Document de support de la présentation :

**Le comportement en corrosion de l’aluminium**

Contenu développé par :

Axel Gambou-Bosca, Ph.D.

# Introduction

Ce document est un complément d’information à la présentation : « Le comportement en corrosion de l’aluminium » d’Alu-Compétences. Des informations seront ainsi fournies pour chaque diapositive de la présentation.

L’aluminium est le second métal utilisé dans le monde après l’acier, avec environ 60 millions de tonnes produites en 2020. Cette production a connu une augmentation constante et soutenue depuis 1950 où elle était d’environ 1 million de tonnes. Le développement de la consommation et des applications de l'aluminium et de ses alliages peut être attribué à plusieurs de ses propriétés qui sont des critères décisifs dans le choix des métaux par les utilisateurs comme la légèreté, la résistance, la conductivité thermique et électrique, et la résistance à la corrosion. Cette dernière propriété, attribuée à la couche hautement protectrice d’oxyde d’aluminium qui se forme au contact du métal avec l’air, est un atout qui explique le développement de l’utilisation de l’aluminium dans plusieurs domaines comme le transport, le bâtiment, les structures et l’emballage.

Ce module de formation est fourni dans le cadre du projet Alu-Compétences d’AluQuébec, la grappe aluminium du Québec, et ses partenaires. Le projet Alu Compétences vise à produire et à diffuser des contenus techniques et scientifiques pour l’enseignement de l’aluminium aux niveaux collégial et universitaire, notamment pour les programmes de design industriel, d’architecture et de métallurgie ainsi que pour les facultés de génie civil, mécanique et aérospatial. Alu-Compétences souhaite enrichir la formation des futurs professionnels sur les notions entourant l’aluminium. Il vise également à encourager les institutions d’enseignement à utiliser leur capacité d’adaptation des programmes de formation pour mieux répondre aux besoins des entreprises de l’industrie de l’aluminium en assurant un bassin de main-d’œuvre qualifiée.

Ce module de formation et la présentation qui lui est associée ont été préparés pour Alu Compétences par le Centre de Métallurgie du Québec. Depuis 1986, l’équipe du CMQ supporte par ses travaux les initiatives de R&D des entreprises québécoises et anime le secteur de la métallurgie par des formations sur mesure ou la tenue d’évènements avec divers partenaires.

Les partenaires du projet Alu-Compétences vous souhaitent bonne lecture.

# Diapositive 6

Même s'il est largement répandu dans la croûte terrestre, l'aluminium n'est devenu un métal industriel qu’à la fin du XIXe siècle. Ceci est attribué au fait que l’oxyde d’aluminium ou l'alumine est l'un des oxydes les plus stables, ce qui rend sa réduction impossible par pyrométallurgie (opérations effectuées à haute température et utilisées pour la transformation du minerai de fer et l’élaboration de l’acier) ou par électrolyse en milieu aqueux à basse température (utilisée pour l’élaboration du cuivre, le zinc ou le nickel par exemple). En effet, entre 1809 et 1857, des procédés d’élaboration de l’aluminium par électrolyse en sels fondus (donc à haute température) ont été développés permettant la production de quantités allant de quelques grammes à plusieurs kilogrammes.

La production de l’aluminium à une échelle industrielle a pris son essor à partir de 1886, date de la découverte simultanée par Hall (ÉU) et Héroult (France) de l’électrolyse de l’alumine dans un bain à base de cryolite (AlF6Na3) portée à une température située entre 940 et 960 °C. L’extraction de l’alumine à partir de la bauxite (un mélange d’alumine, d’oxyde de fer et d’autres oxydes) grâce au procédé développé par Bayer en 1887 a permis le démarrage de la production de l’aluminium à une échelle industrielle. En 1900, la production mondiale de l’aluminium avoisinait 6000 tonnes, avant de passer à 1 million de tonnes en 1945 dopée par la demande pour l’aluminium pour les besoins de l’aviation militaire lors de la Deuxième Guerre mondiale. En 2000, la production mondiale de l’aluminium était de l’ordre de 25 millions de tonnes avant d’atteindre les 60 millions de tonnes en 2020 sous l’effet de la forte croissance de la production chinoise (35 millions de tonnes).

# Diapositive 7

L’aluminium offre plusieurs avantages qui expliquent l’augmentation fulgurante de sa production et de son utilisation pour plusieurs applications dans des domaines variés comme le transport, le bâtiment, l’industrie électrique, les structures et l’emballage. Ci-après une brève présentation de ces avantages :

* La disponibilité : l’aluminium est l’élément métallique le plus abondant dans la croûte terrestre (8%) après le silicium (28%). Aussi, les gisements de bauxite (principale source de l’oxyde d’aluminium) se retrouvent généralement près de la surface.
* La légèreté : la densité de l’aluminium est d’environ 35% celle de l’acier et de 30% celle du cuivre.
* La conductivité thermique : l’aluminium est un excellent conducteur de la chaleur (50 à 60 % celle du cuivre) ce qui explique son utilisation étendue dans la fabrication des échangeurs de chaleurs.
* La conductivité électrique : la conductivité électrique de l’aluminium est de 62% celle du cuivre. En considérant des poids similaires, l’aluminium conduit deux fois plus d’électricité comparé au cuivre.
* Adapté pour le traitement de surface : l’aluminium répond à une grande variété de traitements de surface incluant l’anodisation et les traitements de conversion chimiques, ce qui permet de lui procurer de nouveaux avantages (résistance améliorée à la corrosion, à l’abrasion, aspect esthétique, etc.).
* La diversité des alliages d’aluminium : avec deux grandes catégories (alliages de corroyage et de moulage) et huit séries pour chaque catégorie, les alliages d'aluminium sont très nombreux et offrent une large gamme de compositions, de propriétés et d'utilisations. Les progrès continus de la métallurgie l'aluminium a permis d'obtenir des alliages de plus en plus performants adaptés à tous les types d’applications et de techniques de mise en œuvre.
* La facilité de mise en œuvre et la diversité des produits semi-finis : les alliages d’aluminium se prêtent très bien à tous les procédés conventionnels de mise en forme (moulage, laminage, extrusion, forgeage, etc.) ainsi qu’aux procédés d’assemblage (soudage, brasage, collage, boulonnage, rivetage, etc.).
* Le recyclage : la refusion de l'aluminium ne nécessite que 5 % de l'énergie nécessaire pour extraire le métal à partir de son minerai. Aussi, les rebuts d’aluminium ont une valeur marchande supérieure à celle de la ferraille.
* La résistance à la corrosion : l'aluminium et ses alliages des séries 1xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx et 8xxx (voir diapositives 8 et 9) ont une excellente résistance naturelle à la corrosion atmosphérique en milieu marin, urbain et industriel, en plus d’une grande gamme de produits chimiques. Grâce à cette bonne résistance à la corrosion, les coûts de maintenance des structures en aluminium sont généralement inférieurs à ceux des structures en acier.

La photo à droite montre les composantes en aluminium entrant dans la fabrication de l’Audi A8. D’ailleurs, la tendance vers l’électrification des transports laisse présager une augmentation de la consommation de l’aluminium sous la forme de composantes à haute valeur ajoutée (produits laminés, extrudés, moulés sous pression, etc.). Selon une étude menée par la firme de veille économique CRU Group, l'utilisation de l'aluminium augmentera de 15 à 27% dans les véhicules électriques, par rapport au contenu actuel moyen des véhicules à essence. D’un autre côté, les véhicules électriques hybrides rechargeables utiliseront de 25 à 27% plus d'aluminium que les voitures à essence actuelles. Sur la base de ces estimations, CRU Group prévoit que la demande d'aluminium des véhicules électriques et hybrides sera multipliée par dix pour atteindre près de 10 millions de tonnes d'ici 2030.

# Diapositive 8

Comme mentionné précédemment, il existe deux grandes catégories dans les alliages d’aluminium, soient les alliages de corroyage et les alliages de moulage. Cette diapositive montre que les alliages de corroyage de l’aluminium sont essentiellement classés suivant 8 séries en fonction des principaux éléments d’alliages ajoutés à l’aluminium. Le corroyage pour la majorité des alliages consiste en la transformation de l’alliage par des techniques de [laminage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Laminage), [filage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Filage_%28m%C3%A9tallurgie%29), [matriçage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Matri%C3%A7age_%28m%C3%A9tallurgie%29), [forge](https://fr.wikipedia.org/wiki/Forge_%28m%C3%A9tallurgie%29), etc. Avant de présenter brièvement ces 8 séries (la série 9xxx concerne des alliages non utilisés et réservés pour des applications futures), il importe de mentionner que les alliages de corroyage sont obtenus par déformation plastique (à chaud ou à froid) des lingots issus de la première fusion. Les procédés de déformation plastique utilisés sont le laminage, l’extrusion, le tréfilage ou le forgeage. Les produits obtenus à partir des alliages de corroyage sont considérés comme des produits semi-finis. Ci-après un bref aperçu des 8 séries des alliages d’aluminium de corroyage :

* Série 1xxx : aluminium non allié (> 99 %) utilisé essentiellement dans l’industrie électrique. Le fer et le silicium sont les deux principales impuretés de l'aluminium non allié de la série 1xxx.
* Série 2xxx : alliages où le cuivre est le principal élément d’addition. Ces alliages sont utilisés principalement en aéronautique grâce à leur résistance mécanique élevée de l’ordre de 600 MPa. Par contre, l’ajout du cuivre entraîne une diminution de la résistance à la corrosion de ces alliages et rend le soudage difficile.
* Série 3xxx : alliages où le manganèse est le principal élément d’addition. Ces alliages ont une résistance supérieure à celle de l'aluminium non allié tout en conservant une bonne formabilité et une bonne résistance à la corrosion. Ces alliages ne peuvent pas être traités thermiquement et conviennent à l'anodisation et au soudage. Anodisation - voir diapositives 52 et 53.
* Série 4xxx : alliages où le silicium est le principal élément d’addition. Utilisés principalement comme métal d’apport pour le soudage et le brasage (sous forme de fils et de feuilles).
* Série 5xxx : alliages où le magnésium est le principal élément d’addition. Ces alliages sont facilement soudables et utilisés dans une grande variété d'applications, y compris les réservoirs pressurisés, les bâtiments et l'automobile. Ils sont utilisés également dans la fabrication des bateaux grâce à leur résistance à l’exposition aux atmosphères marines.
* Série 6xxx : alliages où le magnésium et le silicium constituent les principaux éléments d’addition. Utilisés communément pour la fabrication d’extrusions structurelles et architecturales.
* Série 7xxx : alliages où le zinc est le principal élément d’addition, même si d’autres éléments comme le cuivre, magnésium, chrome, ou le zirconium peuvent être spécifiés. Utilisé dans des pièces structurales en aéronautique et ouvrages d’art grâce à leur résistance mécanique élevée (jusqu’à 700 MPa).
* Série 8xxx : alliages avec étain et parfois du lithium. Destinés pour des applications de niche ou applications spéciales (cas de l’alliage 8017 utilisé pour des applications de conductivité électrique)

# Diapositive 9

Les alliages de fonderie sont obtenus en fondant les lingots (de première ou de deuxième fusion) et en les coulant dans des moules ayant les formes du produit final. Les alliages de fonderie sont désignés par un système à trois chiffres, suivis par une décimale qui indique la forme du produit : 0 pour une pièce coulée, 1 pour un lingot avant coulée et 2 pour un lingot avant coulée qui a une composition chimique équivalente à ce qu’on a pour un produit .1, mais avec des limites plus précises sur les quantités. Ci-après un bref aperçu des 8 séries des alliages d’aluminium de fonderie :

* 1xx.x : aluminium non allié (> 99 %) utilisé essentiellement pour la fabrication des rotors.
* 2xx.x : alliages où le cuivre est le principal élément d’addition, mais d’autres éléments peuvent être spécifiés. Leur résistance à la corrosion est faible, et ils ne doivent pas être exposés aux conditions extérieures ou à tout autre milieu agressif.
* 3xxx.x : alliages où le cuivre est le principal élément d’addition, mais d’autres éléments comme le cuivre et magnésium peuvent être spécifiés. Ces alliages sont les plus utilisés parmi tous les alliages de fonderie de l’aluminium (90%), essentiellement pour des applications automobiles.
* 4xx.x : alliages où le silicium est le principal élément d’addition. Ces alliages se moulent facilement et possèdent une bonne résistance à la corrosion atmosphérique.
* 5xx.x : alliages où le magnésium est le principal élément d’addition. À cause de leur forte teneur en magnésium, ces alliages sont assez difficiles à couler. Leur résistance à la corrosion atmosphérique est excellente, notamment en milieu marin. Ils sont donc utilisés pour la fabrication d'éléments d'accastillage (Ensemble des aménagements et appareils utilisés sur les superstructures des bateaux).
* 6xx.x : non utilisés
* 7xx.x : alliages où le zinc est le principal élément d’addition, même si d’autres éléments peuvent être spécifiés. Ces alliages sont généralement difficiles à couler et leur résistance à la corrosion est moyenne.
* 8xxx.x : alliages où l’étain est le principal élément d’addition. La principale application de ces alliages est les roulements (bearing) à cause de l’excellente lubrification induite par l’étain.

# Diapositive 10

Les alliages d’aluminium de corroyage peuvent acquérir des caractéristiques de résistance mécanique améliorées grâce à des traitements thermiques de durcissement structural, ou des traitements mécaniques d’écrouissage. L’écrouissage est l’augmentation de dureté et de résistance produites par une déformation plastique du matériau effectuée au-dessous de la température de recristallisation.

Les traitements thermiques de durcissement structural sont désignés par la lettre T (suivie d’un ou de deux chiffres) et concernent seulement les séries 2xxx, 6xxx et 7xxx (les seules qui répondent à ce genre de traitement). Les produits corroyés de ces séries vont ainsi subir une mise en solution des éléments d’alliages dans l’aluminium, suivie d’une trempe, puis d’une étape de maintien ou de vieillissement naturel (à la température ambiante) ou artificiel (réalisé à des températures comprises entre 100 et 200 C). Ces étapes de vieillissement peuvent être combinées à un travail à froid pour augmenter la réponse au traitement thermique. Les traitements thermiques de durcissement structural visent à provoquer la précipitation de composés intermétalliques durcissant comme le Al2Cu ou Al2CuMg pour les alliages de la série 2xxx, Mg2Si pour les alliages de la série 6xxx, et MgZn2 ou Mg(ZnAlCu)2 pour les alliages de la série 7xxx. Ces traitements thermiques permettent d’atteindre des propriétés mécaniques stables au terme de quelques semaines.

Les traitements mécaniques d’écrouissage sont désignés par la lettre H (suivie de deux chiffres ou plus). L’étape d’écrouissage peut être suivie, ou non (État H1X), d’un recuit partiel (État H2X) ou un traitement de stabilisation (État H3X). Le second chiffre (X), généralement 2, 4, 6 ou 8 correspond au degré final d’écrouissage qui est caractérisé par une valeur minimale de résistance à la traction. Pour fixer les idées, il faut noter que l’état HX8 qui correspond à un taux d’écrouissage de 75% est considéré, par convention, comme étant l’état de référence ou l’état « 100% dur », et que l’état recuit correspond à l’état « 0% dur ». Ainsi, l’état HX4 correspond à 4/8 de l’état ‘dur’ ou « 50% dur », c’est-à-dire à une résistance à la traction (Rm) située à mi-chemin entre la résistance à la traction à l’état « 100% dur » (HX8) et celle à l’état recuit.

Pour les alliages de fonderie, seuls les traitements thermiques T4, T6 et T7 peuvent être appliqués pour produire un durcissement structural des pièces moulées. Les alliages de fonderie durcissables par traitements thermiques sont ceux des séries 2xx.x, 3xx.x, 5xx.x et 7xx.x. Les mécanismes de durcissement sous-jacents sont les mêmes que ceux induits dans le cas alliages de corroyage, à savoir la précipitation de composés intermétalliques durcissant qui se traduit par une augmentation des propriétés mécaniques.

# Diapositive 11

La diapositive 11 présente un tableau qui résume les applications typiques de certains alliages d’aluminium de corroyage, avec les principaux critères de sélection. Par exemple, les alliages d’aluminium destinés à des applications de construction navale sont ceux de la série 5xxx (5754, 5086 et 5083) et de la série 6xxx (6005A et 6082). Ces alliages ont été sélectionnés sur la base de leur bonne formabilité, soudabilité ainsi que leur bonne résistance à la corrosion.

# Diapositive 13

L’aluminium est un métal naturellement passif. Il doit cette propriété à un film d'oxyde naturel et incolore qui couvre naturellement l’aluminium. Ce film est constitué de deux couches superposées d’une épaisseur totale comprise entre 4 et 10 nm (voir la figure jointe) :

- **la première couche** compacte et amorphe, en contact avec le métal, s'appelle la couche barrière, en raison de ses propriétés diélectriques (ne peut pas conduire le courant électrique). Le l'épaisseur maximale de cette première couche est de l'ordre de 4 nm. Cette couche protectrice et stable se forme à n'importe quelle température dès que le métal liquide ou solide entre en contact avec de l'air. Il importe de noter que la température n'agit que sur l'épaisseur finale de la couche barrière. Cette dernière se forme ainsi très rapidement, en quelques millisecondes. En pratique, cela signifie que le film d'oxyde d’aluminium naturel réapparaîtra immédiatement après des opérations de formage ou d'usinage qui auraient détruit localement la couche d'oxyde naturelle initiale.

- **la deuxième couche** se développe au-dessus de la première, par réaction avec l'environnement extérieur, probablement par hydratation. Cette couche continue à croître en fonction des conditions physico-chimiques environnantes (humidité relative et température) et son épaisseur finale ne sera pas atteinte avant plusieurs semaines, voire des mois. Cette couche supérieure est poreuse et moins compacte que la couche barrière. Elle réagit avec le milieu extérieur, soit lors de la mise en forme (laminage, extrusion) par adsorption de résidus d'huile de laminage ou de lubrifiants de formage, ou en service au contact avec l'humidité contenue dans l'atmosphère ou avec des contaminants. Comme le montre la figure jointe à la diapositive 13, la composition de sa surface peut être très complexe. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de régénérer la surface par décapage, avant que tout traitement de surface ne soit appliqué.

# Diapositive 14

La diapositive 14 présente une liste non exhaustive des milieux agressifs qui peuvent affecter la stabilité de la couche d’oxyde naturelle qui se forme à la surface de l’aluminium. Ces milieux sont variés et se caractérisent souvent par l’action simultanée de plusieurs facteurs environnementaux comme l’eau des pluies ou des condensations, de l’oxygène de l’air, des polluants atmosphériques (oxyde d’azote, dioxyde de soufre, etc.). Des facteurs mécaniques (érosion, projection de particules abrasives, cycles froid-chaud, etc.) peuvent également se superposer aux effets environnementaux et favoriser l’endommagement de la couche naturelle d’oxyde d’aluminium. La figure jointe à la diapositive 14 montre que l’aluminium résiste bien à la corrosion dans une variété d’acides et de bases à des pH compris entre 3 et 9. Cette résistance exceptionnelle est attribuée à la stabilité et la passivité de la couche d’oxyde naturelle. Le pH n’est cependant pas le seul paramètre à prendre en compte pour prédire la stabilité de la couche d’oxyde naturelle en milieux aqueux, et il faut prendre en compte la nature de l’acide ou de la base. La figure de la diapositive 14 montre par exemple qu’à pH égal (disons 2), l’aluminium est fortement attaqué par l’acide chlorhydrique ou phosphorique, alors qu’il demeure passif au contact de l’acide acétique.

# Diapositive 15

La photo à gauche montre la base de l’une des colonnes-support du pont en aluminium d’Arvida lors d’une inspection réalisée en 1984. Cette colonne consiste en une extrusion en alliage d’aluminium 2014 (3,9-5,0% Cu ; 0,2-0,8% Mg ; 0,4-1,2% Mn; 0,5-1,2% Si; 1,0% Fe) qui s’appuie sur une base constituée d’une plaque en acier. Une inspection réalisée en 1984 a montré que cette colonne a subi au niveau de sa base une sévère corrosion par exfoliation. Cette forme de corrosion, qui sera abordée à la diapositive 38, se propage d’une façon sélective suivant les joints de grains allongés parallèles à la direction du laminage ou d’extrusion. Les produits de corrosion volumineux formés entre les grains allongés provoquent le détachement de ces derniers et un gonflement du métal donnant l’aspect spectaculaire de cette forme de corrosion. Cette attaque de corrosion a été attribuée au fait que les trous de drainage à la base de cette colonne ont été obstrués avec le temps par différents types de débris (feuilles, gazon, saletés), ce qui a empêché l’évacuation des eaux de pluie et a créé un milieu agressif constamment humide au niveau de cette zone. Cette humidité a pénétré au niveau du bord découpé de la colonne en 2014 et a initié l’attaque de corrosion par exfoliation.

La figure à droite montre une attaque de corrosion au niveau des trous d’assemblage à l’intérieur d’une aile d’un avion de chasse F/A-18 Hornet. Une analyse approfondie a montré que cette défaillance est attribuée à une attaque par corrosion galvanique causée par l’incompatibilité électrochimique entre l’aluminium qui forme l’aile (série 2xxx) et des manchons en fibres de carbone. Cette attaque de l’aile en aluminium a été favorisée également par l’infiltration d’humidité qui a permis d’établir un pont électrolytique entre les deux matériaux.

# Diapositive 16

Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible qui détruit le matériau ou réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue. Il s’agit d’une définition selon le point de vue de l’ingénieur constructeur. Cette définition souligne que la dégradation résulte d’une réaction chimique, pour faire la différence avec un autre phénomène principalement mécanique, l’usure, qui produit la dégradation de la surface d’un matériau et une perte progressive de matière due au frottement ou à l’impact. Cependant, il est possible de rencontrer des attaques de corrosion qui soient assistées par l’environnement, comme c’est le cas de la corrosion-érosion, la corrosion-frottement ou la corrosion-cavitation.

# Diapositive 17

La diapositive 18 énumère les 4 éléments ou conditions essentielles pour la réaction de corrosion se produise. Ces quatre éléments forment une pile de corrosion. Il en sort que la corrosion des métaux est due à une réaction d’oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l’environnement (l’électrolyte). L’oxydation du métal implique la réduction de l’agent oxydant. Dans la pile de corrosion fer-platine présentée à la diapositive 17, la plaque de fer joue le rôle de l’anode où se produit la réaction d’oxydation du fer en ions Fe2+, et les électrons libérés à l’anode en fer passent par le conducteur extérieur vers la plaque de platine où ils sont consommés par la réaction de réduction des ions H+ et la formation (ou le dégagement) de l’hydrogène gazeux.

# Diapositive 18

La corrosion électrochimique se produit, comme son nom l’indique, par réaction électrochimique, c’est-à-dire une transformation chimique qui implique un transfert de charges à l’interface entre un conducteur électronique, appelé électrode, et un conducteur ionique appelé électrolyte. Par exemple, la corrosion du fer dans l’acide, montrée précédemment à la diapositive 17, est une réaction électrochimique où chaque atome de fer qui passe en solution implique l’échange de deux électrons entre le métal (fer) et ions hydrogène. Elle contient deux réactions d’électrode : L’oxydation du fer et la réduction de l’ion hydrogène. Ces principes restent valables pour la corrosion de l’aluminium. La figure associée à la diapositive 18 montre le cas d’une plaque en aluminium exposé à un milieu alcalin. Les sites anodiques (où se produit l’oxydation de l’aluminium) et cathodiques (où se produit la réduction de l’eau et la formation des ions OH-) ne peuvent pas être clairement distingués ce qui mène à une corrosion générale. Les réactions de corrosion électrochimique de l’aluminium seront abordées en détail dans la diapositive suivante (diapositive 19).

# Diapositive 19

La diapositive 19 présente les réactions fondamentales électrochimiques de la corrosion de l’aluminium en milieu aqueux. Du côté de l’oxydation de l’aluminium, cette réaction entraine la transformation du métal en ion trivalent et la perte de 3 électrons (Réaction anodique). Ces électrons seront captés et permettront la réduction d’un agent oxydant (Réaction cathodique). La diapositive 19 présente quatre réactions cathodiques possibles en fonction du type de l’agent oxydant en présence : soit l’ion H+ seul, l’ion H+ accompagné de l’oxygène, la molécule d’eau seule, ou la molécule d’eau accompagnée de l’oxygène.

Cet échange d’électrons confirme le fait que la réaction de corrosion de l’aluminium en milieu aqueux est une réaction électrochimique.

Les réactions de formation de produits de corrosion, à savoir l’alumine hydratée Al(OH)3 ne sont pas des réactions électrochimiques puisqu’elles n’impliquent pas un échange d’électrons. Cependant, il est important de les mentionner, car elles expliquent les mécanismes de formation de l’alumine hydratée Al(OH)3 qui est insoluble dans l’eau et précipite sous la forme d’un gel blanc qu’on retrouve souvent au fond des piqûres de corrosion. Aussi, les réactions de formation de produits de corrosion de l’aluminium peuvent nous renseigner sur la possibilité qu’une acidification localisée ne se produise (à cause de la formation des ions H+). Cette acidification localisée peut en effet provoquer une corrosion localisée dans certains cas.

# Diapositive 20

Les réactions de corrosion électrochimique, ou d’oxydoréduction, qui ont lieu à l'interface métal-solution entraînent une séparation de charge à cette interface, et mène à la formation de ce que les électrochimistes appellent la double couche dont l'épaisseur est de l'ordre de 10 nm. En effet, lors de l’immersion d’un métal dans une solution aqueuse, une perturbation locale de l'arrangement de molécules et d'ions se produit et modifie la répartition des charges électriques à l'interface métal-solution. Afin d'atteindre la neutralité électrique, les charges présentes dans le liquide proches de l'interface (c’est-à-dire les ions qui résultent de la réaction d’oxydation ou la réaction anodique) doivent être neutralisés par le même nombre de charges électriques de signe opposé à la surface du métal (c’est-à-dire les électrons résultant de la réaction de réduction ou la réaction cathodique). La double couche électrochimique tient donc son nom de la structure de l’interface chargée métal-solution avec la présence d’une couche chargée négativement du côté du métal, et d’une couche chargée positivement du côté de la solution. Cette structure rappelle celle d’un condensateur chargé.

En plus de la couche compacte du côté de la solution, formée d’ions (généralement solvatés, c’est-à-dire entourés de molécules d’eau), une couche de diffusion peut se former à proximité de la couche compacte. Cette couche de diffusion résulte de l’agitation thermique des ions qui n’occupent pas une position fixe comme les ions qui forment la couche compacte.

Le concept de la double couche électrochimique permet d’introduit une notion très importante en corrosion électrochimique, à savoir le potentiel électrochimique d’une électrode (un métal plongé dans un électrolyte). Ce potentiel représente la différence de potentiel électrique entre le métal et la solution à l’équilibre. Cet équilibre est atteint lorsque la réaction anodique et la réaction cathodique se déroulent à la même vitesse.

# Diapositive 21

La diapositive 21 introduit une notion importante en corrosion électrochimique, à savoir l’échelle galvanique ou l’échelle de potentiel de corrosion. Le potentiel de corrosion est simplement le potentiel électrochimique à l’équilibre d’un métal plongé dans un électrolyte où il subit une réaction de corrosion. Dans certaines références, on parle de « potentiel de dissolution », ce qui est équivalent au « potentiel de corrosion ».

Le potentiel de corrosion ne peut pas être mesuré dans l’absolu, et est mesuré dans la pratique par rapport à des électrodes dites « de référence ». L’électrode de référence par excellence est l’électrode à hydrogène à laquelle on attribue par convention le potentiel 0 V. Cependant, l’électrode à hydrogène est rarement utilisée dans la pratique à cause de sa complexité (nécessité d’utiliser l’hydrogène sous forme de gaz). Ainsi, on plusieurs autres types d’électrodes de référence sont employés dans la pratique pour mesurer les potentiels de corrosion, comme l’électrode de calomel, l’électrode de chlorure de cuivre, l’électrode de sulfate de cuivre saturé, etc. La mesure du potentiel de corrosion (en volt) d’un métal se fait en branchant ce dernier à l’électrode de référence à travers un voltmètre, le métal et l’électrode de référence étant immergé dans le même électrolyte.

Une échelle galvanique permet donc de classer les matériaux métalliques en fonction de leur potentiel de corrosion mesuré dans une même solution, à une même température, et par une même électrode de référence. L’échelle galvanique présentée à la diapositive 21 a été mesurée dans l’eau de mer par une électrode de référence de calomel à 25 °C. Elle classe les matériaux des moins nobles (les plus actifs avec les potentiels de corrosion les plus bas) aux plus nobles (les moins actifs avec les potentiels de corrosion les plus élevés). L’échelle galvanique est importante pour prévoir la possibilité de corrosion galvanique dans le cas d’assemblages hétérogènes. Il importe de mentionner que, quel que soit le milieu d’exposition, l’aluminium est toujours parmi les matériaux les moins nobles en cas de couplage galvanique. Par exemple, si l’aluminium est couplé à l’acier inoxydable dans l’eau de mer à 25 °C, l’échelle galvanique de la diapositive 21 permet de prédire que l’aluminium jouera le rôle de l’anode (sera attaqué) et que l’acier inoxydable jouera le rôle de la cathode (sera immunisé).

# Diapositive 22

La corrosion galvanique se produit lorsque deux matériaux dissimilaires sont joints électriquement et électrolytiquement, ce qui entraîne un déplacement d’électrons du matériau ayant le potentiel de corrosion le plus bas (anode) vers le matériau ayant le potentiel de corrosion le plus haut (cathode). La figure jointe montre deux cas d’assemblage où (1) deux plaques en acier sont jointes par un rivet en aluminium, et (2) deux plaques en aluminium sont jointes par un rivet en acier. Dans les deux cas, il s’agit d’un assemblage acier/aluminium. Dans ce cas de figure, les tables galvaniques nous permettent de prédire, en cas de présence d’électrolyte, que l’aluminium jouera le rôle de l’anode (sera attaqué) et que l’acier jouera le rôle de la cathode (sera immunisé).

# Diapositive 23

La diapositive 23 présente l’effet des éléments d’alliage sur le potentiel électrochimique des alliages d’aluminium. Certains éléments d’alliages augmentent le potentiel électrochimique des alliages d’aluminium (cas du cuivre et du manganèse), rendant l’alliage moins actif, alors que d’autres éléments le diminuent (cas du magnésium et du zinc) rendant l’alliage plus actif. La variété des alliages d’aluminium entraine une grande différence au niveau de leurs potentiels électrochimiques, allant de -600 mV (mesuré par l’électrode de calomel, ECS) pour le 2014-T4 à -990 mV pour l’alliage 71000. Le tableau de la diapositive 23 montre ainsi que l’assemblage entre certains alliages d’aluminium peut poser des risques de corrosion galvanique.

# Diapositive 24

La diapositive 24 rappelle des notions relatives à la corrosion galvanique. La figure jointe montre un assemblage plaque en aluminium anodisé/boulons en acier inoxydable soumis à un test de brouillard salin de 1000 heures. Normalement, le couplage galvanique de l’aluminium anodisé avec l'acier inoxydable fonctionne très bien, mais en brouillard salin et à cause de la présence de chlorure dans l'environnement, une corrosion galvanique s’est produite dans ce cas et l’aluminium anodisé a été attaqué dans ce cas. Cet exemple montre l’effet de l’électrolyte sur l’intensité de la corrosion galvanique.

# Diapositive 25

La diapositive 26 présente l’un des moyens de mitigation de la corrosion galvanique, à savoir la conception d’assemblage avec l’utilisation d’isolants électriques pour couper tout lien électrique entre le matériau cathodique et le matériau anodique (et bloquer la pile de corrosion initialement formée en cas de contact direct entre les deux matériaux).

Un deuxième exemple présente un autre moyen de mitigation de la corrosion galvanique entre deux matériaux dissimilaires, à travers l’utilisation d’un métal intermédiaire avec un potentiel de corrosion situé entre ceux des deux matériaux dissimilaires Métal 1 et Métal 2. Ceci permettra d’atténuer les effets de la corrosion galvanique à l’interface Métal 1/Métal intermédiaire et Métal intermédiaire/Métal 2 comparé à la corrosion galvanique qui aurait pu avoir lieu si Métal 1 était en contact direct avec Métal 2.

# Diapositive 26

La figure à gauche a été déjà montrée à la diapositive 15 où elle représentait la base de l’une des colonnes-support du pont en aluminium d’Arvida lors d’une inspection réalisée en 1984. Cette colonne consiste en une extrusion en alliage d’aluminium (2014) qui s’appuie sur une base constituée d’une plaque en acier galvanisé a subi une sévère corrosion par exfoliation (cette forme de corrosion sera abordée à la diapositive 38). Lors des réparations effectuées en 1985-1986, l’équipe responsable a pensé à prévenir le risque de corrosion galvanique entre la colonne-support en 2014 et la base en acier galvanisé en intercalant une plaque épaisse en alliage d’aluminium 6061-T51 (76 mm) séparée de la base en acier par une feuille isolante en polymère renforcé par des fibres (FRP) de 3 mm d’épaisseur.

Des cornières en aluminium en forme de L ont été fixées aux bases des colonnes à l'aide d'écrous et de boulons en aluminium. Les angles ont ensuite été fixés aux nouvelles bases en acier avec des boulons, des écrous et des rondelles en acier inoxydable 18/8. Pour empêcher davantage la corrosion galvanique, des rondelles et des manchons isolants en FRP ont été installés sous et autour des fixations en acier inoxydable.

La figure à gauche montre l’état de l’assemblage inspecté après 30 ans de service, suite aux travaux de réparation de 1985-1986. Aucun signe significatif de corrosion n'a été observée sur les bases en acier galvanisé, la plaque épaisse en alliage d’aluminium 6061-T51, ni sur la poutre-support an aluminium.

# Diapositive 27

Alclad est une feuille d'aluminium résistante à la corrosion formée de couches de surface en aluminium pur (1100 par exemple) liées métallurgiquement (par laminage) à un matériau de base en alliage d'aluminium à haute résistance mécanique, mais à faible résistance contre la corrosion (2024 par exemple). La faible épaisseur de l’Alclad n’affecte pas les propriétés mécaniques du substrat (2024).

Vu le potentiel de corrosion plus élevé du 2024 comparé au 1100 (grâce à la présence du cuivre comme on l’a déjà vu à la diapositive 23), en cas de perforation de l’Alclad, ce dernier se comportera comme une anode et protégera la cathode (2024) contre l’attaque de corrosion (c’est le principe de la protection cathodique).

L’Alclad peut dans certains cas mitiger la corrosion galvanique en agissant comme un métal intermédiaire (voir diapositive 25) qui empêche le contact direct entre le 2024 et un métal avec lequel la différence de potentiel électrochimique pourrait favoriser la corrosion galvanique.

# Diapositive 28

Il est pratique de classer les attaques de corrosion par les formes dans lesquelles elles se manifestent. Cette classification se base donc sur l’apparence du métal corrodé. Chaque forme de corrosion peut être identifiée par une simple observation visuelle. Dans la plupart des cas, un examen visuel à l’œil nu peut suffire à cet effet, mais dans certains cas, le recours au grossissement de la zone attaquée (par microscopie optique ou électronique) et l’utilisation des techniques d’analyse non destructive (ressuage, rayons X et ultrasons) peut s’avérer utile ou nécessaire. Dans la figure jointe à la diapositive 28, 9 formes de corrosion sont groupées suivant trois catégories :

* Le groupe I englobe les attaques de corrosion facilement identifiables par simple inspection visuelle : la corrosion uniforme, la corrosion par piqures, la corrosion caverneuse et la corrosion galvanique.
* Le groupe II englobe les attaques de corrosion dont l’identification peut nécessiter des moyens d’examens supplémentaires (loupe, microscope binoculaire, etc.) : la corrosion érosion, la corrosion par cavitation, le « fretting », la corrosion intergranulaire.
* Le groupe III englobe les attaques de corrosion dont l’identification nécessite l’utilisation de microscopes (optiques ou électroniques) : la corrosion par exfoliation, la corrosion sélective (De-Alloying), la corrosion sous tension et la fatigue corrosion.

Les formes de corrosion énumérées ci-haut seront présentées et expliquées dans les diapositives suivantes.

# Diapositive 29

Le tableau présenté à la diapositive 29 résume les propriétés des différents alliages d’aluminium de corroyage classés par séries. D’un point de vue de résistance à la corrosion, les alliages de la série 1xxx (non alliés), et ceux des séries 3xxx, 5xxx, et 6xxx se distinguent par une bonne résistance à la corrosion. Les alliages de la série 5xxx sont connus pour leur bonne résistance à la corrosion marine (notamment l’alliage 5083). Par contre, les alliages des séries 2xxx et 7xxx (surtout en présence du cuivre) se caractérisent par une mauvaise résistance à la corrosion, notamment par piqûres, intergranulaire, par corrosion sous tension et par exfoliation (comme l’a montré la diapositive 15 dans le cas du 2014 utilisé dans les colonnes-support du Pont d’Arvida). C’est pour cette raison que les alliages des séries 2xxx et 7xxx sont souvent protégés par des couches Alclad surtout pour des utilisations dans des milieux agressifs.

# Diapositive 30

Cette forme de corrosion se développe uniformément sur toute la surface et se traduit par une diminution d’épaisseur uniforme et régulière.

Les conditions nécessaires pour une attaque uniforme sont :

* La corrosion électrochimique est le seul mécanisme de détérioration;
* Les réactions anodiques et cathodiques se déroulent sur toute la surface, mais pas d’une façon simultanée et à la même place;
* Il n’y a pas différence macroscopique de la concentration de l’électrolyte le long de la surface du matériau;
* La composition du matériau est relativement homogène.

Les matériaux homogènes sans tendance à la passivation sont susceptibles à cette formation de corrosion. Ainsi, pour l'aluminium, ce type de corrosion s'observe surtout dans les milieux fortement acides ou les milieux alcalins, dans lesquels la solubilité du film d'oxyde naturel est élevée (voir diapositive 14).

La vitesse de dissolution peut varier de quelques micromètres par an à quelques micromètres par heure, selon la nature de l'acide ou de la base (voir diapositive 14).

La corrosion générale n’est pas considérée comme une forme de corrosion dangereuse, car (1) elle peut être prédite et déterminée en mesurant la perte de masse, de la perte d’épaisseur ou de la quantité d'hydrogène libéré, et (2) à cause de l’existence de moyens de prévention (exemple : les revêtements, les inhibiteurs de corrosion, etc. qui seront discutés dans les diapositives suivantes).

# Diapositive 31

Cette diapositive rappelle que l’ampleur de la corrosion généralisée (mesurée par perte d’épaisseur par unité de temps) peut varier grandement en fonction de l’agressivité du milieu d’exposition. Une vitesse de corrosion de plusieurs mm est considérée comme une attaque excessive et très rarement tolérée dans la pratique. D’ailleurs, la compatibilité et l’interaction du métal avec son environnement doivent être prises en compte dès la conception avec les autres propriétés (la résistance mécanique, la dureté, la ténacité, etc.) pour éviter ce genre d’attaque. Par contre, une attaque de corrosion de quelques microns par année peut être considérée comme faible et acceptable pour la majorité des applications industrielles.

# Diapositive 32

La corrosion par piqûres (*Pitting Corrosion)* se produit généralement sur les matériaux passivés dans des milieux contenant des chlorures, bromures, iodures ou perchlorates, où le potentiel de corrosion dépasse une valeur critique appelée potentiel de piqûre. La rupture locale du film de passivation peut générer une attaque localisée qui peut être variable en ouverture et profondeur et peut prendre plusieurs formes en fonction du matériau, du milieu d’exposition (taux de chlorure par exemple) et des conditions de service (présence d’un champ de contrainte qui entretient la rupture du film passif).

Comme matériau qui se passive naturellement, l'aluminium est sujet à la corrosion par piqûres dans les milieux à pH proche de la neutralité, ce qui couvre essentiellement tous les milieux naturels tels que les eaux de surface, l'eau de mer et l'air humide.

Contrairement à d'autres métaux, la corrosion par piqûre de l'aluminium est souvent facilement détectable (si on a accès au site de l’attaque) parce que le les piqûres de corrosion sont recouvertes de pustules blanches, volumineuses et gélatineuses d'hydroxyde d’aluminium Al(OH)3. Ces pustules sont souvent beaucoup plus grosses que la cavité sous-jacente. Il n’en demeure que la corrosion par piqûres est généralement une forme dangereuse de corrosion, car elle est (dans plusieurs cas) difficile à observer, à mesurer, à prédire et peut mener à la perforation de structures avec toutes les conséquences induites (déversements, explosions, etc.).

# Diapositive 33

Comme tous les métaux passifs, l'aluminium est sujet à une corrosion localisée causée par une rupture locale du film passif naturellement formé à la surface. Il en résulte une piqûre de corrosion qui peut se propager, à condition que les conditions soient favorables.

La corrosion par piqûre présente deux stades distincts : l’initiation et la propagation.

**L’initiation :**

La phase d’initiation se produit lorsque les ions chlorure Cl- sont adsorbés sur le film d'oxyde naturel, suivi de la rupture du film aux points faibles, avec formation de microfissures de quelques nanomètres de large. De nombreuses piqûres sont initiées dans un délai très court. D’ailleurs, on sait depuis longtemps que la corrosion par piqûres se développe en présence de chlorure.

**La propagation :**

Parmi les nombreuses piqûres initiées, la plupart vont arrêter de croitre et vont se repassiver après quelques jours. Cependant, une infime minorité des piqûres initiées vont continuer à se propager selon les réactions anodique (au fond de la piqûre) et cathodique (à l’extérieur de la piqûre) présentées à la diapositive 33.

La dissolution de l'aluminium et formation d'ions Al3+ au fond de la piqûre crée un champ électrique qui attire les très mobiles ions Cl- vers le fond de la piqûre, ce qui neutralise chimiquement la solution et entraine la formation de chlorure d'aluminium AlCl4. Aussi, la réaction globale montre la formation d’hydroxyde d’aluminium Al(OH)3 qui sera poussé vers l’extérieur de la piqûre par les bulles d’hydrogène provenant de la réduction des ions H+ (qui se forment au fond de la piqûre). Ce mécanisme explique pourquoi l’hydroxyde d’aluminium Al(OH)3 s’accumule au sommet de la piqûre sous la forme de pustules blanches. D’un autre côté, la formation des ions H+ au fond de la piqûre entraîne une acidification qui empêche la repassivation du fond et entretient la propagation de la piqûre.

# Diapositive 34

La diversité des alliages d’aluminium et la variété des éléments d’alliages utilisés pour leur élaboration mènent à la formation d’une multitude de composés intermétalliques. Ces composés se caractérisent par des potentiels électrochimiques qui peuvent être très différents par rapport à celui de la matrice (c’est-à-dire l’aluminium ou la solution solide). Cette différence peut créer une sorte d’assemblage microgalvanique entre la matrice et le composé intermétallique. Si la matrice se retrouve à jouer le rôle de l’anode dans cet assemblage microgalvanique, elle peut subir une attaque localisée qui peut mener à la formation d’une piqûre. À titre d’exemple, le cuivre avec un potentiel de corrosion de -110 mV (mesuré par rapport à l’électrode de Calomel) remplit le rôle de la cathode s’il est couplé avec l’aluminium pur (cas du 1050 A avec un potentiel de corrosion de -750 mV). L’aluminium pur sera l’anode dans ce cas de figure et sera attaqué localement au niveau de l’interface avec le cuivre, ceci d’autant plus que l’écart entre des potentiels de corrosion du cuivre et de l’aluminium est significatif. Cet exemple explique pourquoi les alliages de la série 2xxx riches en cuivre présentent les résistances à la corrosion par piqûre les plus faibles de tous les alliages de corroyage de l’aluminium.

# Diapositive 35

La corrosion intergranulaire est une attaque localisée aux joints de grains, qui se propage dans le matériau. La cause générale de la corrosion intergranulaire est la présence de piles microgalvaniques entre les joints des grains et l’intérieur des grains due à la différence de concentration en éléments d’addition ou la présence d’impureté ou d’intermétalliques (voir diapositive 36). Il s’agit d’une dangereuse forme de corrosion qui peut provoquer la décohésion du métal, surtout en présence de contraintes de tension.

La corrosion intergranulaire se développe lorsque trois conditions sont simultanément remplies :

– présence d'un milieu corrosif;

– différence de potentiel de l'ordre de 100 mV entre les intermétalliques et la solution solide d’aluminium (il n'y a donc pas de corrosion intergranulaire avec la phase intermétallique Al3Mn contrairement au Al2Cu);

– précipitation continue d'intermétalliques telle que la corrosion intergranulaire puisse continuer à se propager.

# Diapositive 36

À la température ambiante, la solubilité du fer, du nickel ou magnésium dans l'aluminium est si faible que la solution solide a un potentiel très proche de celui de l'aluminium non allié 1050A (potentiel de corrosion de -750 mV). Cependant, lorsque la solution solide est sursaturée à température ambiante, son potentiel dépend de la concentration de l’élément d’alliage.

Le potentiel de corrosion des composés intermétalliques diffère de celui de l'aluminium. Les composés intermétalliques peuvent être :

– moins actifs par rapport à la solution solide (cas des intermétalliques Al3Fe, Al2Cu) : ils sont cathodiques par rapport à la solution solide, et dans le cas de la corrosion intergranulaire, c'est la solution solide qui sera dissoute;

- plus actifs que la solution solide (cas des intermétalliques MgZn2, Al3Mg2 et Mg2Si) : ils sont anodiques par rapport à la solution solide, et en cas de corrosion intergranulaire, ces intermétalliques seront dissous.

# Diapositive 37

La diapositive 37 explique le rôle important que joue le traitement thermique de survieillissement (le traitement T7 ou T7X) dans la prévention de la corrosion intergranulaire des alliages d’aluminium des séries 2xxx et 7xxx. On rappelle que les alliages de ces deux séries sont parmi les plus susceptibles des alliages d’aluminium de corroyage à la corrosion intergranulaire à cause de leur haute teneur en éléments d’alliages qui favorise la précipitation continue d’intermétalliques aux joints de grains. La figure associée à la diapositive 37 montre comment un traitement de survieillissement T73 (20h @ 190 °C) a permis de prévenir la corrosion intergranulaire subie précédemment par un alliage 2014 traité à l’état T6 (16h @ 170°C). Ce comportement peut être expliqué par le fait que le survieillissement entraîne la dissolution des intermétalliques présents aux joints des grains. La précipitation des intermétalliques aux joints des grains devient discontinue ce qui empêche par conséquent la propagation de la corrosion intergranulaire.

# Diapositive 38

La corrosion par exfoliation est une forme de corrosion sélective qui se propage le long de joints de grains allongés parallèles à la direction de laminage ou d'extrusion. Les grains allongés demeurent intacts au centre, mais se détachent les uns des autres sous l’action des produits de corrosion à la manière de feuilles d’un livre. Le métal va gonfler sous l’action des produits de corrosion volumineux, ce qui donne l'aspect spectaculaire de cette forme de corrosion.

La corrosion par exfoliation se produit dans plusieurs milieux extérieurs, mais se développe le plus rapidement dans des milieux marins. Les produits de corrosion volumineux qui favorisent l’exfoliation du métal se forment plus facilement dans des conditions de brouillard salin intermittent ou par immersion intermittente dans une eau salée.

Les alliages d’aluminium des séries 1xxx et 3xxx sont parmi les plus résistants à la corrosion par exfoliation. La corrosion par exfoliation a été observée dans certains alliages fortement laminés à froid de la série 5xxx. Dans les alliages de la série 2xxx et 7xxx, la résistance à la corrosion par exfoliation dépend de l’épaisseur du produit, les produits plus minces (moins de 13 mm d’épaisseur) étant les plus susceptibles à la corrosion par exfoliation, car ils développent une structure plus texturée comparés aux produits plus épais. Comme observé précédemment dans le cas de la corrosion intergranulaire, un traitement thermique de survieillissement permet de minimiser les risques de la corrosion par exfoliation, notamment pour les alliages des séries 7xxx.

# Diapositive 39

La corrosion sous tension (CST) se produit quand une fissure se forme due aux effets simultanés de contraintes statiques de tension et de corrosion par piqûres.

Les contraintes de tension peuvent provenir d’un chargement extérieur, d’un changement de température, ou d’une source interne comme les contraintes résiduelles suite aux traitements thermiques ou au soudage.

Dans les alliages d’aluminium, la CST peut être favorisée par un film d’humidité à la surface du métal exposé à l’atmosphère, ou par des contaminants comme les ions chlorures. Seule une contrainte de tension prolongée à la surface peut causer la CST alors qu’une contrainte de compression constante permet de la prévenir. Les contraintes de tension requises pour causer la CST sont généralement inférieures à la limite d’élasticité. Dans les alliages d’aluminium, les fissures de CST se forment dans des plans perpendiculaires à la contrainte de tension et se propagent principalement d’une façon intergranulaire, sous forme de branches plus ou moins ramifiées. Comme la CST se propage d’une façon intergranulaire, elle est favorisée par les structures fortement texturées (produits laminés ou extrudés avec des grains fortement allongés le long de la direction de transformation).

En général, la résistance à la corrosion sous contrainte est plus élevée pour les états métallurgiques suivants :

– TX51 : les demi-produits aux états T451 et T651 ont été étirés après trempe

(T451) ou entre trempe et vieillissement (T651) afin de réduire les contraintes internes.

Puisque la contrainte totale appliquée est la somme des contraintes internes (causées par la transformation) et les contraintes liées aux conditions de service, il est donc souhaitable d'utiliser des semi-produits avec des contraintes internes les plus faibles possibles.

– T73 survieilli ou doublement vieilli.

# Diapositive 40

Facteurs affectant la résistance à la corrosion sous tension sont :

1. Nature, composition du métal : par exemple, la susceptibilité à la CST concerne principalement les alliages d’aluminium à haute résistance mécanique comme ceux des séries 2xxx et 7xxx, ains que ceux de la série 5xxx avec 3% et plus de magnésium;
2. Microstructure du métal : comme expliqué précédemment, la CST est favorisée par les structures fortement texturées (produits laminés ou extrudés avec des grains fortement allongés le long de la direction de transformation);
3. Traitements thermiques et mécaniques appliqués au métal : par exemple, les produits épais en alliages 2xxx à l’état T3 ou T4 possèdent une mauvaise résistance à la CST dans le sens traverse court, alors que des traitements T6 ou T8 entraînent une amélioration de la résistance à la CST;
4. Espèces présentes dans l'environnement : La présence d’humidité est connue pour favoriser la CST. Les ions Cl-, Br- et I- sont les ions qui accélèrent le plus la CST. Par contre, la CST cesse de se propager dans des milieux gazeux secs;
5. Amplitude et état de la contrainte : Plusieurs tests standardisés sont disponibles pour évaluer la susceptibilité à la corrosion sous contrainte ; les éprouvettes de CST sont soumises à des contraintes de tension ou de flexion, selon le type de test. La charge appliquée est typiquement égale à 75% de Rp0.2. Cependant, réaliser des tests à des charges inférieures de l’ordre 50% et 25% de Rp0.2, permet de déterminer le seuil de contrainte au-dessous de laquelle la corrosion sous contrainte ne se produise pas.

# Diapositive 41

La corrosion caverneuse est une corrosion localisée dans les zones confinées comme les zones de recouvrement de rivetage, boulonnage ou soudure, zones sous les joints d’étanchéité. Ces zones, aussi appelées « crevasses », sont très petites et difficiles d'accès pour le milieu aqueux ce qui limite les échanges avec l’environnement et crée une pile d’aération différentielle où la crevasse, pauvre en oxygène, joue le rôle de l’anode et subit une attaque localisée. La concentration élevée en ions Al3+ de la crevasse entraine la migration des ions chlorures (Cl-) et la formation de chlorure d’aluminium AlCl3. L’hydrolyse chlorure d’aluminium entraine la formation d’ions chlorures et hydrogène et par conséquent l’acidification du milieu de la crevasse ce qui empêche la repassivation de l’aluminium et favorise le développement de la corrosion caverneuse.

# Diapositive 42

La corrosion filiforme est spécifique aux métaux couverts par des revêtements organiques. Il s'agit principalement d'une corrosion esthétique car le métal sous-jacent ne subit qu'une attaque très superficielle, ne dépassant pas quelques dizaines de microns en profondeur.

Cette forme se développe sous forme de filaments étroits, d'environ 0,1 à 0,5 mm de large et de quelques millimètres de long, qui se propagent à l'interface métal-revêtement. Le gonflement causé par les produits de corrosion (l’hydroxyde d’aluminium) entraine la déformation et le soulèvement du revêtement sous la forme de filaments très fins.

La corrosion filiforme commence toujours au niveau des défauts de revêtement, tels que les rayures et les points faibles : arêtes vives, bords coupés ou trous. Elle peut également être causée par une mauvaise adhésion entre le revêtement et le substrat C’est une forme de corrosion qui apparaît généralement après plusieurs années de service.

La corrosion filiforme de l’aluminium est particulièrement sévère dans les milieux tempérés et humides ou en présence d’atmosphères industrielles polluées ou marines. Cette forme de corrosion de l’aluminium se produit rarement à des humidités relatives inférieures à 55% ou supérieures à 95%. La force motrice de la corrosion filiforme est la différence de la concentration en oxygène entre la tête du filament (pauvre en oxygène et qui se comporte en anode) et la queue du filament (riche en oxygène et qui se comporte en cathode).

# Diapositive 43

**Fatigue corrosion :**

Contrairement à la corrosion sous tension, la fatigue-corrosion ne se limite pas à des systèmes métal-milieu spécifique : elle touche tous les métaux soumis à des contraintes périodiques en milieu corrosif (gazeux ou aqueux).

La fatigue-corrosion présente deux stades distincts : l’initiation et la propagation.

L’initiation :

Les mécanismes qui contrôlent l’initiation des fissures en FC sont mal connus, mais on estime que la corrosion joue un rôle prépondérant sous différentes formes : par piqûre, intergranulaire ou liée à la présence d’inclusions.

Propagation des fissures :

Les fissures avancent suivant les plans normaux à la contrainte maximale appliquée, laissant souvent des stries microscopiques sur la surface de fracture, marquant les pas successifs de progression de la fissure.

Finalement, une rupture finale se produit lorsque la surface restante devient incapable de supporter la charge (état de surcharge). Le métal se sépare par rupture rapide.

**Corrosion bactérienne :**

Cette forme de corrosion est causée par les effets de micro-organismes (bactéries, champignons, algues, etc.) dans des systèmes d’eau naturelle et industrielle sur les matériaux structuraux. Il s’agit d’une forme de corrosion localisée qui mène ultimement à une corrosion par piqûres ou caverneuse. Les micro-organismes s’attachent souvent à la surface du matériau et modifient localement les propriétés de la solution (par leur processus métabolique).

La longueur des micro-organismes est comprise entre 0.1 et 5 μm. Certains filaments peuvent atteindre une centaine de microns de long. Une bactérie peut se reproduire jusqu’à un million de fois en quelques heures. Les bactéries peuvent survivre entre -10 et plus de 100 °C, à un pH de 0 à 10.5, avec ou sans oxygène dissout, sous de hautes pressions (31 MPa) et dans un milieu salin.

La corrosion par les bactéries est accélérée pour des températures de 15-45 °C et avec un pH entre 6 et 8.

# Diapositive 44

**Essai en laboratoire :**

Ces tests sont généralement réalisés dans des milieux synthétiques permettant d’évaluer en un temps court la résistance à la corrosion d’un matériau donné ou de comparer la résistance à la corrosion de plusieurs matériaux entre eux.

Les tests de corrosion en chambre environnementale (voir photo jointe à la diapositive 44) sont utilisés, depuis le début des années 1900, en tant qu’outil de contrôle de la qualité pour l’évaluation du comportement en corrosion des matériaux ou la qualité des revêtements en tant qu’outil de contrôle de la qualité.

Une chambre environnementale est utilisée pour produire un environnement permettant l’apparition de la corrosion sur un échantillon de test. Les tests en chambre environnementale les plus communs sont ceux de brouillard salin, de l’humidité, des températures basses et élevées, de l’exposition aux ultraviolets ou encore à des gaz corrosifs. Ces environnements corrosifs peuvent être utilisés individuellement ou en combinaison les uns avec les autres et sont conduits dans des conditions contrôlées.

Le test en chambre environnementale le plus communément utilisé est le test du brouillard salin. L’utilisation du standard ASTM B117 (Standard practice for operating Salt Spray (fog) appartus), adopté en 1954, est largement répandue dans l’industrie automobile, l’industrie aéronautique, ainsi que l’industrie des peintures et des revêtements. Le test de corrosion suivant le standard ASTM B117 est aussi le test le plus populaire pour l’évaluation de la tenue à la corrosion de l’aluminium et ses alliages traités par anodisation et par conversion. Les autres tests les plus utilisés pour évaluer la résistance à la corrosion des alliages de l’aluminium (avec ou sans revêtements) sont l’immersion alternée dans une solution de 3.5% NaCl selon l’ASTM G44 (Practice for Evaluating Stress Corrosion Cracking Resistance of Metals in 3.5% Sodium Chloride Solution), ou encore l’exposition à différentes atmosphères extérieures dont les directives sont décrites dans le standard ASTM G50 (Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals).

Des tests cycliques surtout utilisés par l’industrie automobile (comme les standards GMW14872/GM 9540P, Honda CCTA, Toyota SH 1555G Méthode C et SAE J2334) où des conditions variables d’exposition à des milieux spécifiques (brouillard salin par exemple), suivis par une exposition à un milieu humide, puis un milieu sec pour terminer avec un rinçage forment un cycle qui se répète un certain nombre de fois. Ces tests visent à reproduire les performances de résistance à la corrosion obtenues dans les essais d’exposition extérieure à long terme ou même dans les conditions de service.

Le test de corrosion par immersion des métaux suivant le standard ASTM G31 est utilisé pour déterminer la résistance d'un matériau à un environnement aqueux agressif. Des coupons de corrosion de laboratoire standard sont utilisés pour déterminer la perte de poids due à la corrosion. La méthode d'essai ASTM G31 normalise les taux de corrosion en perte d’épaisseur par unité de temps, généralement en mm/an ou en miles/an (mpy). Les termes des tests varient, mais les résultats sont généralement disponibles dans un cycle d'exposition de 24 heures, 10 ou 20 jours. Les variables comme la température d'essai et de l’aération sont également spécifiques au but recherché du test (étude d’une forme de corrosion spécifique par exemple).

Les essais en exposition extérieure, sur prototype ou en service vise à pallier la difficulté de reproduire certains milieux en laboratoire, et de se rapprocher le plus possible de la réalité. Cependant, ce genre de tests peuvent être longs et onéreux et demandent d’être étalonnés par rapport aux conditions d’exploitation industrielle.

Les méthodes électrochimiques se basent sur le principe de mesure des courants « i » en fonction de la variation d’une tension appliquée à l’échantillon- dans un milieu donné en partant d’un potentiel cathodique et en le faisant varier régulièrement jusqu’à ce qu’il devienne anodique. Ces méthodes permettent d’obtenir une courbe dont la forme dépendra de la position relative des courbes élémentaires (anodique et cathodique) ce qui permet de mesurer le courant de corrosion et par conséquent de déterminer le taux de corrosion. La conduite des essais électrochimiques est réalisée suivant des protocoles stricts en se basant sur les considérations fondamentales de l’électrochimie.

# Diapositive 45

La détermination du taux de corrosion par la méthode de perte de poids est la méthode la plus ancienne de mesure quantitative de la corrosion. Cette méthode consiste à peser un échantillon d’une taille déterminé au début du test, puis de l’immerger dans une solution spécifique pour l’étude du comportement en corrosion et ce pendant un intervalle de temps déterminé. L’échantillon est ensuite retiré et nettoyé par un réactif spécifique pour éliminer les produits de corrosion formés. Finalement, l’échantillon est pesé, la perte de poids est déterminée et le taux de corrosion est calculé suivant la formule suivante :

**Corrosion rate** (en mm/an) = (K x W)/(A x T x D)

où:

K = 8.76 x 104

T = temps d'exposition en heures,

A = aire en cm2,

W = perte de masse en g, et

D = masse volumique en g/cm3.

Il importe de noter que le résultat obtenu ne peut être significatif que si la corrosion est uniforme.

La mesure de dégagement d’hydrogène produit lors de l’attaque de l’aluminium par un réactif sélectif correspond à la réaction de dissolution anodique de l’aluminium :



Le résultat obtenu ne peut être valable que si la corrosion est uniforme (immersion dans l’acide chlorhydrique à pH 2 par exemple).

# Diapositive 46

La diapositive 46 présente une méthode d'évaluation de la corrosion par piqûres selon la norme ASTM G46, à l'aide d'un microscope optique (avec une plage de grossissement de 50 à 1000x) équipé d'un micromètre à cadran (figure à gauche). La mesure de la profondeur de la piqûre a été effectuée en focalisant la surface de l'échantillon sur le rebord de la fosse et en enregistrant la lecture initiale du micromètre, puis en se recentrant sur le fond de la piqûre et en enregistrant la lecture. La différence entre les lectures initiales et finales sur le micromètre représente la profondeur de la piqûre. La figure à droite donne un exemple de mesure de profondeur d’une piqûre selon la norme ASTM G46.

# Diapositive 47

Les essais électrochimiques pour la détermination du taux de corrosion ont été abordés dans la diapositive 44. Les essais électrochimiques se caractérisent par leur rapidité et leur facilité à mettre en œuvre avec les appareils modernes qui permettent d’appliquer aux échantillons testés des courants ou des variations de potentiels et de recueillir leur réponse sous forme d’une signature électrochimique. C’est cette signature chimique qui sera ensuite analysée en utilisant les notions fondamentales de l’électrochimie afin de déterminer des propriétés utiles pour l’utilisateur comme le potentiel de corrosion ou le courant de corrosion (qui mène à déterminer le taux de corrosion). Les essais électrochimiques englobent en réalité une variété de tests ayant chacun son propre principe et méthodologie.

Dans la diapositive 47, on va aborder l’un de ces tests, à savoir le test de polarisation potentiodynamique. Ce test est l'une des techniques les plus largement acceptées pour mesurer la corrosion des échantillons. La différence de potentiel est mesurée entre une électrode de référence et l’échantillon à analyser (appelé électrode de travail). La différence est appliquée entre les deux électrodes, et le courant développé (ou la réponse de l’électrode de travail) est mesuré entre l’échantillon et une électrode dite « contre électrode ». Ce test est mis en œuvre grâce à un appareil appelé « potensiostat ». La figure à gauche associée à la diapositive 47 présente le montage utilisé pour ce test.

La variation du courant (développé par l’échantillon) en fonction de la différence de potentiel appliquée à ce dernier permet de tracer une courbe, dite une « courbe de polarisation », qui, une fois présenté dans une échelle logarithmique, permet de ressortir deux branches distinctes (voir la photo à droite associée à la diapositive 47). Ces deux branches représentent la réaction anodique et la réaction cathodique se déroulant sur l’échantillon. Pour donner une image simplifiée, on peut dire que le balayage du potentiel (d’où le terme « potentiodynamique ») force l’échantillon à se comporter, artificiellement on s’entend, tantôt comme une anode pure, tantôt comme cathode pure (d’où le terme « polarisation »). La courbe obtenue (appelé courbe de polarisation) permet la détermination du courant de corrosion (icorr) comme le montre la figure ci-bas :



La détermination du courant de corrosion (icorr) permet de son côté de déterminer le taux de corrosion (en mm/an ou autre unité) grâce à une loi appelé la loi de Faraday.

Il importe de mentionner que les courbes de polarisation peuvent montrer des formes différentes en fonction des conditions du test et du comportement en corrosion étudié (corrosion uniforme, par piqûre, présence d’un film passif, etc.).

# Diapositive 48

La diapositive 48 présente les standards ASTM développés spécifiquement pour l’étude de la corrosion des alliages d’aluminium. En effet, les méthodes d'essai de corrosion sont comme des systèmes d'unités : des résultats d'essai comparables de différents laboratoires ne peuvent être obtenus que sur la base de méthodes d'essai communes et normalisées. Les premiers tests systématiques de corrosion atmosphérique de l'acier ont été lancés aux États-Unis par l'ASTM. La première norme ASTM sur les essais au brouillard salin remonte aux années 1930. Au début des années 1920, alors que les études de corrosion des métaux communs prenaient de l'importance, des groupes de travail d'experts en corrosion et de métallurgistes de plusieurs sociétés productrices d'aluminium ont été créés afin de développer des méthodes d'essais de corrosion communes à tous les laboratoires. La plupart de ces travaux de normalisation sur les essais de corrosion atmosphérique ont été effectués aux États-Unis sous l'égide de l'ASTM. La normalisation peut concerner l'équipement d'essai, comme les chambres d'essai au brouillard salin, et sur le protocole d'essai. Afin de limiter la dispersion des résultats, les conditions d'essai définissent le plus précisément possible la préparation de l'échantillon, les produits chimiques, la durée de l'essai, l'expression des résultats, etc. La mise au point d'une méthode d'essai nécessite souvent un travail considérable dans plusieurs laboratoires, jusqu'à ce que le test reflète véritablement la susceptibilité à une forme donnée de corrosion.

# Diapositive 50

La prévention de la corrosion doit être prise en considération depuis le début d’un projet et jusqu’à sa fin afin de garantir une durée de vie optimale et réduire les frais d’entretien. Une étude réalisée par NACE (National Association of Corrosion Engineers) a montré que le coût des défaillances par corrosion représente environ 3% du PIB des États-Unis ce qui représente plusieurs centaines de milliards de dollars (<http://impact.nace.org/documents/ccsupp.pdf>). Cependant, la même étude relève que le coût de la corrosion peut être réduit significativement en développant les connaissances des décideurs, concepteur et gestionnaires des projets au niveau des stratégies de prévention et de protection contre la corrosion. Cette diapositive présente un aperçu de ces méthodes et stratégies à savoir :

* La conception, où le risque de corrosion peut être diminué par une forme adaptée des pièces et composantes;
* La modification des propriétés de surface et l’application de revêtements pour isoler le métal des milieux particulièrement agressifs;
* Ajout d’inhibiteurs dans le milieu pour changer ses propriétés et le rendre moins agressif pour le métal.

Ces méthodes seront présentées et expliquées dans les diapositives suivantes.

# Diapositive 51

Comme mentionné précédemment, le risque de corrosion peut être diminué significativement dès l’étape de conception du produit par une forme adaptée des pièces et composantes. En voici quelques exemples :

* Prévoir un bon drainage ou éviter la rétention et l’accumulation de l’humidité.
* Éviter les crevasses (espaces restreints) qui permettent l’accumulation de résidus et provoque la corrosion caverneuse.
* Prévoir des trous d’aération pour éviter l’accumulation de l’humidité.
* Prendre en compte la distribution des contraintes pour minimiser le risque de la corrosion sous tension.
* Éviter les contacts directs entre matériaux dissimilaires pour minimiser le risque de corrosion galvanique.
* Choisir des matériaux résistants à la corrosion en se basant sur les connaissances générales des mécanismes de corrosion, l’historique, les normes, les indicateurs des fournisseurs, la littérature scientifique, les essais de laboratoire, etc.

# Diapositive 52

L'anodisation consiste à produire un film d'oxyde à la surface d'un métal par un traitement électrolytique où le métal joue le rôle de l'anode. L’aluminium est le matériau le plus anodisé à l’échelle industrielle. L’anodisation permet d’augmenter l’épaisseur du film d’oxyde naturel formé sur l’aluminium dépôts d'oxyde à température ambiante par oxydation anodique de l'aluminium dans un électrolyte choisi (généralement à base d'acide sulfurique, chromique ou phosphorique) en imposant une densité de courant de l'ordre de 1 ou plusieurs A/dm2. L’épaisseur de la couche d’anodisation peut aller de quelques microns à 100 μm dépendamment de l’application visée. En voici quelques exemples :

- Réflecteurs : 2 – 4 μm,

- Usage décoratif (mobilier, véhicules) : 5 - 8 μm,

- Usage architectural : 15 - 25 μm,

- Anodisation dure : 50 - 100 μm.

# Diapositive 53

La diapositive 53 présente des données sur les types d’anodisation et la réponse des alliages d’aluminium de corroyage et de moulage aux traitements d’anodisation. Dans l’ensemble, la plupart des alliages d’aluminium de corroyage sont faciles à anodiser à l’exception des alliages de la série 2xxx (à cause de la présence du cuivre/intermétalliques à base de cuivre qui peuvent favoriser la corrosion localisée). Les alliages de moulage s’anodisent également bien même si la présence du silicium donne lieu à une couche anodisée de teinte grise.

# Diapositive 54

La conversion chimique de l’aluminium est un traitement de surface qui mène, par la réaction avec des réactifs sélectionnés, à la formation de couches d’oxyde ou de sels (phosphate ou chromate) insolubles et très adhérents. La conversion chimique de l’aluminium n’implique pas l’application d’un courant et résulte d’une réaction chimique. Cette réaction mène d’abord à l’attaque de la surface traitée, puis à la formation d’une couche superficielle de composés complexes d’épaisseur allant de 0,5 à 5 μm.

Le processus de base de la phosphatation est la précipitation d’un métal divalent (Fe, Zn, Mn) et des ions phosphates (PO4-3) sur une surface métallique. Les bains de phosphatation contiennent essentiellement de l’acide phosphorique (H3PO4) et un phosphate primaire Me(H2PO4)2 où Me = Fe, Zn, Mn. Le phosphate primaire Me(H2PO4)2 soluble réagit ensuite pour former d’abord le phosphate secondaire Me2(HPO4)2 très peu soluble, puis le phosphate tertiaire Me3(PO4)2 insoluble qui constitue la couche protectrice.

La chromatation est un traitement de conversion chimique pouvant être appliqué par immersion ou par aspersion à partir d’une solution contenant du chrome hexavalent comme constituant principal. Elle permet de former des couches complexes d’oxydes et de sels de chrome sur plusieurs métaux, dont l’aluminium.

Dans le cas de l’aluminium, la chromatation vise généralement à augmenter l’adhérence des peintures appliquées ainsi que la résistance à la corrosion sous les peintures.

# Diapositive 55

Les couches de conversion chimique formées sur l’aluminium ne peuvent pas être comparées aux couches anodisées en termes de dureté et de protection contre la corrosion. Cependant ces couches peuvent améliorer légèrement ou modérément certaines propriétés (résistance à la corrosion, usure, etc.) et convenir parfaitement à des applications spécifiques (applications décoratives dans des milieux intérieurs, offrir une résistance à la corrosion temporaire, agir comme sous-couche pour l’application de peintures, etc.). Dans tous les cas, les traitements de conversion chimique se caractérisent par leur simplicité, car les réactifs impliqués peuvent être appliqués par plusieurs façons comme l’immersion, la pulvérisation, à l’ide d’un pinceau, d’un torchon, ou toute autre méthode de mouillage. Ceci offre un avantage au niveau des coûts d’opération comparé aux procédés électrolytiques.

# Diapositive 56

Les revêtements organiques sont composés de trois éléments principaux : (1) le liant (ou résine), (2) le solvant et (3) les matières pulvérulentes (pigments et les charges).

Le solvant est un produit volatil servant à faciliter l'application du revêtement et dont la majeure partie s'évapore complètement suite au séchage. Les pigments sont des substances d'origine minérale ou organique insolubles dans le milieu de suspension : certains servent à la coloration, d'autres assurent une protection contre la corrosion (inhibiteurs de corrosion). Les charges utilisées dans les revêtements organiques sont très variées et se destinent à des applications spécifiques. Elles peuvent apporter certaines propriétés supplémentaires aux peintures comme, par exemple, la résistance à la chaleur, ou l'isolation électrique (verre, mica) ou augmenter la masse et le volume des revêtements.

Généralement, plus d'une couche de peinture est appliquée, soit deux ou trois, pour d'où la désignation de « système de peintures ».

La couche primaire doit présenter de bonnes qualités d'adhérence au substrat et d'inhibition à la corrosion. Les pigments utilisés sont : poudre de zinc, chromate de zinc, chromate de baryum, de strontium. La résine communément utilisée est l’époxy.

La couche intermédiaire contient habituellement des pigments assurant l'étanchéité et une bonne tenue mécanique du film, comme les silicates d’aluminium, de magnésium, de potassium-aluminium, sulfates de baryum. Les résines communément utilisées sont l’époxy, acrylique, phénolique. Enfin, la couche supérieure constitue une barrière environnementale, et offre une résistance aux produits chimiques, à l'eau, UV, etc, une résistance à l’usure/ abrasion en plus d’assurer un aspect esthétique. Les pigments utilisés sont : silicates de potassium-aluminium, sulfates de baryum, oxyde d’aluminium, pigments de couleur. Les résines communément utilisées sont le polyuréthane, acrylique, alkyde, phénolique, polyester.

# Diapositive 57

Un inhibiteur de corrosion est une substance chimique, qui, lorsqu'ajouté en faible concentration, provoque une diminution sensible de la réaction entre le métal et l'environnement.

Les principaux champs d’application des inhibiteurs de corrosion sont :

1. Eaux naturelles, eaux d’alimentation et eaux de refroidissement. Pour les eaux potables, les possibilités sont limitées au carbonate de calcium, silicates, polyphosphates et sels de zinc. Les polyphosphates sont utilisés comme inhibiteurs pour l'eau de refroidissement dans les moteurs à combustion interne;
2. Solutions acides de décapage afin que l’acide de décapage ne s’attaque directement au métal;
3. Milieux de production et de raffinage du pétrole, surtout pour la protection de la surface interne des canalisations servant au transport de l'essence ou autres produits pétroliers.

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés selon qu'ils soient d'action anodique, cathodique ou mixte. Les inhibiteurs d’action anodique sont des anions qui migrent vers les sites anodiques et, généralement avec l'aide de l'oxygène, passivent ces surfaces. Les inhibiteurs d’action cathodique sont des cations : ils migrent donc vers les sites cathodiques où ils se précipitent chimiquement ou électrochimiquement en isolant la surface métallique. Enfin, les inhibiteurs d’action mixte sont adsorbés sur toute la surface et retardent les réactions anodique et cathodique.