

GROUPE CSA™

RECHERCHE SUR LES NORMES

La corrosion galvanique dans les ponts en acier et en aluminium

novembre 2022

Auteurs

Jieying Zhang, Ph.D., Ing., Conseil national de recherches Canada

Nafiseh Ebrahimi, Ph.D., Ing., Conseil national de recherches Canada

Comité consultatif

Kris Mermigas, **M. Sc. A., Ing.,** Ministère des Transports de l'Ontario

Paul King, **M.Sc., Ing.,** Rapid-Span Group

Scott Walbridge, **Ph. D., Ing.,** Université de Waterloo

Sylvie Boulanger, **Ph.D.,** MTB Consulting

Jennifer Teague, **Ph. D.,** Groupe CSA

Mark Braiter, **B.Ing.,** MBA, Groupe CSA

Remerciements

Les auteurs saluent le travail d'équipe du Centre de recherche en construction du CNRC, en particulier la collaboration de D^{re} Olga Naboo et de B. Baldock dans le cadre des travaux de recherches. Les auteurs remercient le Surface Science Centre de l'Université Western pour le soutien apporté dans le cadre des travaux de recherches, en particulier Katarina Albrechtas pour les expériences réalisées, ainsi que le Dr Sridhar Ramamurthy et le Dr Jamie Noel pour les échanges techniques. Les auteurs remercient également Éric Lévesque de Canam Ponts Canada Inc. pour avoir fourni des matériaux, de même qu'Adam Macdonald du MTO et AMG Metals Inc. pour avoir fourni des plaques d'aluminium.

Soutien financier

Cette recherche a été soutenue en partie par l'Initiative sur l'environnement bâti résilient aux changements climatiques (IEBRCC) du CNRC, financée par Infrastructure Canada.

Clause de non-responsabilité

Ce travail a été réalisé par le Conseil national de recherches Canada qui en est le propriétaire. Elle vise à fournir des renseignements de nature générale sur le sujet traité. Les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs. Le Conseil national de recherches Canada et l'Association canadienne de normalisation ne sauraient être responsables d'aucune perte ni d'aucun dommage pouvant résulter de votre utilisation du contenu de cette publication.

Ce rapport ne peut être reproduit, en tout ou en partie, sans le consentement écrit du Conseil national de recherches Canada.

Droit d'auteur

©Sa Majesté le Roi du chef du Canada, tel que représenté par le Conseil national de recherches Canada.

Table des matières

Sommaire 5

1 Introduction 7

1.1 Coût de la corrosion des ponts routiers 7

1.2 Corrosion galvanique des ponts en acier 8

2 Revue de la corrosion galvanique 8

2.1 Mécanisme de corrosion galvanique 8

2.1.1 Tendance et vitesse de corrosion galvanique 9

2.1.2 Série de corrosion galvanique et facteurs dominants 10

2.2 Corrosion galvanique dans diverses industries 11

2.2.1 Transport 12

2.2.2 Tuyauterie 13

2.2.3 Électronique, piles et implants biomédicaux 14

2.3 La corrosion galvanique et sa prévention dans la conception des ponts 14

2.3.1 Problèmes de corrosion galvanique et études actuelles 14

2.3.2 Guide Specification for Service Design of Highway Bridges de l'AASHTO 15

2.3.3 CSA S6:19, Code canadien sur le calcul des ponts routiers 15

2.3.4 Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridges de NASEM 16

2.3.5 Steel Bridge Design Handbook for Corrosion Protection of Steel Bridges de la FHWA 16

2.3.6 Guide de conception européen relatif à l'utilisation de l'acier résistant aux intempéries dans la construction de ponts 17

2.4 Résumé 18

3 Méthodes 20

3.1 La corrosion et les cellules électrochimiques 20

3.2 Mesure du potentiel en circuit ouvert 21

3.3 Mesure de la résistance à la polarisation linéaire 21

3.4 Expérience de polarisation potentiodynamique 21

3.5 Mesure du courant de corrosion galvanique 22

3.6 Analyse de la microstructure par microscopie 23

3.7 Essai au brouillard salin 23

4 Résultats 24
4.1 Potentiel en circuit ouvert 24
4.1.1 OCP et effet de la concentration de NaCl : Comparaison entre les alliages 24
4.1.2 OCP dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids 28
4.1.3 Rondelles en acier inoxydable 28
4.1.4 Formation de patine sur l'acier résistant aux intempéries 29
4.2 Courant de corrosion galvanique 30
4.2.1 Validation de la configuration des mesures 30
4.2.2 Courant galvanique du couplage entre alliage structurel et boulon 31
4.3 Renseignements supplémentaires sur la corrosion et observation visuelle 33
4.3.1 LPR pour la résistance à la corrosion 33
4.3.2 PDP pour la tendance à la corrosion par piqûres 34
4.3.3 Analyse par microscopie 36
4.3.4 Plaques boulonnées à l'essai au brouillard salin 37

5 Discussion 39
5.1 Élaboration de la série galvanique et tendance à la corrosion 39
5.2 Évaluation de la vitesse de corrosion galvanique 42
5.3 Processus d'évaluation de la corrosion galvanique 44
5.4 Atténuation des risques de corrosion galvanique 47
5.5 Application de cette étude 47

6 Résumé et besoins de futures recherches 48
6.1 Résumé du développement 48
6.2 Application et besoins futurs 50

Références 52

Annexe A – Formes de dommages causés par la corrosion 58

Annexe B – Graphiques de l'OCP dans diverses concentrations de sel 60

Annexe C – Graphiques de la PDP dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids 68

Sommaire

La corrosion galvanique est l'un des problèmes de corrosion les plus courants des temps modernes, où des métaux et des alliages différents sont couramment utilisés dans les applications industrielles. Ce rapport traite de la corrosion galvanique dans les applications de pont en se fondant sur une analyse documentaire, une étude expérimentale complète, une analyse avancée ainsi que l'élaboration d'un outil d'évaluation, d'une procédure directrice et d'un ensemble de critères relatifs à la corrosion galvanique. Le rapport vise à fournir des renseignements et des ressources aux ingénieurs de ponts dans le but de favoriser une meilleure évaluation de la corrosion galvanique dans la conception et la gestion des ponts.

Une série galvanique a été mise au point qui permet d'effectuer une collecte systématique des tendances en matière de corrosion des alliages de pont et d'établir des comparaisons entre ces tendances. Cette série a démontré qu'une forte tendance à la corrosion galvanique mérite une attention particulière, mais également qu'une tendance en apparence faible serait susceptible d'entraîner une corrosion galvanique importante entre deux métaux qui se corrodent activement. Ces résultats appuient la nécessité de recourir à une méthode d'évaluation plus poussée : une mesure de la vitesse de corrosion galvanique qui évalue la rapidité à laquelle l'alliage anodique perd sa masse. Un ensemble de critères permettant d'interpréter l'ampleur du risque de corrosion galvanique a été mis au point en prenant en considération à la fois la vitesse de corrosion galvanique et un nouveau concept de rapport qui tient compte de la vitesse de corrosion galvanique dans le contexte d'une vitesse de corrosion générale (Gal/Corr), ce qui assure une évaluation uniforme des alliages à l'étude dans le projet. Ces avancées ont permis par la suite de créer une procédure directrice en trois étapes pour évaluer la corrosion galvanique.

La conception et les résultats expérimentaux ont fourni le fondement d'une étude portant sur 11 alliages de pont faisant appel à des techniques électrochimiques quantitatives, à une analyse microstructurelle et à une inspection visuelle des échantillons testés dans une enceinte de brouillard salin. Les résultats soutiennent également des stratégies d'atténuation fondées sur le mécanisme de corrosion en contrant les conditions nécessaires à la corrosion galvanique et en tenant compte des facteurs clés qui influent sur son ampleur; c'est-à-dire, la façon dont l'assemblage et la configuration influencent le rapport de surface de cathode/anode et la façon dont un environnement influe sur la corrosivité. Une autre constatation importante est que la vitesse de corrosion galvanique n'est pas seulement régie par la force motrice (la différence de potentiel), mais aussi par les comportements de corrosion individuels des métaux. Deux métaux qui se corrodent activement (p. ex., acier résistant aux intempéries et boulon en acier au carbone dans un environnement chargé de chlorures), malgré des potentiels de corrosion similaires, produisent une vitesse de corrosion galvanique beaucoup plus élevée que deux métaux moins actifs aux potentiels de corrosion très différents (p. ex., aluminium et boulon en acier inoxydable).

Une comparaison efficace de la résistance à la corrosion galvanique des alliages de pont couplés indique clairement que la corrosion galvanique dépend de la configuration des matériaux et de l'environnement. Par exemple, la vitesse de corrosion galvanique du boulon en acier au carbone A325 type I couplé à de l'acier résistant aux intempéries était élevée dans les environnements chargés de chlorures; toutefois, cette vitesse devrait être faible dans un environnement sans chlorure. À l'avenir, il est recommandé de mieux comprendre la performance

de corrosion des métaux et des alliages des ponts et de l'examiner systématiquement de la même manière que leurs propriétés mécaniques. Cela s'applique particulièrement aux ponts en aluminium. Bien que le potentiel de corrosion de l'aluminium indique une forte tendance à la corrosion, sa vitesse de corrosion réelle aura tendance à être faible grâce à la protection offerte par les produits de corrosion des oxydes d'aluminium. Il serait également avantageux d'établir des informations sur les propriétés de corrosion individuelles des alliages de pont dans le cadre de la caractérisation complète des alliages, y compris leurs interactions avec les conditions d'exposition, en particulier l'acier résistant aux intempéries, dont le comportement de corrosion dans les environnements chargé de chlorures n'est pas entièrement compris. Il est également nécessaire d'approfondir les critères d'évaluation des risques pour interpréter la corrosion galvanique. Cette étude constitue un premier travail fondé sur les données existantes, une étude expérimentale et un concept récemment élaboré du ratio Gal/Corr qui a placé l'évaluation de la corrosion galvanique dans une nouvelle perspective et qui, espérons-le, suscitera l'intérêt et favorisera d'autres discussions et recherches.



« Un bulletin de rendement des infrastructures canadiennes de 2019 indique que 40 % des ponts sont dans un état passable ou mauvais, principalement en raison de dommages causés par la corrosion »

1 Introduction

La corrosion galvanique, une forme fondamentale de corrosion, est l'un des problèmes de corrosion les plus courants des temps modernes. Des métaux et des alliages différents sont couramment utilisés conjointement dans les applications industrielles, ce qui a permis d'acquérir une connaissance approfondie de nombreux alliages industriels, comme ceux utilisés dans les secteurs de l'aérospatiale et de l'automobile. Dans le milieu de la construction des ponts, les principes de la corrosion galvanique ont été appliqués, mais seulement de façon empirique et implicite en raison d'un manque d'information systématique, de connaissances, d'outils, de guides, de normes, et de codes d'atténuation et de protection, en particulier pour les boulons à haute résistance qui transfèrent les charges critiques des poutres de pont en acier et en aluminium. Il est donc nécessaire d'améliorer la durabilité des ponts métalliques en les protégeant de la corrosion galvanique.

1.1 Coût de la corrosion des ponts routiers

L'étude commanditée en 2002 par la Federal Highway Administration (FHWA) des États-Unis, *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States,* est un document de référence largement cité et influent sur les coûts et le contrôle de la corrosion [1]. L'étude révèle que le coût direct de la corrosion se chiffre à environ 276 milliards de dollars par an, soit l'équivalent d'environ 3,1 % du produit intérieur brut (PIB) des États-Unis. Une étude de suivi réalisée par la National Association of corrosion Engineers (NACE International[1]) a relevé le coût global à 3,4 % du PIB d'un pays [2]. Le coût total de la corrosion inclut le coût direct annuel de la corrosion des ponts routiers aux États-Unis, lequel est estimé à 8,3 milliards de dollars, dont 3,8 milliards de dollars servent à remplacer les ponts structurellement déficients sur dix ans. Le coût direct annuel total de la corrosion du Canada est estimé à 51,9 milliards de dollars, soit 2,98 % du PIB du Canada en 2019 [3]. Le profil d'âge des ponts aux États-Unis et au Canada est similaire, mais le Canada possède un environnement plus corrosif en raison de l'utilisation intensive de sels de déglaçage sur les routes.

Un Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes de 2019 indique que 40 % des ponts sont dans un état passable ou mauvais, principalement en raison de dommages causés par la corrosion [4]. La corrosion atmosphérique est la principale cause des problèmes de durabilité des ponts en acier. Cependant, dans toutes les structures techniques modernes qui utilisent souvent des matériaux mixtes, d'autres sources de risque de corrosion viennent considérablement réduire cette durée de vie.

La conception actuelle de la protection contre la corrosion des ponts au Canada est dictée par la CSA S6:19, *Code canadien sur le calcul des ponts routiers* (CCCPR) [5]. Le CCCPR fournit une description générale des classes d'exposition utilisées pour guider la protection contre la corrosion (c.-à-d., utiliser un système de revêtement/métallisation ou de l'acier résistant aux intempéries). Toutefois, le code n'inclut pas de fonction prédictive de la performance de la corrosion au fil du temps et donc, n'apporte pas d'informations sur d'autres mesures de protection contre la corrosion, comme l'utilisation d'une surépaisseur pour compenser la perte par corrosion à long terme.

1 NACE International fait désormais partie de l'Association for Materials Protection and performance (AMPP).

1.2 Corrosion galvanique des ponts en acier

Bien que la corrosion atmosphérique ait été étudiée à l'échelle mondiale et que les connaissances qui en résultent aient été bien mises en œuvre dans la conception des ponts en acier, d'autres formes de corrosion peuvent soulever des problèmes de durabilité et causer des dommages aux composants des ponts en acier. Dans la construction d'un pont en acier, comme dans d'autres structures d'ingénierie modernes qui font généralement appel à des métaux mixtes, le couplage de métaux dissemblables présente un risque de corrosion galvanique, sous réserve que trois conditions soient remplies :

- les métaux sont en contact électrique;
- les métaux sont exposés au même électrolyte; et
- leur différence de potentiel de corrosion est supérieure à 50 mV [6].

La corrosion galvanique est particulièrement préoccupante dans le cas des poutres de pont et des fixations en acier. Après l'installation, une poutre de pont en acier et ses boulons de raccordement sont en contact électrique direct et exposés au même électrolyte résultant de la pluie, de la fonte de glace et de la neige ou d'une mince pellicule d'eau provenant de la condensation d'air. Par conséquent, les poutres de pont en acier et les boulons de raccordement de différents métaux forment parfois une cellule de corrosion galvanique où le composant ayant un potentiel de corrosion plus faible (négatif) devient l'anode et se corrode préférentiellement [7]. Les vis à haute résistance subissent une tension, un cisaillement ou les deux, et une prétension peut être présente selon le type et le rôle du raccordement [8]. La protection des boulons contre la corrosion et la perte de section transversale constitue une partie importante de la conception des boulons à haute résistance, étant donné leur diamètre relativement petit et leur fonction portante critique.

2 Revue de la corrosion galvanique

Cette section présente une introduction mécaniste sur la corrosion galvanique, une revue de son étude et de sa prévention dans diverses industries, ainsi que l'état actuel de la pratique dans la conception de la durabilité des ponts, y compris ce qui est prévu dans les codes, les spécifications et les lignes directrices en matière de prévention. Cette section vise à répondre aux questions suivantes :

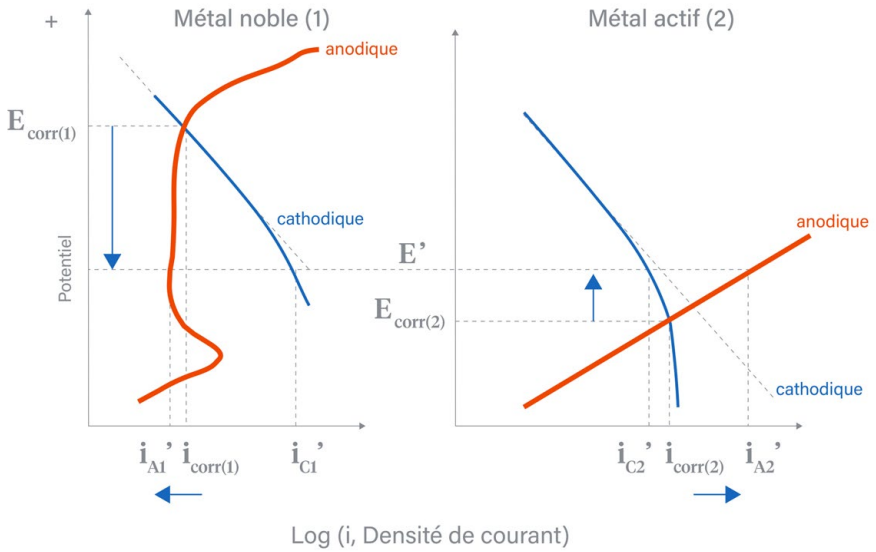
1. Quel mécanisme de corrosion galvanique nécessite d'être pris en compte par les outils/méthodes/guides afin de déterminer les risques?
2. Quels sont les principaux facteurs de la corrosion galvanique dont il faut tenir compte dans l'élaboration des méthodes de prévention?
3. Comment les divers secteurs étudient-ils et gèrent-ils le risque de corrosion galvanique?
4. Quel est l'état de la gestion des risques de corrosion galvanique dans le milieu de la conception des ponts?
5. Que faut-il faire pour éviter le risque de corrosion galvanique dans les assemblages de ponts en acier et en aluminium?

2.1 Mécanisme de corrosion galvanique

La corrosion galvanique, également appelée « corrosion par contact » ou « corrosion bimétallique », nécessite trois composants [7]. Pour fabriquer une cellule de corrosion galvanique, un métal/alliage et un métal/alliage moins noble[2] sont raccordés et immergés dans un électrolyte conducteur comme une solution saline. Il se produit un courant qui circule entre les deux métaux, ce qui accélère la dissolution/corrosion du métal moins noble, tandis que le métal plus noble est protégé. Selon l'application, une cellule galvanique a la capacité d'induire un courant électrique pour une batterie, d'offrir une protection cathodique pour un métal plus noble ou encore, de causer plus de dommages de corrosion à un métal moins noble. Dans ce rapport, la

2 La noblesse d'un métal est liée à sa résistance à la corrosion. Ainsi, plus un métal est noble, plus il résiste à la corrosion.

Figure 1 : Illustration d'une cellule de corrosion galvanique formée entre un métal noble (1) et un métal actif (2) : i = densité de courant, A = réaction anodique et C = réaction cathodique. Reproduit avec la permission du Conseil national de recherches Canada.



corrosion galvanique fait référence aux dommages causés par la corrosion galvanique. Le rapport porte sur la compréhension, l'évaluation et la prévention de la corrosion galvanique dans les ponts en acier et en aluminium.

2.1.1 Tendance et vitesse de corrosion galvanique

La force motrice de la corrosion galvanique est la différence du potentiel de corrosion libre (E_{corr}) entre deux métaux. La figure 1 illustre le fonctionnement de cette force motrice dans les courbes de polarisation lorsque les deux métaux sont reliés électriquement (ou mis en contact direct), illustrant la relation entre le potentiel et le courant de corrosion pour les réactions d'oxydation et de réduction. En commençant par leur potentiel de corrosion libre respectif (E_{corr}) et leur vitesse de corrosion (i_{corr}), le métal noble (électrode 1) présente un potentiel beaucoup plus positif ($E_{corr(1)}$) que celui du métal actif ($E_{corr(2)}$) (électrode 2). Lorsqu'ils sont reliés, ils se dirigent vers un potentiel commun (E').

Les deux métaux sont polarisés lorsque le potentiel est modifié; le métal actif (2) est polarisé anodiquement à un potentiel plus positif E' que son E_{corr} original; et le métal noble (1) est polarisé cathodiquement à un E plus négatif que son E_{corr}. Leurs changements de potentiels entraînent ensuite des changements dans les taux d'oxydation et de réaction de réduction sur les deux métaux. Par conséquent, le taux de réaction anodique (dissolution du métal) sur le métal actif (2) augmente de $i_{corr(2)}$ (le courant de corrosion avant le couplage) à i_{A2}', et son taux de réaction cathodique est réduit de $i_{corr(2)}$ à i_{C2}'. Le contraire se produit dans le métal noble; sa dissolution anodique est réduite de $i_{corr(1)}$ à i_{A1}', et le taux de réaction cathodique augmente de $i_{corr(1)}$ à i_{C1}'.

Le système à deux électrodes aura un nouvel équilibre à E', et les courants de ces réactions suivront la conservation de la masse :

$$i_{C1}' + i_{C2}' = i_{A1}' + i_{A2}' \qquad (1)$$

Dans ce processus, les électrons sont transférés d'une électrode (anode) à l'autre (cathode), produisant un flux électrique de courant de corrosion galvanique i_{couple} :

$$i_{couple} = i_{C1}' - i_{A1}' = i_{A2}' - i_{C2}' \qquad (2)$$

La représentation ci-dessus dans les équations 1 et 2 suppose que la résistance aux électrolytes est négligeable, ce qui est souvent le cas de la corrosion galvanique entre l'acier de pont et ses fixations, ou entre deux composants métalliques immergés dans l'eau de pluie ou exposés à un film de condensation contenant des contaminants. Dans un tel cas, les deux métaux atteindront le même potentiel E'.

La corrosion galvanique coexiste également avec d'autres formes de corrosion (voir l'annexe A), qu'il est possible d'appeler « corrosion générale ». L'équation 2 et la figure 1 montrent trois taux de dissolution du métal anodique avant et après la formation de la cellule de corrosion galvanique :

- avant la corrosion galvanique, la vitesse de corrosion générale est i_{corr};
- avec la corrosion galvanique, la vitesse de corrosion galvanique est de type icouple, mesurable de façon externe;
- avec la corrosion galvanique, la vitesse de corrosion totale du métal actif est i_{A2}, ce qui est plus que $i_{corr(2)}$, ce qui indique une accélération de la corrosion par corrosion galvanique. Cette valeur sera légèrement ou beaucoup plus élevée que i_{couple}, selon le degré de polarisation du métal par rapport à son état de corrosion d'origine.

De manière générale, une mesure du potentiel de corrosion permet d'évaluer la tendance de la corrosion galvanique, tandis qu'une mesure du courant de corrosion galvanique représente une méthode quantitative qui permet d'évaluer la vitesse de corrosion galvanique. Ces deux méthodes sont fondamentales pour étudier la corrosion galvanique et évaluer son risque dans de nombreux domaines d'ingénierie. De plus, la corrosion galvanique coexiste avec d'autres formes de corrosion, ce qui souligne la nécessité de bien comprendre le risque de corrosion au-delà de la corrosion galvanique des structures et des composants critiques.

2.1.2 Série de corrosion galvanique et facteurs dominants

Une série galvanique est un classement des métaux et des alliages en fonction de leur potentiel libre de corrosion réel et mesuré dans un environnement donné [9]. Une série galvanique est généralement présentée pour un environnement d'eau de mer dans les manuels d'ingénierie de la corrosion. Un exemple de série galvanique en eau de mer est présenté à la figure 2, qui comprend des métaux et des alliages de construction courants. Les relations de la série galvanique ont le potentiel d'être un guide très utile pour choisir des métaux à assembler. À l'aide de la série, le choix des matériaux s'effectue de manière à privilégier les métaux ayant une tendance minimale à subir une réaction galvanique.

En général, les métaux situés les plus loin dans la série sont plus susceptibles de subir une corrosion galvanique et donc, de présenter une vitesse de corrosion élevée s'ils sont combinés.

En plus de la différence de potentiel, de nombreux facteurs ont une incidence sur l'ampleur de la corrosion galvanique entre deux métaux couplés [9] :

Potentiel de corrosion libre

La valeur E_{corr} des métaux couplés détermine la polarité intrinsèque d'un couple galvanique (l'anode et la cathode). Néanmoins, l'ampleur de l'activité galvanique n'est pas toujours liée à la différence de E_{corr}. Par exemple, la corrosion galvanique du zinc (Zn) est plus élevée lorsque ce métal est couplé à l'acier que de nombreux autres alliages comme le nickel (Ni), le cuivre (Cu) et le titane (Ti), bien que la différence de potentiel entre le zinc et l'acier soit beaucoup moins grande qu'entre le zinc et le nickel, le cuivre ou le titane [11]. En matière de corrosion galvanique atmosphérique, d'autres facteurs comme la cinétique de réaction et la formation de produits de corrosion sont également essentiels pour déterminer la vitesse de corrosion galvanique. Lorsque la réaction cathodique est limitée par la diffusion d'oxygène, les vitesses différentes de

Figure 2 : Série galvanique fondée sur les données de LaQue [10]



corrosion galvanique d'une anode s'expliquent par les taux de diffusion de l'oxygène à travers les films d'oxyde. Lorsque la diffusion n'est pas le processus limitatif, la vitesse de corrosion galvanique est le produit des différences dans l'efficacité cathodique de la réduction de l'oxygène dans la couche d'oxyde sur la surface de la cathode [12].

Effet de la surface

L'effet de la surface de deux métaux couplés (souvent exprimé en tant que rapport de surface cathodique/anodique) sur la corrosion galvanique dépend du type de contrôle dans le système. Si le système galvanique est sous contrôle cathodique, la variation de la surface anodique aura peu d'effet sur la vitesse de corrosion totale, mais les changements de la surface cathodique auraient un impact significatif [9]. C'est le contraire quand le système est sous contrôle anodique [9]. La documentation indique que la corrosion galvanique du zinc est principalement sous contrôle cathodique [13].

Effet de l'état de la surface

La surface d'un métal en contact avec un électrolyte n'est généralement pas « nue », mais recouverte d'une couche de surface. Il s'agit parfois d'une couche d'adsorption, mais c'est plus souvent une pellicule solide [9]. Une pellicule de produit anticorrosion peut agir comme une barrière physique entre la surface métallique et l'environnement [9]. Les films d'oxyde présentent souvent un potentiel très différent de celui des métaux de base, et déterminent la position de l'électrode dans une série galvanique [9]. Certains matériaux en acier inoxydable, comme le SS316 de la série galvanique, présentent deux gammes distinctes de E_{corr}, avec des valeurs moins nobles provenant de la corrosion caverneuse qui se produit avec certaines surfaces et solutions.

Effet de la solution

Différents électrolytes ou solutions créent différents potentiels pour une surface métallique [9]. La conductivité de l'électrolyte est un facteur essentiel, car elle détermine la répartition de la corrosion galvanique sur la surface de l'anode. Lorsque la conductivité est élevée, comme dans l'eau de mer, la corrosion galvanique du métal anodique est répartie plus uniformément sur toute la surface [13].

Environnement atmosphérique

La corrosion galvanique se produit souvent lorsque les matériaux de construction et de structure sont exposés à des environnements atmosphériques intérieurs et extérieurs [9]. La corrosion galvanique dans des conditions atmosphériques est généralement limitée à une région étroite du métal de l'anode près de la jonction bimétallique, en raison de la haute résistance d'un électrolyte mince formé par la pluie et la condensation d'eau. Cependant, la corrosion galvanique est plus importante dans les environnements salins, comme dans une atmosphère marine ou sur des ponts au Canada où les sels de déglaçage sont fortement utilisés, en raison de la haute conductivité des électrolytes en présence de sels [9].

La corrosion galvanique s'avère parfois coûteuse. Si des matériaux susceptibles de former un couple galvanique sont utilisés, les dommages causés par la corrosion se produiront plus rapidement. Cependant, la corrosion galvanique est évitable, à condition de suivre certaines règles élémentaires qui permettront de limiter ou d'empêcher sa formation. Il est possible d'atténuer la corrosion galvanique comme suit :

- éviter le contact entre des matériaux qui présentent des différences de potentiel importantes;
- s'assurer que la surface de la cathode est plus petite que celle de l'anode;
- utiliser une protection cathodique telle que celle fournie par une anode sacrificielle comme le zinc; ou
- utiliser des revêtements qui empêchent les métaux d'entrer en contact électrique [14].

2.2 Corrosion galvanique dans diverses industries

L'utilisation généralisée de combinaisons de métaux dissemblables dans des applications industrielles modernes, y compris les automobiles, les avions, les bâtiments et les infrastructures, les pipelines, les composants électroniques, les batteries et les implants biomédicaux, ont fait de la corrosion galvanique un problème persistant et critique dans le domaine de l'ingénierie de la corrosion.

2.2.1 Transport

Les métaux tels que l'aluminium et le magnésium remplacent l'acier à faible teneur en carbone et la fonte dans les automobiles modernes, car l'utilisation de ces matériaux réduit considérablement le poids des véhicules, améliorant ainsi la consommation de carburant [15]-[18]. Les véhicules sont fabriqués à partir de matériaux métalliques variés, par exemple des blocs-moteurs et des pièces de suspension en aluminium, des carrosseries en acier et des poteaux de tableau de bord en aluminium [15]. Ce modèle en métal mixte est aussi souvent utilisé pour fabriquer des bateaux et des avions, où le titane, le cuivre, le laiton, l'acier inoxydable, l'acier au carbone et les alliages d'aluminium sont utilisés en combinaison, et donc exposés à un risque de corrosion galvanique [19]-[21].

La corrosion galvanique des alliages de magnésium couplés à d'autres alliages, comme l'acier, est particulièrement intéressante pour les industries de l'automobile et de l'aviation [22]-[25]. Leur faible densité est idéale pour la réduction de charge, et leurs propriétés mécaniques et électriques sont les principales raisons de leur utilisation à grande échelle. La corrosion galvanique est toutefois une préoccupation constante, car ces alliages sont couramment utilisés dans les assemblages avec des composants en acier tels que les fixations, malgré le faible potentiel électrique du magnésium dans la série de corrosion galvanique. Les alliages de magnésium se corrodent préférentiellement lorsqu'ils sont en contact électrique avec d'autres alliages comme l'acier.

Des études antérieures ont examiné les mécanismes de corrosion galvanique afin de déterminer les fixations appropriées pour les alliages de magnésium [22]. D'autres études, cependant, ont également été publiées sur la façon dont la microstructure et la composition des alliages sont en corrélation avec la tendance et la gravité de la corrosion galvanique [25]. Ces résultats donnent un aperçu du mécanisme de corrosion galvanique et, en particulier, de ce qu'il faut prendre en compte dans le développement des matériaux pour les applications de pont en acier.

Bien qu'il soit possible d'évaluer la corrosion galvanique à l'aide des principes de base et des propriétés corrosives des métaux couplés, des essais de corrosion galvanique sont nécessaires pour comprendre le risque in situ, lequel a le potentiel d'être supérieur aux estimations selon les caractéristiques non couplées des métaux [25]. Une méthode d'essai à la fois rapide et fiable est également essentielle, car l'alliage cathodique a la capacité d'influencer la corrosion galvanique de l'alliage anodique [25]. Des expériences ont montré que l'acier était un mauvais choix de cathode pour le magnésium, tandis que l'aluminium était le moins dommageable, et qu'une plus grande distance entre la cathode et l'anode réduisait la vitesse de corrosion galvanique [23]. Cela signifie que la surface de l'acier de construction qui est plus éloignée des fixations peut moins contribuer à la corrosion galvanique que le matériau entourant immédiatement les fixations.

L'essai de corrosion galvanique est un élément important dans la conception d'un pont en acier. Toutefois, des outils et des méthodes perfectionnés permettent d'améliorer la prédiction de la performance des matériaux pour les couples galvaniques et de limiter les dommages causés par la corrosion dans des conditions atmosphériques [26]. Les données obtenues lors d'essais en laboratoire ont été utilisées comme guide pour sélectionner des matériaux résistants à la corrosion, et des recherches ont été menées sur l'utilisation de techniques électrochimiques pour déterminer la série galvanique propre aux matériaux entrant dans la fabrication de différents types de voitures, d'avions et de bateaux. Parmi les techniques d'étude employées, citons la modélisation computationnelle [20] et les essais au brouillard salin [27].

Bien que le fait d'utiliser plusieurs matériaux dans la conception et la construction des véhicules crée un risque de corrosion galvanique, c'est une méthode de plus en plus utilisée avec succès. Ce succès s'explique par le recours à des méthodes de prévention de la corrosion galvanique visant à limiter la corrosion inutile. Les méthodes de prévention de la corrosion comprennent l'utilisation de revêtements électroniques, de revêtements organiques ou d'autres types de pellicules pour recouvrir les matériaux de carrosserie, ce qui les empêche d'entrer en contact électrique



« Alors que la corrosion galvanique peut être évaluée à partir des principes de base et des propriétés de corrosion des métaux couplés, des tests de corrosion galvanique sont nécessaires pour comprendre le risque in situ, qui peut être plus élevé que ce qui est estimé sur la base des caractéristiques non couplées des métaux. »

avec les métaux dissemblables auxquels ils sont fixés [28]-[31]. Une autre technique de prévention de la corrosion galvanique couramment appliquée dans les bateaux est l'utilisation d'anodes sacrificielles, qui sont généralement fabriquées à partir de zinc, d'aluminium ou de nickel [19]. Une technique électrochimique qui permet de prévenir la corrosion galvanique est l'anodisation des matériaux pour former un film d'oxyde isolant. Ce film agit comme une barrière pour empêcher la formation d'un couple galvanique [32].

2.2.2 Tuyauteries

Les dommages de la corrosion causés par des métaux dissemblables en contact électrique sont un problème omniprésent dans les systèmes de tuyauterie, aggravé par les conditions extrêmes auxquelles les tuyaux sont souvent exposés, comme les changements drastiques du pH de la solution, les eaux en mouvement ou les eaux souterraines à haute salinité [33], [34]. En fait, la corrosion galvanique est à la fois l'une des principales formes de corrosion responsable de la dégradation des tuyaux et une cause importante de substances nuisibles ou toxiques comme le fer ou le plomb[3] entrant dans les sources d'eau potable [35]-[39].

Le risque de libération de plomb dans l'alimentation en eau n'est pas le seul problème que cause la corrosion galvanique des systèmes de tuyauterie. La corrosion galvanique a le potentiel de causer des catastrophes environnementales comme des déversements de déchets humains et d'huile [40]-[42]. Les dommages de la corrosion touchent aussi les systèmes de tuyauterie intérieurs. Dans un cas examiné par Shahin et al., un tuyau de borne d'incendie s'est avéré défaillant à deux reprises en raison de la corrosion galvanique [43]. Il arrive même de constater des problèmes de corrosion galvanique entre les tuyaux métalliques et les couches d'oxyde des tuyaux. Song et coll. ont étudié le couplage galvanique entre les tuyaux en acier au carbone et la magnétite [44]. Normalement, la magnétite est un film d'oxyde protecteur, mais les auteurs ont constaté que la vitesse de corrosion des tuyaux augmentait en raison des interactions de couplage entre la magnétite et l'acier au carbone [44].

Il existe plusieurs méthodes de prévention et d'autres sont en cours d'élaboration, dont le but est d'améliorer la sécurité et la longévité de ces systèmes de tuyaux multimétalliques. L'une de ces méthodes est un système inhibiteur à base de silicate. Cette méthode consiste à ajouter une couche de silicone sur le tuyau pour l'empêcher d'entrer en contact électrique avec d'autres métaux dans le système [39]. Les autres techniques de prévention et de détection de la corrosion des tuyaux comprennent l'inspection et le remplacement périodiques des systèmes de tuyauterie, la protection cathodique [45] et les revêtements

3 Bien que les tuyaux de plomb soient interdits de nos jours, il était courant d'installer des tuyaux de cuivre avec des raccords de plomb lors du remplacement des anciens tuyaux de plomb, entraînant une corrosion galvanique subséquente sur le site du raccordement[35], [36].

protecteurs [46]. Toutes ces techniques ont fait l'objet de nombreux essais et démontré leur efficacité contre la corrosion galvanique. Ces méthodes de prévention de la corrosion permettent de procéder à une utilisation sélective de systèmes de tuyauterie mixte tout en limitant les réparations coûteuses ou les défaillances dangereuses [46].

2.2.3 Électronique, piles et implants biomédicaux

Les composants électroniques et les batteries au lithium peuvent avoir une durée de vie réduite en raison de la corrosion galvanique. Souvent, les feuilles de lithium ultraminces sont préparées sur un substrat de cuivre, et une zone de contact métal-métal est générée. La combinaison de ces deux métaux en présence d'un électrolyte a le potentiel d'entraîner une corrosion galvanique [47], [48]. Les différentes façons d'éviter la corrosion galvanique dans les batteries et les composants électroniques comprennent l'utilisation d'inhibiteurs et de revêtements de corrosion organiques et non organiques qui préviennent le contact électrique entre les métaux dissemblables [49].

La corrosion galvanique est également un problème pour les fabricants d'implants médicaux, lesquels renferment généralement des composants mixtes en acier inoxydable, en nickel et en alliages de titane. De nombreuses études se sont concentrées sur la façon dont les milieux à l'intérieur du corps humain influent sur le couplage de différents alliages d'implant. Par exemple, les chercheurs ont examiné la corrosion des alliages de titane et de nickel dans les implants dentaires à l'aide de techniques électrochimiques dans des environnements qui simulent les conditions d'exposition pour aider à prévenir les défaillances prématurées [50]-[52].

Des études de cas ont également été publiées sur la défaillance prématurée des implants médicaux susceptibles de se produire en raison de la corrosion galvanique [53], [54]. Par exemple, dans un cas, un remplacement du genou a échoué et nécessité un remplacement après seulement sept ans en raison de la corrosion galvanique d'une vis en titane [53]. Ces études démontrent que la corrosion galvanique entre le titane et l'acier inoxydable est un réel problème pour les implants médicaux. Il est possible de recourir à des techniques d'analyse électrochimique et de surface pour observer les processus de corrosion entre différents types de métaux utilisés dans les implants. C'est une approche qui permet de déterminer le risque de défaillance associé à la corrosion galvanique lorsque les métaux sont utilisés ensemble.

2.3 La corrosion galvanique et sa prévention dans la conception des ponts

2.3.1 Problèmes de corrosion galvanique et études actuelles

La corrosion dans les assemblages de pont en acier et en aluminium est un problème à la fois fréquent et complexe. Dans la conception des composants de pont, la corrosion est souvent prise en compte en fonction de l'environnement d'exposition. Cet environnement peut être du béton (pH de 12,5 et plus), l'atmosphère, ou un environnement enterré ou immergé en condition de marée ou en milieu marin [55]. Compte tenu de cela, la principale approche de protection utilisée consiste à isoler les métaux de pont et les alliages de leurs environnements, par exemple, en utilisant un revêtement capable d'éliminer l'une des conditions nécessaires à la corrosion. Malgré tout, dans de nombreuses situations, l'efficacité de cette stratégie dépend de l'applicabilité, du contrôle de la qualité et du taux de dégradation du revêtement. Il est important de bien comprendre les conditions nécessaires des différentes formes de corrosion et d'élaborer des stratégies de protection pour les éliminer. Fontana et Green ont effectué une évaluation préliminaire des mécanismes de corrosion dans les applications de pont (annexe A), la corrosion galvanique étant l'une des formes de corrosion à l'étude [55].

Comme nous l'avons mentionné à la section 2.1, la corrosion galvanique a la capacité de se produire dans toutes les conditions d'exposition qui font intervenir un électrolyte conducteur. Dans les applications de pont, la corrosion galvanique la plus reconnue s'observe entre les poutres en acier et leurs fixations, lesquelles sont souvent fabriquées au moyen d'alliages différents, ou entre deux plaques métalliques dissemblables en contact direct. La corrosion galvanique est fréquente sur les ponts en acier où des composants structuraux secondaires, comme les mains courantes, les poteaux

d'éclairage en aluminium ou les conduits électriques, sont en contact avec l'acier, ainsi que sur l'acier où la calamine est exposée [56].

Dans le contexte de la corrosion galvanique, c'est souvent l'expérience technique qui dicte le choix des matériaux de boulonnage, en partie parce qu'il n'existe pas de lignes directrices fondées sur le mécanisme de la corrosion galvanique pour la conception des ponts en acier ou en aluminium. De récentes études sur la corrosion galvanique des ponts en acier ont été entreprises dans le cadre de la construction de ponts en acier inoxydable ASTM A1010 [57]-[62]. La figure 3 illustre une cellule de corrosion galvanique formée entre une plaque d'acier et un boulon, le boulon servant d'anode et la plaque d'acier servant de cathode.

Une étude antérieure [60] a démontré la nécessité de mesurer directement le courant de corrosion galvanique pour comprendre la vitesse de corrosion galvanique entre deux métaux et donc, le taux de perte de masse de l'anode. D'autres études ont eu recours à des méthodes au brouillard salin pour démontrer qu'en l'absence de méthodes expérimentales, il est difficile d'identifier le risque de corrosion avec certains types de métaux [59].

2.3.2 Guide Specification for Service Design of Highway Bridges de l'AASHTO

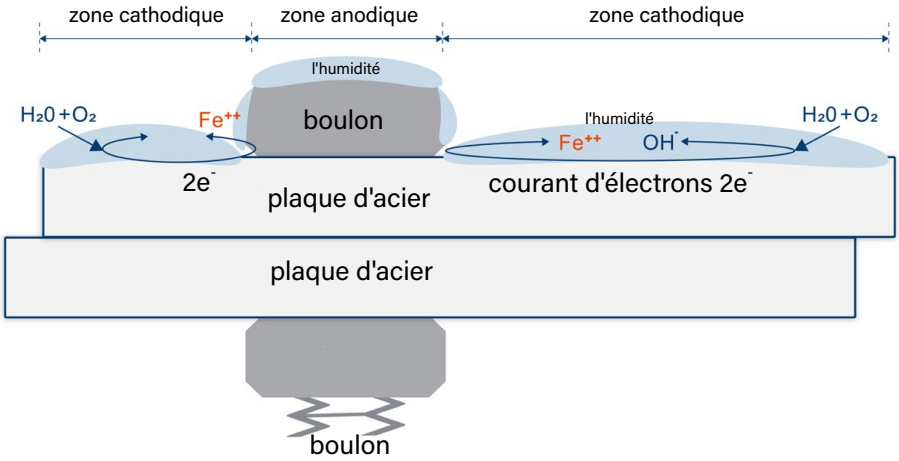
Le *Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridges* de l'American Association of State Highway and Transportation Official's (AASHTO) cite la protection contre la corrosion des ponts en acier comme étant la mesure de précaution la plus critique pour assurer la longévité des ponts [63]. Cependant, seules deux options sont offertes pour un plan de protection contre la corrosion : appliquer un système de revêtement protecteur ou utiliser de l'acier résistant aux intempéries non enduit.

Le guide stipule que la protection contre la corrosion nécessite de bien comprendre la protection disponible d'abord, plutôt que les mécanismes de corrosion des ponts en acier et de leurs composants. La corrosion galvanique n'est pas mentionnée dans ce guide, et la protection contre la corrosion galvanique n'est pas conforme au mécanisme de corrosion galvanique.

2.3.3 CSA S6:19, Code canadien sur le calcul des ponts routiers

Le CCCPR prescrit les exigences de protection contre la corrosion des ponts en acier dans différentes conditions d'exposition à la superstructure et aux

Figure 3 : Schéma de la cellule de corrosion galvanique de la poutre et du boulon en acier. Reproduit avec la permission du Conseil national de recherches Canada.



autres composants [5]. Cette prescription représente une approche perfectionnée qui reconnaît que le mécanisme de détérioration causée par la corrosion est propre au matériau et à l'environnement. Trois conditions d'exposition majeures sont classées selon la quantité de chlorures et de polluants dans l'atmosphère : absence de chlorures directs, chlorures aéroportés ou atmosphère industrielle légère et atmosphère industrielle lourde. Chaque condition comprend trois sous-conditions ainsi qu'une condition « marine », pour tenir compte des différentes conditions d'humidité. Cette directive, toutefois, concerne la protection des composants de la superstructure contre la corrosion générale plutôt que des mécanismes de corrosion particuliers tels que la corrosion galvanique. Par exemple, la protection contre la corrosion prescrite comprend principalement le revêtement, la métallisation, la galvanisation ou l'utilisation d'acier résistant à la corrosion.

Le Commentaire du CCCPR contient une discussion plus approfondie sur cinq mécanismes de corrosion associés à la corrosion des ponts en acier, y compris la corrosion galvanique [64]. Bien que tous les facteurs qui déterminent la vitesse de corrosion galvanique ne soient pas abordés, l'effet du rapport de surface cathode/anode sur la vitesse de corrosion est expliqué en détail, tout comme l'effet de la distance entre les surfaces anodique et cathodique.

Le Commentaire du CCCPR cite également des mécanismes de corrosion détaillés et des facteurs clés. C'est un bon point de départ pour élaborer des lignes directrices de protection fondées sur la performance de corrosion. Des directives supplémentaires sont nécessaires pour favoriser la conception contre la corrosion galvanique, notamment :

- une série galvanique pour les alliages courants des ponts en acier et en aluminium afin d'évaluer la tendance à la corrosion galvanique; et
- une méthode ou un processus à la fois rapide et fiable qui permette de quantifier la vitesse de corrosion galvanique.

2.3.4 Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridges de NASEM

Ce guide a été élaboré dans le but d'appuyer une nouvelle version du *Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridges* de l'AASHTO. C'est un examen approfondi de la protection contre la corrosion des ponts en acier au moyen de revêtements selon plusieurs normes, guides et codes de conception de ponts internationaux, ainsi que des manuels de conception de ponts [65].

Contrairement à la corrosion des structures en béton, qui fait l'objet d'une documentation détaillée, la corrosion des ponts en acier est traitée dans une moindre mesure. Le rapport ne contient qu'une simple discussion sur les revêtements et des détails comme le drainage. Les mécanismes de corrosion des composants en acier ne sont pas abordés, et la corrosion galvanique n'est pas mentionnée dans le rapport. Cependant, les résultats de l'enquête des ingénieurs de ponts identifient clairement la corrosion comme étant le problème le plus courant concernant la durabilité des superstructures en acier et des ponts à fondation en acier, et le deuxième problème de durabilité le plus indiqué pour les roulements en acier.

L'enquête souligne la pratique actuelle en matière de conception de ponts où la corrosion des ponts en acier est considérée comme un problème de durabilité générale, et où l'application d'un revêtement ou d'une métallisation ou le recours à un type d'acier particulier permettrait d'atténuer toutes les formes de corrosion. Un guide de conception lié à la corrosion des ponts en acier et en aluminium fournirait de meilleures directives, fondées sur les mécanismes propres à chaque forme de corrosion.

2.3.5 Steel Bridge Design Handbook for Corrosion Protection of Steel Bridges de la FHWA

Par rapport à la version de 2012, la version 2015 du *Steel Bridge Design Handbook for Corrosion Protection of Steel Bridges* de la FHWA a nettement progressé dans deux domaines au moins [66] :

1. Introduction de la classification quantitative de la corrosivité environnementale, d'après la norme ISO 9223 [67], pour améliorer la définition de l'environnement de corrosion. C'est important pour la corrosion des aciers résistants aux intempéries et la durabilité des revêtements protecteurs.
2. Introduction du concept de corrosion galvanique issu de la construction de poutres en acier plus résistantes à la corrosion avec de l'acier A1010.

Le rapport recommande que les fixations soient plus résistantes à la corrosion que les matériaux de la poutre afin d'éviter un grand rapport de surface cathode/anode. Toutefois, le rapport ne fournit pas de renseignements sur l'évaluation de la résistance à la corrosion ni sur la quantification de la tendance et de la vitesse de la corrosion galvanique.

2.3.6 Guide de conception européen relatif à l'utilisation de l'acier résistant aux intempéries dans la construction de ponts

Un récent document directeur élaboré par la Convention européenne de la construction métallique (CECM) examine un certain nombre de codes et de normes européens afin de fournir des directives sur l'utilisation durable et fiable de l'acier résistant aux intempéries dans les ponts et autres structures [68]. Pour les considérations relatives à la corrosion, il faut d'abord classer les environnements d'exposition à l'acier résistant aux intempéries à l'aide de la norme ISO 9223 [67]. Le document indique que la corrosivité de l'atmosphère intérieure en Europe est généralement classée comme faible (catégorie C2 selon ISO 9223) ou, dans les cas de pollution exceptionnelle, comme moyenne (catégorie C3). Les classes de corrosivité dans les régions côtières de l'Europe varient entre moyenne et très élevée (C3 à C5). L'acier résistant aux intempéries ne convient pas à la classe de corrosivité très élevée (C5) ni aux environnements marins et industriels (CX) sans protection supplémentaire contre la corrosion.

Le guide présente également un nouveau concept de charge de corrosion, en analogie avec les charges mécaniques, à laquelle la protection devrait être capable de résister. Lorsque la charge de corrosion est définie à l'aide de la corrosivité atmosphérique ISO 9223, la protection contre la corrosion est traitée par une perte de la surépaisseur sur une durée de vie nominale cible. Des pertes de surépaisseur sont fournies pour cinq pays (Belgique, Allemagne, Royaume-Uni, France et Espagne) sur une durée de vie nominale de 100 ans.

Outre la conception fondée sur la charge de corrosion de l'environnement, le guide tient également compte des détails structurels et des raccords de protection contre la corrosion dans la construction de ponts en acier résistant aux intempéries. Le risque de corrosion galvanique des matériaux de boulonnage qui relient les poutres d'acier résistant aux intempéries est pris en compte, comme suit :

1. Les assemblages de boulonnage galvanisés à chaud ont la possibilité d'être utilisés pour raccorder l'acier résistant aux intempéries avec une couche de zinc suffisamment épaisse pour résister à l'attaque de corrosion galvanique avant la formation de la patine protectrice.
2. Les assemblages de boulonnage préchargés faits d'acier inoxydable sont susceptibles d'être utilisés sans risque de corrosion galvanique.

L'utilisation d'assemblages de boulonnage préchargés faits d'acier inoxydable mérite un examen plus approfondi. L'utilisation de fixations en acier inoxydable est susceptible d'entraîner de la corrosion, car certains types de boulons et de rondelles en acier inoxydable sont sujets à la corrosion par piqûres [60]. Cette constatation renforce le besoin de lignes directrices qui tiennent compte des comportements de corrosion des alliages dans les ponts. Ce serait utile pour évaluer non seulement le risque de corrosion galvanique, mais également les risques d'autres formes de corrosion.

2.4 Résumé

Cette section a aidé à répondre aux questions suivantes :

1. Quel mécanisme de corrosion galvanique nécessite d'être pris en compte par les outils/méthodes/guides relatifs aux ponts en acier?

La différence de potentiel entre deux métaux est à l'origine du courant de corrosion galvanique ayant pour effet d'accélérer la corrosion du métal anodique. Ainsi, la mesure du potentiel de corrosion aidera à évaluer la tendance à la corrosion galvanique, tandis que la mesure du courant de corrosion galvanique représente une méthode quantitative pour évaluer la vitesse de corrosion galvanique. Ces deux méthodes fondamentales sont utilisées pour étudier la corrosion galvanique et évaluer le risque qu'elle représente dans de nombreux domaines d'ingénierie. De plus, la corrosion galvanique coexiste avec d'autres formes de corrosion. Il faut donc tenir compte du risque de corrosion au-delà du risque de corrosion galvanique pour les structures et les composants critiques.

2. Quels sont les principaux facteurs de la corrosion galvanique dont il faut tenir compte dans l'élaboration des méthodes de prévention?

Une série galvanique est un classement des métaux et des alliages qui sont couramment utilisés dans la pratique en fonction de leur potentiel réel et mesuré de corrosion libre dans un environnement donné. Elle est souvent mise au point pour les environnements marins et présentée dans les manuels d'ingénierie de la corrosion. C'est un guide très utile pour choisir des métaux à assembler ayant une tendance minimale à subir une réaction galvanique. Outre la différence de potentiel, de nombreux facteurs jouent un rôle dans l'ampleur de la corrosion galvanique entre deux métaux couplés, notamment la surface, l'état de la surface, la solution et l'environnement atmosphérique. En effet, ces facteurs influent sur la cinétique de la corrosion galvanique sur le plan de la vitesse de corrosion. Des méthodes de prévention devraient être élaborées de manière à atténuer les effets de ces facteurs directeurs.

3. Comment les divers secteurs étudient-ils la corrosion galvanique dans le but de gérer le risque qu'elle représente?

La corrosion galvanique est courante dans les automobiles, les avions, les pipelines, les appareils électroniques, les batteries et les implants biomédicaux. Les deux méthodes universellement utilisées pour évaluer la vitesse de corrosion galvanique dans ces applications sont le potentiel de corrosion (ou une série galvanique) et la mesure du courant de corrosion galvanique. La modélisation informatique et la science des surfaces permettent de mieux comprendre ces mécanismes. Les méthodes de prévention de la corrosion galvanique utilisées dans ces applications sont dérivées des mécanismes fondamentaux de corrosion galvanique (p. ex., l'utilisation d'un revêtement qui empêche le contact électrique entre des métaux différents).

4. Quel est l'état de la gestion des risques de corrosion galvanique dans le milieu de la conception des ponts?

Le milieu de la construction des ponts a reconnu que la corrosion constitue le problème le plus fréquent concernant la durabilité des superstructures en acier et des ponts à fondation en acier. Parmi les codes et les guides examinés, le CCCPR offre un guide de protection propre à l'exposition environnementale, tandis que la CECM propose une approche quantitative des surépaisseurs de corrosion pour la conception de l'acier résistant aux intempéries en fonction des différentes expositions environnementales. Bien que ces documents reconnaissent que la corrosion est un mécanisme de détérioration propre à l'environnement et aux matériaux, la protection contre la corrosion des ponts en acier est généralement assurée par l'application d'un revêtement ou d'une métallisation ou l'utilisation d'un type d'acier particulier, sans tenir compte des mécanismes des différentes formes de corrosion, comme la corrosion galvanique. L'absence de directives de conception propres au mécanisme de corrosion est susceptible d'empêcher une protection adéquate contre diverses formes de corrosion.

5. Que faut-il faire pour éviter la corrosion galvanique dans les assemblages de ponts en acier et en aluminium?

Il est indispensable d'établir des lignes directrices qui tiennent compte du comportement de corrosion des alliages de pont aux fins de leur application dans les ponts. Une composante de conception fondée sur la corrosion pour les ponts en acier et en aluminium fournirait une meilleure orientation si elle tenait compte de la forme de corrosion particulière en jeu. Ce serait utile pour évaluer non seulement le risque de corrosion galvanique, mais également les risques d'autres formes de corrosion.

L'étude actuelle vise à élaborer des directives relatives à la corrosion galvanique dans la conception et la gestion des ponts, en s'attaquant aux lacunes actuelles suivantes en matière de connaissances :

- Identification du risque de corrosion galvanique entre deux alliages de pont. Cela peut être accompli en mesurant le potentiel de corrosion ou en utilisant la série galvanique des métaux et alliages courants dans les ponts.
- Quantification de la vitesse de corrosion galvanique. Cela peut être effectué en mesurant le courant de corrosion galvanique.

3 Méthodes

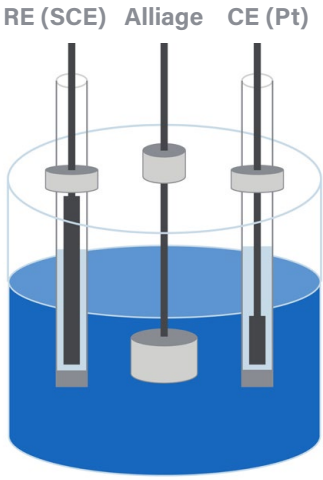
Les expériences suivantes ont été menées au laboratoire d'essais sur la corrosion dans le secteur de la construction du CNRC. Certaines mesures répliquées ont été effectuées dans un laboratoire de l'Université Western en suivant la même procédure, en utilisant les mêmes matériaux et la même installation de cellule de corrosion sous la supervision du CNRC. Les résultats observés dans les deux laboratoires étaient conformes et en adéquation.

3.1 La corrosion et les cellules électrochimiques

Le tableau 1 présente les 11 alliages pris en compte dans cette étude ainsi que leurs spécifications : quatre alliages structurels de pont, cinq alliages de boulon et deux alliages de rondelle supplémentaires. Les alliages ont été usinés en électrodes (échantillons de corrosion) au moyen d'acier au carbone (CS, 350W), d'acier résistant aux intempéries (WS, 350AT), d'acier inoxydable A1010 (SS), de boulons en acier au carbone (A325 type I), de boulons en acier galvanisé (GS) (A325 type I galvanisé), de boulons en acier résistant aux intempéries (A490 type 3), de boulons en acier inoxydable B8M, de boulons en acier inoxydable B8SH, de rondelles SS316L et de rondelles SS410.

Les alliages ont été utilisés pour créer des cellules de corrosion. Une cellule de corrosion se compose d'une ou de plusieurs électrodes fonctionnelles (échantillon d'alliage à l'étude), d'une électrode de référence (RE), d'une électrode au calomel saturé (SCE), d'une contre-électrode (CE) (platine) et d'un électrolyte (solution) représentant l'environnement de corrosion (figure 4).

Figure 4 : Cellule électrochimique pour la mesure de la corrosion; RE = électrode de référence (SCE = électrode au calomel saturé), CE = contre-électrode de platine (Pt), Alliage = électrode fonctionnelle



Chaque échantillon de corrosion (électrode) était doté d'un trou fileté de 3-62 à l'arrière, sur lequel une tige métallique a été fixée pour la connexion électrique avec les cellules corrosives ou électrochimiques. Avant de monter les échantillons dans de l'époxy, la face sans filetage a été mise à la terre par rapport au fini P1200 à l'aide de papier au carbure de silicium (SIC).

Tableau 1 : Les alliages et leurs spécifications utilisés dans cette étude.

Numéro	Alliage structurel de pont	Spécification
1	Acier au carbone, 350W	CSA G40.21-18 calibre 350W [69] ASTM A572/A572M-12 calibre 50 [70]
2	Acier résistant aux intempéries, 350AT	CSA G40.21-18 calibre 350AT [69]
3	ASTM A1010, A1010	ASTM A1010-19 [71] ASTM A709/A709M-21 calibre 50 CR [72]
4	Aluminium, Al	Al Calibre 6061-T6 ASTM B209M/B209M-21a [73]
	Alliage de boulon	**Spécification**
5	Boulon en acier au carbone, A325 type 1	ASTM F3125/F3125M-22 calibres A325 type 1 [74]
6	Boulon en acier galvanisé, A325 type 1, galvanisé	ASTM F3125/F3125M-22 calibres A325 Type 1 –Galvanisé [74]
7	Boulon en acier résistant aux intempéries*, A490 type 3	ASTM F3125 F3125/F3125M-22 calibres A490 type 3 [74]
8	Acier inoxydable (SS), boulon B8M, SS316	ASTM A320/A320M-22 B8M (SS316), classe 2 [75]
9	Acier inoxydable, boulon B8SH, SS304	ASTM A320/A320M-22 B8 (SS304) classe 2 [75]
	Rondelles additionnelles en acier inoxydable	**Spécification**
10	Rondelle en acier inoxydable, SS316L	ASTM A194/A194M-22 calibre 8M (SS316L) [76]
11	Rondelle en acier inoxydable, SS410	ASTM A194/A194M-22 calibre 8 (SS410) [76]

* L'acier A490 type 3 est rarement utilisé dans les ponts au Canada. Dans cette étude sur la corrosion, ce type de boulon est ajouté comme boulon en acier résistant aux intempéries. Les calibres A490 type 3 et A325 type 3 sont tous deux des aciers résistants aux intempéries qui possèdent différentes résistances, mais des compositions chimiques similaires en vertu de l'ASTM F3125.

Ensuite, les électrodes ont été montées dans une résine époxyde transparente Hysol® qui a été purgée sous vide. La purge sert à éliminer les bulles dans l'époxy qui peuvent causer de la corrosion à l'interface de l'époxy et de l'échantillon, comme la corrosion caverneuse. Une fois les échantillons métalliques montés, seule une surface de 1 cm^2 ou 10 cm^2 a été exposée pour la mesure de la corrosion.

Avant chaque essai, l'électrode a été mise à la terre avec le fini P2500, sonisée avec du méthanol, rincée à l'eau ultrapure et séchée à l'argon. L'électrode a ensuite été rapidement placée dans une cellule de corrosion pour éviter la formation d'oxydes sur la surface de l'alliage à la suite de l'exposition à l'air. L'échantillon d'acier galvanisé n'a pas été mis à la terre pour maintenir la couche de zinc intacte.

Trois solutions ont été préparées à différentes concentrations de sel (NaCl). Toutes les solutions ont été préparées avec de l'eau ASTM type I (ASTM D1193-06 2018) avec une résistivité de 18,2 Mω.cm. Des expériences ont été réalisées dans une solution de NaCl à 0,5 %, 1,5 % ou 3,5 % en poids, à l'aide de NaCl de qualité réactif à 99,0 % obtenu auprès de Thermo Fischer Scientific. Les solutions ont été naturellement aérées. Les potentiels de corrosion ont été mesurés et consignés en référence au SCE dans le cadre de cette étude. Toutes les expériences ont été effectuées à l'aide d'un potentiostat Solartron, modèle 1287. Le logiciel CorrWare a été utilisé pour gérer le potentiostat, et le logiciel CorrView a été utilisé pour analyser les données recueillies (les deux proviennent de Scribner Associates).

3.2 Mesure du potentiel en circuit ouvert

Le potentiel de corrosion libre[4] d'un métal ou d'un alliage (E_{corr}) est l'une des propriétés de corrosion les plus importantes et indique l'activité de la surface métallique et la puissance d'oxydation de l'environnement de corrosion. E_{corr} est mesurable dans un circuit ouvert par rapport à une électrode de référence. La valeur de l'E_{corr} d'un métal/alliage est comparée à celle d'un autre métal/alliage, ce qui donne une estimation de la tendance à la corrosion galvanique et indique le métal qui servira d'anode et se corrodera plus rapidement. Les expériences de potentiel en circuit ouvert (OCP) ont été effectuées pendant 48 heures ou jusqu'à ce que le potentiel de corrosion atteigne un état stable.

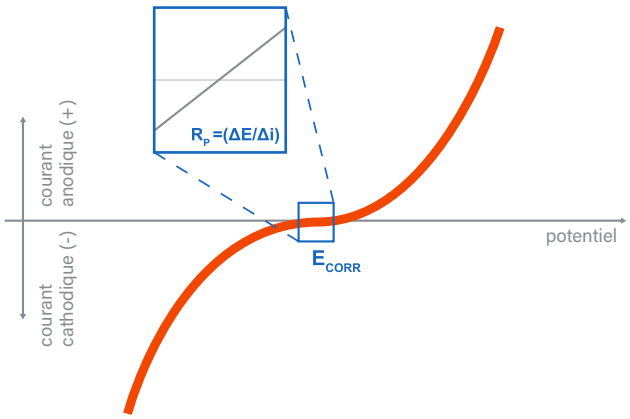
Les échantillons pour la mesure du taux d'OCP ont été polis pour mieux simuler l'accumulation des sels de dégivrage ou en suspension dans l'air qui cause l'instabilité ou l'effritement de la patine. Par conséquent, aucune patine n'était présente sur la surface pour les mesures du potentiel de corrosion. Cependant, le potentiel de corrosion de l'acier résistant aux intempéries a également été étudié avec une formation de patine afin de mieux comprendre son comportement dans un environnement sans chlorure. À cette fin, une patine artificielle a été formée sur de l'acier résistant aux intempéries grâce à des cycles de séchage accéléré par mouillage. L'immersion dans le mouillage utilisait une solution d'environnement sans chlorure simulée dans une solution à 0,0001 M de Na_2SO_4 pendant 30 minutes avant le séchage sous lumière UV pendant 2 heures [77]. Le cycle a été répété pendant 40 jours. Le potentiel de corrosion des quatre échantillons d'acier résistant aux intempéries a été mesuré pendant les périodes d'immersion.

3.3 Mesure de la résistance à la polarisation linéaire

La résistance à la polarisation linéaire (LPR) est une technique électrochimique non destructive utile pour mesurer la vitesse de corrosion relative. Une mesure de la LPR consiste à balayer le potentiel sur une plage de tension courte (p. ex., ± 5 à ±15 mV) à partir de E_{corr} (ou OCP) et à mesurer la réponse du courant. Dans cette petite région, la relation courant-potentiel est approximativement linéaire (figure 5) et donc la réciprocité de la pente donne la résistance à la polarisation, R_p, (en analogie avec le module élastique de l'acier). R_p est une mesure de l'opposition de l'interface électrochimique au passage du courant et, dans le cas d'une réaction de corrosion, elle est inversement proportionnelle à la vitesse de corrosion (p. ex., Jones [7]).

La LPR a été évaluée à la fin de chaque mesure du potentiel de corrosion E_{corr} toutes les 48 heures. Depuis E_{corr}, le potentiel a été polarisé à Ecorr ± 15 mV à un taux de balayage de 1 mV/s pendant deux cycles, et la réponse du courant a été mesurée. Des mesures de la LPR ont été effectuées pour comparer la résistance à la corrosion des différents alliages de pont. Plus la valeur de R_p est élevée, plus la vitesse de corrosion est faible.

Figure 5 : Potentiel, courant et région linéaire Ecorr. ΔE = changement de potentiel, Δi = changement de courant.



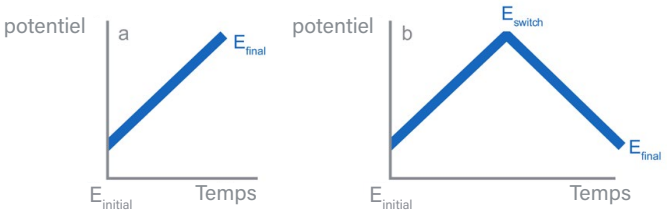
3.4 Expérience de polarisation potentiodynamique

La polarisation potentiodynamique (PDP) est une technique électrochimique dans laquelle un potentiel appliqué (E) est balayé ou imposé sur l'échantillon, et la réponse du courant est enregistrée. Il est souvent balayé de façon linéaire avec le temps par rapport

4 Le potentiel en circuit ouvert (OCP) est utilisé de façon interchangeable avec un potentiel de corrosion libre ou un potentiel de corrosion (E_{corr}).

à son potentiel initial de corrosion libre E_{corr}, qui est indiqué par $E_{initial}$ dans la figure 6. En même temps, la réponse du courant est enregistrée. Le courant mesuré fournit des informations sur les procédés électrochimiques qui sont susceptibles de se produire dans la plage du potentiel balayé et une mesure relative de leurs taux. Comparativement aux mesures de la LPR, les mesures de la PDP s'intéressent à la réponse potentiel-courant sur une vaste gamme de potentiel appliqué, se terminant généralement par un potentiel final (E_{final}) au-delà de 1 V par rapport à $E_{initial}$.

Figure 6 : Schéma du balayage du potentiel (a) et inverse (b) dans le temps de la polarisation potentiodynamique



Un balayage anodique vers l'avant fournit des informations sur la formation et les propriétés des films d'oxyde à la surface (figure 6a). Dans le balayage inverse (6b), le courant est une fois encore enregistré lorsque le potentiel est à nouveau balayé par rapport à $E_{initial}$. La réponse du courant pendant le balayage inverse indique si les oxydants observés lors du balayage vers l'avant étaient réversibles ou irréversibles. Les données obtenues à partir de cet essai sont souvent représentées sous forme de graphique logarithmique (i) par rapport à E et appelées « courbe de polarisation ». Les courbes de polarisation offrent de l'information sur le comportement d'un système donné en fonction du potentiel et permettent d'identifier les régions de comportements actifs, passifs et transpassifs. Il est possible d'obtenir des détails supplémentaires sur le comportement de dégradation du film d'oxyde à l'aide de mesures cycliques. C'est particulièrement utile pour étudier les caractéristiques de la corrosion localisée [7].

Dans cette étude, des expériences de polarisation potentiodynamique ont été réalisées dans une solution naturellement aérée de NaCl à 1,5 % en poids. Une électrode a été maintenue à E_{corr} pendant une heure, suivie d'un balayage potentiodynamique de -0,25 V (par rapport à E_{corr}) vers des potentiels plus positifs à un taux de balayage de 1 mV/s. Le balayage a ensuite été inversé lorsque le courant maximal a été atteint. Lors de ces mesures, la nature de la corrosion et la possibilité de corrosion localisée ont été étudiées.

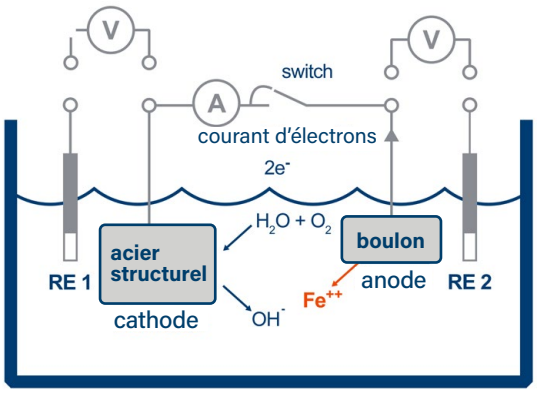
3.5 Mesure du courant de corrosion galvanique

Comme l'indique la section 2.1.1, un courant de corrosion galvanique circule entre l'anode et la cathode dans une cellule galvanique. Ce courant est mesurable en laboratoire en séparant les deux métaux et en les raccordant à un ampèremètre à résistance nulle (ZRA), lequel crée un contact électrique direct, car la résistance électrique négligeable permet de mesurer le flux de courant. Cette méthode mesure le courant net qui passe d'un métal à l'autre (I_{couple}), à partir duquel la densité de corrosion galvanique sur l'anode est calculée en tenant compte de sa surface. La densité de courant de corrosion galvanique anodique représente la vitesse de corrosion galvanique de l'anode. L'I_{couple} mesuré ne comprend pas toutes les réactions d'oxydation et de réduction continues qui se produisent à la surface de chacun des métaux. Pour cette raison, il est important de noter qu'un courant galvanique peut nettement sous-estimer la vitesse de corrosion totale de l'anode si une partie importante de son oxydation est équilibrée par une réaction de réduction sur sa surface, plutôt que sur le métal cathodique couplé. Encore une fois, la corrosion galvanique coexiste avec d'autres formes de corrosion, comme la corrosion générale ou la corrosion par piqûres [7].

La configuration expérimentale de corrosion galvanique, schématisée à la figure 7, suit les principes de base de la norme ASTM G71-81:2019 [78]. Un échantillon d'alliage structurel (p. ex., acier A1010) et un échantillon de boulon sont immergés dans un électrolyte. Avant de les raccorder à un interrupteur ouvert, les électrodes de référence RE 1 et RE 2 mesurent leur E_{corr}. Une fois les deux échantillons raccordés lors de la fermeture de l'interrupteur, un ZRA commence à mesurer leur courant de corrosion

galvanique (I_{couple}). Dans cette étude, les métaux sont couplés entre un alliage structurel et un matériau de boulon avec un rapport de surface de 10:1 dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids.

Figure 7 : Schéma de la configuration expérimentale pour la mesure du courant de corrosion galvanique de l'acier structurel (dans le cas d'une cathode) et du boulon



3.6 Analyse de la microstructure par microscopie

La microstructure d'un alliage peut avoir un effet direct sur les propriétés physiques de l'alliage et sur sa performance de corrosion. Les influences les plus courantes de la microstructure sont la taille du grain et la présence de phases et de composés intermétalliques.

Des échantillons d'alliages structurels et de boulons ont été montés et mis à la terre à l'aide de papiers au carbure de silicium jusqu'à un grain de P4000, suivi d'un polissage au diamant et d'un polissage final à la silice colloïdale. Les échantillons 350W, 350AT et A490 ont été gravés avec du nital à 2 %; B8M et B8SH ont été gravés par électrolyse dans de l'acide nitrique à 60 %; A1010 a été gravé à l'aide d'un réactif glyceregia (mélange HCl/glycérol/HNO_3), et l'échantillon d'aluminium a été gravé à l'aide du réactif de Weck. La surface des échantillons a été imagée à la fois dans l'état tel que poli et après gravure.

L'échantillon A325 type I GS n'a pas été poli en raison de la présence d'une couche de zinc. Cet échantillon a été surveillé au microscope électronique secondaire afin de mesurer l'épaisseur de la couche de zinc. Un microscope électronique à balayage Hitachi SU5000 (SEM) avec un pistolet à émission Schottky Field a été utilisé pour l'imagerie de la couche de zinc galvanisé des boulons A325 et de leur interface avec l'acier au carbone du substrat. L'échantillon a été fait à partir de la coupe transversale du corps d'un boulon A325. Des images et des spectres ont été pris à l'aide du logiciel Oxford AZTec et du détecteur X-Max 80.

3.7 Essai au brouillard salin

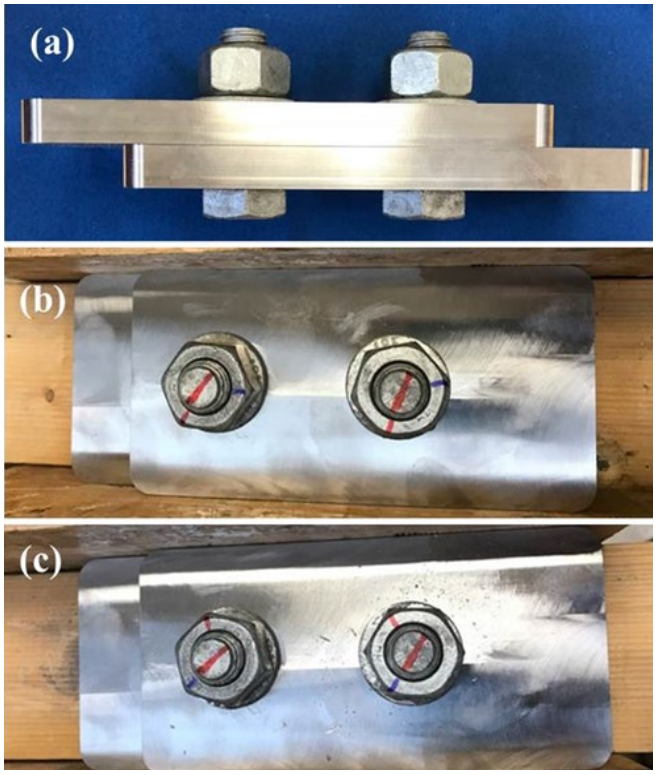
L'essai au brouillard salin est l'une des plus anciennes méthodes d'essai de corrosion. La norme ASTM B117-19, *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus* [79], a été établie pour la première fois dans les années 1930. Depuis, c'est l'essai de corrosion le plus couramment utilisé, généralement effectué dans des environnements confinés et contrôlés, comme dans une chambre de brouillard salin [79]. Il est possible de configurer l'environnement d'un essai au brouillard salin avec des variations de température, de niveau de pH, de concentration de sel et de durée, pour accélérer la vitesse de corrosion et faciliter ainsi la comparaison de la résistance à la corrosion dans l'étude.

En plus du programme expérimental électrochimique, l'essai au brouillard salin a également été effectué pour valider la performance anticorrosion des alliages étudiés. Le tableau 2 présente la liste des plaques et des boulons employés pour les essais au brouillard salin. Pour préparer les échantillons boulonnés aux fins d'essai au brouillard salin, des plaques d'acier de construction sélectionnées ont été usinées selon des dimensions de 15 cm sur 17 cm et une épaisseur de 1,4 cm. Deux plaques ont ensuite été boulonnées ensemble et serrées à 1/3 de tour après la fixation initiale des boulons, comme illustré à la figure 8. Aux fins de l'essai, les plaques boulonnées ont été placées dans une atmosphère de brouillard salin à 5 % pendant un mois. Les échantillons ont fait l'objet d'une inspection visuelle tous les sept jours, avec des photographies indiquant la progression de la corrosion des plaques boulonnées. Cet essai a été effectué à des fins comparatives en fonction des dommages visuels causés par la corrosion pour valider la résistance à la corrosion des alliages à l'étude. Après 28 jours dans la chambre au brouillard salin, des échantillons boulonnés de divers boulons/plaques ont été prélevés pour un examen visuel.

Tableau 2 : Liste des plaques et des boulons dans l'essai au brouillard salin

Plaque en acier de construction	Boulon
Acier au carbone (350W)	A325 Type I CS, A490
Acier résistant aux intempéries (350AT)	A325 Type I CS, A325 Type I GS, B8M, B8SH
Aluminium	B8M, B8SH

Figure 8 : (A) plaques boulonnées, (b) boulons d'alignement et (C) serrage de boulons à 1/3 tour.



4 Résultats

Les résultats concernent d'abord la tendance à la corrosion galvanique (thermodynamique), puis le courant de corrosion galvanique (cinétique) et enfin, les comportements de corrosion des alliages individuels et des observations visuelles. De cette façon, des renseignements d'une complexité croissante sont présentés :

- Les potentiels en circuit ouvert (OCP) indiquent la tendance à la corrosion et leurs différences indiquent la tendance à la corrosion galvanique entre deux alliages.
- Les courants de corrosion galvaniques indiquent l'ampleur des dommages avec le temps sur l'anode des alliages couplés.
- La vitesse de corrosion et la tendance à la corrosion par piqûres fournissent des renseignements supplémentaires sur les propriétés de corrosion des alliages individuels, ce qui permet de mieux comprendre leurs comportements de corrosion galvanique. L'observation visuelle des dommages causés par la corrosion des alliages couplés et par la corrosion galvanique dans le supplément de la chambre au brouillard salin avait déjà permis de recueillir des renseignements pour valider la performance anticorrosion des alliages étudiés.

4.1 Potentiel en circuit ouvert

4.1.1 OCP et effet de la concentration de NaCl : Comparaison entre les alliages

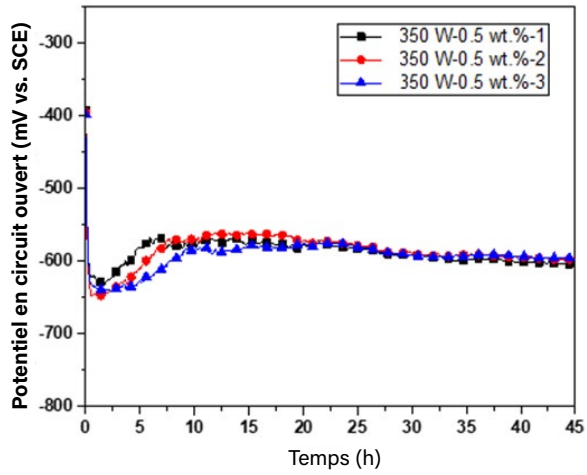
Les valeurs OCP (E_{corr}) des alliages structurels et des matériaux de boulonnage ont été mesurées à trois concentrations différentes de NaCl pendant 48 heures ou jusqu'à stabilisation. Les courbes de données sont présentées à l'annexe B, et certaines sont présentés dans cette section à des fins d'illustration.

- La section B.1 présente l'OCP avec le temps mesuré à partir de deux ou trois réplicats de chaque alliage dans l'ordre suivant : acier au carbone, acier résistant aux intempéries, acier A1010, aluminium, boulons en acier au carbone (A325 type I), boulons en acier inoxydable A325 type I galvanisé, boulons en acier inoxydable (A490 type III), boulons en acier inoxydable B8M, et boulons en acier inoxydable B8 dans la solution de NaCl à 0,5 % en poids;
- B.2 présente ces alliages dans la solution de NaCl à 1,5 % en poids; et
- La section B.3 présente les résultats obtenus dans la solution de NaCl à 3,5 % en poids.

Les observations suivantes ont été faites concernant l'acier au carbone et l'acier résistant aux intempéries :

- Les OCP de l'acier au carbone ont été hautement reproductibles et stabilisés en 25 heures. Les valeurs moyennes étaient de 600 mV (voir la figure 9), de 650 mV et de 670 mV pour les concentrations de chlorure de 0,5 % en poids, de 1,5 % en poids et de 3,5 % en poids, respectivement. Les taux d'OCP dans les solutions de NaCl à 1,5 % en poids et à 3,5 % en poids étaient similaires, avec une différence d'environ 20 mV.
- Les OCP de l'acier résistant aux intempéries étaient semblables à ceux de l'acier au carbone pour les trois solutions de NaCl, mais avaient tendance à se stabiliser plus rapidement avec le temps que l'acier au carbone, en particulier dans les solutions de NaCl à 0,5 % en poids et à 1,5 % en poids, où l'état d'équilibre était atteint en 5 heures.
- En résumé, les OCP en acier au carbone et en acier résistant aux intempéries variaient de 600 mV à 700 mV, y compris l'acier de construction et les boulons.

Figure 9 : OCP par rapport au temps de l'acier au carbone 350W dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.



Le tableau 3 présente les valeurs OCP (E_{corr}), (arrondies aux dix millivolts les plus proches à titre de comparaison en raison du processus dynamique de la corrosion) des alliages structurels et des matériaux de boulonnage. Les mesures représentent au moins deux réplicats à des concentrations différentes de NaCl pendant 48 heures ou jusqu'à stabilisation. En comparaison, l'acier A1010 a démontré des potentiels beaucoup plus positifs, soit environ -100 mV pour les trois concentrations des solutions de NaCl. C'était prévisible compte tenu de sa forte teneur en chrome (environ 9 à 10 %). L'acier résistant aux intempéries ne contient qu'environ 0,4 % de chrome. Cependant, les échantillons en acier A1010 ont également montré une tendance à présenter une corrosion caverneuse aux bords. Les figures 10 et 11 révèlent que lorsqu'une corrosion caverneuse se produit, l'OCP peut chuter de 300 mV à environ -400 mV. Par conséquent, les OCP de l'acier A1010 ont démontré deux valeurs (potentiels) dans les solutions salines testées : -100 mV et -400 mV dans les échantillons avec corrosion caverneuse.

Figure 10 : OCP par rapport au temps de l'acier A1010 dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement

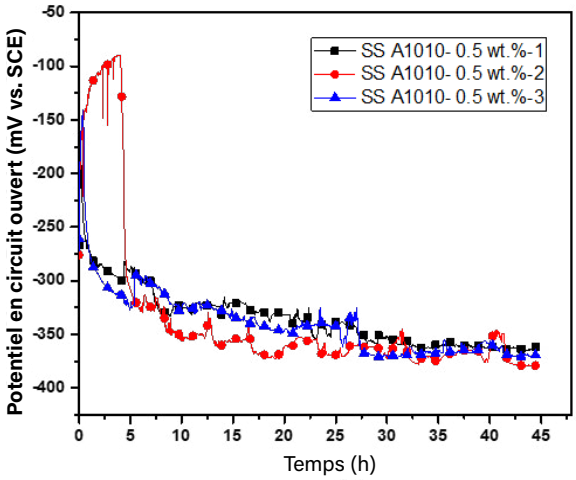


Figure 11 : OCP par rapport au temps de l'acier A1010 dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; cercle (corrosion passive) et carré (corrosion caverneuse)

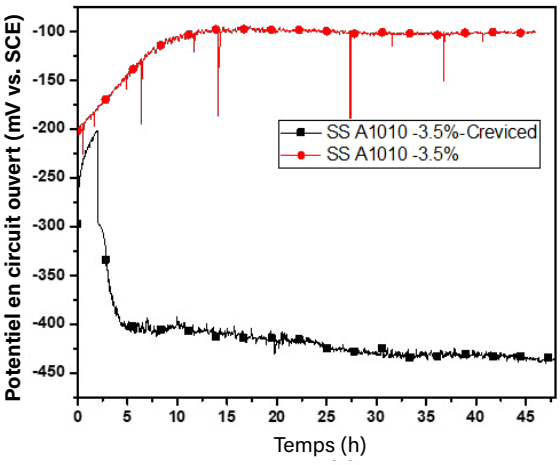


Tableau 3 : OCP des alliages structurels et des matériaux de boulonnage à trois concentrations de NaCl

Solution de NaCl	0,5 % en poids		1,5 % en poids		3,5 % en poids	
	OCP (mV)	Délai avant stabilisation (h)	OCP (mV)	Délai avant stabilisation (h)	OCP (mV)	Délai avant stabilisation (h)
Alliage structurel de pont						
Acier au carbone (350W)	-600	25	-650	25	-670	25
Acier résistant aux intempéries (350AT)	-600	5	-650	5	-650	5
ASTM A1010*	-100 -400*	10 5	-100 -400*	10 10	-100 -440*	10 5
Aluminium (A1)	-780	3	-680	3	-700	3
Alliage de boulon						
Acier au carbone (A325 type I)	-620	15	-610	10	-680	8
Acier galvanisé (A325 type I)	-980	3	-1050	3	-1080	2
Acier résistant aux intempéries (A490 type 3)	-600	4	-620	5	-650	10
Acier inoxydable (SS) B8M (SS316)	-50	15	-60	10	-100	15
Acier inoxydable B8SH (SS 304)	-150	5	-180	5	-200	10
Rondelles en acier inoxydable						
SS 316L	-	-	-80	20	-	-
SS 410	-	-	-100	15	-	-

*OCP avec corrosion par piqûres

Les OCP de l'aluminium ont également été mesurés avec une bonne répétabilité. Ils se sont rapidement stabilisés en 3 heures dans les solutions de NaCl à 0,5 % en poids et à 3,5 % en poids. Les concentrations de NaCl ont légèrement diminué et variaient de -700 mV à -650 mV dans les solutions testées.

Voici un résumé des résultats de l'OCP des quatre alliages structurels de pont pour l'acier au carbone, l'acier résistant aux intempéries, l'acier A1010 et l'aluminium :

- L'OCP devenait négatif en cas d'augmentation des concentrations de NaCl pour tous les alliages. C'était attendu, puisque cela indique une plus grande activité de corrosion avec une concentration accrue de chlorure. De 0,5 % en poids à 3,5 % en poids, la variation du taux d'OCP était inférieure à 100 mV. C'est un résultat notable qui contraste de façon importante avec l'effet des chlorures sur l'OCP des barres d'armature en acier au carbone dans le béton, pouvant chuter de plus de 500 mV lorsque la teneur en chlorure augmente.
- Dans une série galvanique, par ordre de diminution de la noblesse, l'acier A1010 aurait deux positions : -100 mV et -400 mV pour la corrosion caverneuse; l'acier au carbone et l'acier résistant aux intempéries se situeraient de -600 mV à -700 mV; et l'aluminium, de -650 mV à -700 mV.

Pour le boulon en acier au carbone (A325 de type I), le boulon en acier galvanisé, le boulon en acier résistant aux intempéries (A490 de type 3), le boulon en acier inoxydable B8M et le boulon en acier inoxydable B8, les OCP étaient comme suit :

- Les OCP étaient très répétables et situés dans une plage prévue pour chaque matériau, à l'exception du boulon B8SH.
- Les OCP de l'acier galvanisé étaient d'environ -1000 mV à -1060 mV pour les trois concentrations de NaCl.
- Les boulons en acier au carbone et en acier résistant aux intempéries sont passés de -600 mV à environ -650 mV avec une concentration accrue de NaCl.
- Les boulons B8M (SS 316) ont montré les OCP les plus positifs (nobles), de -40 mV à -80 mV, sous l'effet de l'augmentation de la concentration de NaCl (figure 12).
- Les boulons B8SH ont été les seuls échantillons où la corrosion par piqûres s'est produite de façon répétée. La corrosion par piqûres était visible à la surface, comme le montre la figure 13. Cela explique également leurs OCP oscillants avec le temps, affichant une croissance dynamique de la corrosion par piqûres et des processus de repassivation, comme le montre la figure 14. Les OCP allaient de -60 mV à -180 mV. Ce type de boulon n'est donc pas recommandé pour une utilisation sur des ponts en acier ou en aluminium lorsque l'exposition au sel est prévue.

Figure 12 : OCP par rapport au temps de l'acier B8M dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

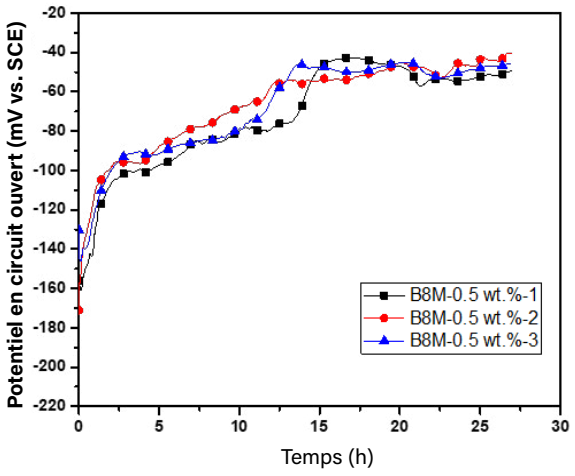


Figure 13 : Corrosion par piqûres visible sur la surface du B8SH après obtention des mesures de l'OCP (a) à l'Université Western (b) au CNRC. La résine blanche (b) est une couche de protection supplémentaire pour prévenir la corrosion caverneuse.

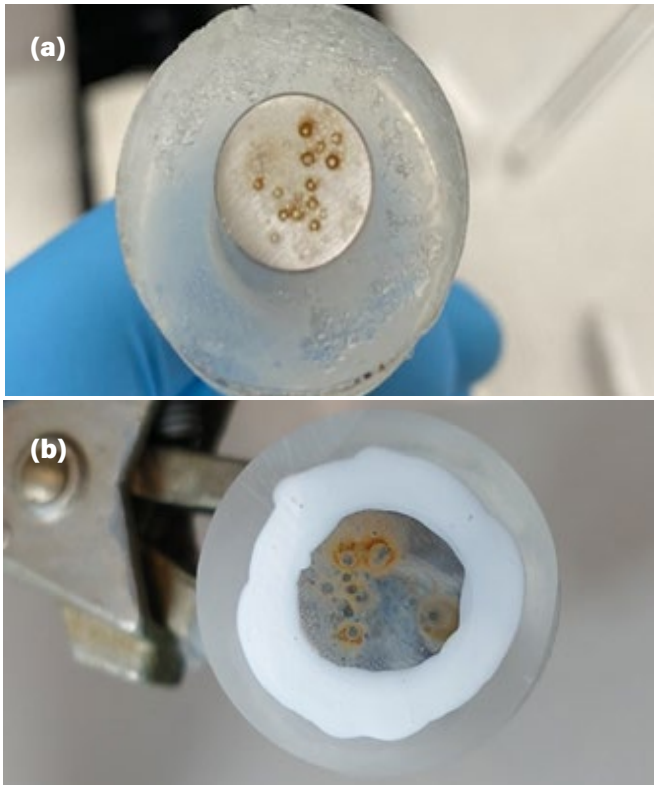
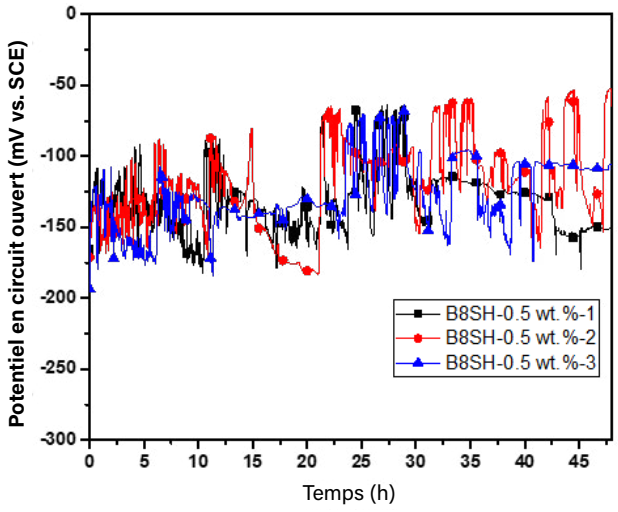


Figure 14 : OCP par rapport au temps du B8SH dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.



4.1.2 OCP dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids

Les concentrations de NaCl dans les alliages à l'étude ont montré des différences relativement faibles de l'OCP des groupes d'échantillons d'alliage (dans les 100 mV). Une comparaison entre différents groupes d'échantillons d'alliage a été effectuée à l'aide de la solution de NaCl à 1,5 % en poids. La concentration de NaCl à 1,5 % en poids a également été utilisée pour les mesures de la LPR, de la PDP et du courant de corrosion galvanique.

La figure 15 compare les OCP (a) des quatre alliages structurels de pont testés et (b) des cinq alliages de boulons. Étant donné qu'un OCP plus positif, en général, indique une plus grande résistance à la corrosion, l'A1010 a obtenu la valeur la plus positive (noble) parmi les alliages structurels à -100 mV dans un état passif et à -400 mV en corrosion caverneuse. Les potentiels favorables suivants ont été montrés par l'acier au carbone et l'acier résistant aux intempéries, avec des potentiels de corrosion très similaires d'environ -600 à -650 mV. L'aluminium a montré le potentiel de corrosion le moins favorable à environ -700 mV. Les alliages structurels démontrent trois groupes distincts de potentiel de corrosion.

En comparaison, les alliages à boulons ont également démontré trois groupes de potentiel de corrosion, mais avec une plus grande variété de différences. Le B8M a révélé le potentiel de corrosion le plus positif d'environ -80 mV; les boulons en acier au carbone et en acier résistant aux intempéries avaient des potentiels de corrosion similaires (-600 à 650 mV), qui étaient aussi presque identiques à ceux de l'acier au carbone structurel et de l'acier résistant aux intempéries. Le boulon en acier galvanisé présentait le plus faible potentiel de corrosion d'environ -1000 mV, ce qui était prévu en raison du zinc de surface.

4.1.3 Rondelles en acier inoxydable

Idéalement, les rondelles sont faites du même alliage que les boulons pour éviter la corrosion galvanique. En pratique, elles diffèrent parfois, d'après les déclarations ou les constatations effectuées. Les boulons B8M (SS316) et B8SH (SS304) commandés dans le cadre de cette étude sont fournis avec des rondelles SS316L et SS410. Il a donc été décidé de mesurer leur OCP pour obtenir plus de données. Les résultats sont présentés à l'annexe B (figures 52 et 53), obtenus dans la solution de NaCl à 1,5 % en poids. La rondelle SS316L présentait un potentiel de corrosion d'environ -50 mV, ce qui était très semblable au boulon B8M (SS316) (mais légèrement plus positif que celui-ci). Les deux matériaux, SS316 et SS316L, sont presque identiques dans leurs compositions, sauf que le SS316L comporte beaucoup moins de carbone. Cette particularité est conforme aux mesures effectuées concernant leur potentiel de corrosion. Les rondelles SS410 présentaient un potentiel de corrosion légèrement plus négatif (plus actif)

Figure 15 : OCP par rapport au temps (a) des alliages structurels et (b) des matériaux de boulonnage dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids. Le carré est l'aluminium, le cercle est le 350W, le triangle est le 350AT et le triangle inversé est le SS A1010.

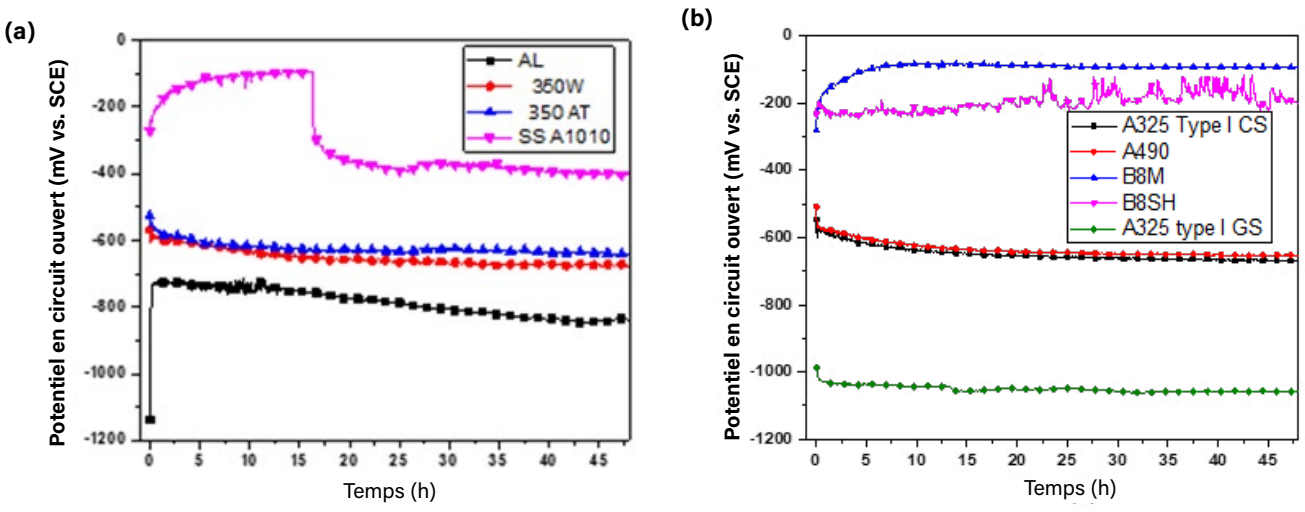
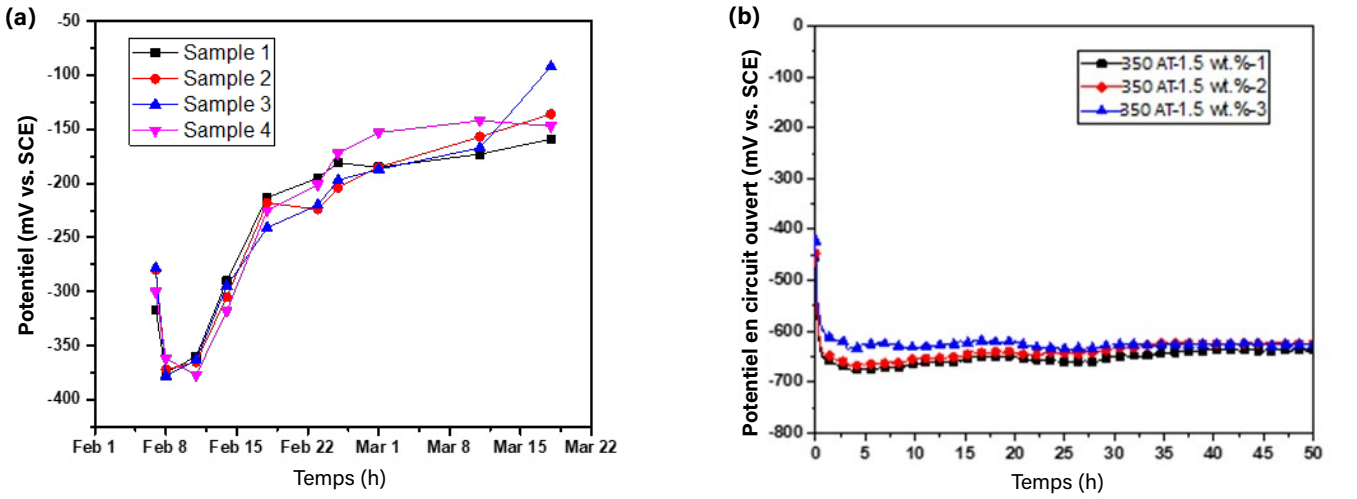


Figure 16 : Potentiel de corrosion (E_{corr} = OCP) avec formation de patine sur l'acier résistant aux intempéries (a) et l'acier résistant aux intempéries poli en présence de chlorure (b). Le carré, le cercle, le triangle et le triangle inversé représentent les échantillons 1, 2, 3 et 4, respectivement.



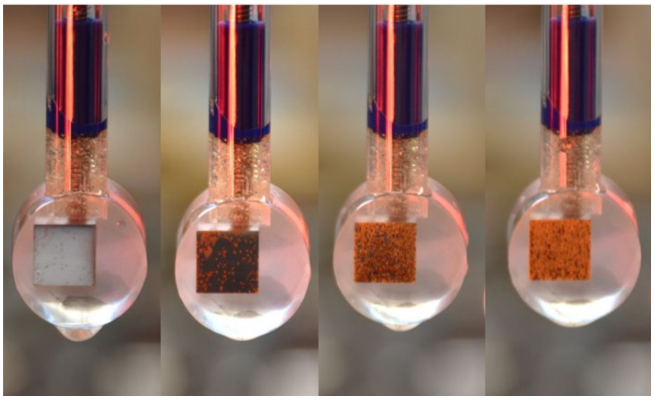
d'environ -100 mV que les rondelles SS316L. D'autres recherches seront nécessaires pour mieux comprendre si cette rondelle a tendance à développer de la corrosion par piqûres, bien qu'aucune corrosion par piqûres n'ait été trouvée dans l'étude actuelle.

4.1.4 Formation de patine sur l'acier résistant aux intempéries

Le potentiel de corrosion des quatre échantillons d'acier résistant aux intempéries est passé de -400 mV à des valeurs plus positives (nobles) de -100 à -150 mV au fil du temps (figure 16 [a]), ce qui est beaucoup plus positif que le -600 à -700 mV dans les solutions de NaCl, comme mesuré avec les échantillons polis (figure 16 [b]).

La figure 17 illustre la formation de patine sur l'acier résistant aux intempéries 350AT (de gauche à droite), qui a épaissi avec le temps, le nombre de cycles d'immersion et le séchage sous la lumière UV. Après 38 jours, la patine peut également avoir joué son rôle de protection contre la corrosion parce que le potentiel de corrosion a commencé à se stabiliser, comme le montre la figure 16(a). La question devrait être approfondie dans les recherches futures afin de mieux comprendre la corrosion de l'acier résistant aux intempéries et l'effet des chlorures. Il devrait être noté que la corrosion galvanique en présence de NaCl est plus pertinente pour étudier le risque de dommage potentiel. Sans chlorures, la corrosion galvanique est moins susceptible de se développer, non seulement parce que la probabilité de corrosion de chaque alliage dans le couple galvanique est faible, mais aussi parce que la résistance électrique de l'électrolyte est élevée. La patine formée lors de l'essai de cycle s'est effritée lorsque les échantillons ont été exposés aux solutions de NaCl et que le potentiel a chuté à -600 mV.

Figure 17 : Formation de patine sur l'acier résistant aux intempéries 350AT sur une période de 38 jours



4.2 Courant de corrosion galvanique

Un courant galvanique mesuré entre deux alliages contient deux éléments d'information pertinents :

- la polarité du courant qui détermine lequel est l'anode et lequel est la cathode; et
- l'intensité du courant, divisée par la surface de l'anode, ce qui détermine la vitesse de corrosion galvanique et la vitesse à laquelle l'anode sera endommagée par la corrosion.

La configuration de cette étude et la présentation sont les suivantes :

1. Un couple galvanique ou une paire comprenant un alliage structurel et un boulon. Par exemple, un couple galvanique désigné par la mention « 350AT/A325 type I GS » fait référence à l'acier résistant aux intempéries structurel couplé à un boulon en acier galvanisé A325 type I.
2. La polarité d'un courant mesuré indique l'anode. Lorsque le courant est positif, l'alliage structurel est l'anode; lorsque le courant est négatif, l'alliage à boulons est l'anode.
3. Puisque l'alliage structurel a une surface plus grande que le boulon, la densité du courant de corrosion galvanique, actuellement divisée par la surface de l'anode, sera plus faible lorsque l'alliage structurel est l'anode et que la polarité est positive.

4.2.1 Validation de la configuration des mesures

La mesure de la corrosion galvanique implique un courant très faible. Par conséquent, il est recommandé de valider la configuration de mesure, y compris les cellules de corrosion, la connexion et la machine, afin d'assurer la qualité du signal. Cette validation est réalisée en associant les deux mêmes alliages, car en théorie, il devrait y avoir un courant de corrosion galvanique oscillant pour les alliages actifs ou aucun courant galvanique pour les alliages passifs.

La figure 18 montre le courant galvanique entre les deux échantillons d'acier galvanisé qui corroderaient activement dans la solution de NaCl à 1,5 % en poids. Le courant galvanique (i_{couple}) va et vient avec le temps, ce qui indique qu'il n'y a pas d'anode ou de cathode absolue entre les deux mêmes échantillons actifs. La figure 19 illustre le courant galvanique entre deux échantillons en acier A1010 qui seraient passifs. L'i_{couple} entre les deux échantillons est proche de zéro et la tendance indique qu'il est proche de la limite du potentiostat lors de la mesure du courant minimal.

Figure 18 : Courant de couplage entre deux échantillons d'acier galvanisé

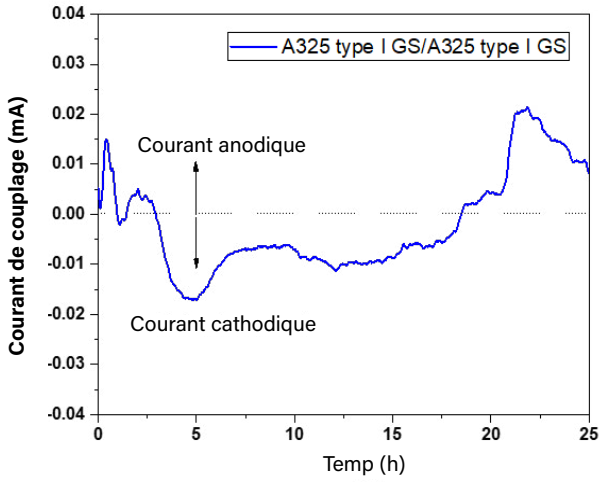


Figure 19 : Courant de couplage entre deux échantillons d'A1010

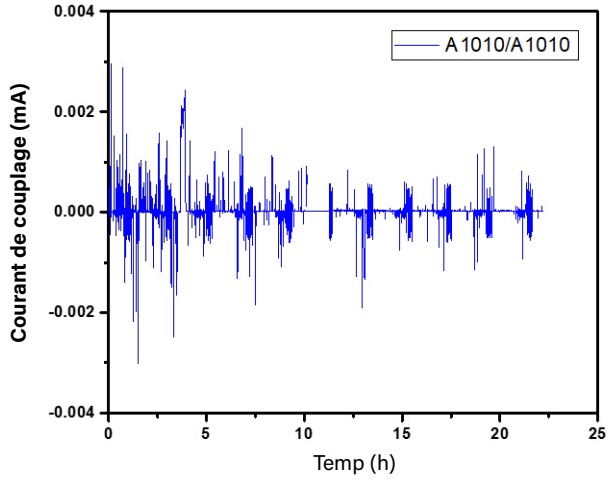


Tableau 4 : Courant de corrosion galvanique mesuré après 48 heures dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids (polarité : « + » signifie que l'alliage structurel est l'anode et « - » signifie que le boulon est l'anode; CS désigne l'acier au carbone et GS, l'acier galvanisé)

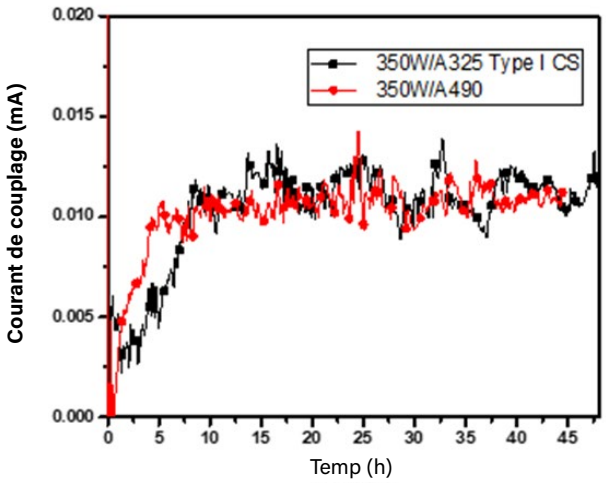
Numéro de couplage	Plaque et boulon couplés	Université Western (mA)	CNRC (mA)
1	350W/A325 Type I CS	+0,019	+0,012
2	350W/A490	+0,025	+0,011
3	350AT/A325 Type I CS	-0,052	-0,071
4	350AT /A490	-0,022	-0,011
5	350AT /B8M	+0,021	+0,011
6	350AT /B8SH	+0,021	+0,010
7	350AT /A325 Type I GS	Début -0,910 Fin -0,022	Début -0,126 Fin -0,051
8	A1010/B8M	+0,0005	+0,0001
9	A1010/B8SH	+0,006	+0,002
	A1010/ A325 type I GS		Début -0,783 Fin -0,215
10	Aluminium/ B8M		+0,014
11	Aluminium/ B8SH		+0,015

4.2.2 Courant galvanique du couplage entre alliage structurel et boulon

Toutes les expériences de couplage galvanique ont été réalisées dans la solution de NaCl à 1,5 % en poids au CNRC et à l'Université Western sous la supervision du CNRC. Les magnitudes actuelles de toutes les paires mesurées étaient comparables, et la polarité du courant était constante entre les données obtenues par les deux laboratoires. Le tableau 4 ci-dessous présente un résumé des résultats à la fin de l'expérience.

Pour les deux paires de boulons 350W/A325 type I CS et 350W/A490, l'acier au carbone 350W structurel a été jumelé à un boulon en acier au carbone A325 type I et à un boulon en acier résistant aux intempéries A490, respectivement, pour la mesure de la corrosion galvanique. Les deux paires ont été choisies à la fois pour valider les informations dérivées de leurs potentiels de corrosion similaires et pour établir des valeurs de référence permettant de comprendre les autres paires de couplage galvanique. Il n'existe, en effet, aucun critère existant pour interpréter la corrosion galvanique. Les résultats des deux paires de référence sont présentés à la figure 20. Les deux paires affichent des courants de couplage similaires autour de 12 µA, selon la moyenne des deux expériences. La polarité positive des deux courants indique que l'acier 350W est l'anode dans les deux paires et que la densité du courant anodique est d'environ 1,2 µA/cm^2, ce qui se situerait dans une catégorie de vitesse de corrosion faible selon l'ISO 9223 [67].

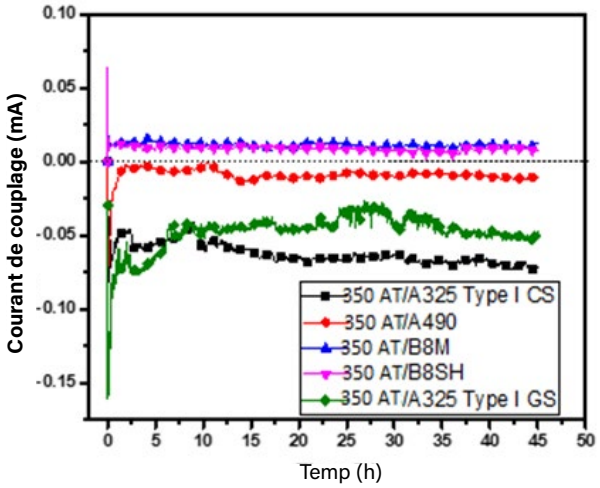
Figure 20 : Courant galvanique de l'acier 350W couplé à un boulon A490 et A325 type I CS. Le carré est le 350W/A325 type I CS, et le losange, le 350W/A490.



L'acier 350AT résistant aux intempéries a été étudié avec une variété de boulons, et leurs courants de corrosion galvaniques sont présentés à la figure 21 :

- En association avec B8M ou B8SH, son courant galvanique est d'environ 11 µA. Les boulons sont protégés contre la corrosion en contact avec l'acier 350AT résistant aux intempéries.
- L'acier 350AT/A490 a montré des valeurs négatives entre -10 et -22 µA. Cependant, la polarité pourrait changer avec le temps pour cette paire si elle était surveillée suffisamment longtemps. En effet, il s'agit essentiellement des mêmes matériaux qui subissent une corrosion active dans la solution saline, comme le montre la figure 18 pour deux échantillons en acier galvanisé.
- Dans la paire d'acier au carbone 350AT/A325 type I, le courant est d'environ -60 µA, ce qui indique que le boulon en acier au carbone est l'anode et qu'il présente une vitesse de corrosion plus élevée que les paires susmentionnées.
- Les boulons en acier galvanisé A325 type I ont produit des courants encore plus élevés (122 µA) au début de l'expérience, qui ont diminué au fil du temps à -51 µA. Ils ont montré une dissolution rapide de la couche de zinc sur le boulon au début et, avec le temps, ont atteint son substrat de carbone. Le courant à la fin de l'expérience est comparable à celui du boulon en acier au carbone A325, confirmant la dissolution du zinc.

Figure 21 : Courant galvanique du 350AT couplé aux boulons A325 type I CS (carré) et GS (losange), A490 (cercle), B8M (triangle) et B8SH (losange inversé).



Pour l'aluminium associé à des boulons en acier inoxydable, comme illustré à la figure 22, Al/B8M et Al/B8SH ont produit des courants similaires d'environ 15 µA en polarité positive, semblable à l'acier résistant aux intempéries jumelé aux deux boulons en acier inoxydable (12 µA).

La corrosion galvanique de l'A1010 avec les boulons B8M, B8SH et A325 type I GS est présentée à la figure 23. Encore une fois, la dissolution rapide de la couche

Figure 22 : Courant galvanique de l'Al couplé au B8M (carré) et au B8SH (cercle).

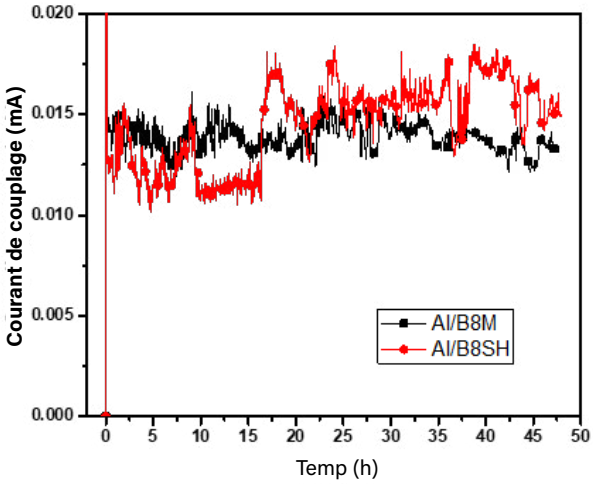
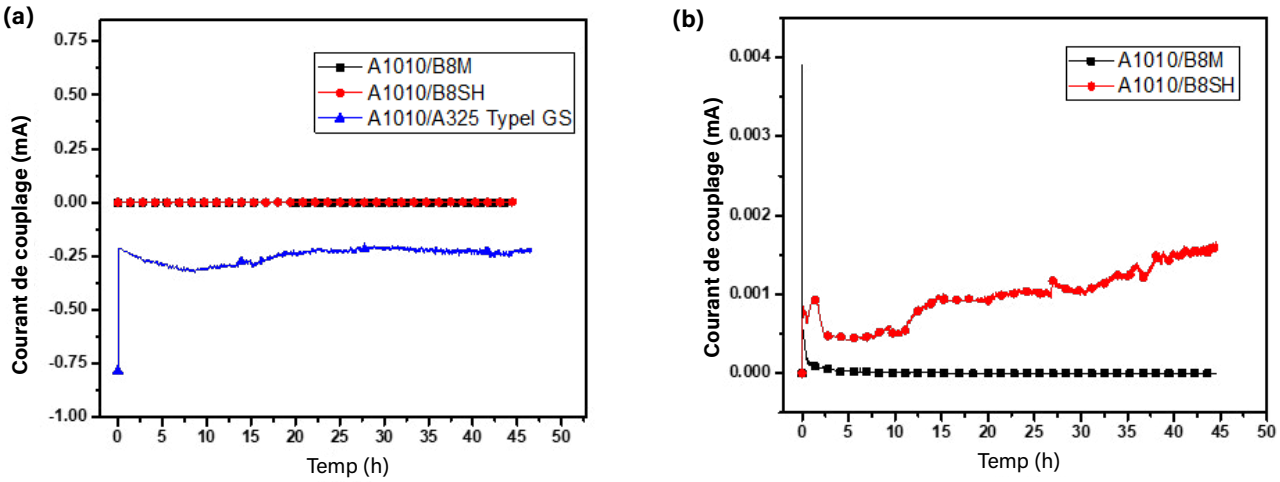


Figure 23 : Courant galvanique de l'alliage de pont A1010 couplé avec (a) A325 type I GS (triangle), B8SH (cercle) et B8M (carré) et (b) B8M (carré) et B8SH (cercle)



de zinc est observée par un courant négatif de -750 µA au début de l'expérience portant sur l'A1010/A325 type I GS. Au fil du temps, cette valeur s'abaisse à -250 µA lorsque le substrat en acier au carbone est atteint. L'A1010/B8M et l'A1010/B8SH ont des courants galvaniques négligeables d'environ 0,5 µA, et 2 µA, respectivement. Un examen plus approfondi de la figure 23 (b) aux deux paires a révélé que le courant du B8SH était très bas, à 0,5 µA au début de l'expérience, mais qu'il a augmenté au fil du temps jusqu'à environ 2 µA. C'est probablement dû à la corrosion localisée du boulon B8SH visible sur sa surface. Avec le B8M, l'A1010/B8M a généré le courant le plus faible (environ 0,5 µA) qui est resté stable tout au long de l'expérience.

4.3 Renseignements supplémentaires sur la corrosion et observation visuelle

4.3.1 LPR pour la résistance à la corrosion

Les valeurs de résistance à la corrosion ont été calculées en obtenant les pentes des moitiés supérieure et inférieure de la courbe de LPR et en faisant la moyenne de ces valeurs. Un exemple de graphique (figure 24) illustre la procédure d'obtention des valeurs de résistance sur l'acier au carbone 350W, où une moyenne des pentes des balayages avant et arrière était de 1,98 KΩ cm^2. Cette valeur est également utilisée comme valeur de référence pour évaluer d'autres alliages à l'étude.

Figure 24 : Potentiel par rapport à la densité du courant de l'acier au carbone 350W dans la solution de NaCl à 1,5 % en poids

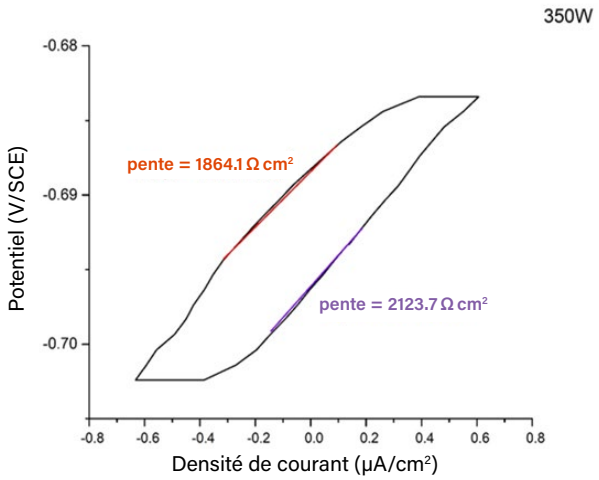


Tableau 5 : Résistance à la polarisation alliages de pont et de boulon dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids

Type d'alliage	Nom de l'alliage	LPR (KΩ cm²)
Alliage de corps de pont	350W	1,98
	350AT	1,52
	Al	394
	A1010	516
Alliage de boulon	A325 type I CS	1,76
	A325 type I GS	0,56
	A490	2,2
	B8M	1410
	B8SH	88,6

Le tableau 5 résume les données de la résistance à la polarisation des alliages de pont et de boulon à l'étude, représentant leur résistance à la corrosion individuelle.

Observations dérivées du tableau 5 :

- Parmi tous les matériaux structurels de pont, l'A1010 présente la plus haute résistance de polarisation (516 kΩ.cm²). C'est un résultat attendu puisque l'A1010 contient environ 9 à 10 % de chrome qui le protège de la corrosion. Vient ensuite l'aluminium, dont la résistance à la polarisation est capable d'atteindre 394 kΩ.cm². Malgré un potentiel de corrosion beaucoup plus faible, des oxydes d'aluminium se forment à la surface en présence d'oxygène, ce qui peut bloquer la progression de la corrosion et entraîner une plus grande résistance à la polarisation. L'acier au carbone 350W et l'acier résistant aux intempéries 350AT présentent une résistance à la polarisation nettement inférieure, soit 1,98 et 1,52 kΩ.cm², respectivement. C'est un résultat attendu de l'acier au carbone. L'acier résistant aux intempéries comporte certains éléments d'alliage à un faible pourcentage (environ 0,4 % de chrome) et devrait avoir une résistance à la corrosion plus élevée que l'acier au carbone grâce à la formation d'une couche d'oxyde. Cependant, la patine n'est pas stable en présence de sel. Par conséquent, la résistance de polarisation de 350W et 350AT est similaire dans les mesures.
- Parmi les matériaux de boulonnage, l'acier inoxydable B8M offre la plus grande résistance à la corrosion en raison de Cr à 19 % en poids, de Ni à 8 % en poids et de molybdène (Mo) à 2 % en poids dans ses compositions. L'alliage B8SH présente également une résistance élevée à la corrosion (88,6 kΩ.cm²), mais elle est environ 15 fois inférieure au B8M. Malgré une composition similaire dans les deux alliages d'acier inoxydable, le B8SH n'a pas de Mo, ce qui joue un rôle important dans l'amélioration passive du film et la prévention de la corrosion localisée dans les environnements chargés de chlorures.
- Le boulon A325 type I galvanisé est celui qui présente la plus faible résistance à la corrosion (0,56 kΩ.cm²). La résistance mesurée ici provient de la corrosion de la couche de zinc qui est censée avoir une faible résistance à la polarisation.
- Les deux boulons en acier au carbone A325 type 1 et en acier résistant aux intempéries A490 ont des valeurs comparables de résistance à la polarisation de 1,76 et 1,30 kΩ.cm². Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, ces deux alliages sont semblables au 350W et au 350AT, respectivement, ce qui confirme la similarité de leurs valeurs de résistance à la polarisation.

4.3.2 PDP pour la tendance à la corrosion par piqûres

Des analyses de polarisation potentiodynamique ont été effectuées dans la solution de NaCl à 1,5 % en poids. La figure 25 montre les PDP de l'acier structurel 350W et des matériaux d'alliage à boulon A325 type I CS et A490. Le courant de corrosion individuel a été estimé en fonction des courbes de polarisation potentiodynamique. À partir des courbes, les vitesses de corrosion individuelles ont été obtenues concernant les matériaux de pont et les alliages de boulon à l'étude, et leur tendance à la corrosion générale/localisée a été étudiée. La PDP effectuée sur d'autres alliages est présentée à l'annexe C. Les résultats sont présentés au tableau 6.

Figure 25 : Courbes de polarisation dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids pour l'acier au carbone 350W (carré), l'A325 type 1 CS (cercle) et l'A490 (triangle).

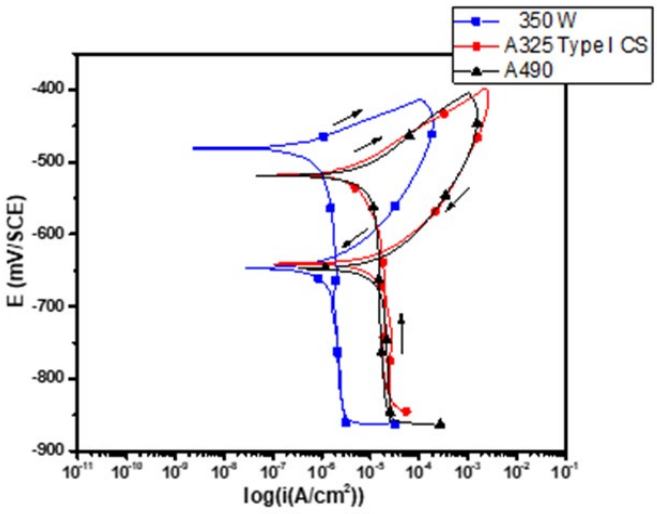


Tableau 6 : Vitesse de corrosion (i_{corr}) des alliages de pont et de boulon dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids

Type	Nom de l'alliage	i_{corr} (µA/cm²)	Nature de la corrosion
Alliage structurel de pont	Acier au carbone 350W	19	Générale
	Acier résistant aux intempéries 350AT	13	Générale
	Al	5	Générale
	A1010	3	Localisée
Alliage de boulon	A325 type I CS	17	Générale
	Acier résistant aux intempéries A490	11	Générale
	A325 type I GS	8,5	Générale
	B8M	0,12	Passive
	B8SH	0,17	Localisée

Les observations suivantes ont été faites à partir des résultats présentés ci-dessus :

- La polarisation potentiodynamique est un outil précieux pour identifier la nature de la corrosion ainsi que la vitesse de corrosion individuelle.
- Les alliages structurels de pont 350W et 350AT présentent une corrosion générale caractérisée par des vitesses de corrosion relativement élevées de 19 et 13 µA/cm², respectivement, dans la solution de NaCl à 1,5 % en poids. Ces résultats concordent avec les données de LPR qui ont montré que les deux alliages avaient une résistance à la polarisation à la fois faible et similaire. La même tendance est observée dans les matériaux de boulonnage : L'acier au carbone A325 type I et l'acier résistant aux intempéries A490 présentent une corrosion générale caractérisée par des vitesses de corrosion plus élevées (17 et 11 µA/cm², respectivement). Les boulons en acier galvanisé A325 type I présentent également une vitesse de corrosion relativement élevée de 8,5 µA/cm².
- Les vitesses de corrosion de l'Al et de l'A1010 sont inférieures (3 et 5 µA/cm² respectivement). Une fois polarisés, ils présentent une tendance à la corrosion localisée.
- Le B8M a démontré un comportement passif avec des vitesses de corrosion négligeables (0,12 µA/cm²), tandis que l'alliage est resté passif pendant la polarisation, exerçant une grande résistance à la corrosion localisée. Bien que le B8SH ait révélé une vitesse de corrosion passive (0,17 µA/cm²), il était sensible à la corrosion localisée, comme expliqué précédemment.

Rappelez-vous que l'Al a un potentiel de corrosion aussi négatif que l'acier et l'acier au carbone dans les solutions salines. L'Al a démontré une résistance à la corrosion beaucoup plus élevée et une vitesse de corrosion plus faible. Par conséquent, l'Al a un potentiel de corrosion nettement plus négatif que l'A1010, et pourtant, ils ont des vitesses de corrosion comparables. Ces résultats démontrent l'importance de comprendre la différence entre la thermodynamique de la corrosion et la cinétique, ainsi que les comportements de corrosion de différents métaux.

4.3.3 Analyse par microscopie

4.3.3.1 Microscopie optique

Les figures 26 et 27 présentent les analyses microstructurales des alliages de pont à l'étude obtenus au moyen de la microscopie optique.

Figure 26 : Images au microscope optique de la surface gravée de (a) 350W, (b) 350AT, (c) A1010 et (d) Al

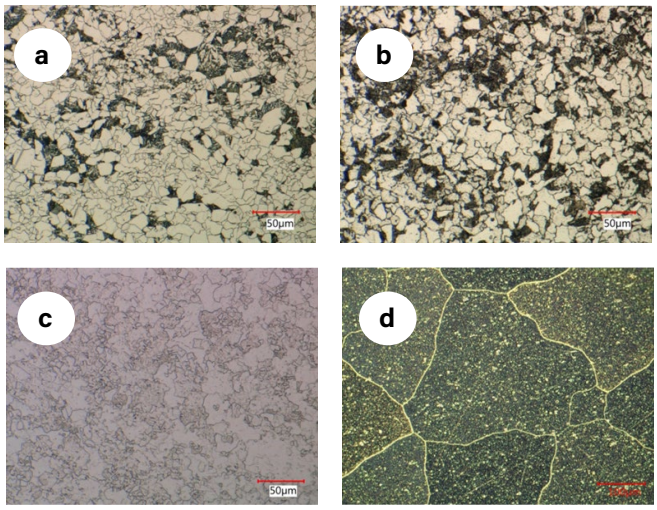
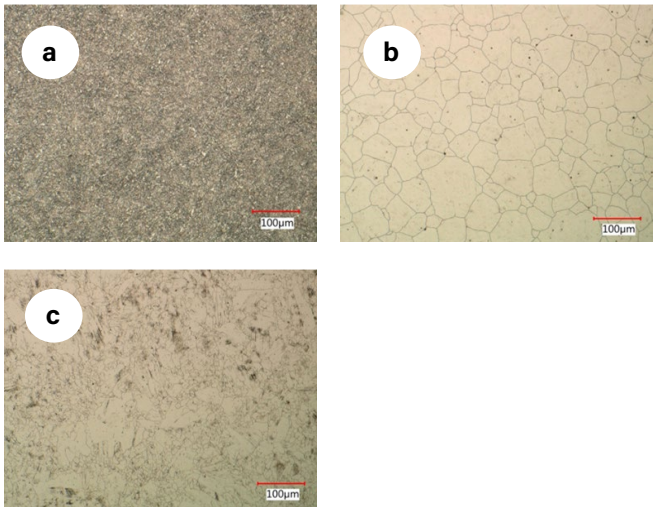


Figure 27 : Images au microscope optique de la surface gravée de (a) A490, (b) B8M et (c) B8SH



Les images au microscope optique des surfaces gravées (figures 26 et 27) montrent différentes microstructures dans ces échantillons. Notez qu'il n'est pas possible d'interpréter les microstructures avec précision sans connaître l'historique de traitement des échantillons. D'après les images optiques des surfaces gravées, les microstructures de ces échantillons sont interprétées comme suit :

- L'échantillon d'acier au carbone 350W semble contenir de la ferrite et de la perlite. La ferrite de Widmanstätten est visible dans certaines zones de cet échantillon à des grossissements plus élevés.
- L'acier résistant aux intempéries 350AT possède une microstructure qui semble contenir de la ferrite et de la perlite. Dans cet échantillon, des bandes perlitiques sont également détectées.
- L'échantillon d'acier A1010 semble avoir deux phases, une phase brillante et une phase plus foncée de ferrite et de martensite trempée.
- L'exemple d'Al montre les limites du grain et la phase secondaire à l'intérieur des grains.
- L'échantillon d'A490 semble avoir une microstructure de martensite probable et tempérée. La présence d'une phase bainitique est également possible.
- L'échantillon de B8M montre une microstructure composée de grains équiaxiaux, généralement observée dans les aciers inoxydables austénitiques.
- L'échantillon de B8SH comprend des grains de différentes tailles et une phase sombre. Cet échantillon contient une combinaison de petits et de gros grains. Sans analyse ni informations supplémentaires sur l'historique ou le traitement antérieur de cet échantillon, il est difficile d'identifier la phase sombre.

4.3.3.2 Imagerie SEM et analyse EDS du boulon en acier galvanisé

L'interface Zn/Fe est visible par imagerie SEM à la figure 28(a). Le mappage EDS a été effectué sur la même zone pour évaluer la distribution du zinc et du fer de l'échantillon. La figure 28(b) présente la carte du fer et la figure 28(c) met en évidence la distribution du zinc.

Figure 28 : Image SEM de l'interface Zn/Fe du zinc et de l'acier dans les boulons en acier galvanisé A325 (a), carte EDS montrant le fer (b) et carte EDS montrant le zinc (c).

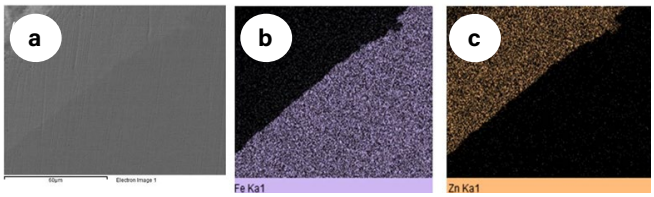


Figure 29 : Mesures de l'épaisseur de la couche de zinc dans un boulon en acier galvanisé A325 type I.

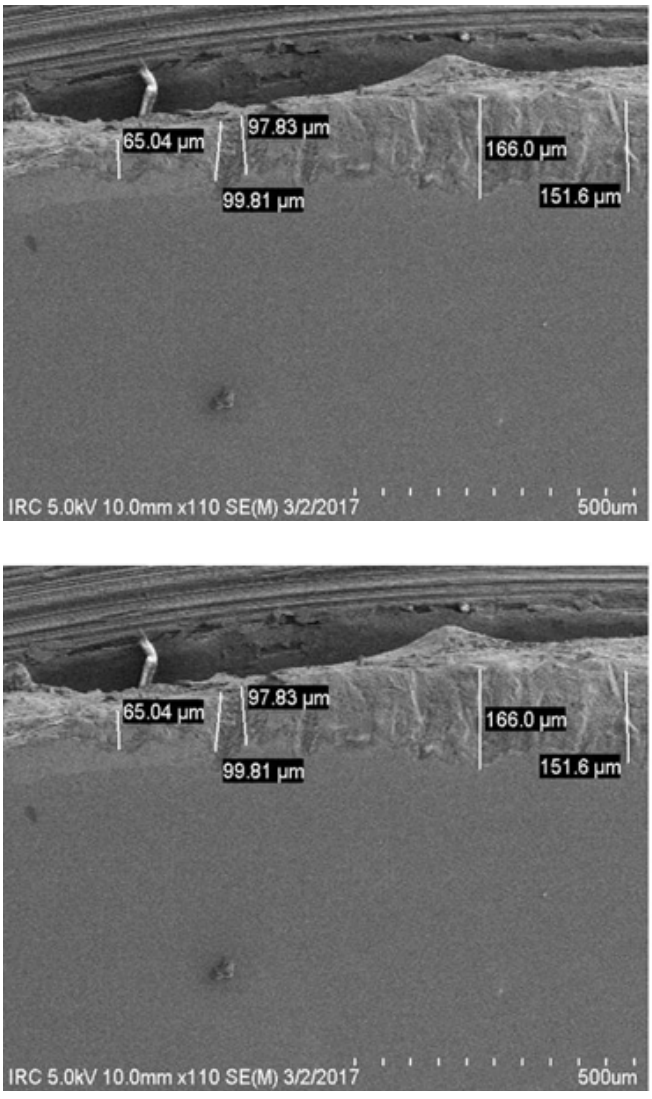
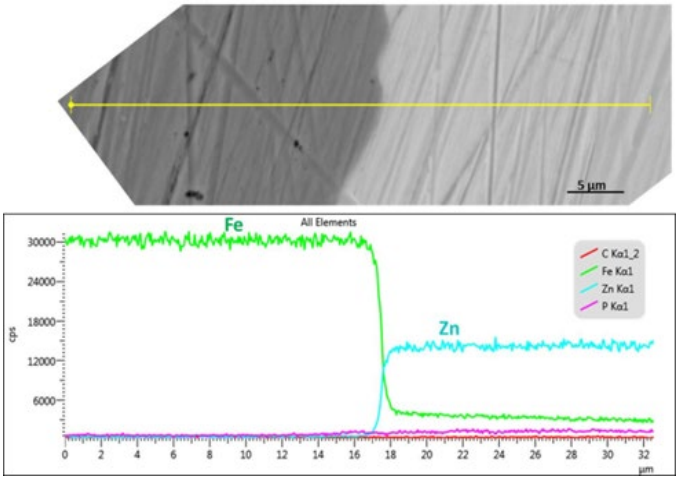


Figure 30 : Imagerie SEM et balayage linéaire EDS de l'interface Zn/Fe, montrant une variation de la concentration élémentaire sur 32 µm d'interface.



Pour estimer l'épaisseur de la couche de zinc, une série de mesures d'épaisseur a été effectuée sur un échantillon prélevé sur la tige d'un boulon en acier galvanisé A325. La figure 29 montre l'imagerie SEM de l'échantillon avec les mesures de l'épaisseur. La différence de contraste observée dans l'échantillon s'explique par la différence de poids atomique du Zn et du Fe. Ce contraste dans l'image a été utilisé pour estimer l'épaisseur de la couche de Zn. Les mesures révèlent que l'épaisseur n'est pas uniforme dans l'échantillon, allant de 57 µm à 166 µm. L'interface Zn/Fe a également été examinée à l'aide d'un balayage linéaire EDS. Le nombre élémentaire par seconde sur 32 µm de l'interface est illustré à la figure 30. Une diminution nette de la concentration de Fe et une augmentation de la concentration de Zn sont observées à l'interface Zn/Fe dans les boulons galvanisés. L'échantillon contient également des traces de carbone et de phosphore. Le substrat du boulon A325 est principalement en fer (98,7 % en poids) avec de légères traces de manganèse et de silicone. Vers l'interface, des traces de zinc apparaissent.

4.3.4 Plaques boulonnées à l'essai au brouillard salin

La figure 31 présente la progression de la corrosion des plaques en acier résistant aux intempéries 350AT boulonnées avec des boulons A325 type I, B8M et

Figure 31 : Plaques boulonnées en acier au carbone 350W après l'essai au brouillard salin. Plaque 350W – Boulon en acier au carbone A325 type 1 (haut), Plaque 350W – Boulon A490 (bas).



Plaque 350W – Boulon en acier au carbone A325 type I



Plaque 350W – Boulon en acier au carbone A325 type I



Plaque 350W – Boulon A490



Plaque 350W – Boulon A490

B8SH. Comme prévu, la plaque d'acier résistante aux intempéries 350AT a été fortement corrodée. Le boulon en acier au carbone A325 type I a montré une corrosion générale en contact avec des plaques fortement corrodées. La corrosion de la couche de zinc était visible par l'oxyde de zinc blanc sur le boulon en acier galvanisé A325 type I. Les boulons B8M et B8SH n'ont présenté presque aucun signe de corrosion (légère décoloration). Bien que les essais effectués dans le banc de corrosion aient révélé une corrosion importante par piqûres du B8SH, l'essai au brouillard salin n'a pas produit de corrosion par piqûres. D'autres études sont nécessaires pour le B8SH.

La figure 32 présente la progression de la corrosion des plaques en acier résistant aux intempéries 350AT boulonnées avec des boulons A325 type I, B8M et B8SH. Comme prévu, la plaque d'acier résistante aux intempéries 350AT est fortement corrodée. Le boulon en acier au carbone A325 type I montre une corrosion générale en contact avec des plaques fortement corrodées. La corrosion de la couche de zinc est visible par l'oxyde de zinc blanc sur le boulon en acier galvanisé A325 type I. Les boulons B8M et B8SH ne présentent presque aucun signe de corrosion sur le boulon (légère décoloration). Bien que les essais effectués dans le banc de corrosion aient révélé une corrosion importante par piqûres du B8SH, l'essai au brouillard salin n'a pas encore révélé de corrosion par piqûres. D'autres études sont nécessaires pour le B8SH.

Figure 32 : Plaques boulonnées en acier résistant aux intempéries 350AT après l'essai au brouillard salin. Plaque 350W – Boulon en acier au carbone A325 type 1 (haut), Plaque 350AT – Boulon B8M (milieu), Plaque 350W – Boulon B8SH (bas).



Plaque 350AT – Boulon en acier galvanisé A325 type I



Plaque 350AT – Boulon en acier galvanisé A325 type I



Plaque 350AT – Boulon en acier au carbone A325 type I



Plaque 350AT – Boulon en acier au carbone A325 type I



Plaque 350AT – Boulon B8M



Plaque 350AT – Boulon B8M



Plaque 350AT – Boulon B8SH



Plaque 350AT – Boulon B8SH

La figure 33 présente la progression de la corrosion des boulons B8M et B8SH qui raccordent deux plaques d'aluminium. Les inspections visuelles ne montrent aucun signe de corrosion sur les boulons, tandis que l'aluminium est corrodé au niveau de l'interface avec les boulons et de la plaque. Encore une fois, les résultats sont conformes à la prévision électrochimique indiquant que l'aluminium serait l'anode. Notre étude précédente, faisant appel à la même procédure, a montré que l'A1010 ne s'est pas corrodé dans la chambre au brouillard salin [59].

Figure 33 : Plaques boulonnées en aluminium après l'essai au brouillard salin. Plaque Al – Boulon B8M (haut), Plaque Al – Boulon B8SH (bas)



Plaque Al – Boulon B8M



Plaque Al – Boulon B8M



Plaque Al – Boulon B8SH



Plaque Al – Boulon B8SH

5 Discussion

5.1 Élaboration de la série galvanique et tendance à la corrosion

Une série galvanique est une liste de métaux et d'alliages d'ingénierie classés en fonction de leur potentiel de corrosion libre mesuré (E_{corr}) dans un environnement donné (principalement de l'eau de mer). La position d'un alliage dans la série correspond à sa tendance à la corrosion par rapport aux autres alliages, indiquant s'il est plus ou moins noble (inerte). Les relations entre les alliages présentés dans une série galvanique, définies par leur position et leur différence d'E_{corr}, constituent donc un guide pratique pour choisir deux alliages ayant moins tendance à subir la corrosion galvanique.

Dans cette étude, une série galvanique a été mise au point pour les alliages de pont. Elle est présentée à la figure 34. Dans cette série galvanique, chaque entrée d'alliage est associée à une gamme de potentiels de corrosion (E_{corr}) obtenus dans des solutions de NaCl situées entre 0,5 % et 3,5 % en poids, simulant des environnements d'exposition définis par diverses concentrations de chlorure. La seule exception est l'entrée « acier résistant aux intempéries-patine » qui a été mise au point dans une solution sans sels. Dans la partie la plus à droite de la figure se trouvent l'or et le platine (E_{corr} allant de +80 mV à 200 mV dans l'eau de mer) [7]. Comme prévu, les alliages structurels de pont et les matériaux de boulonnage ont une vitesse de corrosion E_{corr} plus négatif que l'or et le platine (indiqués par leur positionnement du côté gauche dans la série), ce qui signifie qu'ils sont moins nobles et plus actifs en comparaison dans la tendance à la corrosion.

La série galvanique présentée à la figure 34 présente une collecte, un classement et une comparaison systématiques de la tendance à la corrosion des alliages de pont pour la première fois, révélant une catégorisation en quatre groupes d'alliages étudiés selon leur E_{corr} :

- **Groupe A.** Le groupe le plus noble ayant la tendance la moins élevée à la corrosion est composé de l'acier inoxydable A1010, du B8M et du B8SH, et leur E_{corr} varie de -200 mV à 0 mV.
  - L'acier résistant aux intempéries 350AT dans un environnement sans sel avec une patine bien formée et d'autres aciers résistants aux intempéries, comme les boulons ASTM A490 type 3 avec une patine bien formée, sont également censés faire partie de ce groupe. Cela permet de souligner que le comportement de corrosion d'un alliage n'est pas seulement une propriété totale du matériau et de sa composition, mais qu'il est déterminé à la fois par le matériau et l'exposition à l'environnement.
- **Groupe B.** Le deuxième groupe, à gauche du groupe A, est l'acier A1010 en cas de corrosion caverneuse, l'E_{corr} étant légèrement supérieur à -400 mV. Ainsi, l'acier A1010 a deux positions dans la série galvanique. Ce phénomène d'avoir deux positions dans une série galvanique est commun pour les aciers inoxydables, car certains aciers ont tendance à présenter une corrosion localisée, surtout dans les environnements chargés de sel. Cela démontre également que les matériaux dans un environnement (en termes de chimie) ont la possibilité de présenter plus d'un comportement de corrosion en raison des conditions locales (micro) sur la surface du matériau causées par la corrosion d'aération différentielle, par exemple. Cela montre également que la corrosion a la possibilité d'être un processus très dynamique, ce qui explique pourquoi les mesures du courant de corrosion des échantillons répliqués sont susceptibles de présenter toute une gamme de valeurs.

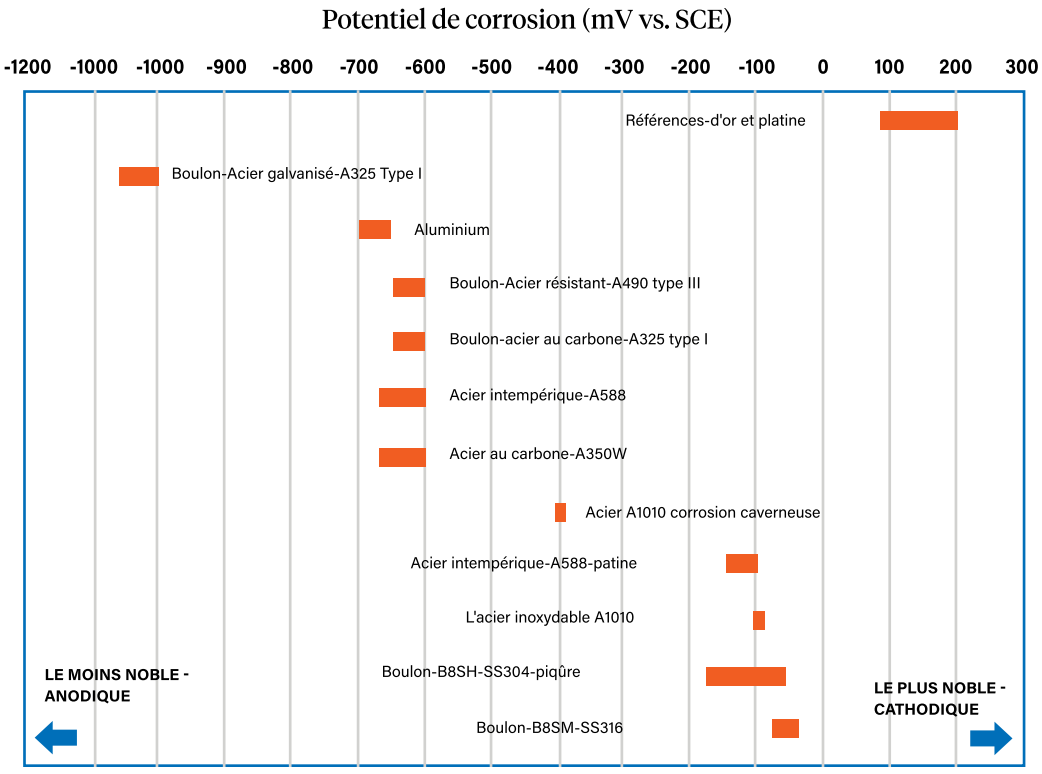
- **Groupe C.** Le troisième groupe, plus à gauche dans la série galvanique, présente un E_{corr} plus négatif dans une plage allant de -700 mV à -600 mV. Ce groupe est composé de l'acier au carbone (boulons de structure 350W et A325 type I), de l'acier poli résistant aux intempéries (boulons de structure 350AT et A490 de type 3) et de l'aluminium. Les alliages d'aluminium couvrent une vaste gamme de la série galvanique de -700 à 1000 mV lorsqu'ils sont testés dans l'eau de mer [7], mais nos essais révèlent une gamme quelque peu plus étroite de 700 mV à -600 mV. La différence peut provenir des solutions.
- **Groupe D.** Le groupe le moins noble provient du zinc sur le boulon galvanisé A325 type I comme prévu, qui était inférieur à -1000 mV. La plage E_{corr} négative obtenue dans cette étude est conforme aux potentiels de corrosion bien connus du zinc. Toutefois, il est important de noter que son potentiel négatif explique en partie son utilisation généralisée, et qu'il sert souvent d'anode sacrificielle pour protéger d'autres alliages par le processus de corrosion galvanique.

Le tableau 7 présente les différences de corrosion obtenues entre les alliages structuraux et les matériaux de boulonnage de pont par rapport à leurs potentiels de corrosion mesurés dans la solution NaCl à 1,5 % en poids à la fin des 48 heures pour démontrer l'utilisation de la série galvanique (ou deux potentiels mesurés) aux fins de l'estimation de la tendance galvanique.

Concernant les alliages de pont étudiés dans les solutions de NaCl à 1,5 % en poids (tableau 7), il est possible de classer trois niveaux de tendance à la corrosion galvanique en fonction de la différence de potentiel de corrosion :

- **Tendance faible selon le potentiel.** Il s'agit des paires d'alliage galvaniques du groupe A (acier inoxydable) ou du groupe C (acier résistant aux intempéries, acier au carbone et aluminium) qui présentent des différences de potentiel de corrosion inférieures à 50 mV ou légèrement supérieures à 50 mV (c.-à-d., 60 mV entre l'aluminium et le boulon en acier au carbone A325 type I).

Figure 34 : Série galvanique des alliages de pont de cette étude



- **Tendance élevée selon le potentiel.** Il s'agit des paires qui présentent des différences de potentiel de corrosion allant de 200 mV à environ 900 mV. Parmi ces paires : i) boulon en acier galvanisé A325 type I (groupe D) jumelé aux alliages structurels des groupes A, B et C, et ii) boulons du groupe B (acier au carbone et acier résistant aux intempéries) jumelés aux alliages structurels du groupe A (p. ex., un boulon en acier au carbone A325 type I couplé à de l'acier A1010).
- **Tendance moyenne selon le potentiel.** Cette catégorie concerne les différences de potentiel de corrosion se situant entre 278 mV et environ 610 mV. Elle comporte les boulons en acier inoxydable jumelés à des alliages structurels non inoxydables du groupe C. Les potentiels de la catégorie de tendance moyenne ont une polarité différente, y compris des différences de potentiel de corrosion élevées dans la catégorie « tendance élevée ». La polarité positive signifie que l'acier de construction est l'anode et que le boulon est protégé, étant la cathode. Cette polarité positive réduit la tendance à la corrosion galvanique, car l'acier de construction possède une plus grande surface dans un couplage galvanique avec le boulon.

Ces résultats constituent un outil précieux qui non seulement indique le potentiel de corrosion de chaque alliage (structure et boulon), ce qui permet d'estimer la tendance à la corrosion, mais également illustre la position relative et la différence des deux alliages, ce qui permet d'estimer leur tendance à la corrosion galvanique lorsqu'ils sont couplés. De plus, cet outil est une référence utile pour orienter la création de nouveaux alliages destinés à des applications de pont, car il souligne l'importance de tenir compte à la fois des performances mécaniques et de la tendance à la corrosion, dont la corrosion galvanique, lors de ce processus de création.

Nous avons utilisé la différence de potentiel de corrosion pour distinguer les tendances à la corrosion galvanique relevant des catégories faible, moyenne et élevée des différents couplages d'alliage de boulons et d'acier structurel. En estimant le processus galvanique, nous avons déterminé que l'ampleur et la polarité de la différence de potentiel de corrosion permettent de déterminer le niveau de tendance à la corrosion. La polarité détermine quel alliage fonctionne comme anode. Lorsqu'un boulon devient l'anode dans une cellule de corrosion galvanique, le risque de défaillance est plus élevé que lorsque c'est l'acier de construction qui remplit cette fonction. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser un matériau de fixation (notamment des boulons, des rondelles et des écrous) qui présentent un potentiel de corrosion plus élevé que l'acier structurel du pont. Les boulons en acier galvanisé peuvent cependant faire exception ici, car ils sont souvent utilisés pour leurs propriétés de corrosion sacrificielle.

Il convient également de noter que la tendance à la corrosion galvanique estimée par la différence de potentiel de corrosion est une tendance à la corrosion

Tableau 7 : Différence de potentiel dans la solution de NaCl à 1,5 % pour illustrer la tendance à la corrosion

Matériau du boulon	Alliage structurel de pont					
	Acier résistant aux intempéries	Acier résistant aux intempéries-patine	Acier au carbone	Acier A1010	Corrosion caverneuse A1010	Aluminium
Acier galvanisé A325 type I	-372‡	-850‡	-365‡	-913‡	-611‡	-349‡
A325 type I Acier au carbone	17*	-461‡	24*	-524‡	-222‡	40*
A490 type 3 Acier patinable	37*	-441‡	44*	-504‡	-202‡	60*
B8M SS316	587††	109††	594††	46*	348††	610††
B8SH SS304	517††	39*	524†	-24*	278††	540††

Polarité : « + » signifie que l'alliage de boulon est la cathode, et « - » signifie que l'alliage de boulon est l'anode. Gris foncé* : Faible tendance à la corrosion galvanique selon le potentiel. Gris pâle† : Tendance moyenne à la corrosion galvanique selon le potentiel. Blanc‡ : Forte tendance à la corrosion galvanique selon le potentiel.

galvanique (régie par la thermodynamique), tandis que les dommages réels liés à la corrosion galvanique sont contrôlés par le courant de corrosion galvanique (cinétique de corrosion), qui est présenté dans la section suivante. Cela est dû au fait qu'une tendance élevée à la corrosion n'entraîne pas nécessairement une vitesse de corrosion élevée. Par exemple, la formation d'une couche d'oxyde efficace (produits de corrosion) a le potentiel de réduire considérablement la vitesse de corrosion. De plus, les alliages d'aluminium sont bien connus pour avoir des potentiels de corrosion très négatifs, mais ils pourraient avoir une vitesse de corrosion très faible (ou une résistance élevée à la corrosion).

5.2 Évaluation de la vitesse de corrosion galvanique

Cette section décrit les courants de couplage galvanique des paires d'alliage (acier structurel et boulon) et le risque de corrosion galvanique sur le plan de la vitesse des dommages causés par la corrosion, ce qui est présenté au tableau 8.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, il n'existe aucune connaissance existante qui permette de guider l'évaluation de l'ampleur de la corrosion galvanique. Nous avons choisi deux paires d'acier structurel/boulons, l'acier au carbone structurel 350W avec deux matériaux de boulons respectifs, l'acier au carbone A325 type I et l'acier résistant aux intempéries A490, comme paires de référence dans cette étude pour comparer l'ampleur de la corrosion galvanique d'autres couples galvaniques. Dans les deux paires, les anodes étaient des échantillons d'acier au carbone structurel 350W (10 cm^2), démontrés par la polarité positive du courant. Les densités de courant anodique résultantes étaient de 1,2 $\mu A/cm^2$ et 1,1 $\mu A/cm^2$. Ces densités de corrosion galvanique feront que l'anode (acier au carbone) perdra plus rapidement son acier sous l'effet d'une vitesse de corrosion générale de 19 $\mu A/cm^2$. Les densités de courant galvanique de 1,2 $\mu A/cm2$ et 1,1 $\mu A/cm^2$, moins de 10 % de sa vitesse de corrosion générale avant le couplage galvanique dans un même environnement, seraient considérées dans la catégorie de corrosion faible, et donc, présenteraient une vitesse faible de corrosion galvanique.

Pour la paire d'acier résistant aux intempéries 350AT/acier au carbone A325 type I, le courant de couplage mesuré était de 71 µA, et compte tenu de la polarité négative, le boulon servait d'anode de corrosion avec une densité de courant de couplage de 71 $\mu A/cm^2$. Cela représente une corrosion accélérée du boulon en acier au carbone, car son courant de corrosion était de 17 $\mu A/cm^2$ avant qu'il ne soit couplé à l'acier 350AT. La corrosion galvanique a accéléré sa vitesse de corrosion de plus de quatre fois et l'a transmise à une vitesse de corrosion galvanique très élevée.

Nous avons également analysé la vitesse de corrosion galvanique (la densité de courant galvanique sur l'anode, $\mu A/cm^2$) par rapport à la vitesse de corrosion générale d'un alliage anodique observée avant le couplage galvanique. Pour les deux paires de référence, le rapport entre la vitesse de corrosion galvanique et la vitesse de corrosion générale (Gal/Corr) a été établi à 0,06 (tableau 9). C'est moins de 10 % de la vitesse de corrosion générale qui se produirait sans le couplage. Cela représente un risque galvanique faible, conforme à l'évaluation antérieure de la vitesse de corrosion galvanique à elle seule. D'autres paires ont été étudiées pour évaluer la vitesse de corrosion galvanique et le rapport avec la vitesse générale, donnant quatre groupes distincts sur le plan de la densité du courant de corrosion galvanique :

- **Négligeable.** L'acier inoxydable A1010 (l'anode) avec le B8M et le B8SH présente des densités de courant de corrosion galvanique de 0,01 $\mu A/cm^2$, soit environ un ordre d'ampleur de moins que les paires de référence. La vitesse de corrosion galvanique est donc négligeable par rapport à la corrosion générale. Les rapports Gal/Corr étaient inférieurs à 0,01, ou 1 %, soit un risque de corrosion galvanique suffisamment faible pour être classé comme étant négligeable.
- **Faible.** Lorsque les boulons en acier inoxydable ont été couplés à l'acier résistant aux intempéries 350AT structurel (l'anode) ou à l'aluminium (l'anode), les densités de courant de corrosion galvanique variaient de 0,2 à 1,5 $\mu A/cm^2$, ce qui est aussi faible que les paires de référence. Les rapports Gal/Corr étaient tous inférieurs à 0,5, ce qui signifie que la vitesse de corrosion galvanique était deux fois plus basse que la vitesse de corrosion générale de l'alliage anodique. La tendance à la corrosion galvanique a donc été évaluée comme étant faible.

Tableau 8 : Évaluation de la densité du courant de corrosion galvanique mesuré dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids

Alliage structurel/ boulon couplés	Anode (Surface)	M : Vitesse de corrosion galvanique Niveau de corrosion galvanique (selon l'ISO 9223)	N : Vitesse de corrosion individuelle sans couplage galvanique ($\mu A/cm^2$)	Rapport corrosion/ corrosion galvanique (M/N) Niveau de tendance galvanique
350W/A325 type I CS	350W ($10\ cm^2$)	1,2 $\mu A/cm^2$ Référence : Faible	Plaque : 19 $\mu A/cm^2$	0,06 Faible
			Boulon : 17 $\mu A/cm^2$	—
350W/A490	350W ($10\ cm^2$)	1,1 $\mu A/cm^2$ Référence : faible	Plaque : 19 $\mu A/cm^2$	0,06 Faible
			Boulon : 11 $\mu A/cm^2$	—
Acier au carbone 350AT/ A325 type I	A325 type I-CS ($1\ cm^2$)	71 $\mu A/cm^2$ Très élevée	Plaque : 13 $\mu A/cm^2$	—
			Boulon : 17 $\mu A/cm^2$	4,17 Très élevée
350AT/B8M	350AT ($10\ cm^2$)	1,1 $\mu A/cm^2$ Faible	Plaque : 13 $\mu A/cm^2$	0,08 Faible
			Boulon : 0,12 $\mu A/cm^2$	—
350AT/B8SH	350AT ($10\ cm^2$)	1,0 $\mu A/cm^2$ Faible	Plaque : 13 $\mu A/cm^2$	0,08 Faible
			Boulon : 0,17 $\mu A/cm^2$	—
Acier galvanisé 350AT/ A325 type I	A325 type I GS ($1\ cm^2$)	51 $\mu A/cm^2$ Très élevée	Plaque : 13 $\mu A/cm^2$	—
			Boulon : 8,5 $\mu A/cm^2$	6,00 Très élevée
A1010/B8M	A1010 ($10\ cm^2$)	0,01 $\mu A/cm^2$ Négligeable	Plaque : 3 $\mu A/cm^2$	0,003 Négligeable
			Boulon : 0,12 $\mu A/cm^2$	-
A1010/B8SH	A1010 ($10\ cm^2$)	0,02 $\mu A/cm^2$ Négligeable	Plaque : 3 $\mu A/cm^2$	0,006 Négligeable
			Boulon : 0,17 $\mu A/cm^2$	—
A1010/A325 type I GS	A325 type I GS ($1\ cm^2$)	Extrémité 215 $\mu A/cm^2$ Extrême	Plaque : 3 $\mu A/cm^2$	—
			Boulon : 8,5 $\mu A/cm^2$	25,29 Extrême
Aluminium/B8M	Aluminium ($10\ cm^2$)	1,4 $\mu A/cm^2$ Faible	Plaque : 5 $\mu A/cm^2$	0,28 Faible
			Boulon : 0,12 $\mu A/cm^2$	—
Aluminium/B8SH	Aluminium ($10\ cm^2$)	1,5 $\mu A/cm^2$ Faible	Plaque : 5 $\mu A/cm^2$	0,30 Faible
			Boulon : 0,17 $\mu A/cm^2$	—

- **Très élevée.** Lorsque l'acier de construction 350AT a été couplé aux boulons A325 (acier au carbone de type I ou acier galvanisé de type I), les densités de courant de corrosion galvanique variaient de 51 à 71 $\mu A/cm^2$, soit un ordre d'ampleur plus élevé que les paires de référence et indiquant une vitesse très élevée en comparaison. Les rapports Gal/Corr, 4,17 et 6,00, étaient supérieurs à 2, ce qui signifie que la vitesse de corrosion galvanique était plus du double de la vitesse de corrosion générale de l'alliage anodique. La tendance à la corrosion galvanique est donc classée comme étant très élevée.

Les résultats de ces deux paires justifient un examen plus approfondi, car la tendance galvanique estimée serait faible si seuls leurs potentiels de corrosion étaient pris en compte (tableau 7). Malgré un potentiel de corrosion semblable, dans les environnements chargés de chlorures, ils se corrodent rapidement et présentent une forte tendance à la corrosion. Dans un tel cas, une légère polarisation a également le potentiel d'entraîner un courant de corrosion galvanique important.

Ces deux paires illustrent clairement qu'il faut caractériser les comportements/propriétés de corrosion individuels de l'alliage de pont, notamment les propriétés de l'alliage qui interagissent avec ses conditions d'exposition. De tels renseignements devraient alors être mis à la disposition du milieu de la construction des ponts. Ces données aideront à évaluer un mécanisme de corrosion particulier. Plus important encore, elles permettront aux ingénieurs de ponts d'effectuer une évaluation complète de la corrosion de certains métaux et alliages, et faciliteront l'évaluation générale de la tendance à la corrosion.

- **Extrême.** Le couplage acier A1010 et boulon en acier galvanisé A325 type I a donné un résultat extrême, ce qui confirme la prévision établie à partir de la grande différence de potentiel de corrosion de ces deux matériaux. Leur vitesse de corrosion galvanique a diminué au fil du temps, passant de 783 à 215 µA/cm^2 à la fin de la période de surveillance, soit plus de deux ordres d'ampleur supérieurs aux paires de référence. Le rapport Gal/Corr atteignait 25. La tendance à la corrosion galvanique a donc été évaluée comme étant extrême.

Compte tenu de cette analyse, une grande différence de potentiel de corrosion pourrait indiquer une tendance à la corrosion galvanique plus élevée, ce qui devrait donner lieu à une enquête plus approfondie, en particulier dans le cas des applications critiques. À l'inverse, une différence apparemment mineure de potentiel de corrosion qui indique une tendance à la corrosion galvanique inférieure pourrait également entraîner une vitesse de corrosion galvanique importante selon le comportement de corrosion individuel de l'alliage dans un environnement donné. À l'avenir, il serait avantageux d'établir les comportements/propriétés de corrosion individuels des alliages de pont dans le cadre de leurs interactions avec les conditions d'exposition.

Il est bon de répéter que le niveau extrême de courant de la corrosion galvanique constaté sur le boulon en acier galvanisé indique une vitesse de corrosion élevée. En fait, c'est cet attribut bien connu qui est exploité, où la couche de zinc subit une corrosion galvanique de manière à former une cellule de corrosion galvanique, protégeant ainsi les métaux en contact.

Par conséquent, toute corrosion galvanique n'est pas nécessairement « mauvaise ». Ces recherches portent sur la présentation du risque de corrosion galvanique sur le plan de l'ampleur, y compris la façon de l'évaluer.

L'analyse ci-dessus confirme également la nécessité d'établir des critères pour interpréter la corrosion galvanique. Les critères provisoires de la corrosion galvanique sont présentés au tableau 9. Ces critères sont fondés à la fois sur la vitesse de corrosion galvanique (la vitesse de perte de métal causée par le courant d'un métal à l'autre) et sur le nouveau rapport Gal/Corr (créé pour comparer la vitesse de perte de métal causée par la corrosion galvanique et la vitesse de perte de métal sans corrosion galvanique dans un même environnement). Par exemple, le rapport Gal/Corr donne une idée de l'ampleur de la zone touchée par la corrosion galvanique par rapport à la zone non touchée qui est plus éloignée du contact métallique. Remarque : Une zone non touchée par la corrosion galvanique pourrait encore subir une corrosion générale « préjudiciable » par elle-même.

Cette élaboration des critères de corrosion galvanique était une enquête initiale. Une étude plus approfondie est nécessaire afin d'élaborer des critères d'évaluation complets. Plus de données sont requises, comme le démontrent les catégories des critères (tendances « moyenne » et « élevée »), lesquelles manquent actuellement d'exemples de paires d'alliage. De plus, des études devraient être menées en laboratoire et sur le terrain sur les dommages causés par la corrosion à plus long terme pour corréler les densités de courant, à des fins d'amélioration. Malgré cela, notre conception expérimentale nous a permis d'observer diverses densités de corrosion galvanique et d'établir des critères préliminaires susceptibles de servir de base au développement et à la discussion.

5.3 Processus d'évaluation de la corrosion galvanique

Le potentiel de corrosion et la fonction d'ampleur de la corrosion ont été utilisés comme outil pour effectuer une évaluation de la corrosion galvanique en utilisant des renseignements de complexité croissante, comme illustré à la figure 35 :

- **Étape 1 :** Évaluer le risque de corrosion galvanique des métaux et des alliages couplés en fonction des renseignements tirés de l'expérience en ingénierie, de la documentation ou des documents directeurs, y compris les codes et les normes.
- **Étape 2 :** Évaluer le risque de corrosion galvanique (la tendance) en fonction de leur potentiel de corrosion à partir d'une série galvanique existante ou de mesures du potentiel de corrosion.
- **Étape 3 :** Mesurer le courant de corrosion galvanique et évaluer l'ampleur de la corrosion galvanique. Pour les structures critiques, une vitesse de corrosion générale est recommandée pour procéder à une évaluation plus complète des risques, à l'aide des critères de risque de corrosion galvanique (tableau 9).

Dans ce processus, l'étape 1 définit la condition d'exposition, les matériaux et la configuration d'un scénario de corrosion galvanique dans l'application donnée. La condition d'exposition devrait être semblable aux conditions observées antérieurement pour garantir la validité de la comparaison. L'étape 2 obtient les potentiels de corrosion et les différences permettant d'évaluer la tendance à la corrosion galvanique. Des renseignements supplémentaires sur le rendement individuel des matériaux en matière de corrosion, par exemple, les vitesses de corrosion et la tendance à la corrosion par piqûres (section 4.3), sont utiles pour mener une évaluation plus approfondie. L'étape 3 mesure et évalue quantitativement le taux de dommages causés par la corrosion galvanique. Cette étape est fortement recommandée si une corrosion galvanique se produit entre une paire inconnue de métaux et d'alliages qui seraient utilisés dans un composant de pont critique.

Ce processus est également démontré par l'analyse suivante qui porte sur des cellules de corrosion galvanique obtenues dans le cadre de cette étude et qui illustrent parfaitement les étapes de l'évaluation. Comparant les deux couplages de boulons en acier au carbone 350AT/A325 et 350AT/B8M (tableau 10), l'analyse est effectuée en fonction des nouvelles informations et des informations dérivées de l'étape précédente afin de mieux comprendre le scénario et d'actualiser le fondement de la prise de décisions :

- **Étape 1.** Cette étape est réalisable au moyen d'une analyse documentaire.
- **Étape 2.** D'après la série galvanique mise au point dans le cadre de cette étude, les différences de potentiel de corrosion ou leur position sont inférieures à 50 mV d'écart pour l'acier au carbone 350AT/A325 et à 587 mV pour le 350AT/B8M. Leurs différences de potentiel ont été mesurées à -16 mV et à 587 mV, respectivement. Ces deux facteurs contribueraient à déduire facilement que le 350AT et le B8M auraient une tendance galvanique beaucoup plus importante sans que leurs propriétés de corrosion individuelles soient connues.
- **Étape 3.** Malgré la grande tendance à la corrosion galvanique du couple 350AT/B8M, la vitesse de corrosion galvanique est négligeable (1,1 µA/cm^2). En revanche, malgré la différence potentielle minimale de l'acier au carbone 350AT/A325, la vitesse de corrosion galvanique sur l'anode en acier au carbone A325 est très élevée, à 71 µA/cm^2.

Tableau 9 : Évaluation et critères de la vitesse de corrosion galvanique

Rapport Gal/Corr	Vitesse de corrosion galvanique/vitesse de corrosion générale	Corrosion galvanique
< 0,01	Moins de 1 %	Négligeable
0,01 à 0,5	1 à 50 %	Faible
0,5 à 1	50 % jusqu'à une valeur équivalente	Moyenne
1 à 2	Jusqu'au double	Élevée
2 à 10	Jusqu'à 10 fois	Très élevée
> 10	Plus de 10 fois supérieure	Extrême

Rapport Gal/Corr : rapport entre la vitesse de corrosion galvanique et la vitesse de corrosion générale.

L'application de la procédure dans l'évaluation de la corrosion galvanique des deux paires suit clairement le processus décisionnel avancé avec des informations plus détaillées : i) à partir de l'étape 1, il est impossible d'obtenir une évaluation des risques de corrosion galvanique; ii) à partir de l'étape 2, il serait possible d'évaluer que le 350AT/B8M présente un risque de corrosion galvanique plus élevé que le boulon en acier au carbone 350AT/A325; et iii) à partir de l'étape 3, l'évaluation est mise à niveau pour refléter que la vitesse de corrosion galvanique 350AT/A325 est beaucoup plus élevée que celle du 350AT/B8M.

En conclusion, le risque de corrosion galvanique est beaucoup plus élevé dans le couplage 350AT/A325 que dans le couplage 350AT/B8M, ce qui est le contraire de l'évaluation initiale obtenue à partir de l'étape 2. La vitesse de corrosion galvanique négligeable du couplage 350AT/B8M s'explique potentiellement par le fait que le SS316 du B8M demeure passif et agit comme une faible cathode [80]; la vitesse de corrosion galvanique très élevée du couple 350AT/A325 provient de la corrosion rapide des métaux dans la solution de NaCl à 1,5 % en poids, où une petite quantité de polarisation peut considérablement augmenter la vitesse de corrosion.

Pour les composants critiques de support ou de transfert de charge des ponts qui présente un risque de corrosion galvanique, la procédure proposée en trois étapes est recommandée dans un environnement rigoureux à des fins de durabilité et de sécurité. Il est tout aussi important de bien comprendre la corrosion des alliages de pont individuels. Cela permet de mieux évaluer la corrosion galvanique, comme le couplage 350AT/B8M, qui présente une tendance importante à la corrosion galvanique, mais qui présente une vitesse de corrosion galvanique négligeable. La corrosion galvanique coexiste avec d'autres formes de corrosion. L'étude du boulon B8SH le confirme. Lorsqu'il est couplé à de l'acier résistant aux intempéries, 350AT ou A1010, le risque de corrosion galvanique est faible. Malheureusement, ce type de boulon peut avoir tendance à présenter une corrosion par piqûres, et il n'est donc pas recommandé de l'utiliser dans les ponts. Par conséquent, sa corrosion galvanique ne présente pas toujours de risque, mais son comportement de corrosion demeure un risque qu'il vaut mieux éviter.

Figure 35 : Un processus d'évaluation des risques de corrosion galvanique en trois étapes.

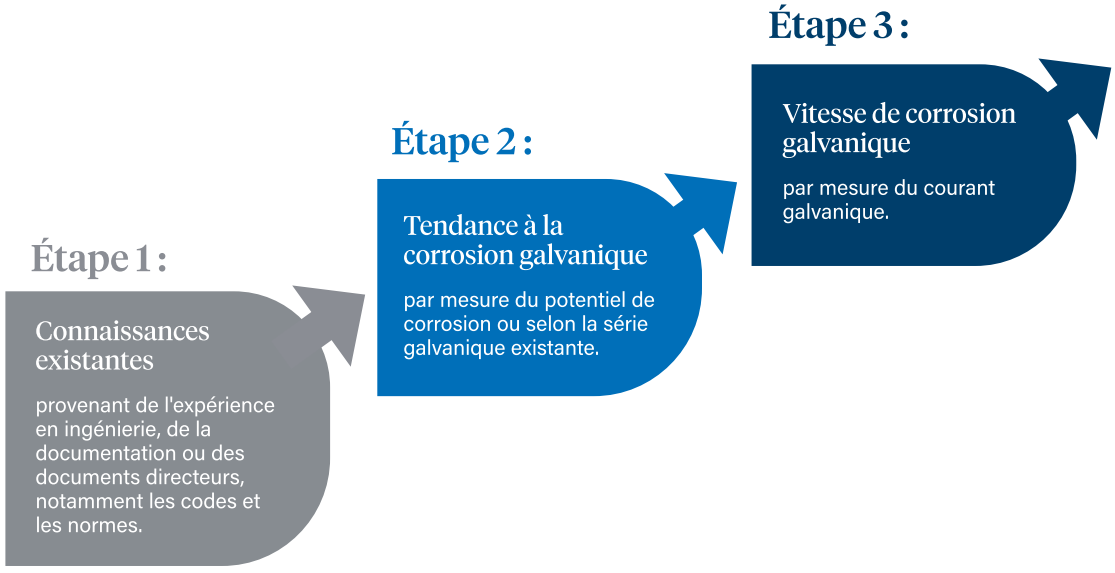


Tableau 10 : Résumé de la corrosion galvanique des deux paires dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids.

	Corrosion galvanique	Boulon en acier au carbone A325 type I	Boulon B8M en acier inoxydable
Acier résistant aux intempéries 350AT	Différence du potentiel de corrosion	-16 mV	587 mV
	Courant galvanique	-0,071 mA	+0,011 mA
	Anode	A325 type I	350AT
	Densité de courant anodique	71 µA/cm²	1,1 µA/cm²

Cela a démontré qu'en pratique réelle, le risque de corrosion a besoin d'être évalué de façon exhaustive en tenant compte des formes de corrosion pertinentes pour les ponts en acier et en aluminium.

5.4 Atténuation des risques de corrosion galvanique

Contrant les deux premières conditions nécessaires à la formation de la corrosion galvanique, l'isolation électrique et la peinture permettent d'isoler et d'éliminer le contact de l'électrolyte avec les métaux. Ces approches ne font pas partie de la portée de cette étude. En raison de la troisième condition nécessaire, le fait d'éviter un risque de corrosion supérieur à 50 mV est certainement utile. Toutefois, cela représente un défi lorsque des métaux mixtes sont régulièrement utilisés dans les applications d'ingénierie, notamment les ponts. Une solution plus faisable consiste à évaluer les risques associés aux métaux candidats.

Parmi les trois facteurs clés qui permettent de contrôler l'ampleur de la corrosion galvanique, selon cette étude, utiliser des métaux plus résistants à la corrosion, éviter les grands rapports de surface cathode/anode en se gardant de choisir un boulon qui serait l'anode dans les alliages structurels de pont, et réduire la teneur en sel sur les ponts permettraient de réduire le risque de corrosion galvanique.

5.5 Application de cette étude

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, il est bien connu que la corrosion est un mécanisme de détérioration propre au matériau et à l'environnement. La corrosion galvanique est encore plus compliquée, car elle implique deux matériaux et est propre à la configuration, à l'assemblage et à l'environnement.

L'assemblage et la configuration ont une incidence directe sur le rapport de surface cathode/anode, un facteur clé de la corrosion galvanique. L'environnement influence la corrosivité de l'électrolyte et constitue un autre facteur critique. Bien que les résultats de cette étude offrent des stratégies d'atténuation possibles, l'enquête sur le risque galvanique de paires particulières ne devrait pas être utilisée dans des applications directes sans tenir compte de l'environnement, de l'assemblage et de la configuration réels.

Cela est dû au fait que l'ampleur de la corrosion galvanique présentée dans cette étude a été évaluée dans des environnements salins qui simulent les paramètres corrosifs susceptibles d'exposer un pont à des risques de corrosion exigeant une protection et une prévention. Le schéma de classification décrit dans le présent document compare efficacement la résistance de la paire d'alliage à la corrosion galvanique. Par exemple, le risque de corrosion galvanique constaté concernant le boulon en acier au carbone A325 type I associé à l'acier résistant aux intempéries 350AT était très élevé par rapport aux autres paires étudiées dans l'environnement chargé de chlorures.

Bien que cette étude porte sur la corrosion galvanique des alliages structurels et des matériaux de boulonnage de pont, l'outil et le guide d'évaluation des risques de corrosion galvanique mis au point ici s'appliquent à d'autres configurations dans les applications de pont. Pour ces autres configurations, le même processus serait suivi : i) comprendre l'environnement; ii) examiner les types de métaux en contact; et iii) comprendre les surfaces respectives qui influent sur la corrosion galvanique.

Tableau 11 : Atténuation de la corrosion galvanique dans les applications de pont

	Mécanismes de corrosion	Mesures d'atténuation	Exemple dans cette étude
Conditions nécessaires	En contact électrique	Isolation électrique	S.O. P. ex., films d'oxyde isolants et pièces rapportées
	Exposition au même électrolyte	Éliminer l'électrolyte ou le contact de l'électrolyte avec les métaux	S.O. P. ex., peinture
	La différence de potentiel de corrosion est supérieure à 50 mV.	Éviter les matériaux qui présentent des différences importantes de potentiel de corrosion ou évaluation du risque	Évaluation des risques selon la procédure en trois étapes de la section 4.6
Facteurs clés	Résistance individuelle des métaux à la corrosion	Utiliser des métaux qui offrent une excellente résistance à la corrosion sans tendance à la corrosion par piqûres	Les boulons 316 B8M en acier inoxydable présentent un risque négligeable de corrosion galvanique.
	Rapport de surface cathode/anode	Éviter que le boulon soit l'anode	Le boulon en acier au carbone A325 type I, l'anode par rapport à un pont en acier résistant aux intempéries, présente un risque élevé de corrosion galvanique.
	Corrosivité de l'électrolyte	Éviter certaines paires de matériaux dans un environnement de sels de déglaçage	Le potentiel de corrosion est considérablement plus élevé dans l'échantillon d'acier résistant aux intempéries avec une formation accélérée de patine que dans les solutions salines de la section 4.1.

6 Résumé et besoins de futures recherches

6.1 Résumé du développement

La section 2 présente une introduction mécaniste de la corrosion galvanique, un examen de son étude et de sa prévention dans diverses industries, ainsi que l'état actuel de la pratique (au moyen de codes, normes et spécifications) dans la conception de la durabilité des ponts. Cette section explique que les mesures du potentiel de corrosion et du courant de corrosion galvanique sont deux méthodes fondamentales pour évaluer les risques de corrosion galvanique dans les domaines de l'ingénierie. Une série galvanique est un guide utile pour choisir des métaux à assembler ayant une tendance minimale à subir une réaction galvanique. Outre la différence de potentiel, de nombreux facteurs jouent un rôle dans l'ampleur de la corrosion galvanique entre deux métaux couplés, notamment la surface, l'état de la surface, la solution et l'environnement atmosphérique. En effet, ces facteurs influent sur la cinétique de la corrosion galvanique sur le plan de la vitesse de corrosion. Plusieurs de ces principes ont été démontrés tout au long de cette étude et servent de base à l'élaboration des stratégies de prévention et d'atténuation.

La section 2 décrit plus explicitement pour la première fois comment la corrosion galvanique coexiste avec d'autres formes de corrosion, ce qui signifie qu'au-delà de la simple vitesse de corrosion galvanique, une compréhension complète du risque de corrosion est nécessaire pour les structures et les composants critiques. Cela a été confirmé par l'étude expérimentale, en particulier avec le boulon B8SH qui a développé une corrosion par piqûres dans une cellule galvanique. Le milieu de la construction des ponts a reconnu que la corrosion constitue le problème le plus courant concernant la durabilité des superstructures en acier et



« Dans les applications de pont, si un boulon sert d'anode dans la cellule de corrosion galvanique, le risque peut être plus grand que lorsque l'acier de construction sert d'anode en raison de la surface beaucoup plus petite du boulon. »

des ponts à fondation en acier. Néanmoins, l'absence de directives de conception propres au mécanisme de corrosion empêche une protection adéquate contre diverses formes de corrosion en s'attaquant à leurs mécanismes particuliers.

La section 3 décrit le programme expérimental complet dans lequel 11 alliages de pont ont été étudiés dans des solutions à trois concentrations de NaCl (0,5 %, 1,5 % et 3,5 % en poids). Une combinaison de plusieurs techniques électrochimiques quantitatives a été utilisée pour explorer les cellules de corrosion galvanique et les comportements de corrosion individuels des alliages. La tendance à la corrosion galvanique (thermodynamique) et l'ampleur de la corrosion galvanique (cinétique de la corrosion) ont été mesurées. La vitesse de corrosion et les comportements passif-actif des alliages individuels ont également été mesurés pour mieux comprendre leur corrosion galvanique. Ensuite, une inspection visuelle des échantillons testés a été réalisée dans une chambre au brouillard salin à des fins de validation.

Dans la section 4, les propriétés anticorrosion des alliages, sur le plan de la résistance à la corrosion et de la vitesse de corrosion, ont été présentées en plus des potentiels de corrosion et du courant galvanique mesurés relativement aux alliages à l'étude. Malgré son potentiel de corrosion négatif, bien connu et confirmé dans cette étude, l'aluminium a démontré une résistance à la corrosion beaucoup plus élevée et une faible vitesse de corrosion comparativement à l'acier résistant aux intempéries ou à l'acier au carbone, car des oxydes d'aluminium se forment à la surface et ralentissent la progression de la corrosion. Ces résultats ont permis de mieux comprendre la différence entre la thermodynamique de la corrosion, la cinétique et les comportements de corrosion des métaux.

Dans le cadre de l'étude expérimentale (section 3) et de l'analyse avancée (section 4), un outil d'évaluation constitué d'une série galvanique, une procédure directrice et un ensemble de critères de corrosion galvanique ont été élaborés pour les chercheurs et les ingénieurs de pont, dans le but de mieux évaluer la tendance à la corrosion galvanique.

Une série galvanique a été mise au point (section 5.1) qui permet d'effectuer une collecte systématique des tendances en matière de corrosion des alliages de pont et d'établir des comparaisons entre ces tendances pour la première fois. Il s'agit d'un outil puissant pour présenter les potentiels de corrosion de manière ordonnée, ce qui facilite l'estimation de la tendance à la corrosion galvanique entre deux alliages de pont. Cela permet d'établir des valeurs de référence pour guider le développement de nouveaux alliages destinés à des applications de pont et rappeler aux concepteurs qu'ils devraient tenir compte à la fois des performances mécaniques et de la corrosion, notamment du risque de corrosion galvanique avec les alliages de pont existants.

À l'aide de la série galvanique, cette étude a démontré une différence significative du potentiel de corrosion qui permettrait de prédire un risque plus élevé. Toutefois, une petite différence indiquant une tendance inférieure à la corrosion galvanique a le potentiel d'entraîner une corrosion galvanique substantielle pour deux métaux, tous deux se corrodant activement. Ainsi, une méthode d'évaluation plus approfondie a été élaborée à l'aide de la mesure du courant de corrosion galvanique réel (section 5.2). Dans les applications de pont, si un boulon agit comme anode dans la cellule de corrosion galvanique, le risque sera plus élevé que lorsque l'acier de construction sert d'anode, en raison de la surface beaucoup plus petite du boulon. Cette analyse a également nécessité la création d'un ensemble de critères de corrosion galvanique permettant d'interpréter le risque de corrosion galvanique pour la première fois dans les applications de pont. Cet ensemble de critères a été élaboré en fonction de la vitesse de corrosion galvanique et du concept de rapport Gal/Corr, lequel tient compte de la vitesse de corrosion galvanique dans le contexte de la corrosion générale au sein d'un même environnement. La vitesse de corrosion et le rapport Gal/Corr ont fourni des paramètres d'évaluation cohérents pour les alliages étudiés dans ce projet. S'agissant d'un effort préliminaire, l'étude a placé l'évaluation du risque galvanique dans une nouvelle perspective et, espérons-le, suscitera l'intérêt, la discussion et la collaboration dans le milieu de la construction des ponts.

Ces résultats ont par la suite permis de mettre au point une procédure d'évaluation de la corrosion galvanique (section 5.3). La procédure comporte trois étapes qui utilisent des renseignements de plus en plus complexes : 1) utilisation des connaissances et de l'expérience existantes, y compris les guides, les codes et les normes, 2) utilisation de l'outil de série galvanique ou des mesures du potentiel de corrosion pour obtenir les potentiels de corrosion, et 3) utilisation des mesures du courant de corrosion galvanique. L'application de la procédure directrice a été démontrée avec succès au moyen de deux exemples qui ont montré une amélioration de la prise de décisions grâce à une plus grande quantité de renseignements et qui ont montré qu'une utilisation incomplète de la procédure risquait de fausser la conclusion.

6.2 Application et besoins futurs

Cette étude a été conçue dans le but d'appliquer des mécanismes de corrosion galvanique et des facteurs clés pour mieux comprendre le risque de corrosion galvanique dans les ponts en acier et en aluminium. Une série galvanique des alliages de pont, un ensemble de procédures et un ensemble de critères d'évaluation de la corrosion galvanique ont été mis au point et sont utilisables directement dans les applications de pont.

Les résultats de cette étude constituent aussi une stratégie d'atténuation possible, par exemple, en tenant compte de l'incidence de l'assemblage et de la configuration sur le rapport de surface cathode/anode et de l'influence d'un environnement sur la corrosivité. Parmi les trois facteurs clés qui permettent de contrôler l'ampleur de la corrosion galvanique, selon cette étude, utiliser des métaux plus résistants à la corrosion, éviter les grands rapports de surface cathode/anode en se gardant de choisir un boulon qui serait l'anode dans les alliages structurels de pont, et réduire la teneur en sel sur les ponts permettraient de réduire le risque de corrosion galvanique.

Il devrait être noté que la corrosion galvanique causée par la couche galvanisée de zinc est souvent utilisée pour protéger les métaux en contact. Par conséquent, toute corrosion galvanique n'est pas nécessairement « mauvaise ». Il est également important de mentionner que bien que cette étude porte sur la corrosion galvanique des alliages structurels et des matériaux de boulonnage de pont, l'évaluation de la corrosion galvanique par l'outil et le guide mis au point, ainsi que la stratégie d'atténuation subséquente, s'appliquent à d'autres configurations dans des applications de pont.

L'ampleur de la corrosion galvanique présentée dans cette étude a été évaluée dans des environnements salins qui simulent les paramètres corrosifs susceptibles d'exposer un pont à des risques de corrosion exigeant une protection et une prévention. L'étude fournit une comparaison efficace de la résistance des paires à la corrosion galvanique. Toutefois, cette étude a également montré que la corrosion galvanique est propre à la configuration, aux matériaux et à l'environnement. Par conséquent, le

risque galvanique de paires particulières ne devrait pas être utilisé dans des applications directes sans tenir compte de l'environnement, de l'assemblage et de la configuration réels. Par exemple, le risque de corrosion galvanique du boulon en acier au carbone A325 type I associé à l'acier résistant aux intempéries 350AT était très élevé par rapport aux autres paires étudiées dans l'environnement chargé de chlorures. Toutefois, dans un environnement sans chlorure, le risque sera probablement faible. Par conséquent, l'exploration expérimentale de la corrosion galvanique en l'absence de chlorure mérite d'être étudiée à l'avenir.

Cette étude a également démontré que la vitesse de corrosion galvanique n'est pas seulement régie par la force motrice d'une différence de potentiel de corrosion, mais aussi par la performance de corrosion des métaux. Par exemple, deux métaux qui se corrodent activement (p. ex., acier résistant aux intempéries et boulon en acier au carbone), malgré des potentiels de corrosion similaires, présentent une vitesse de corrosion galvanique beaucoup plus élevée que deux métaux (p. ex., aluminium et boulon en acier inoxydable) aux potentiels de corrosion très différents. Ainsi, la procédure mise au point qui comprend une mesure du courant de corrosion galvanique devrait être utilisée pour des applications critiques dans des environnements corrosifs. Cela suggère également que les performances de corrosion de chaque métal dans les applications de pont devraient être meilleures et systématiquement comprises de la même façon que leurs propriétés mécaniques le sont, généralement, dans les applications de pont.

À l'avenir, il serait avantageux d'inclure des renseignements sur les comportements/propriétés de corrosion individuels des alliages de pont avec les propriétés de ces alliages qui interagissent avec leurs conditions d'exposition. Cette précaution aidera non seulement à évaluer les mécanismes de corrosion rencontrés dans les applications de pont, mais surtout à fournir aux ingénieurs de ponts des renseignements plus complets sur la corrosion des alliages qu'ils sont susceptibles d'utiliser. Cela s'applique particulièrement à l'acier résistant aux intempéries, car son comportement de corrosion dans les environnements salins n'est pas entièrement compris. Environ la moitié des ponts en acier au Canada (dont plusieurs sont soumis à des sels de déglaçage) sont construits avec de l'acier résistant aux intempéries, malgré une image si incomplète de ses propriétés corrosives.

Il est également nécessaire d'approfondir les critères d'évaluation des risques pour interpréter la corrosion galvanique. Cette étude constitue une première tentative qui se fonde sur les données existantes, une analyse en laboratoire d'échantillons de ponts types et l'introduction du nouveau concept de rapport Gal/Corr. Le rapport Gal/Corr tient compte de la vitesse de corrosion galvanique dans le contexte de la corrosion générale au sein d'un même environnement, assurant une évaluation uniforme des alliages à l'étude dans le projet. Bien qu'il s'agisse d'un effort préliminaire, le travail décrit dans le présent document place l'évaluation du risque galvanique dans une nouvelle perspective qui, espérons-le, stimulera la discussion, la collaboration et d'autres recherches.

Références

[1] G. Koch, M. Brongers, N. Thompson, Y. Virmani, and J. Payer, "Corrosion cost and preventive strategies in the United States,", Federal Highway Administration, Washington, DC, Report No. FHWA-RD-01-156, 2002. Consulté le : 26 oct. 2022. [En ligne]. Adresse : https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/39217

[2] G. Jacobson, "NACE International's IMPACT breaks new ground in the study of corrosion management," *Summer Bridge on Issues at the Technology/Policy Interface*, *The Bridge,* vol. 46, no. 2, Summer 2016. Consulté le : 26 oct. 2022. [En ligne]. Adresse : https://www.nae.edu/File.aspx?id=155268

[3] Shipilov, S.A. "What Corrosion Costs Canada: Or, Can We Afford to Ignore Corrosion?" in Materials Development and Performance of Sulphur Capture Plants, eds. C. Barry, P. Wanjara, Montreal, Quebec, Canada: Canadian Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum, 2009, pp. 55-76.

[4] BluePlan Engineering, « Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes. Suivi de l'état des infrastructures publiques essentielles du Canada », Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes, Ottawa (Ontario), 2019. Consulté le : 26 octobre 2022. [En ligne]. Adresse : http://www.canadianinfrastructure.ca/downloads/bulletin-rendement-infrastructures-canadiennes-2019.pdf

[5] *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, CSA S6-19, Association canadienne de normalisation, Toronto, Ontario, 2019.

[6] F. Mansfeld, "Area relationships in galvanic corrosion," *Corrosion* vol. 27, no. 10, pp. 436–442, 1971. https://doi.org/10.5006/0010-9312-27.10.436

[7] D.A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*. New York, NY : Macmillan Publishing Company, 1992.

[8] G. L. Kulak, « Boulons à haute résistance dans les ouvrages de génie civil », Institut canadien de construction en acier, Willowdale (Ontario), 2005. Consulté le : 27 oct. 2022. [En ligne]. Adresse : https://www.cisc-icca.ca/wp-content/uploads/2017/03/boulonhr.pdf

[9] H. Uhlig and R. Revie, *Corrosion and Corrosion Control*, 3rd ed. New York, NY: Wiley-Interscience, 1985.

[10] F. LaQue, *Marine corrosion : Causes and prevention*. Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 1975.

[11] F. Mansfeld, D. H. Hengtenerg, and J. v Kenkel, "Galvanic corrosion of Al alloys I. Effect of dissimilar metal," *Corrosion*, vol. 30, no. 10, pp. 343–353, 1974, doi: 10.5006/0010-9312-30.10.343.

[12] F. Mansfeld and J. Kenkel, "Electrochemical measurements of time-of-wetness and atmospheric corrosion rates," *Corrosion*, vol. 33, no. 1, pp. 13–16, 1977, doi: 10.5006/0010-9312-33.1.13.

[13] F. Mansfeld and J. Kenkel, "Galvanic corrosion of Al alloys — II. Effect of solution composition," *Corrosion*, vol. 15, no. 3, pp. 183–198, 1975, doi: 10.1016/S0010-938X(75)80008-4.

[14] E. Ghali and M. Elboujdaini, *Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions*. New York, NY : John Wiley & Sons, 2007.

[15] M. Hagarová, J. Brezinová, G. Baranová, J. Viňáš, and P. Maruschak, "Degradation of components in cars due to bimetallic corrosion," *Materials*, vol. 14, no. 12, 2021, doi: 10.3390/ma14123323. [En ligne]. Adresse : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8235354/pdf/materials-14-03323.pdf

[16] A. Chami, R. Benabbou, M. Taleb, Z. Rais, and M. E. Haji, "Analysis of survey data on corrosion in the automotive industry," *Mater Today Proc*, vol. 45, no. 8, pp. 7636–7642, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.113.

[17] A. Taub, E. Moor, A. Luo, D. K. Matlock, J. G. Speer, and U. Vaidya, "Materials for automotive lightweighting," *Annu Rev Mater Res*, vol. 49, pp. 327–359, 2019, doi: 10.1146/annurev-matsci-070218-010134.

[18] H. Schreckenberger, M. Papke, and S. Eisenberg, *The magnesium hatchback of the 3-liter car: Processing and corrosion protection*, SAE Transactions, v. 109, pp. 606–612, 2000. Consulté le : 26 oct. 2022. [En ligne] Adresse : http://www.jstor.org/stable/44643882

[19] C. Nejneru, C. Savin, M. C. Perju, D. D. Burduhos-Nergis, M. Costea, and C. Bejinariu, "Studies on galvanic corrosion of metallic materials in marine medium," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 572, p. 012106, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/572/1/012106. [En ligne]. Adresse : https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/572/1/012106/pdf

[20] R. Adey, A. Peratta, J. Baynham, and T. Curtin, "Predicting cumulative galvanic corrosion damage in aircraft structures," in *NACE International Corrosion Conference Proceedings, Houston, TX,* 2019, Paper no. 13292, pp. 14.

[21] J. R. Xavier, "Galvanic corrosion of copper/titanium in aircraft structures using a cyclic wet/dry corrosion test in marine environment by EIS and SECM techniques," *SN Appl Sci*, vol. 2, no. 8, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-3145-x. [En ligne]. Adresse : https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s42452-020-3145-x.pdf

[22] J. Skar, "Corrosion and corrosion prevention of magnesium alloys," *Materials and Corrosion*, vol. 50, no. 1, pp. 2–6, 1999, https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4176(199901)50:1<2::AID-MACO2>3.0.CO;2-N.

[23] G. Song, G. Johannesson, S. Hapugoda, and D. StJohn, "Galvanic corrosion of magnesium alloy AZ91D in contact with an Aluminum alloy, steel and zinc," *Corros Sci*, vol. 46, no. 4, pp. 955–977, 2004. https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00190-2

[24] J. Jia, A. Atrens, G. Song, and T. Muster, "Simulation of galvanic corrosion of magnesium coupled to a steel fastener in NaCl solution," *Materials and Corrosion*, vol. 56, no. 7, pp. 468–474, 2005. https://doi.org/10.1002/maco.200403855

[25] J. Janiec-Anwar, "Galvanic corrosion of magnesium alloys," (Doctoral Thesis), University of Manchester, Manchester, UK, Manchester, UK, 2014. [En ligne]. Adresse : https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/102592751/FULL_TEXT.PDF

[26] P. Kramer, T. Curtin, M. Merrill, M. Kim, F. Friedersdorf, R. Adey., "Atmospheric corrosion measurements to improve understanding of galvanic corrosion of aircraft," in *NACE International Corrosion Conference Proceedings*, Phoenix, AZ, USA, April 15-19, 2018, Paper no. NACE-2018-10968. pp. 11.

[27] J. Jun, Y. C. Lim, Y. Li, C. D. Warren, and Z. Feng, "Mitigation of galvanic corrosion in bolted joint of AZ31B and carbon fiber-reinforced composite using polymer insulation," *Materials*, vol. 14, no. 7, p. 1670, 2021, doi: 10.3390/ma14071670. [En ligne]. Adresse : http://dx.doi.org/10.3390/ma14071670

[28] S. S. Wang and G. S. Frankel, "Fundamental study of corrosion-preventive compounds: part III—soft films," *Corrosion Engineering Science and Technology*, vol. 55, no. 6, pp. 497–505, 2020, doi: 10.1080/1478422X.2020.1745356.

[29] J. M. Beigay and D. R. Zaremski, "Aluminum striped stainless trim for prevention of auto body galvanic corrosion," *SAE Transactions,* vol. 81, pp. 1772–1780, 1972, doi: 10.4271/720515. http://www.jstor.org/stable/44722837.

[30] Z. Feng, G. L. Song, Y. Xu, D. Zheng, and X. Chen, "Micro-galvanic corrosion during formation of epoxy coating," *Prog Org Coat*, vol. 147, p. 105799, 2020, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105799.

[31] U.C. Kumru, S. Erserin, O. Tekelioğlu, and U. Üzel, "The effect of corrosion on the mechanical behavior of the dissimilar material joints (aluminum – steel) using the friction stir spot welding method," *J Mater Electron Devices*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2020. [En ligne]. Adresse : http://dergi-fytronix.com/index.php/jmed/article/view/54

[32] T. Kosaba, I. Muto, and Y. Sugawara, "Effect of anodizing on galvanic corrosion resistance of Al coupled to Fe or type 430 stainless steel in diluted synthetic seawater," *Corros Sci*, vol. 179, p. 109145, 2021, doi: 10.1016/j.corsci.2020.109145.

[33] A. K. Halder, M. Manna, A. Chakraborty, and A. N. Bhagat, "Analysis of early failure of galvanised borewell pipe," *Eng Fail Anal*, vol. 133, p. 105957, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105957.

[34] D. A. Yeshanew, M. G. Jiru, H. G. Lemu, and M. A. Tolcha, "Internal corrosion damage mechanisms of the underground water pipelines," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 111–123, 2022, doi: 10.12913/22998624/149369. [En ligne]. Adresse : http://www.astrj.com/pdf-149369-75647?filename=Internal % 20Corrosion % 20Damage.pdf

[35] H. Zhang *et al.*, "Review on corrosion and corrosion scale formation upon unlined cast iron pipes in drinking water," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 117, pp. 173–189, 2022, doi: 10.1016/j.jes.2022.04.024.

[36] L. Chang, J. H. W. Lee, and Y. S. Fung, "Prediction of lead leaching from galvanic corrosion of lead-containing components in copper pipe drinking water supply systems," *J Hazard Mater*, vol. 436, p. 129169, 2022. [En ligne]. Adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074222001966#preview-section-introduction

[37] L. Chang, J. H. Lee, and Y. S. Fung, "Prediction of lead leaching from galvanic corrosion in drinking water supply systems," *J Hazard Mater*, 2022, doi: 10.2139/ssrn.4034392.

[38] D. Q. Ng, J. K. Lin, and Y. P. Lin, "Lead release in drinking water resulting from galvanic corrosion in three-metal systems consisting of lead, copper and stainless steel," *J Hazard Mater*, vol. 398, p. 122936, 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122936.

[39] B. Li, B. F. Trueman, M. S. Rahman, and G. A. Gagnon, "Controlling lead release due to uniform and galvanic corrosion — An evaluation of silicate-based inhibitors," *J Hazard Mater*, vol. 407, p. 124707, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124707.

[40] M. Wasim and M. B. Djukic, "External corrosion of oil and gas pipelines: A review of failure mechanisms and predictive preventions," *J Nat Gas Sci Eng*, vol. 100, p. 104467, 2022, doi: 10.1016/j.jngse.2022.104467. [En ligne]. Adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510022000580

[41] O. S. I. Fayomi, I. G. Akande, and S. Odigie, "Economic impact of corrosion in oil sectors and prevention: An overview," *J Phys Conf Ser*, vol. 1378, p. 022037, 2019, doi : 10.1088/1742-6596/1378/2/022037. [En ligne]. Adresse : https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1378/2/022037/pdf

[42] B. Tansel and K. Zhang, "Effects of saltwater intrusion and sea level rise on aging and corrosion rates of iron pipes in water distribution and wastewater collection systems in coastal areas," *J Environ Manage*, vol. 315, p. 115153, 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115153.

[43] D. S. Shahin, W. Khalifa, and L. Z. Mohamed, "Failure analysis of firefighting pipe: Case study," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 22, pp. 1135–1143, 2022, doi: 10.1007/s11668-022-01397-7.

[44] G. D. Song, S. H. Jeon, Y. H. Son, J. G. Kim, and D. H. Hur, "Galvanic effect of magnetite on the corrosion behavior of carbon steel in deaerated alkaline solutions under flowing conditions," *Corros Sci*, vol. 131, pp. 71–80, 2018, doi: 10.1016/j.corsci.2017.10.017.

[45] Q. Sun and M. Dai, "Study on corrosion simulation and anti-corrosion of marine B10 seawater pipe system," in *2nd International Conference on Mechanical, Electronics, and Electrical and Automation Control (METMES 2022)*, 2022, vol. December, p. 122441A. doi: 10.1117/12,2634871.

[46] D. A. Shifler, H. P. Hack, and D. Melton, "New techniques for galvanic corrosion in piping systems," in *Proceedings of the Corrosion/ 98 research topical Symposia*, San Diego, CA, USA, Mar. 22-27 1998, Paper number NACE-98706

[47] A. Kolesnikov *et al.*, "Galvanic corrosion of lithium-powder-based electrodes," *Adv Energy Mater*, vol. 10, p. 2000017, 2020, doi: 10.1002/aenm.202000017. [En ligne]. Adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aenm.202000017

[48] J. F. Dohmann *et al.*, "Galvanic couples in ionic liquid-based electrolyte systems for lithium metal batteries—An overlooked cause of galvanic corrosion?," *Adv Energy Mater*, vol. 11, no. 24, p. 2101021, 2021, doi: 10.1002/aenm.202101021. [En ligne]. Adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aenm.202101021

[49] B. Tan, L. Guo, D. Yin, T. Ma, S. Zhang, and C. Wang, "Environmentally sustainable corrosion inhibitors used for electronics industry," in *Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc., 2022, pp. 359–381. doi: 10.1016/B978-0-323-85405-4.00007-0.

[50] C. D. Reis Barros, J. C. Rocha, B. F. Braz, R. E. Santelli, and J. A. Cunha Ponciano Gomes, "Galvanic corrosion of Ti6Al4V coupled with NiCr as a dental implant alloy in fluoride solutions," *Int J Electrochem Sci*, vol. 15, no. 1, pp. 394–411, 2019, doi: 10.20964/2020.01.07. [En ligne]. Adresse : http://www.electrochemsci.org/papers/vol15/150100394.pdf

[51] M. Cortada, L. Giner, S. Costa, F. J. Gil, D. Rodriguez, and J. A. Planell, "Galvanic corrosion behavior of titanium implants coupled to dental alloys," *J Mater Sci Mater Med*, vol. 11, pp. 287–293, 2000, doi: 10.1023/A:1008905229522.

[52] N. M. Taher and A. S. A. Jabab, "Galvanic corrosion behavior of implant suprastructure dental alloys," *Dental Materials*, vol. 19, no. 1, pp. 54–59, 2003, doi: 10.1016/S0109-5641(02)00008-8.

[53] M. J. M. Zee, B. C. van Bemmel, and J. J. A. M. van Raay, "Massive osteolysis due to galvanic corrosion after total knee arthroplasty: a rare cause for early revision?," *J Surg Case Rep*, vol. 2020, no. 2, pp. 1–3, 2020, doi: 10.1093/jscr/rjaa002.

[54] H. Serhan, M. Slivka, T. Albert, and S. D. Kwak, "Is galvanic corrosion between titanium alloy and stainless steel spinal implants a clinical concern?," *Spine Journal*, vol. 4, no. 4, pp. P379-387, 2004, doi: 10.1016/j.spinee.2003.12.004.

[55] M. Fontana and N. Greene, *Corrosion Engineering*. New York, NY : McGraw Hill, 1967.

[56] J. Kulicki, Z. Prucz, D. Sorgenfrei, D. Meritz, and W. Young, "Guidelines for Evaluating Corrosion Effects in Existing Steel Bridges". Transportation Research Board, Washington, DC, , Report No. 333, 1990. Consulté le : October 26, 2022. [En ligne]. Adresse : https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_333.pdf

[57] M. A. Grubb, K. E. Wilson, C. D. White, and W. N. Nickas, "Load and resistance factor design (LRFD) for highway bridge superstructures, Reference manual," Federal Highway Administration, Washington, DC, Publication No. FHWA-NHI-15-047, 2015 Consulté le: October 26, 2022. [En ligne]. Adresse : https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/nhi15047.pdf

[58] M. Hebdon and I. Groshek. (2018). Accelerated corrosion testing of ASTM A1010 stainless steel. Presented at World Steel Bridge Symposium. [En ligne]. Adresse : https://www.aisc.org/globalassets/nsba/conference-proceedings/2018/2018-wsbs-final-paper---groshek.pdf

[59] J. Zhang and N. Ebrahimi, "Corrosion risk of using stainless steel bolts for A1010 steel bridge girders," *J Bridge Eng*, vol. 26, no. 2, p. 06020001, Feb. 2021, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001659.

[60] J. Zhang, N. Ebrahimi, and D. Lai, "Galvanic corrosion risk of using galvanized A325 bolts in corrosion-resistant steel bridges," *J Bridge Eng*, vol. 24, no. 6, p. 06019001, Jun. 2019, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001395.

[61] I. G. Groshek, "Corrosion behavior of ASTM A1010 stainless steel for applications in bridge components," M. S. Thesis, Civ Eng, Virginia Tech, Blacksburg, VA, , 2017. [En ligne]. Adresse : https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/78191/Groshek_IG_T_2017.pdf?sequence=1

[62] Y. Virmani, "Improved corrosion-resistant steel for highway bridge construction knowledge-based design", Federal Highway Administration, Washington, DC, Report No. FHWA HRT-09-053. 2009. Consulté le : Oct. 27, 2022. [En ligne]. Adresse : https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/09053/09053.pdf

[63] *Guide specification for service life design of highway bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2020. [En ligne]. file :///C:/Users/jteague/Downloads/HBSLD-1_TableOfContents %20(3).pdf

[64] *Commentary on CSA S6:19, Canadian highway bridge design code*, CSA S6.1:19, Canadian Standards Association, Toronto, ON, 2019.

[65] T. Murphy, J. Kulicki, F. Moon, A-M. Langlois, N. Samtani, *Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridges,* National Academies Press, Washington, D.C., 2020. [En ligne]. Adresse : https://nap.nationalacademies.org/booksearch.php?record_id=25672&term=publish

[66] R. Kogler, "Steel Bridge Design Handbook: Corrosion Protection of Steel Bridges", Federal Highway Association, Washington, DC, Report No. FHWA-HIF-16-002 - Vol. 19, :2015. Consulté le : Oct. 27, 2022. [En ligne]. Adresse : https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42715/dot_42715_DS1.pdf

[67] *Corrosion des métaux et alliages – Corrosivité des atmosphères – Classification, détermination et estimation*, ISO 9223:2012, Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse, 2012.

[68] D. Ungermann and P. Hatke, "European design guide for the use of weathering steel in bridge construction," European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, Belgium, vol. 143, 2021. Consulté le : 26 octobre 2022. [En ligne]. Available: https://www.steelconstruct.com/wp-content/uploads/ECCS-Design-Guide-Weathering-Steel-Bridges.pdf

[69] *General requirements for rolled or welded structural quality steel / Structural quality steel*, G40.20-13/G40.21-13 (R2018), Canadian Standards Association Group, Toronto, ON, 2013.

[70] *Standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel*, ASTM A572/A572M-12, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2012.

[71] *Standard specification for higher-strength martensitic stainless steel plate, sheet, and strip*, ASTM A1010/A1010M-13, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2013(Reapproved 2018).

[72] *Standard specification for structural steel for bridges*, ASTM A709/A709M-21, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2021.

[73] *Standard specification for aluminum and aluminum-alloy sheet and plate*, ASTM B209/B209M-21A, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2021.

[74] *Standard specification for high strength structural bolts and assemblies, steel and alloy steel, heat treated, inch dimensions 120 ksi and 150 ksi minimum tensile strength, and metric dimensions 830 MPa and 1040 MPa minimum tensile strength*, ASTM F3125/F3125M-22, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2022.

[75] *Standard specification for alloy-steel and stainless steel bolting for low-temperature service*, ASTM A320/A320M-22, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2022.

[76] *Standard specification for carbon steel, alloy steel, and stainless steel nuts for bolts for high pressure or high temperature service, or both*, ASTM A194/A194M-22, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2022.

[77] P. Montoya, T. Marín, A. Echavarría, and J. A. Calderón, "Influence of anion and pH on the electrochemical co-deposition and transformation of iron oxy hydroxide," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, No. 12, pp. 12566–12579, 2013. [En ligne]. Adresse : http://www.electrochemsci.org/papers/vol8/81212566.pdf

[78] *Standard guide for conducting and evaluating galvanic corrosion tests in electrolytes*, ASTM G71-81, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 1981 (Reapproved 2019).

[79] *Standard practice for cyclic salt fog/UV exposure of painted metal, (alternating exposures in a for/dry cabinet and a UV/condensation cabinet)*, ASTM D5894-21, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, 2021.

[80] S. Qian and J. Zhang, "Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repair," *Cem Concr Compos*, vol. 28, pp. 685–695, 2006. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.010

Annexe A – Formes de dommages causés par la corrosion

L'atténuation de la corrosion devrait commencer par une identification des formes de dommages causés par la corrosion, car ces dommages peuvent provenir d'expositions environnementales, de structures métalliques et de mécanismes de corrosion distincts. Étant donné que la corrosion uniforme ou la corrosion générale est la corrosion la plus souvent visible en termes de rouille et de ternissement, le revêtement de toute la surface métallique devient l'une des méthodes de protection les plus courantes. Cependant, les dommages causés par la corrosion se présentent sous plusieurs formes susceptibles d'entraîner des fissures ou une perte de résistance ou de ductilité [9]. Le revêtement n'est peut-être pas l'approche la plus rentable pour toutes les formes de corrosion pendant la longue durée de vie des ponts (75 ans ou plus).

Parmi les nombreuses formes de dommages causés par la corrosion qui ont été identifiées avec le temps et grâce aux progrès de l'ingénierie de la corrosion, la plus grande acceptation des catégories de dommages causés par la corrosion se trouve dans le manuel de l'ingénierie de la corrosion classique de Fontana et Green [55], qui recense huit groupes principaux : corrosion uniforme/générale, corrosion galvanique/bimétallique, corrosion par piqûres, corrosion caverneuse, corrosion intergranulaire (soudure), lixiviation/séparation sélective, corrosion par érosion et corrosion sous contrainte (p. ex., fissuration par l'hydrogène). Fontana et Green [55] disposaient d'une évaluation préliminaire des mécanismes de corrosion en ce qui concerne les applications de pont. Au moins quatre des huit formes de dommages causés par la corrosion sont associées à la corrosion des ponts : corrosion uniforme/générale, corrosion caverneuse, corrosion galvanique et corrosion par piqûres. Une forme de corrosion moins évidente, mais aux conséquences graves, est également susceptible de se produire dans les ponts : la fissuration par corrosion sous contrainte.

Tableau A-1 : Mécanisme des dommages causés par la corrosion et association avec les applications de pont [55]

Forme de dommage causé par la corrosion	Mécanismes/dommages	En lien avec la corrosion des ponts
Corrosion uniforme	Perte de métal	Perte de surépaisseur jusqu'à une réduction de section qui diminue la capacité portante
Corrosion galvanique	En général, la corrosion du métal le moins résistant à la corrosion augmente, et la corrosion du matériau le plus résistant diminue.	Courante dans les composants et les systèmes de ponts lorsque différents métaux sont en contact électrique, comme les poutres et les fixations en acier, et en présence de différents types de barres d'armature en béton.
Corrosion caverneuse	Cette corrosion est généralement associée à de petits volumes de solution stagnante causés par des trous, des portées de joint, des joints de recouvrement, des dépôts de surface et des fissures sous les têtes de boulon et de rivet.	Au niveau des petits espaces et des ouvertures en raison de différences d'épaisseur, d'alignement, d'une partie non étanche, comme le bord du chevauchement de feuilles de métal; sous les têtes de boulon et de rivet; ou sous la peinture physiquement endommagée ou tout défaut sur le film de peinture.

Corrosion par piqûres	C'est l'une des formes de corrosion les plus destructrices et les plus insidieuses. Elle entraîne la défaillance de l'équipement en raison de la perforation avec seulement un petit pourcentage de perte de poids de l'ensemble de la structure. Il est souvent difficile de détecter les piqûres en raison de leur petite taille et parce qu'elles sont généralement recouvertes de produits de corrosion. De plus, il n'est pas facile de mesurer quantitativement et de comparer l'étendue des piqûres, lesquelles peuvent présenter des profondeurs et des nombres variables dans des conditions identiques. Les piqûres sont également difficiles à prévoir dans le cadre d'essais en laboratoire.	Câbles d'acier; armatures de précontrainte; sous le dépôt des nids et des excréments d'oiseaux. Les dommages sont susceptibles d'être catastrophiques, mais il n'existe pas de données ni de rapports systématiques provenant du terrain. Des études supplémentaires sont nécessaires.
Corrosion intergranulaire	Les impuretés sont susceptibles de causer de la corrosion intergranulaire aux limites du grain, l'enrichissement de l'un des éléments d'alliage ou l'épuisement de l'un de ces éléments dans les zones périphériques du grain. Il a été démontré que de petites quantités de fer dans l'aluminium, dans lequel la solubilité du fer est faible, séparent les limites du grain et causent de la corrosion intergranulaire. Il a été démontré qu'en fonction de la tension superficielle, la teneur en zinc du laiton est plus élevée aux limites du grain. L'appauvrissement du chrome dans les régions limitrophes du grain entraîne une corrosion intergranulaire de l'acier inoxydable.	
Lixiviation sélective	La lixiviation sélective consiste au retrait d'un élément d'un alliage solide par des processus de corrosion.	
Corrosion par érosion	La corrosion par érosion se caractérise par l'apparence de cannelures, de ravins, de vagues, de cratères et de creux, et présente habituellement un motif directionnel. Dans de nombreux cas, les défaillances dues à l'érosion et à la corrosion se produisent relativement rapidement. Elles sont essentiellement inattendues parce que les essais d'évaluation de la corrosion ont été effectués dans des conditions statiques ou parce que les effets de l'érosion n'ont pas été pris en compte.	La corrosion par érosion se produit parfois dans les palplanches en acier lorsque le flux de fluide transporte des particules.
Fissuration par la corrosion sous contrainte	Ce phénomène de fissuration a de graves conséquences puisqu'il est susceptible de se produire à des niveaux de contrainte se situant dans la plage des contraintes typiques de conception.	Cette forme de corrosion nécessite la présence d'un niveau de contrainte élevé par rapport à la résistance de rendement et a la capacité de se produire sur des armatures de précontrainte détériorées. Des études supplémentaires sont nécessaires.

Annexe B – Graphiques de l'OCP dans diverses concentrations de sel

Voici les résultats des mesures de l'OCP dans diverses concentrations de NaCl à 0,5, 1,5 et 3,5 % en poids pour différents échantillons d'alliage.

B.1 Solution de NaCl à 0,5 % en poids

Figure 36 : OCP par rapport au temps du 350W dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

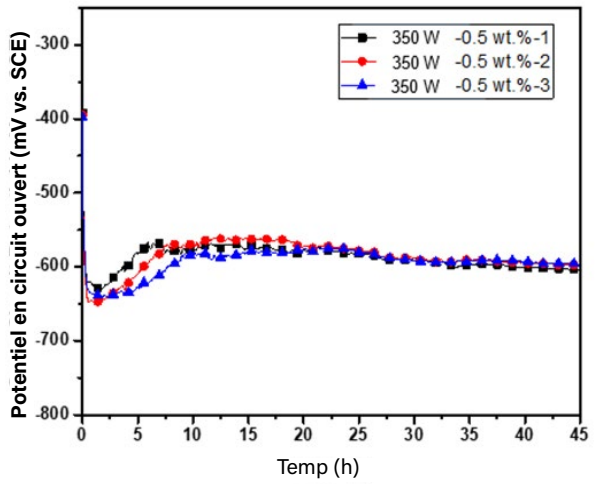


Figure 37 : OCP par rapport au temps de l'acier résistant aux intempéries (350AT) dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

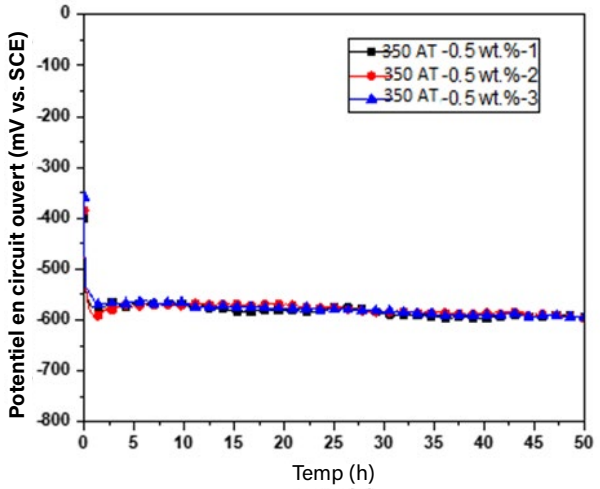


Figure 38 : OCP par rapport au temps de l'acier A1010 dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

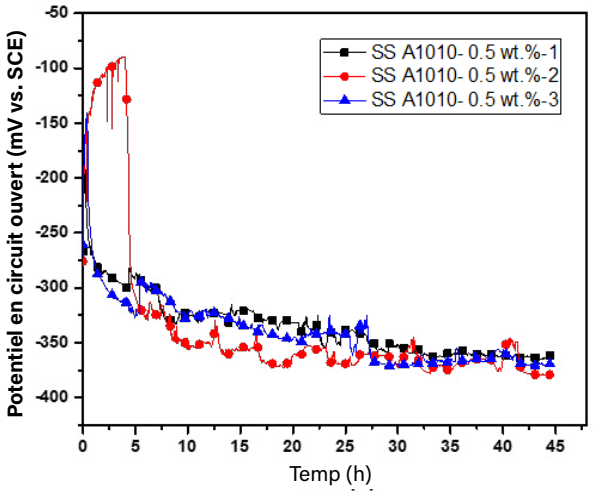


Figure 39 : OCP par rapport au temps de l'aluminium (Al) dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

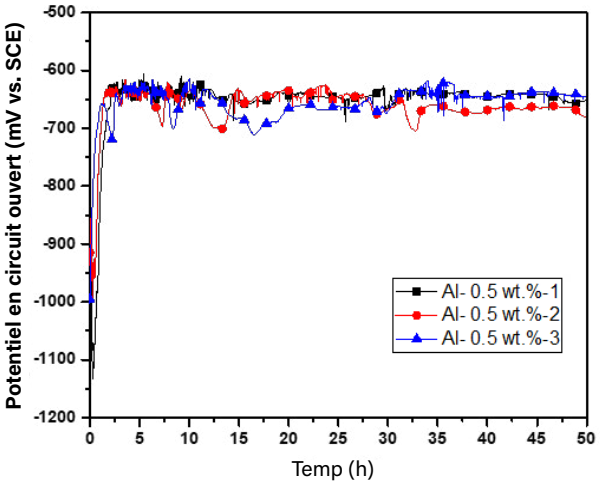


Figure 40 : OCP par rapport au temps de l'acier au carbone A325 type I (CS) dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

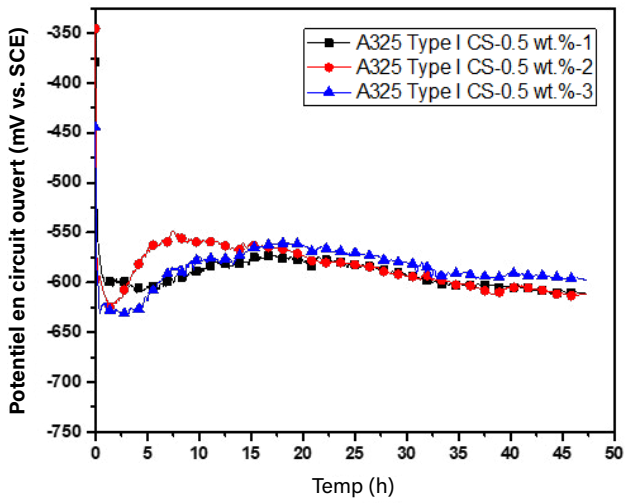


Figure 41 : Potentiel par rapport au temps du boulon en acier galvanisé A325 type I dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

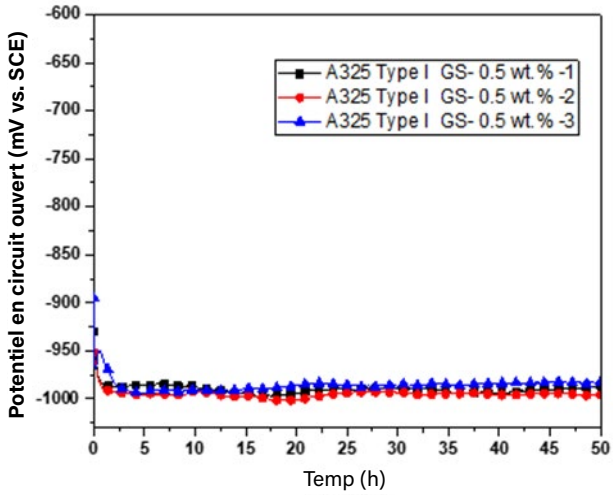


Figure 42 : Potentiel par rapport au temps de l'acier A490 dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

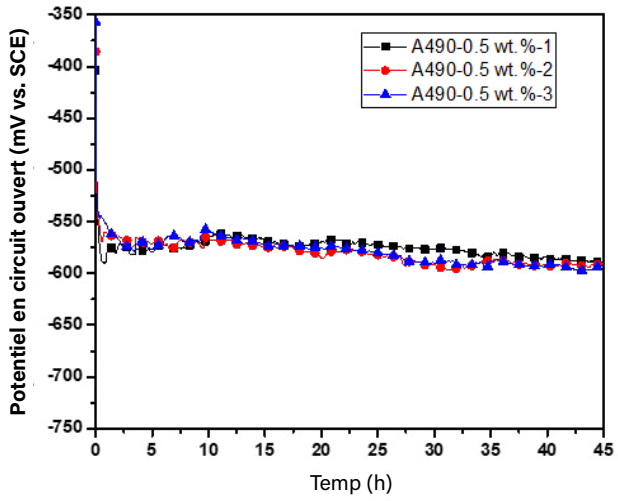
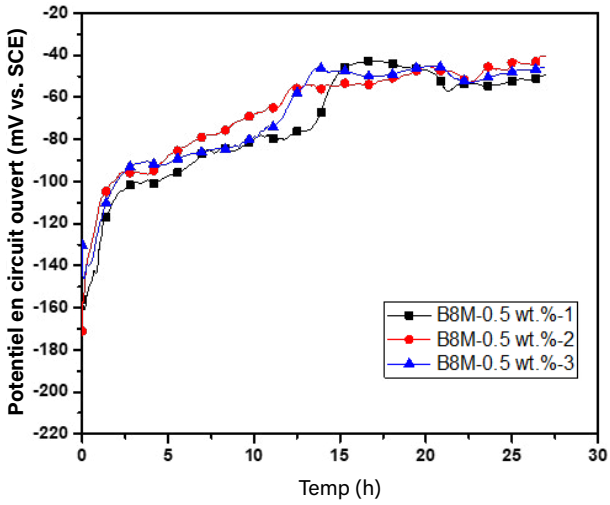


Figure 43 : Potentiel par rapport au temps de l'acier B8M dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.



B.2 Solution de NaCl à 1,5 % en poids

Figure 44 : Potentiel par rapport au temps de l'acier B8SH dans une solution de NaCl à 0,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

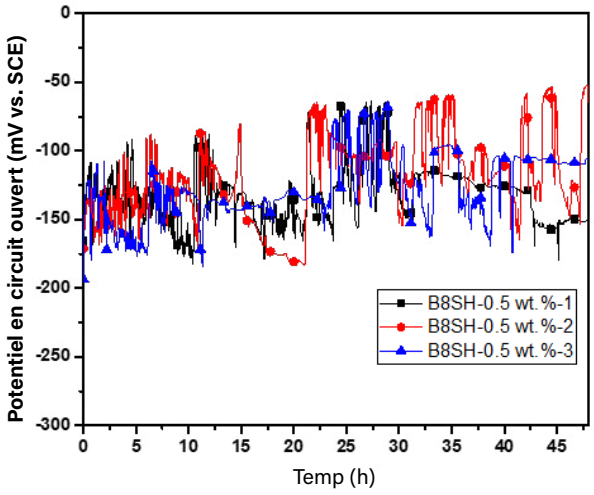


Figure 45 : OCP par rapport au temps du 350W dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

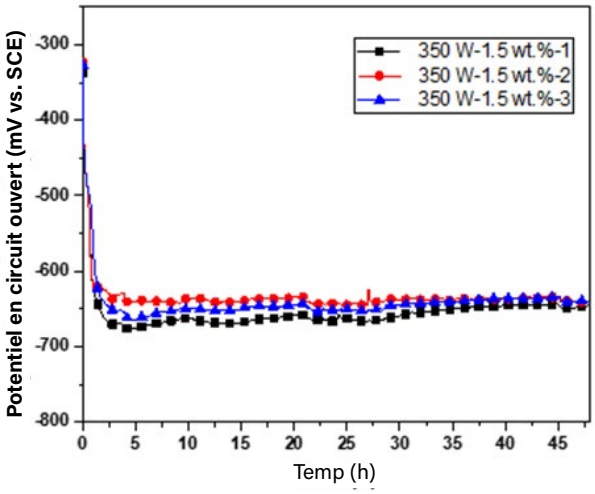


Figure 46 : OCP par rapport au temps de l'acier résistant aux intempéries 350AT dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

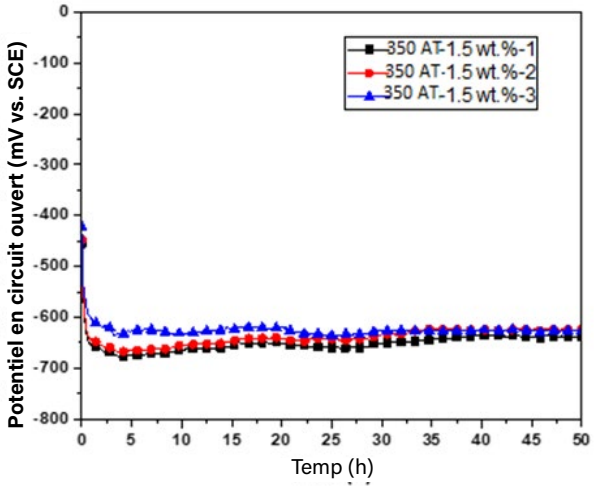


Figure 47 : OCP par rapport au temps de l'acier A1010 dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

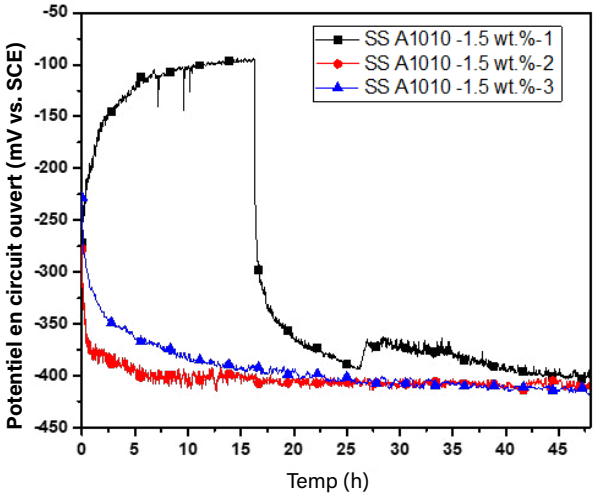


Figure 48 : OCP par rapport au temps de l'aluminium (Al) dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

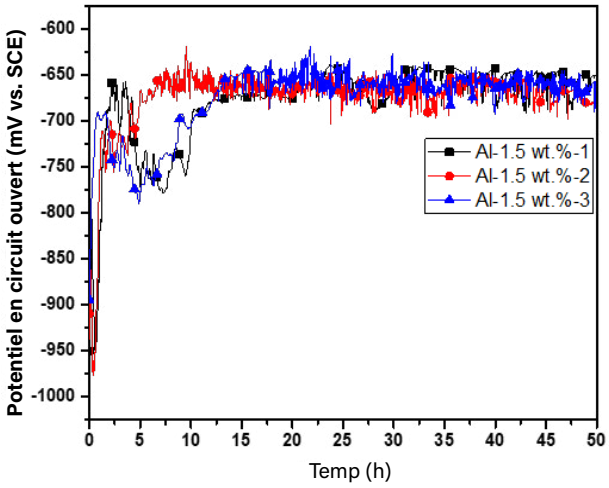


Figure 49 : OCP par rapport au temps de l'acier au carbone A325 type I (CS) dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

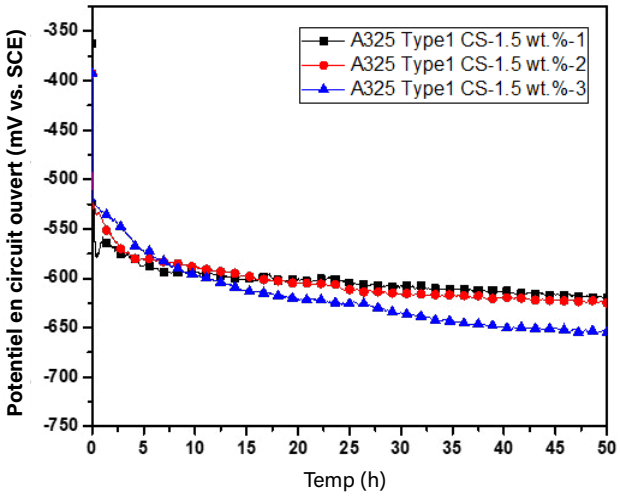


Figure 50 : OCP par rapport au temps du boulon en acier galvanisé A325 type I dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

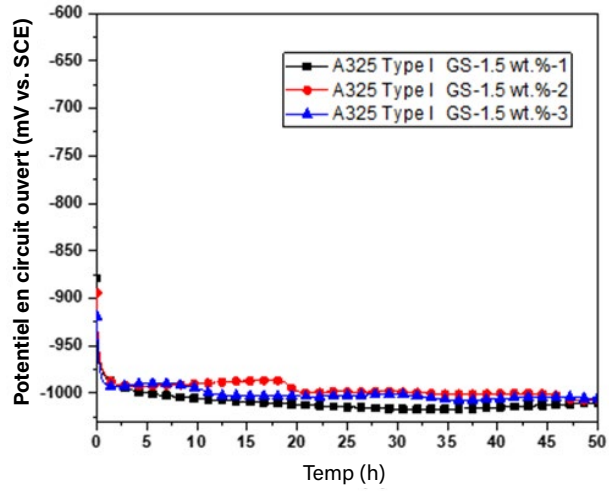


Figure 51 : OCP par rapport au temps de l'acier A490 dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

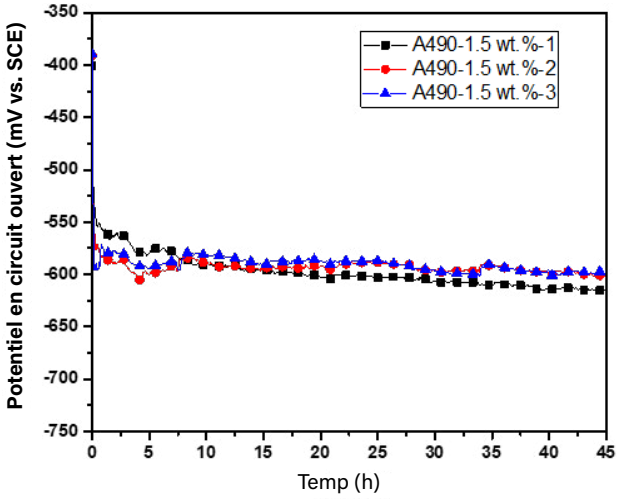


Figure 52 : OCP par rapport au temps de l'acier B8M dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

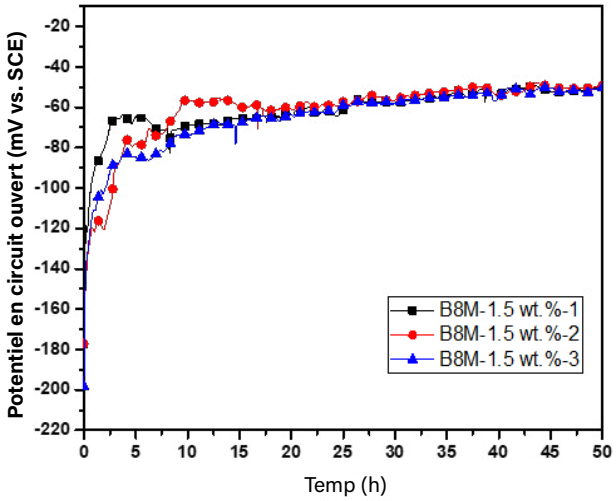


Figure 53 : Potentiel par rapport au temps de la rondelle SS316L dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

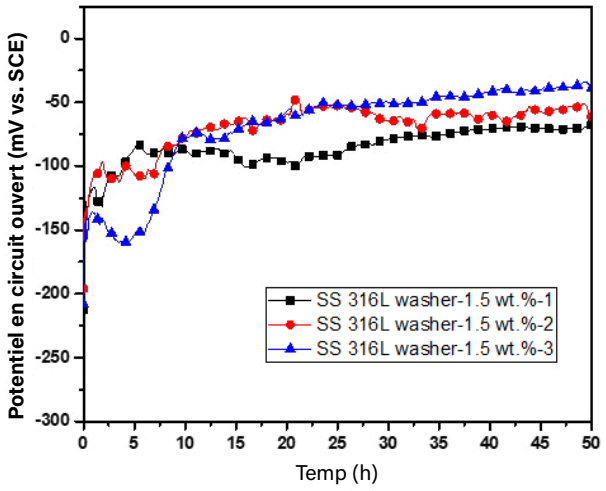


Figure 54 : Potentiel par rapport au temps de la rondelle SS410 dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

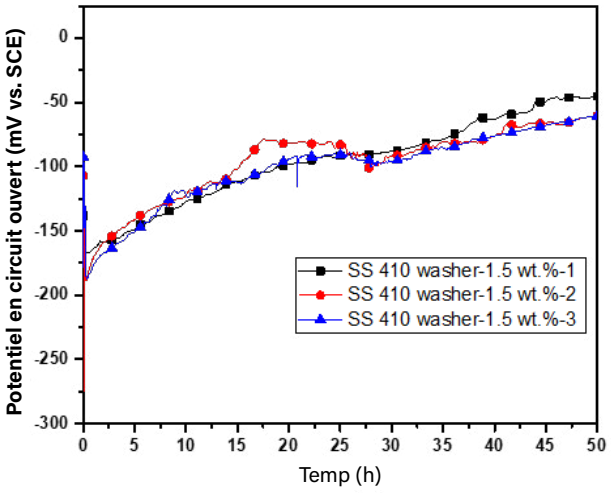
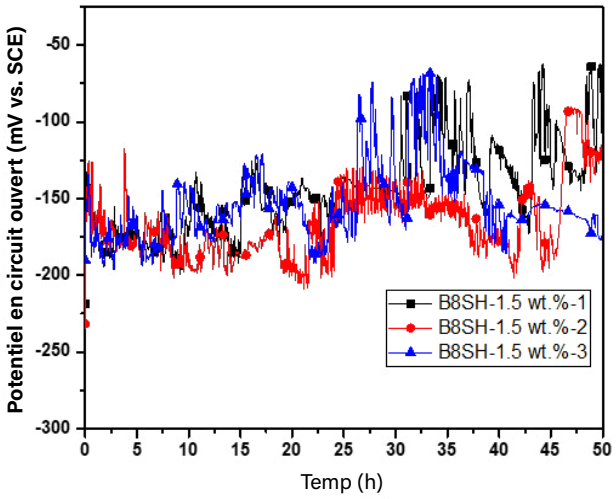


Figure 55 : Potentiel par rapport au temps de l'acier B8SH dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.



B.3 Solution de NaCl à 3,5 % en poids

Figure 56 : OCP par rapport au temps du 350W dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; les symboles de carré, de cercle et de triangle correspondent aux réplicats 1, 2 et 3, respectivement.

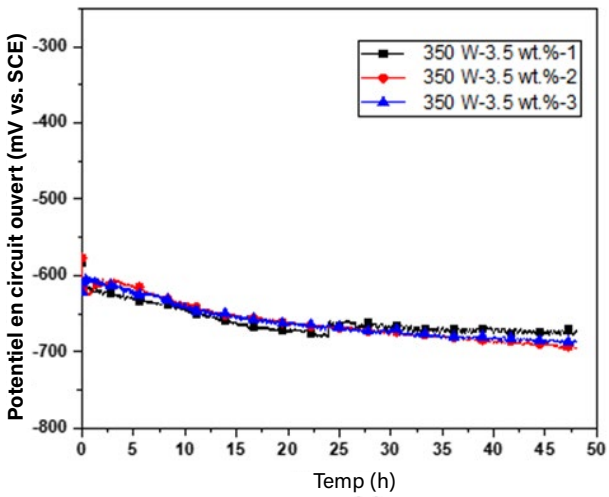


Figure 57 : OCP par rapport au temps de l'acier résistant aux intempéries dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; les symboles du carré et du cercle correspondent aux réplicats 1 et 2, respectivement.

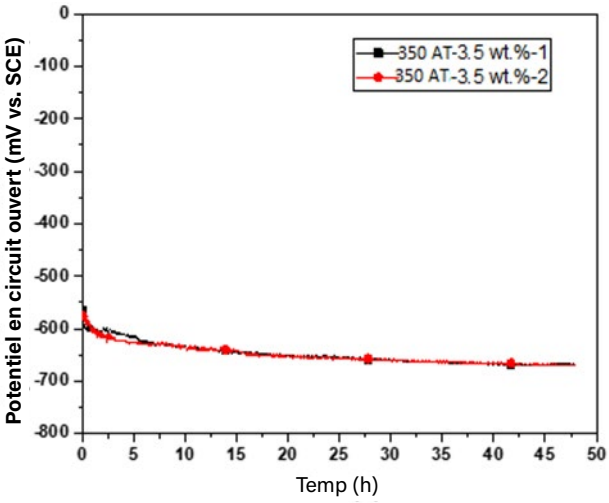


Figure 58 : OCP par rapport au temps de l'acier A1010 dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; les symboles du carré et du cercle présentent les potentiels de corrosion caverneuse et de corrosion passive, respectivement.

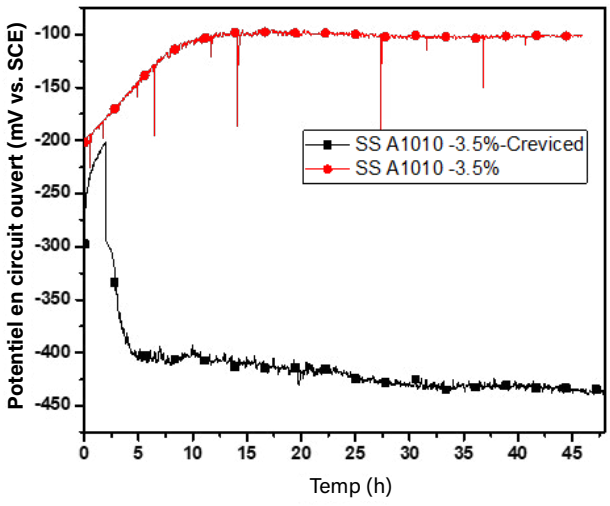


Figure 59 : OCP par rapport au temps de l'aluminium (Al) dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; les symboles du carré et du cercle correspondent aux réplicats 1 et 2, respectivement.

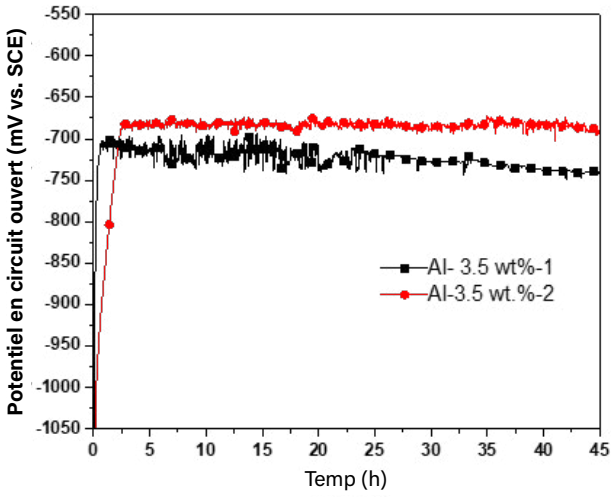


Figure 60 : OCP par rapport au temps de l'acier au carbone A325 type I dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; les symboles du carré et du cercle correspondent aux réplicats 1 et 2, respectivement.

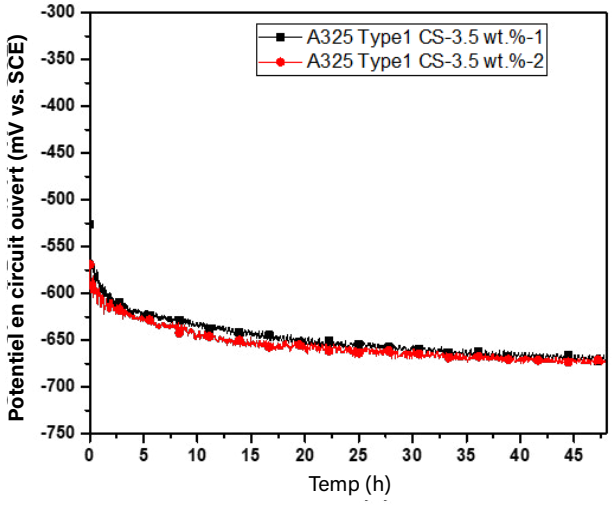


Figure 61 : OCP par rapport au temps du boulon en acier galvanisé A325 type I dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; les symboles du carré et du cercle correspondent aux réplicats 1 et 2, respectivement.

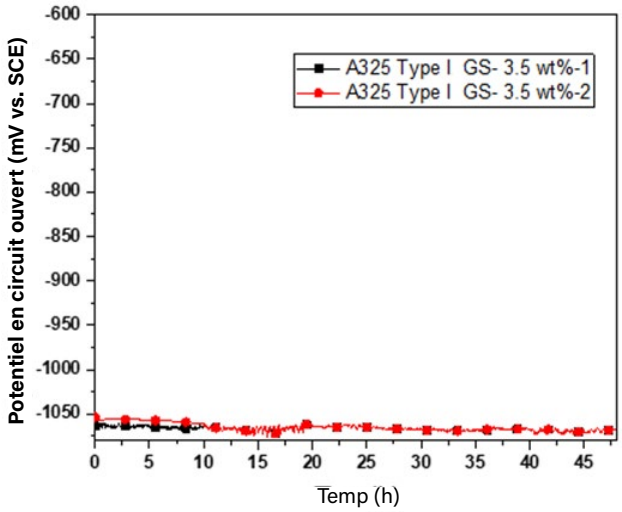


Figure 62 : OCP par rapport au temps de l'acier A490 dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; les symboles du carré et du cercle correspondent aux réplicats 1 et 2, respectivement.

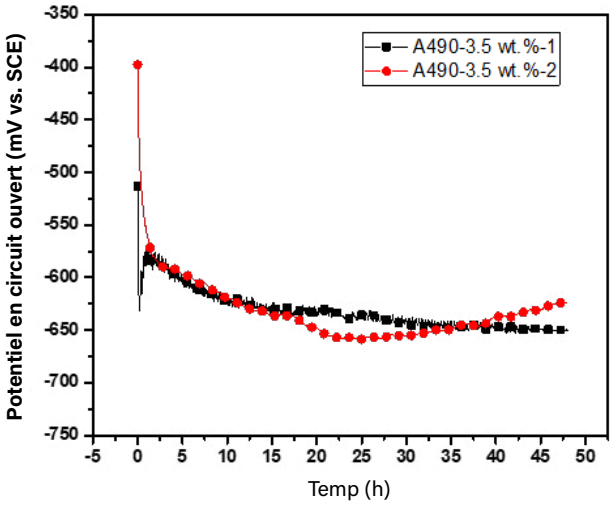


Figure 63 : OCP par rapport au temps de l'acier B8M dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids (rouge); les symboles du carré et du cercle correspondent aux réplicats 1 et 2, respectivement.

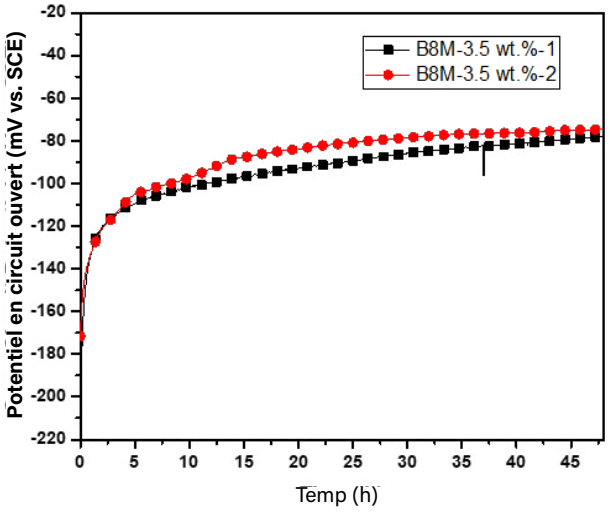
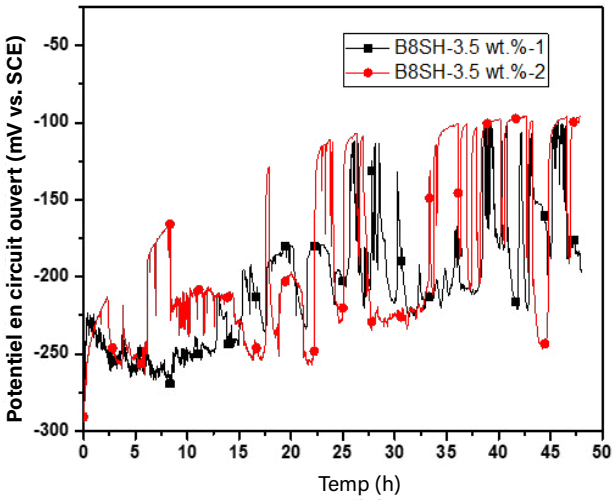


Figure 64 : OCP par rapport au temps de l'acier B8SH dans une solution de NaCl à 3,5 % en poids; les symboles du carré et du cercle correspondent aux réplicats 1 et 2, respectivement.



Annexe C – Graphiques de la PDP dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids

Figure 65 : Courbes de polarisation dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids pour l'acier 350AT (carré), l'acier au carbone A325 type 1 (triangle rouge), l'acier B8M (losange), l'acier B8SH (étoile), l'acier galvanisé (cercle) et l'acier A490 (triangle violet).

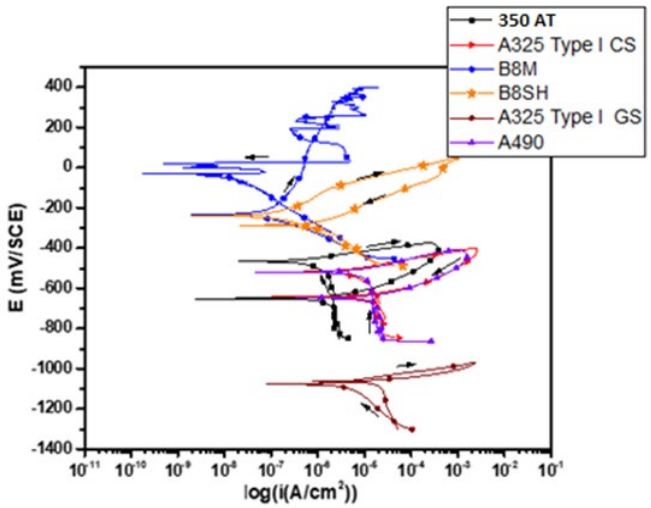


Figure 66 : Courbes de polarisation dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids pour l'acier A1010 (carré), B8M (cercle) et B8SH (étoile).

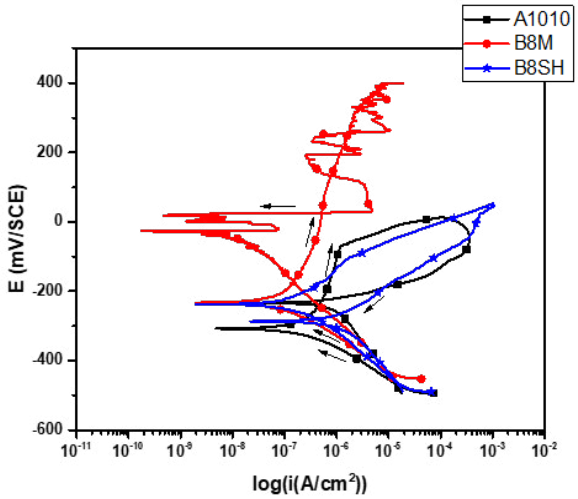
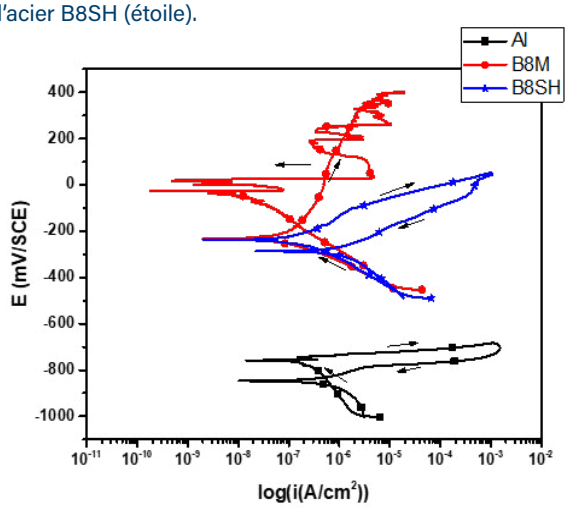


Figure 67 : Courbes de polarisation dans une solution de NaCl à 1,5 % en poids pour l'Al (carré), l'acier B8M (cercle) et l'acier B8SH (étoile).



Recherche du Groupe CSA

Dans le but de favoriser l'adoption de solutions normatives fondées sur le consensus afin d'accroître la sécurité et de favoriser l'innovation, le Groupe CSA soutient et effectue des recherches dans des domaines qui visent les industries nouvelles ou émergentes ainsi que sur des sujets et des questions qui touchent une vaste gamme de parties prenantes actuelles et potentielles. Les résultats de nos programmes de recherche étaieront l'élaboration de solutions normatives futures, ils offriront aux industries des directives provisoires sur la conception et l'adoption de nouvelles technologies et ils contribueront à démontrer notre engagement continu envers l'édification d'un monde meilleur, plus sécuritaire et plus durable.

GROUPE CSA™

© 2023 Sa Majesté le Roi du chef du Canada, tel que représenté par le Conseil national de recherches Canada