosion (une trop forte polarisation cathodique peut cependant créer une corrosion cathodique). À l'inverse, si le potentiel appliqué à l'aluminium est plus positif que celui mesuré dans l'état de quasi-équilibre (polarisation anodique), alors la corrosion de l'aluminium sera accélérée. Le tracé d'une courbe de polarisation consiste à enregistrer les courbes cathodique et anodique d'un métal immergé dans une solution donnée.

Dans le cadre de mesures de corrosion galvanique, le tracé des courbes de polarisation individuelle de deux métaux appelés à être mis en contact permet de déduire aisément la valeur du courant de corrosion qui se développera lorsqu'ils seront couplés et immergés dans l'environnement de corrosion. À titre d'exemple, la **Figure 22** présente les courbes de polarisation enregistrées séparément pour le fer et l'aluminium. Lorsque ces métaux seront couplés, dû à leur position dans la série galvanique (**Figure 4**), le fer agira comme cathode et l'aluminium comme anode. Afin de connaître le courant de corrosion galvanique qui se développera entre les deux métaux, il s'agit alors de superposer sur le même graphique les courbes de polarisation de l'aluminium et du fer. Tel que montré à la **Figure 22**, le point d'intersection de la branche cathodique du fer (puisqu'il agira comme cathode lors du couplage) et de la branche anodique de l'aluminium (puisqu'il sera l'anode qui corrodera) indique directement la valeur du courant de corrosion galvanique qui sera développé suite au couplage des deux métaux ($i_{mesuré}$).

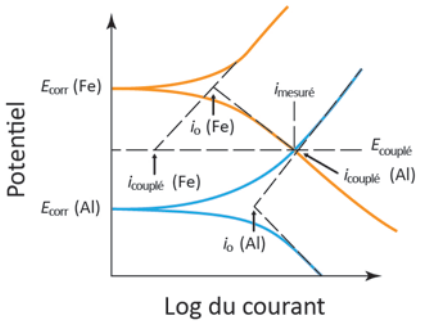


Figure 22. Prédiction du potentiel et du courant de corrosion galvanique à partir des courbes de polarisation individuelles de l'aluminium et du fer qui seront mis en contact.
Adapté de *ASM Handbook*, (2003, Vol. 13A)

Cette technique présente aussi l'avantage majeur de permettre la prédiction de la forme de corrosion qui se manifestera lors du couplage galvanique. Par exemple, si la rencontre des courbes anodiques et cathodiques des métaux se produit à un potentiel auquel a lieu la piqûration de l'aluminium, alors l'aluminium piqûrera suite au couplage.

5.1.2. Courant de corrosion galvanique

Tel que spécifié précédemment, les tables de séries galvaniques ne permettent pas de prédire l'intensité du couplage galvanique entre deux métaux. Toutefois, en laboratoire, des mesures expérimentales permettent de déterminer directement la valeur du courant de corrosion qui se développe entre deux métaux lorsqu'ils sont mis en contact électrique et électrolytique. Aussi, ces mesures permettent de quantifier l'effet de la composition, du pH et de la température du milieu de corrosion.

La **Figure 23** présente le dispositif électrochimique utilisé pour mesurer le courant galvanique qui se développe entre deux métaux. À chacune des deux extrémités de la cellule est placé un des métaux. Dans le cas présent, l'aluminium est utilisé à l'une des extrémités et l'acier inoxydable (SS) à l'autre extrémité. Une électrode de référence (Ag/AgCl) est utilisée afin de mesurer le potentiel des deux électrodes de travail. Il existe aussi sur le marché d'autres géométries de cellules électrochimiques qui permettent d'évaluer de nombreuses formes de pièces.

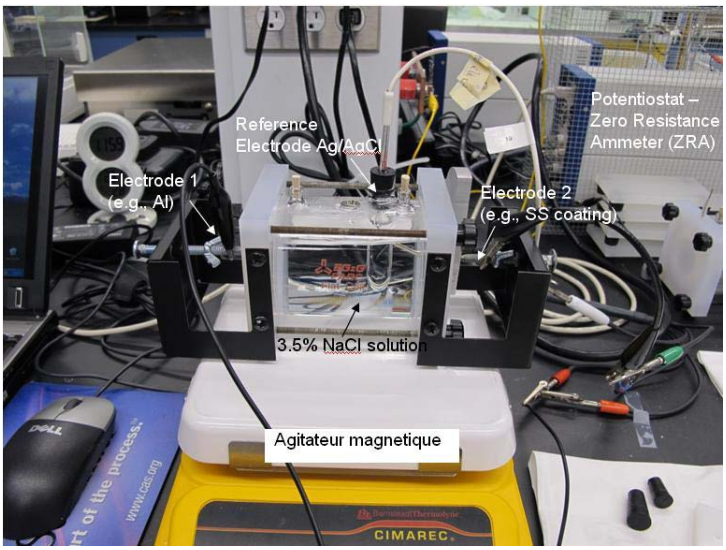


Figure 23. Cellule électrochimique utilisée pour mesurer le courant de corrosion galvanique développé par deux métaux dissimilaires mis en contact électrique et électrolytique.

Source : Centre des technologies de l'aluminium du CNRC

En utilisant un potentiostat doté d'un ZRA (*zero-resistance ammeter*), il est possible de mesurer directement le courant de corrosion galvanique qui circule entre les deux métaux sans qu'il soit perturbé par une tension externe.

Ce type de mesure peut être réalisé de façon normalisée en se conformant à la norme *ASTM G71 – Conducting and evaluating galvanic corrosion tests in electrolytes*.

Un résultat typique obtenu par de telles mesures est présenté à la **Figure 24**. Cette figure démontre que les mesures de corrosion galvanique réalisées à l'aide d'un ZRA donnent directement la valeur du courant de corrosion qui se développe entre deux métaux dissimilaires. Dans le cas présenté, il est clair que le couplage galvanique entre l'aluminium et le plomb conduira à une dégradation plus rapide de l'aluminium que le couplage de ce dernier avec l'acier inoxydable. Néanmoins, dans les deux cas, les valeurs de courant galvanique enregistrées peuvent être considérées élevées. Il serait donc important d'isoler électriquement les métaux l'un de l'autre avant de les assembler.

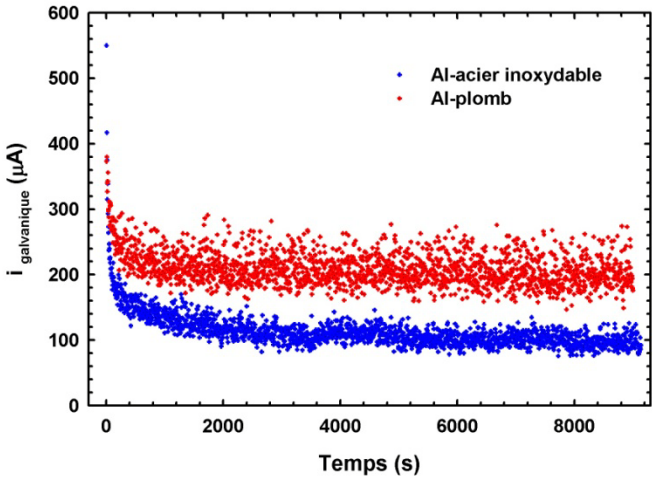


Figure 24. Courant de corrosion galvanique mesuré entre l'aluminium et l'acier inoxydable, et entre l'aluminium et le plomb

(N.B. Les oscillations de courant observées sont attribuables à l'agitation non uniforme du milieu de corrosion).

Source : Rapport interne, Centre des technologies de l'aluminium du CNRC

5.1.3. Mesure de la perméabilité de revêtements

Dans le cadre de l'application d'un revêtement isolant visant à contrer les phénomènes de corrosion galvanique, le maintien de la perméabilité du revêtement est d'une importance primordiale. En effet, si le milieu aqueux conducteur réussit à pénétrer aisément à travers le revêtement, ce dernier perdra ses propriétés isolantes et, par le fait même, sa capacité à isoler électriquement les métaux l'un de l'autre.

La perméabilité de revêtement isolant peut être évaluée à partir de mesures d'impédance électrochimiques. En effet, des mesures de perméabilité de peintures à partir de la spectroscopie d'impédance électrochimique permettent de déterminer si les solutions de recouvrement des métaux assurent une protection efficace. Ces mesures peuvent aussi être réalisées sur des pièces fraîchement peintes, ou après que ces dernières aient été exposées à un milieu agressif mettant à l'épreuve leurs propriétés barrières.

Cette approche est particulièrement efficace pour effectuer une première sélection de revêtements sur la base : de leur résistance au passage du courant dans leurs états non dégradés et de leur capacité à conserver leur perméabilité en fonction du temps de contact avec un milieu aqueux.

La **Figure 25** présente le montage simple utilisé pour réaliser des mesures de spectroscopie d'impédance électrochimique à partir de plaques d'aluminium sur lesquelles un revêtement a été déposé. Dans ce cas, une petite cellule électrochimique est installée sur la plaque d'aluminium à caractériser. La solution corrosive est ajoutée dans la cellule (ex. : 3.5 % NaCl) et le spectre d'impédance est enregistré en fonction du temps de contact entre la solution et le matériau évalué (quelques heures à quelques jours).

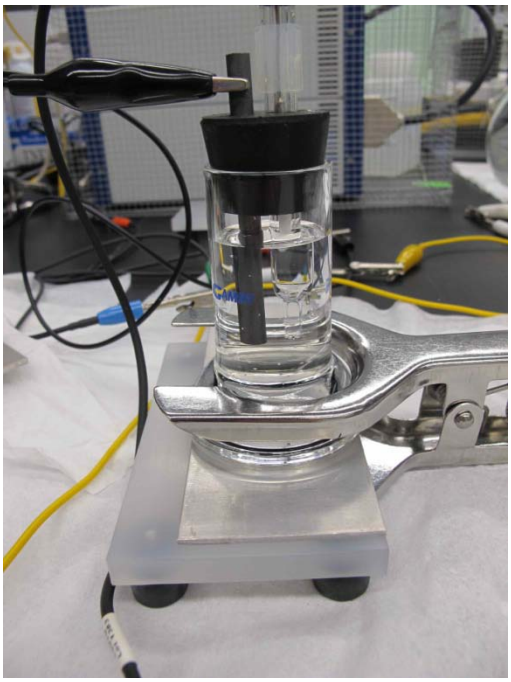


Figure 25. Cellules électrochimiques installées sur un alliage d'aluminium revêtu et qui permettent d'évaluer la résistance à la corrosion du matériau en fonction du temps d'exposition à la solution.
Source : Centre des technologies de l'aluminium du CNRC

Suite à l'acquisition du spectre d'impédance électrochimique, une étape de modélisation permet d'assigner un circuit électrique équivalent à la structure de la surface du matériau étudié. La **Figure 26** présente un exemple typique d'un revêtement isolant présentant des pores qui favorisent le passage du courant entre la solution et le matériau de base [74].

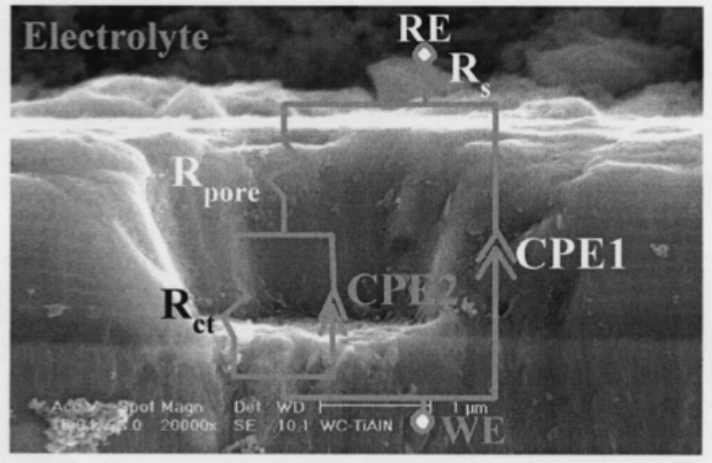


Figure 26. Représentation du circuit électrique équivalent utilisé pour modéliser une courbe d'impédance électrochimique enregistrée pour un matériau revêtu d'un revêtement poreux immergé dans un électrolyte (WE : matériau ; R_x : phénomènes résistifs ; CPE_y : phénomènes capacitifs).
Source : *Surf. Coat. Technol.* 163-164, 611-619.

5.2. Étude du comportement en corrosion galvanique des assemblages à l'aide d'une chambre environnementale

Une chambre environnementale permet de simuler, en accéléré, certaines conditions rencontrées dans les environnements réels. De façon générale, les essais utilisés pour mesurer l'efficacité de solutions de protection contre la corrosion galvanique sont plus sévères que les conditions rencontrées dans les situations réelles.

5.2.1. Essais de brouillard salin

Les essais de brouillard salin sont généralement réalisés en accord avec la norme *ASTM B117 – Operating salt spray (fog) apparatus* qui demande que les échantillons soient soumis en continu à un brouillard produit à partir d'une solution 5 % NaCl dans une enceinte climatique à 35°C. La durée typique d'un tel essai est de 1000, 2000 ou 3000 heures. La norme *ASTM G85 – Modified salt spray (fog) testing* permet certaines variantes dans la composition de la solution utilisée pour produire le brouillard salin, tout comme le permet la norme *ISO 9227 – Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests.*

Les essais de brouillard salin, bien qu'ils accélèrent l'apparition de la corrosion, ne sont toutefois pas représentatifs des conditions dans lesquelles circulent les véhicules terrestres. En effet, rares sont les situations lors desquelles un véhicule est soumis sans arrêt à des conditions humides de brouillard salin. Dans la réalité, l'eau saline déposée sur une structure séchera ou sera lavée par une eau dont le contenu en sel est moindre.

Dans l'éventualité où le sel aura séché à la surface du métal, il pourrait par la suite être lentement réhydraté, par exemple lors d'un soir de rosée ou tout simplement puisque l'humidité de l'air ambiant ce sera mise à augmenter.

Ainsi, les véhicules mis en contact avec une eau salée sont plus appelés à être soumis à des cycles brouillard ou immersion – séchage – humidification, qu'à des cycles continus d'un brouillard salin.

5.2.2. Essais de corrosion cyclique

Les essais de corrosion cycliques sont plus complexes à opérer, mais sont davantage près des conditions réelles de mise en service des assemblages évalués que les essais de brouillards salins. De nombreuses normes décrivent des essais cycliques pertinents pour le domaine des transports, dont :

GM9540P – Accelerated corrosion test.
ASTM G44 – Exposure of metals and alloys by alternate immersion in neutral sodium chloride solution.
ISO 14993 – Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, « dry » and « wet » conditions.
ISO 11130 – Corrosion of metals and alloys – Alternate immersion test in salt solution.
SAE J2334 – Laboratory cyclic corrosion test.

La **Figure 27** présente une chambre environnementale typique qui permet de conduire les essais de corrosion cyclique mentionnés ci-dessus. Tous ces essais cycliques sont pertinents pour évaluer l'intensité de la corrosion galvanique qui peut se produire lorsque deux métaux dissimilaires sont couplés. À l'heure actuelle, d'après les références consultées, celui le plus utilisé par l'industrie du transport est le test *GM9540P*, développé par les ingénieurs de *General Motors*. Voici la description de cet essai, telle que retrouvée dans la norme : « Cette procédure décrit une méthode de laboratoire qui permet d'évaluer en accéléré le comportement en corrosion d'assemblages de même que de composantes. La procédure fournit une combinaison de conditions cycliques (solution saline, différentes températures, différents niveaux d'humidité) qui permettent d'accélérer la corrosion des métaux. La procédure permet d'évaluer une large variété de formes de corrosion, dont la corrosion généralisée, galvanique, par crevasses, etc. La durée du test peut être ajustée afin d'obtenir le niveau de corrosion souhaité ». La norme *GM9540P* permet aussi d'intégrer aux essais plusieurs variantes qui permettent d'évaluer, en parallèle, l'effet d'huiles, de matières abrasives, de pluies acides, etc. Voici en résumé les étapes suivies lors de la réalisation d'un essai normalisé typique selon la norme *GM9540P* :

1. Vaporisation sur les échantillons, à 4 reprises et à intervalles réguliers, d'une solution saline (0.9 % NaCl + 0.1 % $CaCl_2$ + 0.25 % $NaHCO_3$) (durée : 8 heures) ;
2. Exposition des échantillons à un environnement 49±2 °C et 100 % RH (durée : 8 heures) ;
3. Séchage à 60±2°C et < 30%RH (durée : 8 heures).

Avant de réaliser un essai cyclique, il est recommandé de consulter les différentes normes disponibles afin de sélectionner celle qui correspond le plus aux besoins identifiés. Par exemple, la norme *SAE J2334 – Cosmetic corrosion lab test cycles* est davantage définie comme étant un essai permettant d'évaluer la performance de revêtements d'un point de vue esthétique. Aussi, certaines normes telles l'*ISO 11130* permettent l'utilisation d'une solution qui simule l'effet des sels de déglaçage (solution composée de Na_2SO_4 – Na_2SO_3 – $Na_2S_2O_3$ – NaCl – $CaCl_2$) ou de l'eau de mer.

Figure 27. Chambre environnementale permettant d'exposer des échantillons et assemblages à des procédures de corrosion cyclique
(à droite : la chambre; à gauche : le bassin contenant la solution pouvant être transférée vers la chambre).
Source : Centre des technologies de l'aluminium du CNRC

La **Figure 28** montre des échantillons disposés dans la partie inférieure de la chambre environnementale durant l'étape d'immersion d'un essai cyclique (norme de *Ford*). Suite au retrait de la solution après 15 minutes d'immersion, les échantillons étaient séchés et par la suite exposés à des conditions de haute température et haute humidité. En réalisant à répétition et automatiquement ces étapes dans une chambre environnementale programmable lors d'un essai cyclique, des résultats très pertinents sont obtenus, et ce, tout en requérant un minimum d'efforts de la part du personnel technique.

Figure 28. Échantillons disposés dans la chambre environnementale et immergés durant une des étapes d'un essai de corrosion cyclique.
Source : Centre des technologies de l'aluminium du CNRC

5.2.3. Résultats d'essais typiques tirés de la littérature

La **Figure 29** présente un exemple typique d'essai de corrosion galvanique réalisé en laboratoire à partir de la norme *GM9540P* (40 cycles de 24 heures). Dans ce cas, l'effet de protection contre la corrosion galvanique de revêtements appliqués sur un alliage de magnésium, en contact avec des rondelles en aluminium, a été évalué. La **Figure 29a** montre que le revêtement obtenu par anodisation du magnésium ne protège pas l'alliage de magnésium de la corrosion galvanique lorsqu'il est mis en contact avec des rondelles d'aluminium. Toutefois, tel que présenté à la **Figure 29b**, l'application d'un revêtement à base d'époxy sur l'alliage de magnésium le protège très efficacement de la corrosion galvanique.

a)

b)

Figure 29. Photographies de plaques d'un alliage de magnésium suite à un essai de corrosion galvanique suivant la norme *GM9540P*. Rondelles d'aluminium apposées sur une plaque de magnésium recouverte (a) d'un oxyde obtenu par anodisation; (b) d'une peinture époxy.
Source : *SAE Technical Paper 2005-01-0732* W. Zheng et al.

Suite aux étapes de sélection des matériaux et du design des assemblages, l'efficacité de méthodes de protection contre la corrosion galvanique doit être obligatoirement évaluée en laboratoire. Cette étape est nécessaire et permet de valider l'efficacité des paramètres d'assemblage établis en fonction des critères de performance recherchés et des limitations techniques dictées par l'environnement de production. Les résultats obtenus permettent d'appuyer l'ingénieur dans ses prises de décisions.

6. *Conclusion*

Même si les assemblages aluminium-acier sont, par la nature électrochimique des deux matériaux, susceptibles à la corrosion galvanique, le concepteur œuvrant dans l'industrie du transport, notamment la fabrication des autocars, dispose d'une grande panoplie de moyens pour prévenir cette forme de corrosion. Afin de faire un bon choix parmi toutes les méthodes de protection mises à sa disponibilité, le concepteur doit d'abord définir les différentes considérations relatives à la protection requise : design des assemblages, choix des matériaux, conditions de service, etc. Il doit également posséder une bonne connaissance des produits de protection contre la corrosion galvanique disponibles sur le marché, s'être informé des produits qui ont fait leurs preuves dans ce domaine et être en mesure de planifier des activités de validation dans un contexte de contrôle de la qualité.

À l'origine de la démarche décrite ci-dessus, il importe que les concepteurs ainsi que les décideurs sachent que l'application de méthodes efficaces de lutte contre la corrosion galvanique des assemblages aluminium-acier permettra d'intégrer davantage de structures en aluminium, avec tous les avantages qui s'y rattachent (allègement des autocars et réduction de la consommation en carburants ainsi que des émissions des gaz à effet de serre.).

Un document publié en 1993 par le centre de recherche principal d'*Alcoa, Alcoa Technical Center,* mentionne que bien que l'assemblage de l'acier et de l'aluminium dans un environnement corrosif donne lieu à la corrosion galvanique de l'aluminium, ces deux métaux ont été et sont utilisés ensemble avec succès en raison des précautions prises par les manufacturiers pour éliminer ou minimiser les effets de la corrosion galvanique. À preuve, on compte des dizaines de milliers de remorques, citernes, camions et autobus utilisant l'aluminium en usage quotidien. Il en est de même pour chaque automobile qui possède des composantes d'aluminium assemblées à de l'acier à divers endroits du véhicule [52]. Lorsque les activités relatives à la prévention de la corrosion galvanique, et de ses autres formes sont réalisées selon les règles de l'art, il s'ensuit généralement une augmentation de la longévité du produit dans son ensemble.

Un exemple réel qui illustre bien cette constatation provient des autobus d'aluminium fabriqués par *Volvo* et livrés entre 1984 et 1986 à *New Jersey Transit* que l'on aperçoit sur la **Figure 30**. En octobre 2002, ces autobus étaient toujours en service après 17 ans d'utilisation. Une excellente résistance à la corrosion a été constatée bien que ces autobus ont dû être mis au rancart… en raison de problèmes mécaniques [75].

Figure 30. Autobus d'aluminium Volvo, après dix-sept années d'utilisation
Source : *Corrosion prevention of aluminum components on mixed metal vehicles* (2004, p. 19)

7. Bibliographie

1. AA, *Aluminum Statistical Review for 2008*, T.A. Association, Editor. 2009: Arlington. p. 22 p.
2. EAA, *Aluminium in trucks, trailers & buses*. 2006, EAA.
3. AA, *Aluminum's Role in Meeting Future Heavy Truck Fuel Economy Standards*. 2010. p. 22 p.
4. SUMME, T., *The Aluminum Advantage: Commercial Vehicle Applications*. 2009, Automotive Aluminum. p. 27 p.
5. Balboa, J. *Low-emissions buses readied for Moscow and St.Petersburg*. 2010 [cited 2010 November 30]; Available from: http://www.ecoseed.org/en/green-transportation/alternative-transport/article/71-alternative-transport/7043-low-emissions-buses-readied-for-moscow-and-st-petersburg.
6. *164 New Buses for Moscow and St.Petersburg to be Built with Alcan Engineered Products Aluminium Lightweight EcoRange Technology*. 2010, PRNewswire. p. 1 p.
7. ALCAN, *EcoRange: Introduction to the Alcan Bus System*. 2009: Zurich. p. 26 p. .
8. BATAILLE, A. *Le bus londonien tire sa révérence*. 2005 [cited 2010 December 16]; Available from: http://www.caradisiac.com/Le-bus-Londonien-tire-sa-reverence-8274.htm.
9. Busworld. *Eighty years of Mauri Bus bodies*. 2010 [cited 2010 December 1]; Available from: http://www.busworld.org/news/article/876#start.
10. ADL. *Welcome to Alexander Dennis*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.alexander-dennis.com/index.php?s=1.
11. CeatanoBus. *CeatanoBus*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.caetanobus.pt/.
12. Caio. *Caio Induscar*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.caio.com.br/index.php?lg=I.
13. CaioNA. *Caio - North America*. 2009 [cited 2010 December 21]; Available from: http://caio-na.com/.
14. CollinsBusCorporation. *Collins Bus Corporation* [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.collinsbus.com/index.html.
15. Contrac. *Contrac Cobus Industries*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.contrac-cobus.de/2-3-contrac.html.
16. DesignLine. *DesignLine Global Gateway*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.designlinecorporation.com/.
17. ElDorado. *ElDorado National*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.enconline.com/.
18. Elkhart. *Transit and Shuttle Buses by Elkhart*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.elkhartcoach.com/default.asp.
19. Gemilang. *Welcome to Gemilang Coachwork*. 2009 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.gml.com.my/index.aspx.
20. Gillig. *Gillig Corporation*. 2001 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.gillig.com/New%20GILLIG%20WEB/default.htm.
21. Girardin. *Index*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.girardin.com/index.html.
22. Marcopolo. *Marcopolo*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.marcopolo.com.br/website/marcopolo_en/content/marcopolo/home/.
23. Mauri. *Mauri Bus Systems*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.mauri-bus.it/english/history.htm.
24. MotorCoach. *New and Pre-owned Coach*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.mcicoach.com/index.htm.
25. NABI. *Welcome to North American Bus Industries*. [cited 2010; December 21]. Available from: http://www.nabusind.com/index.asp.
26. Optare. *Optare*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.optare.com/og_introduction.htm.
27. Daimler. *Orion International*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.orionbus.com/orion/0-867-557917-1-580186-1-0-0-0-0-1-10595-557917-0-0-0-0-0-0-0.html.
28. Overland. *Overland Custom Coach (2007)*. 2008 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.overlandcustomcoach.com/Home/24/0.
29. PLaxton. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.plaxtonlimited.co.uk/plaxton/index.html.
30. Busworld. *Alcan Supplies Ecorange Bodyparts for Singapore Scanias*. 2009 [cited 2010 December 1]; Available from: http://www.busworld.org/news/article/759#start.
31. Scania. *Scania group*. 2008 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.scania.com/.
32. Setra. *Setra Busse*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.setra.de/#/en/home.

33. Sunlongbus. *Sunlong Bus*. 2009 [cited 2010 december 21]; Available from: http://www.sunlongbus.com/english/index.asp.
34. Sunwinbus. *Sunwin, Volvo*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.sunwinbus.com/index_eng.aspx.
35. SilverEagle. *Silver Eagle Bus Mfg*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.silvereaglebus.com/.
36. Startrans. *Welcome to Startrans Bus*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.startransbus.com/.
37. VanHool. *Home Francais*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.vanhool.be/home%20fr/homefr.html.
38. VDL. *VDL Berkhof Valkenswaard*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.berkhof.nl/UK/profile/index.htm.
39. VDLBova. *VDL BOVA*. 2007 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.vdlbova.nl/index.php.
40. VDLBC. *VDL Bus & Coach*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.vdlbuscoach.com/fr/.
41. NorskHydro. *Bus and coaches - Hydro* 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.hydro.com/en/Subsites/Profiler/Products/Product-applications/Transport/Buses-and-coaches/.
42. Volgabus. *Volgabus*. [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.volgabus.ru/eng/.
43. Volgren. *Volgren, bus manufacture*. [cited 2010 december 21]; Available from: http://www.volgren.com.au/index.php?doc_id=33.
44. VolvoGroup. *Home: Volvo Buses*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.volvobuses.com/bus/global/en-gb/Pages/home_new.aspx.
45. Wright. *The Wright Group*. 2010 [cited 2010 December 21]; Available from: http://www.wrightbus.com/site/default.asp.
46. GALLANT, D. and M.-C. GAGNON, *Description de l'énoncé de travail et des livrables*. 2010. p. 6.
47. OLSEN, A., *Designing Galvanic Corrosion Out of Magnesium Drivetrain Components*, SAE. p. 6.
48. NPL, *Bimetallic Corrosion*. 2000: Teddington. p. 16.
49. ASM, ed. *Corrosion: Materials*. ASM handbook, ed. A. International. Vol. 13B. 2005, ASM International.
50. SASTRI, V.S., E. GHALI, and M. ELBOUJDAINI, *Corrosion prevention and protection: practical solutions*. 2007, Chichester: Wiley.
51. Kruger, J., *Electrochemistry of corrosion*, in *Electrochemistry Encyclopedia*. 2001.
52. MORAN, J.P. and S.C. BYRNE, *Galvanic Corrosion: Its Principles and Guidelines for Prevention (With Emphasis on Automotive Applications)*, Alcoa, Editor. 1993: Alcoa. p. 26.
53. Davis, J.R., ed. *Corrosion - Understanding the basics*. ed. A. International. 2000: Materials Park. 563 p.
54. AA, *Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material*, A. Association, Editor. 2001. p. 24 p.
55. NPL, *Corrosion control checklist*, N.P. Laboratory, Editor. 2003, NPL: Teddington.
56. SHREIR, L.L., R.A. JARMAN, and G.T. BURSTEIN, *Corrosion*, ed. Butterwoth-Heinemann. Vol. 1. 1994.
57. LEONARD, R., *Continuous Hot Dip Coatings*. ASM Handbook, ed. A. International. Vol. 13A. 2003.
58. LANDOLT, D., *Corrosion et chimie de surface des métaux*. 1999: Presses polytechniques et universitaires romandes.
59. BERNDT, M.L. and B. BERNDT, *Thermal Spray Coatings*, in *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, A. International, Editor. 2003, ASM International. p. 803-813.
60. *CVD and PVD Coatings*, in *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, A. International, Editor. 2003, ASM International. p. 759-762.
61. STANSBURY, E.E. and R.A. BUCHANAN, *Fundamentals of electrochemical corrosion*, ed. A. International. 2000, Material Park: ASM International.
62. HAYNES, G. and J. BIJENDRA, *Joining aluminum to steel with transition material*, S.o.A. Engineers, Editor. 1999.
63. OGLE, K. and M. WOLPERS, *Phoshate Conversion Coatings*, in *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, A. International, Editor. 2003, ASM International. p. 712-719.
64. *Prevention of corrosion of motor vehicle body and chassis components*, S.o.A. Engineers, Editor. 1995.
65. TAKAHASHI, H., *Aluminum Anodizing*, in *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, A. International, Editor. 2003, ASM International: Material Park. p. 736-740.
66. BUCHHEIT, R.G. and A.E. HUGHES, *Chromate and Chromate-Free Conversion Coatings*, in *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, A. International, Editor. 2003, ASM International: Material Park. p. 720-730.
67. COURVAL, G.J., J. ALLIN, and D.P. DOYLE, *Galvanic Corrosion prevention of steel-aluminum couples*, SAE, Editor. 1993.
68. MUNGER, C.G., *Corrosion prevention by protective coating*. 1999: National Association of Corrosion Engineers.

69. TATOR, K.B., *Organic Coatings and Linings*, in *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Prevention*, A. International, Editor. 2003, ASM International: Material Park. p. 817-833.
70. SENKOWSKI, E.B. and K.B. TATOR, *Rubber Coatings and Linings*, in *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. 2003, ASM International: Material Park. p. 845-850.
71. *Direct Calculation of economic appraisals of corrosion control measures*, NACE, Editor. 1972.
72. BREVOORT, G.H. and A.H. ROEBUCK, *The simplified cost calculations and comparisons of paint and protective coating systems, Expanded life and economic justification*, NACE, Editor. 1979.
73. GHALI, E., *Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing*. Wiley series in corrosion, ed. Wiley. 2010, Hoboken, N.J. 719 p.
74. AHN, S.H., et al., *Surface Coating Technologies*. 2003. p. 611-619.
75. COURVAL, G., *Corrosion prevention of aluminum components on mixed metal vehicles*. 2004. p. 26 p.