

Évaluation de l'état et atténuation de la corrosion de l'armature d'acier galvanisé dans les ouvrages en béton

Rapport client A1-000339.2

pour

Corbec Inc.

Daam Galvanizing Co. Ltd.

AZZ incorporated

Ministère des Transports du Québec

Infrastructure et Transports Manitoba

Red River Galvanizing Inc.

South Atlantic LLC





Évaluation de l'état et atténuation de la corrosion de l'armature d'acier galvanisé dans les ouvrages en béton

Auteurs : J. Zhang
B. Baldock

Gestionnaire de projet : _____
Jieying Zhang, Ph. D., ing.

Approuvé par : _____
Istemi Ozkan, Ph. D., ing.

Rapport n° : A1-000339.2
Date du rapport : 6 juillet 2015
Contrat n° : A1-000339
Référence : Accord daté d'août 2012
Programme : Infrastructures essentielles en béton

xvi + 149 pages
Exemplaire de 4

TABLE DES MATIÈRES

Évaluation de l'état et atténuation de la corrosion de l'armature d'acier galvanisé dans les ouvrages en béton	i
RÉSUMÉ	xiii
REMERCIEMENTS	xv
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....	5
2.1 Contexte de l'utilisation de la technique des relevés de potentiel par demi-pile pour l'évaluation de l'état.....	5
2.1.1 Taux de corrosion et potentiel de corrosion.....	5
2.1.2 Corrosion de l'acier galvanisé.....	6
2.2 Protocole expérimental	7
2.2.1 Prismes de béton en vue de l'étude de l'effet des chlorures et de l'environnement	7
2.2.2 Dalles de béton en vue de cycles de mouillage-séchage.....	8
2.2.3 Matériaux et surveillance	9
CHAPITRE 3 : RÉSISTANCE À LA CORROSION DE L'ACIER GALVANISÉ	13
3.1 Effet de la teneur en chlorures et de la formulation du béton	13
3.1.1 Environnement E-3 à une HR de 100 %	13
3.1.2 Conditions d'exposition dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % et l'environnement E-2 à HR ambiante	29
3.1.3 Environnement E-4 à une HR de 80 % et environnement à corrosion accélérée	40
3.2 Effet de l'exposition aux conditions environnementales	50
3.2.1 Acier galvanisé et acier au carbone dans du béton sans chlorures.....	50
3.2.2 Acier galvanisé et acier au carbone dans du béton avec chlorures	51
3.3 Effet de la teneur en humidité dans le béton	56
3.3.1 Effet de la teneur en humidité sur le taux de corrosion	56
3.3.2 Effet de la teneur en humidité sur les indicateurs de l'état de corrosion	57
3.4 Résistance à la corrosion dans des dalles de béton soumises à un cycle de mouillage-séchage ..	63
3.5 Résumé.....	72
CHAPITRE 4 : ÉLABORATION DE MODÈLES ET DE LIGNES DIRECTRICES POUR ÉVALUER LA PROBABILITÉ DE CORROSION DE L'ACIER GALVANISÉ DANS LES OUVRAGES EN BÉTON	75
4.1 Analyse statistique de la résistance à la corrosion	75
4.1.1 Taux de corrosion.....	75

4.1.2 Potentiels de corrosion	80
4.2 Lignes directrices relatives aux catégories de probabilité de corrosion.....	90
4.2.1 Lignes directrices basées sur la résistance à la corrosion	90
4.2.2 Modélisation basée sur des probabilités cumulatives	95
4.3 Vers une modélisation avancée de la probabilité de corrosion	102
4.4. Résumé.....	107
CHAPITRE 5 : VALIDATION DES MODÈLES ET DES LIGNES DIRECTRICES POUR L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DE CORROSION	110
5.1 Étude sur le terrain	110
5.1.1 Information sur les ponts et l'étude sur le terrain	110
5.1.2 Données d'étude et discussion	115
5.2. Validation des modèles/lignes directrices d'évaluation de l'état.....	129
5.2.1 Évaluation de l'état au moyen du modèle/lignes directrices n° 1 et validation	129
5.2.2 Évaluation de l'état au moyen du modèle/lignes directrices n° 2 et validation	134
5.2.3 Évaluation de l'état au moyen du modèle P et validation.....	137
CHAPITRE 6 : RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.....	143
CHAPITRE 7 : BIBLIOGRAPHIE	147

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Configuration d'un prisme de béton.....	12
Figure 2 Dalle de béton pour cycles de mouillage-séchage.....	12
Figure 3 Corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange OPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}	19
Figure 4 Corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) acier galvanisé et b) acier au carbone.....	20
Figure 5 Corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange HPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}	21
Figure 6 Acier galvanisé passif dans les mélanges OPC et HPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}	22
Figure 7 Corrosion active de l'acier galvanisé dans les mélanges OPC et HPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}	23
Figure 8 Corrosion de l'acier au carbone dans les mélanges OPC et HPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}	24
Figure 9 Acier galvanisé et acier au carbone passifs dans le mélange OPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}	25
Figure 10 Corrosion active de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone dans le mélange OPC dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}	26
Figure 11 État des prismes d'OPC avec 2 % de chlorures dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) acier galvanisé, b) répliquat d'acier galvanisé, c) acier au carbone et d) acier au carbone à un moment ultérieur.....	27
Figure 12 Résistivité du béton dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %.....	28
Figure 13 Résistivité du béton et développement de la résistance relative du mélange OPC dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %.....	28
Figure 14 Corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange OPC et l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}	33
Figure 15 Corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange HPC et l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}	34
Figure 16 Corrosion de l'acier au carbone dans les mélanges OPC et HPC, et l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}	35
Figure 17 Résistivité du béton avec le temps dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) OPC et b) HPC.....	36
Figure 18 Impact de la résistivité du béton sur la corrosion de l'acier dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) OPC et b) HPC.....	37
Figure 19 Corrélation entre la résistivité du béton et le taux de corrosion dans du béton avec 2 % de chlorures.....	38
Figure 20 Résistivité du béton du mélange OPC avec le temps dans l'environnement E-2 à HR ambiante.....	38

Figure 21 Corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone avec le temps dans l'environnement E-2 à HR ambiante.....	39
Figure 22 Impact de la résistivité du béton sur la corrosion de l'acier dans l'environnement E-2 à HR ambiante.....	39
Figure 23 Impact de la teneur en humidité sur la corrosion de l'acier galvanisé	40
Figure 24 Corrosion de l'acier galvanisé dans l'environnement E-4 à une HR de 80 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}	43
Figure 25 Corrosion de l'acier au carbone dans l'environnement E-4 à une HR de 80 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}	44
Figure 26 Endommagement de prismes de béton : a) acier galvanisé à 1 % de chlorures, b) acier galvanisé à 2 % de chlorures, c) acier au carbone à 1 % de chlorures et d) acier au carbone à 2 % de chlorures.....	45
Figure 27 État passif des aciers dans un mélange OPC et l'environnement E-4 à une HR de 80 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}	46
Figure 28 Corrosion des aciers dans un mélange OPC avec 1 % de chlorures dans l'environnement E-4 à une HR de 80 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}	47
Figure 29 Potentiel de corrosion et taux de corrosion des aciers dans le temps à 2 % de chlorures dans l'environnement E-4 : a) E_{corr} et b) I_{corr}	48
Figure 30 Effet de l'enrobage de béton sur le taux de corrosion	49
Figure 31 Résistivité du béton dans l'environnement E-4 à une HR de 80 %.....	49
Figure 32 Teneur en humidité et humidité ambiante : désorption (croix) et adsorption (cercle), adaptée de Hansen (1986)	50
Figure 33 Effet de la teneur en humidité sur le potentiel de corrosion à l'état passif : a) acier galvanisé et b) acier au carbone	53
Figure 34 Effet de la teneur en humidité sur la corrosion de l'acier au carbone : a) E_{corr} et b) I_{corr}	54
Figure 35 Effet de la teneur en humidité sur la corrosion de l'acier galvanisé : a) E_{corr} et b) I_{corr}	55
Figure 36 Courbe de sorption du béton (adapté de Cunningham, 2008)	59
Figure 37 Impact de la teneur en humidité sur le taux de pénétration de substances agressives.....	59
Figure 38 Impact de la teneur en humidité sur le taux de corrosion.....	60
Figure 39 Impact de la teneur en chlorures sur le taux de corrosion	60
Figure 40 Impact de la teneur en humidité sur le potentiel de corrosion.....	61
Figure 41 Impact de la teneur en chlorures sur le potentiel de corrosion	61
Figure 42 Impact de la teneur en chlorures sur la résistivité du béton.....	62
Figure 43 Impact de la teneur en humidité sur la résistivité du béton	62
Figure 44 Corrosion de l'acier au carbone dans des dalles soumises à un cycle de mouillage-séchage : a) E_{corr} et b) I_{corr}	66
Figure 45 Effet de la préfissuration du béton sur la corrosion de l'acier galvanisé : a) I_{corr} et b) E_{corr} ..	67
Figure 46 Résistance à la corrosion de l'acier galvanisé dans des dalles OPC et DCI : a) I_{corr} et b) E_{corr}	68
Figure 47 Résistance à la corrosion dans des dalles OPC : a) acier galvanisé et b) acier au carbone	69
Figure 48 Corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone dans des dalles HPC : a) I_{corr} et b) E_{corr}	70

Figure 49 Corrosion et endommagement superficiel de l'acier galvanisé : a) I_{corr} et b) E_{corr}	71
Figure 50 Histogramme des taux de corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone.....	77
Figure 51 Histogramme des taux de corrosion : a) acier au carbone et b) acier galvanisé.....	77
Figure 52 Histogramme des taux de corrosion en pourcentage	78
Figure 53 Histogramme des potentiels de corrosion : a) acier au carbone et b) acier galvanisé	85
Figure 54 Histogramme des potentiels de corrosion : a) absence de corrosion et b) corrosion active ...	86
Figure 55 Histogramme des potentiels de corrosion de divers états de corrosion.....	87
Figure 56 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone.....	87
Figure 57 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de l'acier galvanisé	88
Figure 58 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de l'acier au carbone.....	88
Figure 59 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de l'absence de corrosion	89
Figure 60 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de la corrosion active	89
Figure 61 Corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier au carbone	94
Figure 62 Corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier galvanisé.....	94
Figure 63 Corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier galvanisé dans du béton saturé	95
Figure 64 Probabilité de corrosion active cumulative en fonction du potentiel de corrosion	100
Figure 65 Probabilité de corrosion de l'acier galvanisé comme fonction continue du potentiel de corrosion.....	105
Figure 66 Probabilité de corrosion de l'acier au carbone comme fonction continue du potentiel de corrosion.....	105
Figure 67 Probabilité de corrosion de l'acier galvanisé en fonction du potentiel de corrosion.....	106
Figure 68 Probabilité de corrosion de l'acier galvanisé en fonction du potentiel de corrosion, modèle P	106
Figure 69 Illustration schématique des piliers du pont 13540	112
Figure 70 Photo du pont 13540 à l'intersection du boul. Montarville et de l'autoroute 30.....	112
Figure 71 Illustration schématique des piliers du pont 13577	113
Figure 72 Photo du pont 13577 à l'intersection de la route 116 et de l'autoroute 30.....	113
Figure 73 Réparation par rapiéçage observée sur le pilier 1A du pont 13577.....	114
Figure 74 Corrélation entre le taux de corrosion réel et la lecture de taux de corrosion au moyen du Galvapulse.....	114
Figure 75 Histogramme des potentiels par demi-pile des piliers du pont 13540.....	131
Figure 76 Histogramme des potentiels par demi-pile des piliers du pont 13577.....	131
Figure 77 Distribution des potentiels par demi-pile du pont 13540 au moyen du modèle/lignes directrices n° 1.....	132
Figure 78 Distribution des potentiels par demi-pile du pont 13577 au moyen du modèle/lignes directrices n° 1.....	133
Figure 79 Distribution des potentiels par demi-pile des piliers du pont 13540 à l'aide du modèle/lignes directrices n° 2.....	135
Figure 80 Distribution des potentiels par demi-pile des piliers du pont 13577 à l'aide du modèle/lignes directrices n° 2.....	136

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Conversion entre la densité du courant de corrosion, le taux de pénétration et la perte massique.....	10
Tableau 2 État de corrosion et taux de corrosion de l'acier au carbone dans le béton	10
Tableau 3 Lignes directrices de la norme ASTM C876-09 pour l'évaluation de l'état de la corrosion de l'acier dans le béton	10
Tableau 4 Passivation de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone, avec données tirées de Moreno et Sagüés (1996).....	11
Tableau 5 Température et humidité relative des quatre environnements	11
Tableau 6 Formulations et propriétés du béton.....	11
Tableau 7 Résistivité du béton (ρ) des mélanges OPC et HPC à une HR de 100 % pendant 105 semaines	18
Tableau 8 Corrosion des barres d'acier dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % et l'environnement E-3 à une HR de 100 % à 105 semaines	32
Tableau 9 Potentiel de corrosion de l'armature en acier à l'état passif mesuré à 105 semaines	51
Tableau 10 Potentiel de corrosion de l'acier dans du béton avec 2 % de chlorures à 105 semaines.....	52
Tableau 11 Taux de corrosion prévus dans du béton non protégé et dans l'environnement (Polder, 2001)	57
Tableau 12 Impact du ratio e/c sur la résistivité du béton et le potentiel de corrosion à 105 semaines d'âge.....	59
Tableau 13 Teneur en chlorures dans des dalles de béton selon les normes ASTM C 1152/C 1152M-04	65
Tableau 14 Statistiques sur les taux de corrosion pour l'acier galvanisé et l'acier au carbone	79
Tableau 15 Statistiques sur les potentiels de corrosion pour l'acier galvanisé et l'acier au carbone	84
Tableau 16 Probabilité de potentiel de corrosion pour un potentiel de corrosion choisi aléatoirement $x=-339$ mV	84
Tableau 17 Taux de corrosion et potentiel de corrosion de l'acier au carbone, et comparaison avec la norme ASTM C876.....	93
Tableau 18 Données sur la corrosion de l'acier galvanisé et lignes directrices G sur l'évaluation de l'état de corrosion.....	93
Tableau 19 Statistiques de potentiel de corrosion pour la corrosion active et l'absence de corrosion .	100
Tableau 20 Potentiels de corrosion limites pour différentes probabilités de corrosion	100
Tableau 21 Modèle/lignes directrices n° 1 basé sur des probabilités cumulatives pour l'acier galvanisé	101
Tableau 22 Modèle/lignes directrices n° 2 basé sur des probabilités cumulatives pour l'acier galvanisé	101
Tableau 23 Modèles/lignes directrices basés sur les probabilités cumulatives pour l'établissement de la probabilité de corrosion de l'acier galvanisé	108
Tableau 24 Taux de corrosion type de l'acier dans le béton au moyen de différentes techniques	111

Tableau 25 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 1A du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC) en 2014.....	117
Tableau 26 Mesures de taux de corrosion du pilier 1A du pont 13540 en 2014	117
Tableau 27 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 1A du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC)	117
Tableau 28 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 1B du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC) en 2014.....	118
Tableau 29 Mesures de taux de corrosion du pilier 1B du pont 13540 en 2014.....	118
Tableau 30 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 1B du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC)	118
Tableau 31 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 3C du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC) en 2014.....	119
Tableau 32 Mesures de taux de corrosion du pilier 3C du pont 13540 en 2014.....	119
Tableau 33 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 3C du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC)	119
Tableau 34 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 3D du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC) en 2014.....	120
Tableau 35 Mesures de taux de corrosion du pilier 3D du pont 13540 en 2014	120
Tableau 36 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 3D du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC)	120
Tableau 37 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 1A du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC) en 2014.....	121
Tableau 38 Mesures de taux de corrosion du pilier 1A du pont 13577 en 2014	121
Tableau 39 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 1A du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC)	121
Tableau 40 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 2A du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC) en 2014.....	122
Tableau 41 Mesures de taux de corrosion du pilier 2A du pont 13577 en 2014	122
Tableau 42 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 2A du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC)	122
Tableau 43 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 3B du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC) en 2014.....	123
Tableau 44 Mesures de taux de corrosion du pilier 3B du pont 13577 en 2014.....	123
Tableau 45 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 3B du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC)	123
Tableau 46 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 4B du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC) en 2014.....	124
Tableau 47 Mesures de taux de corrosion du pilier 4Bof pont 13577 en 2014	124
Tableau 48 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 4B du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC)	124
Tableau 49 Teneur en chlorures en pourcentage de masse de béton du pont 13540 en 2014	125
Tableau 50 Teneur en chlorures en pourcentage de masse de béton du pont 13577 en 2014	125

Tableau 51 Examen visuel des barres d'armature en acier galvanisé exposées dans les piliers de deux ponts routiers.....	126
Tableau 52 Probabilité (%) de corrosion active du pilier 1A du pont 13540 en 2014.....	139
Tableau 53 Probabilité (%) de corrosion active du pilier 1B du pont 13540 en 2014.....	139
Tableau 54 Taux de corrosion au pilier 1A du pont 13540 en 2014.....	139
Tableau 55 Taux de corrosion au pilier 1B du pont 13540 en 2014.....	140
Tableau 56 Probabilité (%) de corrosion active au pilier 1A du pont 13577 en 2014.....	140
Tableau 57 Probabilité (%) de corrosion active au pilier 4B du pont 13577 en 2014.....	140
Tableau 58 Taux de corrosion au pilier 1A du pont 13577 en 2014.....	141
Tableau 59 Taux de corrosion au pilier 4B du pont 13577 en 2014.....	141

RÉSUMÉ

Cette étude de durée de trois ans sur l'armature en acier galvanisé par immersion à chaud dans les ouvrages en béton était composée d'un programme expérimental complet, d'une analyse de la résistance à la corrosion, d'une analyse statistique, d'une modélisation de l'évaluation de l'état et d'une étude sur le terrain pour validation. Trois parties majeures de l'étude ont été présentées dans ce rapport : i) une première partie sur la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone traditionnel en vue d'une meilleure compréhension de l'utilisation du premier pour prolonger la durée de vie des ouvrages en béton; ii) une deuxième partie sur l'élaboration de modèles/lignes directrices, pour l'évaluation de l'état de l'armature en acier galvanisé dans les ouvrages en béton, similaires aux modèles/lignes directrices de la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone; et enfin iii) une partie sur une étude sur le terrain qui a servi à mener l'évaluation de l'état et à valider les modèles/lignes directrices élaborés.

Il a été établi que l'acier galvanisé a un taux de corrosion de cinq à dix fois inférieure à celle de l'acier au carbone dans du béton fortement contaminé contenant 2 % de chlorures par masse de ciment (0,31 % de béton), selon l'exposition aux conditions environnementales, et que le taux de corrosion de l'acier au carbone augmente exponentiellement avec le temps dans un environnement très corrosif tandis que l'acier galvanisé maintient un taux de corrosion stable et beaucoup plus lente. Un taux de corrosion lent après l'initiation de la corrosion est l'une des caractéristiques les plus cruciales de la résistance à la corrosion de l'armature en acier pour ce qui est du retardement de la fissuration et de la délamination du béton. Deux études sur le terrain menées en 1997 par le CNRC et en 2014 dans le cadre de l'étude sur des piliers de deux ponts routiers en béton ont montré que l'acier galvanisé présentait des taux de corrosion lents en été, comme l'ont confirmé une analyse de la teneur en chlorures et un examen visuel. Leur taux de corrosion lent expliquait le fait qu'aucune fissuration induite par la corrosion n'a été trouvée dans le béton après presque 50 ans de service. En outre, l'impact de paramètres clés comme la teneur en chlorures, la teneur en humidité et le ratio eau-ciment du mélange de béton a été étudié de façon approfondie tant du point de vue de la résistance à la corrosion que de l'évaluation de l'état de l'acier galvanisé. Un inhibiteur de corrosion à base de nitrites de calcium peut être un moyen efficace d'améliorer encore davantage la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé. On a trouvé que non seulement il retarde l'initiation de la corrosion de l'acier galvanisé, mais il réduit considérablement le taux de corrosion de ce dernier. Il a été établi qu'une pré-fissuration du béton et un endommagement mineur du revêtement de l'acier galvanisé n'avaient pas d'impact négatif sur la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé, mais que la pré-fissuration du béton avait un effet négatif beaucoup plus grand sur l'acier au carbone.

Trois niveaux de modèles/lignes directrices ayant des capacités de prévision différentes et qui tiennent compte des progrès réalisés en matière de compréhension, de l'analyse de la corrosion à l'analyse statistique, ont été élaborés pour l'évaluation de l'état de l'acier galvanisé dans les ouvrages en béton. Le modèle/lignes directrices n° 1 et le modèle/lignes directrices n° 2 basés sur des probabilités cumulatives peuvent être utilisés pour l'acier galvanisé. Ils reconnaissent respectivement quatre et cinq catégories de probabilités de corrosion basées sur le potentiel de corrosion mesuré au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile. De plus, un modèle P avancé a été établi pour la première fois. Ce modèle calcule la probabilité de corrosion à partir d'une fonction continue de potentiel de corrosion, par établissement des fonctions de probabilités de distribution.

Une évaluation de l'état a été effectuée sur huit piliers des deux ponts routiers étudiés, au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile et des modèles/lignes directrices élaborés dans le cadre de la présente étude. Le modèle/lignes directrices n° 1 a déterminé que deux piliers présentaient le meilleur et le pire état de corrosion, et le modèle/lignes directrices n° 2 a établi le classement des piliers étudiés du point de vue de l'état de corrosion. Un examen visuel et une analyse des chlorures ont validé

ces résultats. Le modèle P a également établi les différents états de corrosion des piliers, et les mesures de taux de corrosion ont validé les différences prévues.

Malgré l'usage d'un grand nombre de données sur la corrosion mesurées à partir d'un large éventail d'états de corrosion représentatifs pour établir les modèles/lignes directrices,, davantage de données pertinentes permettraient d'en améliorer l'exactitude. Plus d'études sur les modalités d'utilisation de la probabilité de corrosion par ces modèles/lignes directrices comme donnée quantitative dans la prise de décision touchant la gestion des actifs demeurent nécessaires, comme la prévision de la durée de vie et la réhabilitation des ouvrages en béton à armature d'acier galvanisé..

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner le soutien financier du Conseil national de recherches du Canada (CNRC), d'AZZ Inc., de Corbec Inc., de Daam Galvanizing Co. Ltd., du ministère des Transports du Québec, d'Infrastructure et Transports Manitoba, de Red River Galvanizing Inc. et de South Atlantic LLC. Ils tiennent à remercier M. E. Gardin pour son aide dans la mise au point du projet, M. D. Krys pour son aide dans la programmation de l'analyse statistique, M. G. Chan pour son aide dans le titrage des chlorures, et M. J. Margeson de CNRC Construction pour son aide dans la préparation et l'essai des mélanges de béton.

DISCLAIMER

Si une question devait être soulevée concernant l'exactitude de l'information présentée par la version traduite de ce rapport, veuillez vous référer à la version anglaise dudit rapport.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

L'armature en acier galvanisé par immersion à chaud (acier galvanisé) a été utilisée dans de nombreux types d'ouvrages en béton depuis les années 1930 (Yeomans, 1987), en particulier depuis les quarante dernières années. Dans le procédé d'immersion à chaud, un mince revêtement de zinc est lié métallurgiquement au substrat d'acier au carbone, qui peut ainsi résister à l'abrasion et à des charges lourdes, et offrir une plus grande résistance à la corrosion que l'armature en acier classique (acier au carbone). Il a été établi que l'acier galvanisé présente des valeurs seuils de chlorures moyennes de 1,5 à 2,5 fois plus élevées que l'acier au carbone (Yeomans, 1994a; Darwin et coll., 2009). Le film passif du revêtement de zinc demeure stable à partir d'un pH de 9,5 (Yeomans, 1994a) à un pH de 13,3 (Macias et Andrade, 1983), ce qui implique que l'acier galvanisé peut également offrir une plus grande résistance à la corrosion induite par la carbonatation du béton que l'acier au carbone, ce qui a été confirmé par une étude expérimentale (Vera et coll., 2012).

Il est maintenant considéré comme nécessaire d'utiliser de l'acier offrant une plus grande résistance à la corrosion que l'acier au carbone pour prévenir une détérioration prématurée, prolonger la durée de vie et réduire le coût du cycle de vie des ouvrages en béton dans des environnements corrosifs, comme les ponts routiers exposés aux sels de dégivrage. Comme l'acier galvanisé est l'un des aciers d'armature résistant à la corrosion les plus couramment utilisés depuis longtemps, il existe un ensemble de connaissances issues de la recherche en laboratoire et d'études sur le terrain, sur sa résistance à la corrosion dans les ouvrages en béton, ou de son adoption dans les codes et les normes, comme les normes CAN/CSA G164 et ASTM A767. Parmi l'abondante littérature sur la question, on notera tout particulièrement les travaux de Yeomans (p. ex. 1987, 1994a et 1994 b), dont les articles, les rapports et les livres forment un recueil de connaissances allant de l'électrochimie, et de la caractérisation et performance des matériaux à la prévision de la durée de vie et aux applications pratiques dans le béton. Ce corpus peut servir de guide vers plus de références et de ressources, en particulier en ce qui a trait à la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé dans les ouvrages en béton.

La présente étude visait toutefois à établir des lignes directrices relativement à l'évaluation de l'état de corrosion de l'acier galvanisé dans les ouvrages en béton au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile. Les propriétaires de ponts ont constaté qu'une évaluation fiable de l'état est aussi importante que l'utilisation d'un acier résistant à la corrosion parce qu'elle permet d'évaluer l'état de corrosion des ouvrages en béton et donc, d'optimiser les stratégies de maintenance/réparation/réhabilitation tout au long du cycle de vie. Le fait de disposer de lignes directrices fiables d'évaluation de l'état, d'autre part, encouragera également l'usage de l'acier galvanisé dans de nouveaux ouvrages.

La technique des relevés de potentiel par demi-pile (demi-cellule électrochimique) est utilisée depuis le début des années 1970 pour repérer les barres d'armature en acier qui se corrodent dans les ouvrages en béton (Stratfull, 1973; Van Daveer, 1975). La norme ASTM C876 prescrit l'utilisation de la technique des relevés de potentiel par demi-pile dans les ouvrages en béton, mais, surtout, elle fournit des lignes directrices en vue de l'interprétation de la probabilité de corrosion basée sur le potentiel de corrosion libre mesuré au moyen de cette technique, faisant de celle-ci un moyen efficace et rapide d'évaluation de l'état de corrosion active/passive des barres d'armature encastrées. Cette technique est devenue la méthode la plus répandue pour l'évaluation de l'état de corrosion des ouvrages en béton. Le Comité technique 154 de la RILEM (Elsener, 2001 et 2003) formule des recommandations techniques similaires. Dans le présent rapport, les notions de potentiel de corrosion libre, de potentiel de corrosion et de potentiel par demi-pile telles que ces notions sont utilisées en génie civil sont interchangeables dans la présentation et l'analyse.

L'utilisation répandue de la technique des relevés de potentiel par demi-pile est attribuable à deux raisons majeures. En premier lieu, cette technique est basée sur les caractéristiques de corrosion de l'acier au carbone dans le béton, en particulier la corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion; c'est-à-dire qu'un potentiel de corrosion plus négatif est généralement associé à un taux de corrosion plus grand de l'acier au carbone dans le béton. Par exemple, un potentiel de corrosion plus négatif que -350 mV par rapport à l'ESC (électrode Cu/CuSO₄) dans le béton signifie une probabilité de 90 % que l'acier au carbone fasse l'objet d'une corrosion active selon les lignes directrices de la norme ASTM C876. Deuxièmement, il est beaucoup plus facile, commode et rapide de mesurer le potentiel par demi-pile sur place que de mesurer le taux de corrosion, même si ce dernier quantifie le taux de dissolution du métal et indique le véritable état de corrosion. La mesure du potentiel par demi-pile requiert seulement une électrode et un voltmètre. Par contre, la mesure du taux de corrosion requiert non seulement des instruments plus complexes et beaucoup plus de temps, mais surtout, elle exige une expertise en matière de corrosion, et une expérience en utilisation et en dépannage des instruments pour produire des données crédibles. Les ministères des transports tant au Canada qu'aux États-Unis (p. ex. le ministère des Transports de l'Ontario (MTO-OSIM, 2009), le ministère des Transports du Québec (MTQ) et le département de transport de Californie (Caltrans-OSMPP, 2012)) utilisent la technique des relevés de potentiel par demi-pile et les lignes directrices de la norme ASTM C876 pour évaluer l'état de corrosion, qui sert ensuite à élaborer des stratégies de réparation et de réhabilitation et/ou d'atténuation de la corrosion.

Les lignes directrices de la norme ASTM C876 s'appliquent toutefois seulement à l'acier au carbone nu et il n'existe pas de lignes directrices équivalentes pour l'acier galvanisé. Le zinc dans la série électrochimique a un potentiel d'électrode standard très négatif; c'est-à-dire que $Zn^{2+} + 2e^- = Zn$ donne -0,762 V par rapport à l'ESH (électrode standard à hydrogène). Il est beaucoup plus négatif que le fer, pour lequel $Fe^{2+} + 2e^- = Fe$ donne -0,447 V par rapport à l'ESH (Jones, 1992). Cela rend le zinc thermodynamiquement plus susceptible de corroder que le fer, protégeant de ce fait ce dernier lorsque les deux métaux sont en contact électrique, mais cela implique également que l'acier galvanisé dans le béton a un potentiel de corrosion libre plus négatif que l'acier au carbone. La difficulté d'évaluations de l'état d'ouvrages en béton à armature d'acier galvanisé vient donc du fait que le potentiel de corrosion mesuré peut ne pas correspondre à la probabilité de corrosion interprétée par la norme ASTM C876 en raison de la présence du revêtement de zinc et des couches d'alliage fer-zinc. La corrélation entre le potentiel de corrosion libre et le taux de corrosion est une caractéristique unique pour chaque type de métal ainsi que pour l'électrolyte (p. ex. solutions interstitielles du béton) dans lequel la corrosion se produit. En d'autres termes, la raison même qui rend les lignes directrices de la norme ASTM C876 appropriées pour l'acier au carbone les rend inappropriées pour l'acier galvanisé.

Outre les considérations théoriques, le monde du génie civil s'est également rendu à l'évidence que les lignes directrices relatives à l'acier galvanisé devraient être différentes des lignes directrices relatives à l'acier au carbone. Par exemple, le MTO (Pianca et Schell, 2005) avait noté dans les années 1970, au cours de l'évaluation de l'état dans le cadre de ses trois projets pilotes utilisant de l'acier galvanisé, qu'on ne trouvait pas dans la littérature existante sur l'acier galvanisé dans le béton un moyen d'interpréter les données sur les relevés de potentiel par demi-pile. À la place, la plupart des évaluations de l'état de l'acier galvanisé dans les tabliers de pont ont tout simplement adopté les lignes directrices de l'ASTM (p. ex. Olson et Nagi, 2002), des potentiels par demi-pile très négatifs ayant été mesurés à certains endroits, mais ont seulement réussi à trouver des barres d'armature à l'état passif sans corrosion active.

Le principal objectif du présent projet de recherche en collaboration financé par le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et ses collaborateurs est d'élaborer des lignes directrices en vue de l'évaluation de la corrosion au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile pour l'acier

galvanisé dans les ouvrages en béton. Les lignes directrices aideront les propriétaires et les gestionnaires à évaluer l'état de la corrosion active/passive de leurs ouvrages en béton à armature d'acier galvanisé, et donc à prendre les décisions qui s'imposent relativement aux stratégies de maintenance/réparation/réhabilitation et aux mesures d'atténuation de la corrosion, ce qui encouragera une plus grande utilisation de l'acier galvanisé étant donné sa plus grande résistance à la corrosion que l'acier au carbone. Le présent rapport, en plus d'établir des comparaisons entre la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé et celle de l'acier au carbone, explore les stratégies d'atténuation de la corrosion destinées à améliorer la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé et à prolonger la durée de vie des ouvrages en béton.

Cette étude de trois ans a inclus un programme expérimental complet visant à obtenir des données sur la corrosion représentant un large éventail d'états de la corrosion de l'acier galvanisé dans des ouvrages en béton. Les taux de corrosion se sont étendus sur cinq ordres de grandeur allant de l'état passif à des taux de la corrosion lents, modérés et élevés, avec une combinaison des principaux paramètres de corrosion, dont l'exposition aux conditions environnementales et la teneur en chlorures ainsi que le type de béton. Ces données ont été utilisées pour l'analyse de la résistance à la corrosion et l'analyse statistique en vue de l'élaboration de modèles/lignes directrices d'évaluation de l'état de la corrosion. L'étude a également inclus une étude sur le terrain menée sur deux ponts routiers; les données recueillies à la suite de relevés de potentiel par demi-pile ont servi à valider les modèles/lignes directrices d'évaluation de l'état élaborés.

CHAPITRE 2 : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Cette section présente le contexte et le programme expérimental mis au point pour simuler divers états de corrosion de l'acier galvanisé dans des ouvrages en béton. Les données sur la corrosion recueillies ont servi à mieux comprendre la résistance à la corrosion et à établir des modèles/lignes directrices d'évaluation de l'état pour l'acier galvanisé dans des ouvrages en béton dans les chapitres suivants du rapport.

2.1 Contexte de l'utilisation de la technique des relevés de potentiel par demi-pile pour l'évaluation de l'état

Pour élaborer les modèles/lignes directrices proposés, un programme expérimental doit viser à obtenir des données d'un large éventail d'états de la corrosion en concevant des paramètres clés qui régissent la corrosion de l'acier galvanisé. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la revue de la littérature a indiqué une abondance de ressources, mais le présent rapport fait référence seulement aux études qui sont pertinentes du point de vue de notre objectif principal, qui est d'explorer la corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier galvanisé dans le béton. La revue qui suit et l'étude des données tirées de la documentation retenue incluent également des conclusions tirées des données, mais non présentées par les auteurs originaux.

2.1.1 Taux de corrosion et potentiel de corrosion

La corrosion des métaux et des alliages est un processus électrochimique qui consiste dans le transfert de charges électriques à la suite de réactions de réduction (cathodiques) et d'oxydation (anodiques) (Uhlig, 1963). À mesure que les réactions anodiques et cathodiques s'effectuent par polarisation, les potentiels et les vitesses de réaction de leurs électrodes respectives s'approchent des mêmes niveaux, de sorte qu'au point d'équilibre, elles atteignent le même potentiel de corrosion libre, E_{corr} , et le taux de corrosion correspondant, I_{corr} (Jones, 1992). Pour la corrosion de l'acier galvanisé, la réaction d'oxydation au site anodique, p. ex. $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e$, mène à la dissolution du zinc et le taux de corrosion quantifie la vitesse à laquelle s'effectue la dissolution. Dans les ouvrages en béton, le taux de corrosion détermine directement le taux de détérioration du béton causée par les produits de corrosion accumulés, p. ex. le délai de fissuration et d'effritement du béton. La détermination du taux de corrosion est donc le but ultime d'une évaluation de l'état de corrosion.

Le taux de corrosion peut être quantifié de différentes façons, comme au moyen de la densité du courant de corrosion, de la perte massique et/ou du taux de pénétration. Ces quantités sont reliées par la loi de Faraday, selon laquelle la quantité d'électrons et d'ions métalliques consommés ou produits dans des réactions électrochimiques est directement proportionnelle à la quantité d'électricité, ou courant de corrosion, qui circule. Le Tableau 1 énumère les densités de courant ($\mu A/cm^2$) communément utilisées telles que mesurées en laboratoire et sur le terrain, et leur conversion en taux de pénétration ($\mu m/an$) et en pertes massiques ($g/m^2/jour$). Selon le taux de corrosion mesuré et le risque connexe d'endommagement des ouvrages en béton, l'état de corrosion d'une barre d'armature peut également être évalué comme présentant un taux de corrosion négligeable, un taux de corrosion bas, un taux de corrosion modéré ou un taux de corrosion élevé (Andrade et Alonso, 1996; CT 154-EMC RILEM, 2004), comme il est indiqué au Tableau 2. Un taux de corrosion inférieur à $0,1 \mu A/cm^2$ est un taux de corrosion négligeable lorsqu'une barre d'armature dans le béton est à l'état passif ou dans du béton sec qui empêche la corrosion active (Song et Saraswathy, 2007). Pour simplifier les choses, cet état peut être appelé absence de corrosion parce que le terme « corrosion » est souvent utilisé pour désigner la corrosion active assortie d'un taux de corrosion supérieur à $0,1 \mu A/cm^2$.

La technique des relevés de potentiel par demi-pile effectuée conformément à la norme ASTM C876 fournit une méthode servant à mesurer le potentiel de corrosion libre des barres d'armature encastrées

dans le béton par rapport au potentiel par demi-pile d'une électrode Cu/CuSO₄ (ESC). Le potentiel de corrosion libre mesuré, ou potentiel de corrosion, est souvent appelé potentiel par demi-pile en génie civil. La corrélation entre le potentiel de corrosion et l'état de corrosion est indiquée par les lignes directrices largement utilisées relatives à l'évaluation de l'état fournies par la norme ASTM C876, comme il est montré au Tableau 3. Les lignes directrices établissent une corrélation entre une probabilité de corrosion de 90 %, soit une corrosion active, et des potentiels de corrosion mesurés plus négatifs que -350 mV par rapport à l'ESC, ainsi qu'entre une probabilité de corrosion active de 10 % et des potentiels de corrosion mesurés plus positifs que -200 mV par rapport à l'ESC. Les lignes directrices fournissent essentiellement des probabilités de corrosion active et d'absence de corrosion fondées sur un potentiel de corrosion mesuré, de même qu'une incertitude de l'état de corrosion pour un éventail de potentiels de corrosion compris entre -350 mV et -200 mV par rapport à l'ESC.

2.1.2 Corrosion de l'acier galvanisé

La réaction entre l'acier au carbone et le zinc fondu pendant le procédé de galvanisation par immersion à chaud produit un revêtement sur l'acier composé d'une série de couches d'alliage fer-zinc allant de l'interface acier/zinc à une couche de zinc essentiellement pur sur la surface extérieure. Pour une utilisation dans des ouvrages en béton, une épaisseur totale de 100 µm est habituellement spécifiée en vue d'une performance et une épaisseur optimales (Yeomans, 1987).

La corrosion passive/active du revêtement galvanisé est fonction du pH des solutions interstitielles du béton. Macias et Andrade (1983 et 1987) ont déterminé qu'un seuil du pH de $<13,3 \pm 0,1$ pouvait produire une passivation efficace du revêtement galvanisé dans des solutions interstitielles du béton simulées. Le produit de corrosion passivant d'hydroxyzincate de calcium, de formule $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, forme une couche compacte et isolante qui stoppe la dissolution du zinc. Les potentiels de corrosion passive mesurés se sont révélés être entre -450 mV et -650 mV par rapport à l'ESC (électrode standard de calomel), équivalant à -510 à -710 mV par rapport à l'ESC. Les potentiels de corrosion passive de l'acier au carbone traditionnel, d'autre part, sont typiquement plus positifs que -250 mV par rapport à l'ESC dans des solutions interstitielles du béton simulées.

Moreno et Sagüés (1996) ont suivi le comportement de passivation de l'acier galvanisé dans différents mélanges de béton conservés dans l'air à une humidité relative (HR) ambiante de 60 % (état sec) et à l'état saturé (état humide) pendant plus de deux ans, par rapport au comportement de l'acier au carbone. Leur étude a montré que l'acier galvanisé dans tous les mélanges de béton, y compris le béton ordinaire et les bétons avec des cendres volantes ou des fumées de silice ou une combinaison de ces deux matériaux, avait développé un comportement stable et une passivation similaire. Ces constatations sont conformes à celles de l'étude de Macias et Andrade (1983 et 1987), qui a établi que les valeurs de pH des solutions interstitielles du béton extraites allaient de 12,66 à 13,04. À la suite d'un examen plus approfondi de ces chiffres, les données relatives au potentiel de corrosion à l'état passif stabilisé pour les deux mélanges de béton ordinaire, d'un ratio eau-ciment (e/c) de 0,55 et 0,41 respectivement, ont été compilées et sont présentées au Tableau 4, accompagnées des observations suivantes.

1. L'acier galvanisé et l'acier au carbone ont une densité de courant passif comparable (taux de corrosion, I_{corr}), mais le potentiel de corrosion, E_{corr} , de l'acier galvanisé est beaucoup plus négatif que celui de l'acier au carbone. La différence peut être de 400 mV.
2. Le potentiel de corrosion E_{corr} de l'acier galvanisé est beaucoup plus sensible à la teneur en humidité du béton que celui de l'acier au carbone. La différence de potentiel de corrosion (E_{corr}) entre l'état sec et l'état humide du béton est d'environ 200 mV pour l'acier galvanisé et de moins de 50 mV pour l'acier au carbone, dans l'étude.

Ces études montrent clairement que pour le même état passif d'absence de corrosion, le potentiel de corrosion de l'acier galvanisé est différent de celui de l'acier au carbone, et l'humidité relative ambiante est un paramètre clé qui influence les lectures de potentiel de corrosion. Pour l'état de corrosion active causé par les chlorures, Macias et Andrade (1983 et 1990) ont établi que le potentiel de corrosion de l'acier galvanisé est devenu plus négatif dans des solutions interstitielles du béton simulées qu'à l'état passif d'absence de corrosion. Un examen attentif des données présentées pour I_{corr} et E_{corr} montre que :

1. Les potentiels de corrosion dans la solution de Ca(OH)_2 avec NaCl ont été stabilisés entre -850 mV et -650 par rapport à l'ESC, tandis que les potentiels de corrosion dans la solution de Ca(OH)_2 sans NaCl se sont situés autour de -550 mV par rapport à l'ESC;
2. Le taux de corrosion active I_{corr} dans la solution de Ca(OH)_2 avec NaCl a été stabilisé autour de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, tandis que le courant de densité de la corrosion passive a été stabilisé à environ $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dans la solution de Ca(OH)_2 sans NaCl;
3. La différence entre les taux de corrosion pour trois concentrations très différentes de NaCl de 0,3 M, 0,6 M et 0,9 M était négligeable, ce qui pourrait être une importante caractéristique de l'acier galvanisé qui offre une protection additionnelle dans un béton fortement contaminé par les chlorures.

Pour résumer, l'acier galvanisé a un potentiel de corrosion très différent de l'acier au carbone, dans le béton, ce qui rend les lignes directrices de la norme ASTM C876 non pertinentes. Pour élaborer des lignes directrices efficaces en vue de l'évaluation de l'état de l'acier galvanisé, il est important d'étudier et de comprendre la corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion. À cette fin, il a été déterminé que les principaux paramètres de corrosion étaient l'humidité et la teneur en chlorures, ainsi que la formulation du béton, paramètres qui ont été utilisés dans le programme expérimental en vue de l'élaboration de données représentatives pour différents états de corrosion de l'acier galvanisé. Le protocole expérimental détaillé a été présenté dans le rapport provisoire (Zhang et Baldock, 2013), et la section qui suit résume le programme expérimental en vue de l'analyse des données ainsi que de l'élaboration des modèles et des lignes directrices pour l'évaluation de l'état de corrosion.

2.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental a inclus la corrosion de barres d'armature dans des échantillons de béton au moyen desquels trois paramètres clés ont été étudiés, de même qu'un total de six facteurs qui influent sur la corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone.

2.2.1 Prismes de béton en vue de l'étude de l'effet des chlorures et de l'environnement

Nous avons utilisé des prismes de béton pour obtenir le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier galvanisé dans du béton contenant trois niveaux de teneur en chlorures et exposé à quatre combinaisons de conditions environnementales, par rapport à l'acier au carbone. Soixante-quatre prismes de béton renfermant 128 barres ont été préparés. Chaque prisme ($200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$) contenait, comme le montre la Figure 1, deux barres d'acier. Les barres ont été préparées de manière à présenter une longueur de 230 mm, une extrémité étant attachée à un fil de calibre 18 au moyen d'un raccord à sertissage et d'un boulon en acier inoxydable 8-32 pour la connexion électrique. Les deux extrémités ont été enduites de résine époxy et recouvertes d'une gaine prévenant l'écaillage de la résine époxy, pour une longueur utile de la barre de 150 mm. Les barres d'acier incluaient des barres en acier galvanisé (Gal), en acier au carbone traditionnel (CS pour *Carbon Steel*) et en zinc (Zn), comme références.

L'un des paramètres clés de la corrosion, la teneur en chlorures, a varié de 0 % et 1 % à 2 % par masse de ciment. Une teneur en chlorures de 2 % par masse de ciment équivaut à une teneur en chlorures de

7,2 kg/m³ de béton, ce qui constitue une contamination grave des ouvrages en béton (Weyers et coll., 1993). Nous avons conçu le paramètre de manière à obtenir la résistance dans les conditions de corrosion les plus difficiles. Un deuxième paramètre clé de la corrosion, l'exposition environnementale, incluait quatre combinaisons d'humidité et de température, comme le montre le Tableau 5. La teneur en humidité est l'un des facteurs cruciaux déterminant la résistivité du béton et le taux de corrosion de l'armature en acier dans le béton. Les prismes de béton ont été conçus de manière à être exposés à une humidité relative de 100 %, 80 % et 50 %, ainsi qu'à une humidité ambiante non contrôlée. Parmi ces conditions d'exposition, l'environnement E-3 d'une humidité relative de 100 % représentait une condition limite de l'état humide pour la corrosion, l'environnement E-1 d'une humidité relative de 50 % représentait une condition de faible humidité et l'environnement E-4 consistait dans une enceinte à atmosphère contrôlée où l'humidité relative était réglée à 80 % et la température oscillait quotidiennement entre 25 °C et 40 °C. L'environnement E-4 a également été utilisé pour accélérer la corrosion des barres d'armature encastrées, et accélérer ainsi les dommages dans le béton et les observer au cours de la durée du projet.

Un autre paramètre clé était la formulation du béton, qui incluait deux ratios eau-ciment (e/c) : le béton de ciment Portland ordinaire OPC (Ordinary Portland Concrete) de ratio e/c=0,5 et le béton à haute performance HPC (High Performance Concrete) de ratio e/c=0,37. Les détails sont présentés au Tableau 6 et à la section 2.2.3. Pour résumer, nous avons conçu les prismes de béton de manière à obtenir un large éventail d'états de corrosion et avons utilisé les données obtenues pour élaborer des lignes directrices d'évaluation de l'état et comparer la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone. Par exemple, dans la dernière analyse, CS OPC CI-0 E-4 signifie que le potentiel de corrosion ou le taux de corrosion ont été obtenus pour de l'acier au carbone dans le mélange OPC sans chlorures dans l'environnement E-4 d'une humidité relative de 80 %, et Gal HPC CI-2 E-3, que les mêmes données ont été obtenues pour de l'acier galvanisé dans le mélange HPC avec 2 % de chlorures dans l'environnement E-3 d'une humidité relative de 100 %.

2.2.2 Dalles de béton en vue de cycles de mouillage-séchage

Nous avons utilisé des dalles de béton en vue de cycles de mouillage-séchage pour étudier la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé sous l'effet de la pénétration des chlorures pour les quatre facteurs suivants : i) fissuration initiale du béton; ii) endommagement initial du revêtement galvanisé; iii) inhibiteur de corrosion dans le béton; et iv) béton à haute performance et béton ordinaire.

La conception des dalles de béton pour les cycles de mouillage-séchage était basée sur la norme ASTM G109 moyennant certaines modifications visant à augmenter le taux de pénétration des chlorures. Comme on peut le voir dans la configuration des dalles (Figure 2), chaque dalle (300 mm × 455 mm × 152 mm) équivalait à quatre prismes (300 mm × 115 mm × 152 mm), ce qui a permis un mouillage plus uniforme que le mouillage des prismes individuels. Chaque dalle contenait douze (12) barres placées dans le sens de la largeur (300 mm). Chaque barre mesurait 330 mm de longueur, ses deux extrémités étaient recouvertes de résine époxy et la longueur utile des barres, c'est-à-dire la longueur exposée au béton, était de 256 mm. Les quatre barres du dessus avaient un enrobage de béton de 17 mm et chacune était reliée électriquement à deux barres du fond en vue du contrôle du courant de macrocellule entre elles. Les dalles ont été soumises à des cycles de mouillage-séchage au moyen d'une solution de 3,5 % de NaCl à la température ambiante.

Huit dalles ont été préparées en vue des cycles de mouillage-séchage. Pour le plan d'échantillonnage, voir le rapport provisoire. Les types de barre d'acier utilisés incluaient des barres d'acier galvanisé (Gal), des barres d'acier galvanisé avec endommagement intentionnel du revêtement galvanisé (Gal-D) et des barres d'acier au carbone (CS). Étant donné que le revêtement galvanisé sur les nervures est plus susceptible d'être égratigné sur les chantiers de construction, nous avons meulé mécaniquement le

revêtement sur les nervures des barres d'acier galvanisé afin de simuler des dommages. Ces dommages visaient à simuler un état extrême et sont beaucoup plus accentués qu'ils le seraient dans des conditions réelles. Les formulations de béton utilisées incluaient un béton de ciment Portland ordinaire (OPC), un béton de ciment Portland ordinaire avec inhibiteur de corrosion à base de nitrites de calcium (OPC-DCI) et un béton à haute performance (HPC). Pour de l'information détaillée sur les formulations, voir le Tableau 6. Un autre paramètre était la préfissuration du béton pour chacun des trois types de barre d'armature.

En outre, nous avons conçu les cylindres de béton de manière à obtenir des données supplémentaires afin de mieux comprendre la résistance à la corrosion. Des cylindres avec barres d'acier, et des cylindres ordinaires de deux tailles différentes de 76 mm × 152 mm (3 po × 6 po) et 100 mm × 200 mm (4 po × 8 po) ont été préparés. Les cylindres ont été conçus avec barres pour comparer le délai de fissuration du point de vue des différentes barres d'acier, expositions aux conditions environnementales et épaisseurs de l'enrobage de béton (30 mm et 40 mm). Des cylindres de béton ordinaire ont été coulés pour chaque gâchée et chaque environnement afin de contrôler la résistivité électrique du béton et d'étudier l'influence de celle-ci sur la corrosion de l'acier galvanisé et l'évaluation de l'état de ce dernier.

2.2.3 Matériaux et surveillance

Trois mélanges de béton ont été préparés, soient un béton de ciment Portland ordinaire (OPC), un béton de ciment Portland ordinaire avec inhibiteur de corrosion (OPC-DCI) et un béton à haute performance (HPC). Les mélanges OPC et OPC-DCI utilisaient du ciment Portland CSA type GU (anciennement appelé CSA type 10, équivalant à l'ASTM type I/II) et un ratio de poids eau:ciment:sable:granulat égal à 0,5:1:2:3. L'inhibiteur de corrosion était un produit commercial de type nitrites de calcium (ASTM C494 Type C) et le dosage utilisé pour l'étude était de 16L/m³ par volume de béton. Le mélange HPC utilisait un ciment hydraulique ternaire CSA Gub S/SF avec bas ratio eau-ciment et un ratio de poids eau:ciment:sable:agrégat égal à 0,37:1:2:2. Comme on peut le voir au Tableau 6, six gâchées ont été préparées pour les trois types de béton. Les échantillons de béton ont été démoulés 24 heures après le moulage, puis laissés à sécher pendant 28 jours dans une salle de mûrissement à une humidité relative de 95 % ± 5 % et une température de 22 °C ± 3 °C. Le Tableau 6 résume également les propriétés des trois types de béton. Les résistances à la compression à 28 jours (f_c') des mélanges ont été de 38,3 MPa à 68,3 MPa; la f_c' du mélange OPC-DCI a été plus élevée que celle du mélange OPC en raison de la teneur en air plus faible causée par l'utilisation de l'inhibiteur de corrosion.

Les potentiels de corrosion et les taux de corrosion ont été mesurés périodiquement sur les barres d'acier encastrées dans les prismes de béton, dans les dalles de béton et dans les cylindres de béton avec barres d'acier. Nous avons effectué les mesures de potentiel de corrosion au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile de la norme ASTM C876 et avons mesuré les taux de corrosion au moyen de la technique de la résistance de polarisation linéaire (LPR pour *Linear Polarization Resistance*) détaillée dans le rapport provisoire (Zhang et Baldock, 2013). Nous avons mesuré la résistivité électrique du béton (résistivité du béton) sur les cylindres de béton en même temps que sur les prismes de béton pour en étudier l'influence sur la corrosion de l'acier galvanisé. Nous avons effectué périodiquement des examens visuels visant à déterminer le délai de fissuration à la suite de la corrosion de l'acier encastré. La teneur en chlorures des dalles de béton, ainsi que des carottes d'échantillonnage du béton, a été analysée conformément aux normes ASTM C 1152/C 1152M-04.

Tableau 1 Conversion entre la densité du courant de corrosion, le taux de pénétration et la perte massique

	Densité du courant de corrosion $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Taux de pénétration $\mu\text{m}/\text{an}$	Perte massique $\text{g}/(\text{m}^2\text{jour})$
Acier	1	11,6	0,249
Zinc	1	15,0	0,292

Tableau 2 État de corrosion et taux de corrosion de l'acier au carbone dans le béton

État de corrosion selon la norme ASTM C876	Taux de corrosion et niveau	Valeur de la densité de courant I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Corrosion active	Élevé	$I_{corr} \geq 1,0$
	Modéré	$0,5 \leq I_{corr} < 1,0$
	Faible	$0,1 \leq I_{corr} < 0,5$
Absence de corrosion	Négligeable (passive)	$I_{corr} < 0,1$

Tableau 3 Lignes directrices de la norme ASTM C876-09 pour l'évaluation de l'état de la corrosion de l'acier dans le béton

Potentiel mesuré E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)	Probabilité de corrosion
$E_{corr} > -200$	Faible, 10 % de probabilité de corrosion ⁺
$-350 < E_{corr} \leq -200$	Incertaine*
$E_{corr} \leq -350$	Élevée, 90 % de probabilité de corrosion

* Probabilité de corrosion intermédiaire ou croissante.

+ Par « corrosion », il faut entendre la corrosion active.

Tableau 4 Passivation de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone, avec données tirées de Moreno et Sagüés (1996)

	Acier galvanisé		Acier au carbone	
	Béton sec HR de 60 %	Béton humide HR de 100 %	Béton sec HR de 60 %	Béton humide HR de 100 %
E_{corr} (par rapport ESC)	Entre -300 et -400 mV	Entre -500 et -600 mV	Env. -150 mV	Entre -150 et -200 mV
I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	<0,002	<0,02	<0,002	< 0,01

Tableau 5 Température et humidité relative des quatre environnements

Environnement		Température		HR	
	Également indiqué dans le rapport	Moyenne	EMQ	Moyenne	EMQ
E-1	HR de 50 %	24,2 °C	0,3 °C	49,1 %	2,0 %
E-2	HR ambiante	21,2 °C	1,4 °C	37,7 %	11,4 %
E-3	HR de 100 %			99,2 %	0,5 %
E-4	HR de 80 %	Cycle de 25 °C à 45 °C		86,7 % (av. charge)	7,2 % (av. charge)

Tableau 6 Formulations et propriétés du béton

Mélange	Gâchée n°	Eau (kg)	Ciment (kg)	Sable (kg)	Granulat (kg)	Teneur en ciment (kg/m^3)	% Cl (poids de ciment)	% Cl ⁻ (poids de ciment)	Cl ⁻ (kg/m^3)	Teneur en air (%)	Résistance à 28 jours (MPa)
OPC	1a	16,65	33,3	66,6	99,9	353	0	0	0	8,2	38,3
	1b	16,65	33,3	66,6	99,9	354	0	0	0	7	39,1
	2	13,0	26,0	52,0	78,0	359	1	0,15	3,6	6,4	39,8
	3	18,2	36,4	72,8	109,2	359	2	0,31	7,2	5	41,6
OPC-DCI	4	13,2*	26,4	52,8	79,2	372	0	0	0	2,8	46,9
HPC	5	15,7	42,9	85,8	85,8	432	0	0	0	7,5	66,1
	6	9,5	25,8	51,6	51,6	438	2	0,37	8,8	5,5	68,3

* La teneur en eau totale est de 12,06 kg d'eau du robinet plus 1,14 kg d'eau provenant de DCI.

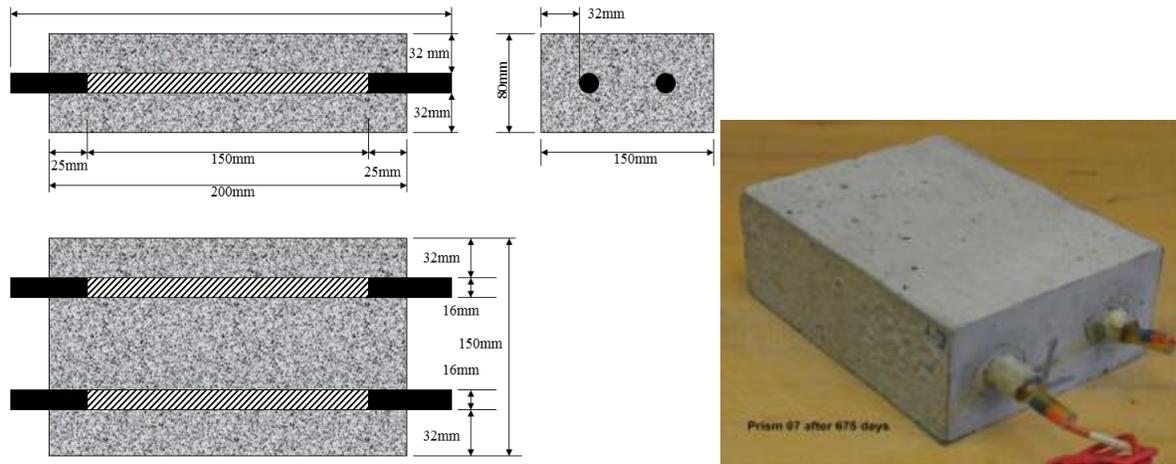


Figure 1 Configuration d'un prisme de béton

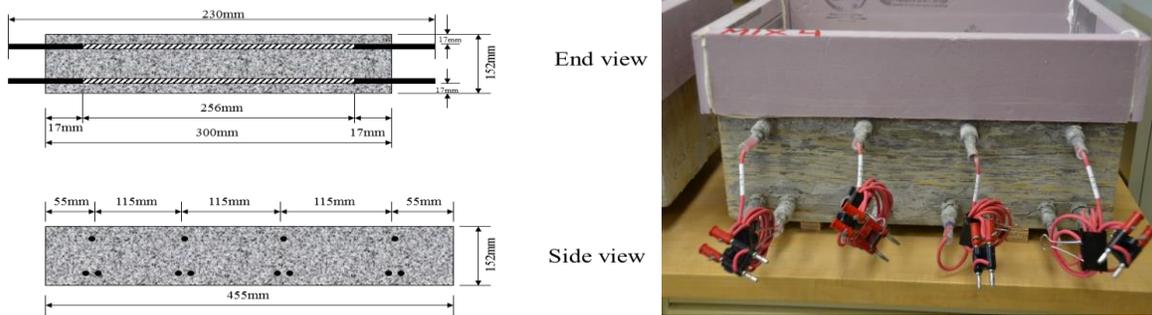


Figure 2 Dalle de béton pour cycles de mouillage-séchage

CHAPITRE 3 : RÉSISTANCE À LA CORROSION DE L'ACIER GALVANISÉ

Le présent chapitre porte sur la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé du point de vue i) de la teneur en chlorures, ii) de l'humidité et iii) du ratio e/c de la formulation du béton par rapport à l'acier au carbone. Le chapitre met l'accent sur les effets de ces paramètres sur le potentiel de corrosion et le taux de corrosion. Tous les potentiels de corrosion sont indiqués par rapport à une électrode de référence cuivre-sulfate de cuivre, en mV par rapport à l'ESC.

3.1 Effet de la teneur en chlorures et de la formulation du béton

La présente section traite de la résistance à la corrosion dans les prismes de béton pour chacun des quatre ensembles de conditions d'exposition, soit un environnement E-1 à une HR de 50 %, un environnement E-2 à HR ambiante, un environnement E-3 à une HR de 100 % et un environnement E-4 à une HR de 80 %. Les prismes de béton ont été placés dans chaque environnement après une cure par humidification de 28 jours, et les potentiels de corrosion, E_{corr} , et les taux de corrosion, I_{corr} , des barres encastrées ont été mesurés périodiquement, y compris pour l'acier galvanisé (Gal), l'acier au carbone (CS) et le zinc (Zn).

3.1.1 Environnement E-3 à une HR de 100 %

Acier galvanisé

La corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange OPC est présentée en premier. Les taux de corrosion I_{corr} et les potentiels de corrosion E_{corr} suivis dans le temps sont montrés aux Figure 3 a) et b), respectivement. Comme on pouvait s'y attendre, les taux de corrosion ont été plus élevés et les potentiels de corrosion ont été plus négatifs dans le béton renfermant plus de chlorures, les teneurs en chlorures s'établissant à 0 %, 1 % et 2 %, respectivement. Plus particulièrement, dans le béton sans chlorures, l'acier galvanisé a montré un processus de passivation type où le taux de corrosion (I_{corr}) a baissé sous $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dans les trois mois d'âge, ce qui démontre qu'il était déjà dans un état passif. En même temps, le potentiel de corrosion (E_{corr}) a augmenté de manière générale avec le temps, passant d'une valeur initiale de -778 mV à -470 mV à 105 semaines d'âge, moment du dernier cycle de mesures.

Dans le béton renfermant 2 % de chlorures, d'autre part, les barres d'acier galvanisé devaient présenter une corrosion active avec un taux de corrosion supérieur à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Le taux de corrosion mesuré a commencé à $0,54 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ et a atteint un taux élevé de $3,06 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Par la suite, le taux de corrosion a graduellement diminué avec le temps jusqu'à un taux faible de $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ à 105 semaines d'âge. Ces changements dynamiques du taux de corrosion ont également été reflétés dans le potentiel de corrosion : E_{corr} est devenu aussi négatif que -1082 mV à 34 semaines d'âge avant de commencer à passer à des valeurs plus positives avec le temps pour atteindre environ -576 mV à 105 semaines.

Dans le béton renfermant 1 % de chlorures, les taux de corrosion et les potentiels de corrosion mesurés se sont situés entre les valeurs pour les teneurs de 0 % et 2 % de chlorures, comme on pouvait le prévoir. Ces différentes teneurs en chlorures ont donc permis d'atteindre tant un état passif d'absence de corrosion qu'une corrosion active. Les corrélations entre I_{corr} et E_{corr} pour chacun de ces états de corrosion sont présentées à la Figure 4 a). Dans la figure, les valeurs de E_{corr} (axe des Y) et de I_{corr} (axe des X) sont présentées selon une échelle logarithmique, le taux de corrosion dans l'échelle logarithmique étant corrélé avec le potentiel en polarisation (Jones, 1992). La Figure 4 a) montre clairement qu'un potentiel de corrosion plus positif signifie généralement un taux de corrosion plus bas, et inversement. Il semble y avoir une relation linéaire approximative entre E_{corr} et le log (I_{corr}) pour l'état passif de l'acier galvanisé, comme l'indique le fait que le R au carré de la régression est égal à 0,90. Mais pour l'acier galvanisé en corrosion active, les valeurs d' E_{corr} et du log (I_{corr}) sont plus

dispersées que linéaires, comme le montre le fait que le R au carré de la régression est égal à 0,50 dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures.

Les Figure 5 a) et b) présentent les valeurs I_{corr} et E_{corr} des barres d'acier galvanisé dans les mélanges HPC renfermant 0 % et 2 % de chlorures. Dans le mélange HPC sans chlorures, le processus de passivation s'est également stabilisé dans les trois premiers mois, comme le montre la diminution significative des valeurs I_{corr} et l'augmentation significative des valeurs E_{corr} pendant cette période, ces dernières étant passées de -1108 mV à 28 jours à -387 mV et les valeurs I_{corr} étant passées de 0,46 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ à 0,03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Par comparaison, les barres d'acier galvanisé dans le mélange HPC avec 2 % de chlorures se sont corrodées activement et ont présenté des valeurs I_{corr} et E_{corr} distinctives de celles de l'état passif d'absence de corrosion. Les taux de corrosion ont varié de modérés à élevés; après les trois premiers mois, des valeurs d' E_{corr} plus négatives que les valeurs E_{corr} de l'état d'absence de corrosion d'environ 200 à 300 mV en moyenne ont été obtenues.

Les corrélations d' E_{corr} (axe des Y) et du $\log(I_{corr})$ obtenues à partir des mélanges HPC sont également présentées à la Figure 4 a). Comme pour les mélanges OPC, un potentiel de corrosion plus positif est généralement associé à un taux de corrosion plus bas, et inversement. Si tous les états de corrosion sont considérés dans leur ensemble, toutefois, les valeurs d' E_{corr} et du $\log(I_{corr})$ sont trop dispersées pour présenter une corrélation linéaire.

Nous examinerons maintenant l'effet du ratio e/c sur la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé. Les Figure 6 a) et b) comparent les valeurs E_{corr} et I_{corr} , respectivement, des mélanges OPC et HPC sans chlorures pour des barres d'acier galvanisé à l'état passif d'absence de corrosion. Le mélange HPC a produit des valeurs E_{corr} beaucoup plus positives que le mélange OPC. La différence était initialement de plus de 300 mV juste après le processus de passivation, mais a diminué avec le temps pour atteindre environ 100 mV au bout de 105 semaines. Malgré la différence de valeurs E_{corr} , l'acier galvanisé a atteint la passivation à peu près au même moment dans les mélanges OPC et HPC, et a fini par ne pas présenter de différences essentielles de la densité de courant passif, soit 0,02 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dans le mélange OPC et 0,015 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dans le mélange HPC (de beaucoup inférieur à 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Ces résultats montrent que dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %, représentant un béton saturé, le ratio e/c peut être un facteur significatif qui influe sur les lectures de potentiel de corrosion de l'acier galvanisé à l'état passif d'absence de corrosion. Une autre observation est qu'avec le temps, la majorité des potentiels de corrosion de l'acier galvanisé à l'état passif d'absence de corrosion, tant pour les mélanges OPC que HPC, sont demeurés plus négatifs que -350 mV. Ces potentiels de corrosion, s'ils étaient interprétés à la lumière des lignes directrices de la norme ASTM C876, signifieraient une probabilité de corrosion active de 90 %, ce qui est en contradiction avec l'état passif réel de l'acier galvanisé.

Les Figure 7 a) et b) comparent les valeurs E_{corr} et I_{corr} de la corrosion active obtenues dans les mélanges OPC et HPC avec 2 % de chlorures. Les taux de corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange HPC n'ont pas toujours été inférieurs à celles dans le mélange OPC; ils ont parfois été supérieurs à ces derniers et les potentiels de corrosion n'ont pas toujours été plus positifs que ceux dans le mélange OPC. L'une des raisons peut en être que la teneur en chlorures absolue par volume unitaire de béton était plus élevée dans le mélange HPC (8,8 kg/m^3) que dans le mélange OPC (7,2 kg/m^3), comme on a pu le voir au Tableau 6, le mélange HPC ayant une teneur en ciment plus élevée que le mélange OPC. Ces résultats donnent toutefois à penser qu'une fois l'état de corrosion active atteint, le ratio e/c du béton ne fait pas beaucoup de différence dans le taux de corrosion de l'acier galvanisé pour des teneurs en chlorures similaires.

Acier au carbone

La corrosion de l'acier au carbone dans les mélanges OPC et HPC est présentée à la Figure 8. Cette figure montre encore une fois que la teneur en chlorures influe de façon importante tant sur les valeurs I_{corr} que les valeurs E_{corr} . Sans chlorures, on s'attendait à ce que les barres d'acier au carbone soient à l'état passif d'absence de corrosion, comme le confirment des taux de corrosion mesurés de 0,01 à 0,02 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ avec le temps. Dans la corrosion active obtenue pour du béton avec 2 % de chlorures, l'acier au carbone avait des taux de corrosion élevés dans le mélange OPC avec des valeurs I_{corr} mesurées se situant entre 1,00 et 2,14 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, et des taux de corrosion modérés et élevés dans le mélange HPC avec des valeurs I_{corr} mesurées se situant entre 0,68 et 1,45 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ avec le temps. Les taux de corrosion active se sont également reflétés dans les potentiels de corrosion très négatifs, comme le montre la Figure 8 b), avec des valeurs E_{corr} plus négatives que -400 mV dans le mélange HPC et plus négatives que -600 mV dans le mélange OPC.

La Figure 8 montre également que les barres d'acier au carbone dans les mélanges OPC et HPC avaient des taux de corrosion similaires, que ce soit à l'état de corrosion active ou à l'état d'absence de corrosion. Les potentiels de corrosion de l'état d'absence de corrosion ont toutefois été beaucoup plus négatifs dans le mélange OPC que dans le mélange HPC, de près de 200 mV. En revanche, les potentiels de corrosion de l'état actif obtenus pour les mélanges OPC et HPC ont fini par être similaires.

Les corrélations des valeurs E_{corr} et $\log(I_{corr})$ pour l'acier au carbone sont montrées à la Figure 4 b) tant pour les mélanges OPC que HPC avec deux teneurs en chlorures différentes. Si nous considérons les données dans leur ensemble, il semble exister une corrélation linéaire approximative entre les valeurs d' E_{corr} et du $\log(I_{corr})$ pour l'acier au carbone.

Comparaison de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone

L'analyse ci-dessus montre que la teneur en chlorures et le ratio e/c de la formulation du béton ont eu les impacts similaires suivants sur la résistance à la corrosion tant de l'acier galvanisé que de l'acier au carbone dans du béton saturé :

1. le taux de corrosion a été plus élevé et le potentiel de corrosion a été plus négatif dans les bétons avec plus de chlorures, tant dans les mélanges OPC que HPC;
2. pour la même teneur en chlorures par masse de ciment, que ce soit 0 % ou jusqu'à 2 %, le ratio e/c n'a pas influé sur l'état de corrosion réel mesuré au moyen de taux de corrosion similaires. Le ratio e/c a toutefois influé sur les lectures de potentiel de corrosion obtenues pour l'état passif sans chlorures et le mélange OPC a mené à des potentiels de corrosion beaucoup plus négatifs que le mélange HPC.

Compte tenu de ces tendances générales, la présente section examine la différence entre l'acier au carbone et l'acier galvanisé à l'état d'absence de corrosion et à l'état de corrosion active. Les Figure 9 a) et b) présentent les valeurs I_{corr} et E_{corr} obtenues dans le mélange OPC sans chlorures où les barres d'acier galvanisé et d'acier au carbone, ainsi que de zinc, étaient toutes à l'état passif. Après le processus de passivation initial des douze premières semaines, les densités de courant passif I_{corr} de l'acier galvanisé ont été légèrement supérieures à celles de l'acier au carbone. La même chose a été observée par Macias et Andrade (1983) dans les solutions de béton simulées. L'acier galvanisé avait toutefois des valeurs E_{corr} beaucoup plus négatives que l'acier au carbone. La différence était initialement de plus de 400 mV et était encore de 230 mV à 105 semaines de contrôle. D'un autre côté, les barres d'acier galvanisé et de zinc ont eu des potentiels de corrosion très similaires dans le temps, ce qui implique que la passivation de l'acier galvanisé est attribuable à la couche de zinc pur.

Les Figure 10 a) et b) présentent les valeurs E_{corr} et I_{corr} dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures, où les barres d'acier galvanisé et d'acier au carbone, ainsi que de zinc, étaient toutes dans un état de corrosion active. Le comportement en corrosion des barres d'acier galvanisé est celui qui a été trouvé le plus intéressant, parmi les trois types de barres :

1. Initialement, les valeurs E_{corr} des barres d'acier galvanisé étaient similaires à celles des barres de zinc et étaient plus négatives que celles des barres d'acier au carbone de plus de quelque 200 mV en moyenne. Au bout de 42 semaines, cependant, les valeurs E_{corr} pour l'acier galvanisé ont commencé à devenir plus positives et ont fini par être similaires à celles de l'acier au carbone, qui se situaient autour de -600 mV;

2. Il est intéressant de noter que les valeurs I_{corr} initiales des barres d'acier galvanisé et de zinc étaient similaires à celles de l'acier au carbone (entre 1 et 2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$); avec le temps, les valeurs I_{corr} de l'acier au carbone sont demeurées relativement stables à environ 1,00 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, les valeurs I_{corr} des barres de zinc sont passées graduellement à 4,54 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, mais les valeurs I_{corr} des barres d'acier galvanisé ont commencé à diminuer de façon significative après 42 semaines pour atteindre 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (taux de corrosion bas) à 105 semaines d'âge.

Ces données démontrent que l'acier galvanisé a connu une « transition » tant du point de vue du taux de corrosion que du potentiel de corrosion à partir de 42 semaines environ. Avant ce moment, son comportement en corrosion était similaire à celui des barres de zinc et après ce moment, son potentiel de corrosion est devenu plus similaire à celui de l'acier au carbone, sauf que son taux de corrosion est devenu encore plus bas, cinq fois plus bas, que celui de l'acier au carbone. Cet état de fait peut avoir été causé par la transition du stade de protection au stade de propagation de l'acier galvanisé, ce qui a également été observé et confirmé par une étude antérieure (Zhang et coll., 2012) sur l'acier galvanisé dans du béton avec 3 % de chlorures. Au stade de la propagation, on suppose normalement que le zinc et sa protection ont été consommés, et que la corrosion provient du substrat d'acier au carbone seulement, mais ces données expérimentales montrent que l'acier galvanisé au stade de la propagation a un taux de corrosion cinq fois plus bas que l'acier au carbone.

La Figure 11 montre l'examen visuel du béton qui a validé les mesures de taux de corrosion ci-dessus. Les Figure 11 a) et b) montrent l'état des prismes OPC avec 2 % de chlorures et barres d'acier galvanisé encastrées, qui correspond au pire des états de corrosion parmi toutes les barres d'acier galvanisé dans l'environnement E-3. La fissuration de la surface de béton a d'abord été observée après 380 jours sur deux répliquats de prisme. Aucune photo n'a été prise par la suite parce qu'aucun nouveau développement n'avait été observé après plus de 700 jours au moment de la rédaction du présent rapport. De la même manière, les Figure 11 c) et d) montrent l'état du prisme OPC (n° 33) avec 2 % de chlorures et barres d'acier au carbone encastrées, mais à différents moments en raison du progrès de la fissure : la fissuration de la surface est apparue après 180 jours et sa longueur a progressé avec le temps.

Ces examens visuels mènent également à une importante comparaison entre l'acier au carbone et l'acier galvanisé du point de vue du taux de corrosion réel et de l'endommagement par la corrosion réel dans le béton. Si l'acier galvanisé avait initialement des taux de corrosion légèrement plus élevés que l'acier au carbone (2 % de chlorures) parce que le zinc a un taux de corrosion plus élevé que l'acier, la fissuration dans le béton est d'abord apparue dans le béton avec barres d'acier au carbone encastrées à 180 jours. La fissuration du béton avec barres d'acier galvanisé encastrées s'est par contre d'abord manifestée à 380 jours, soit le double du délai de la fissuration du béton induite par la corrosion. Ces données expérimentales ont confirmé que les produits de corrosion du zinc prennent moins de volume dans le béton que ceux des oxydes de fer et créent donc un effort de traction moindre dans le béton, ce qui retarde la fissuration de celui-ci (Yeomans, 1987).

Pour résumer, l'acier galvanisé a eu un potentiel de corrosion beaucoup plus négatif que l'acier au carbone dans le béton saturé, la différence pouvant être de 200 mV à 350 mV, à l'état passif d'absence de corrosion. Dans du béton fortement contaminé avec 2 % de chlorures, il a été déterminé que le taux de corrosion de l'acier galvanisé était cinq fois inférieure à celle de l'acier au carbone dans le mélange OPC.

Résistivité du béton dans l'environnement E-3

La Figure 12 montre la résistivité électrique de tous les mélanges de béton dans l'environnement E-3, y compris les mélanges OPC et HPC avec différentes teneurs en chlorures. Tous les mélanges ont montré une résistivité presque « constante » dans le temps après 12 semaines, à l'exception du mélange OPC avec 2 % de chlorures qui est passé de 49 ohms.m à 73 ohms.m sur une période de 105 semaines, ce qui indique que l'humidité relative interne de la plupart des prismes de béton était en équilibre avec l'humidité relative de 100 % de l'air ambiant. Comme on pouvait s'y attendre, la résistivité du béton a été plus faible dans les bétons avec une teneur en chlorures plus élevée. Le Tableau 7 montre que l'ajout de 2 % de chlorures a entraîné une réduction de 15,5 % de la résistivité pour le mélange OPC, mais une réduction de 47,7 % pour le mélange HPC.

Sans égard à la teneur en chlorures, toutefois, le mélange HPC avait une résistivité du béton beaucoup plus grande que le mélange OPC, de cinq à huit fois, comme le montre le Tableau 7, ce qui indique que le ratio e/c a influé beaucoup plus sur la résistivité du béton que la teneur en chlorures. Ce résultat a eu des implications importantes du point de vue du rôle de la résistivité du béton dans l'évaluation de l'état de corrosion. Si le mélange HPC sans chlorures avait une résistivité huit fois supérieure à celle du mélange OPC, les densités de courant passif obtenues ont été similaires, comme nous l'avons mentionné à la section précédente, tant pour l'acier au carbone que pour l'acier galvanisé. Pour un état de corrosion active dans du béton avec 2 % de chlorures, malgré que la résistivité du mélange HPC a été quand même cinq fois supérieure à celle du mélange OPC, les taux de corrosion dans le mélange HPC n'ont pas toujours été inférieurs à ceux du mélange OPC, tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone.

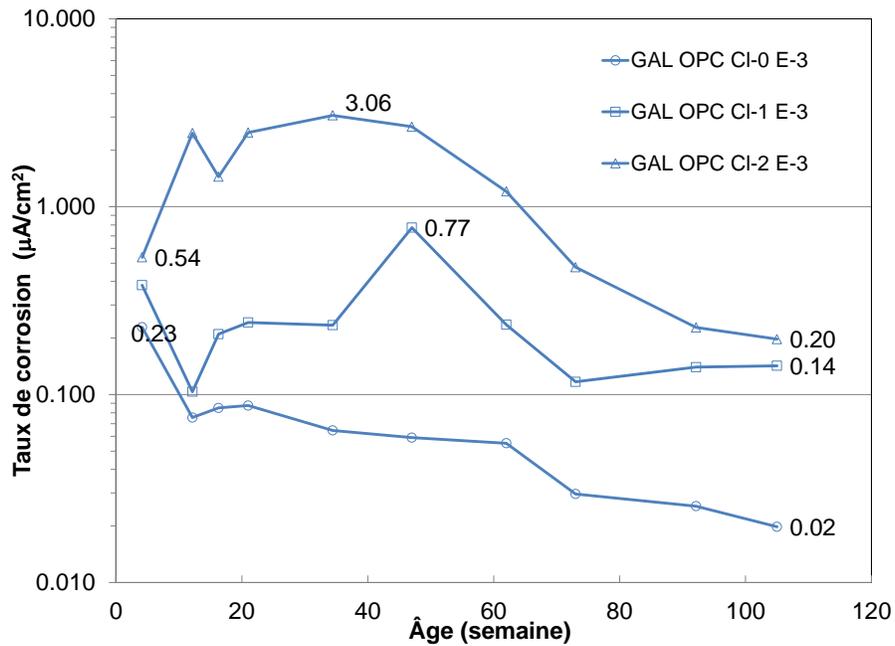
La résistivité du mélange HPC avec 2 % de chlorures a été aussi élevée que 356 ohms.m, mais l'acier galvanisé et l'acier au carbone étaient en corrosion active, ce qui est en contradiction avec le savoir empirique qui veut que 200 ohm soit un seuil de résistivité au-dessus duquel la probabilité de corrosion est faible (Song et Saraswathy, 2007). Ces résultats indiquent que l'on ne peut pas se baser uniquement sur la résistivité électrique du béton pour évaluer la corrosion de l'acier dans le béton, en particulier lorsque l'information sur la formulation du béton n'est pas disponible, parce qu'un ratio e/c bas peut augmenter considérablement la résistivité du béton. Il faut donc faire preuve de prudence dans l'application du savoir empirique, mais auquel on fait largement référence, selon lequel le risque de corrosion de l'armature en acier est faible lorsque la résistivité du béton est supérieure à 200 ohms.m (20 000 ohms.cm).

La Figure 12 montre également qu'entre 28 et 85 jours (environ 12 semaines), tous les mélanges ont présenté une augmentation rapide de leur résistivité en raison de l'hydratation continue du ciment à l'état humide, qui réduit encore davantage la porosité du béton et en augmente ainsi la résistivité. On estime normalement qu'à 90 jours, environ 90 % de la chaleur potentielle dégagée par l'hydratation du ciment Portland type est libéré (Mehta et Monteiro, 1993), comme le démontre également le développement relativement rapide de la résistance au cours de cette période par rapport aux périodes subséquentes. Pour le béton traité par humidification, le développement de la résistance du mélange OPC ASTM Type I se fait selon $f_{cm}(t) = f_{c28} \left(\frac{t}{4+0,85t} \right)$ dans le temps (Comité 209 de l'ACI), où $f_{cm}(t)$ est la résistance à la compression moyenne à t jours et f_{c28} est la résistance à la compression moyenne à 28 jours. La Figure 13 illustre le ratio de la résistance à la compression par rapport à la résistance à la

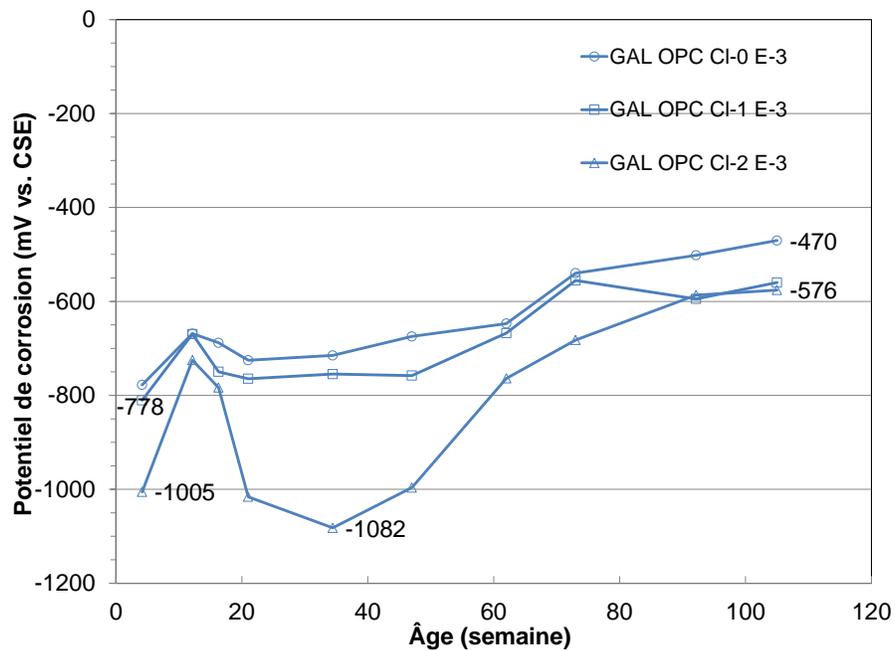
compression à 28 jours et à la résistivité. De 28 à 85 jours, la résistance à la compression augmente de 11 %, ce qui est beaucoup plus rapide que par la suite. L'augmentation rapide de la résistivité et de la résistance dès le début du processus a découlé dans les deux cas de la réduction rapide de la porosité du béton en raison de l'hydratation du ciment dans le béton saturé.

Tableau 7 Résistivité du béton (ρ) des mélanges OPC et HPC à une HR de 100 % pendant 105 semaines

	ρ d'OPC, en ohms.m	ρ de HPC, en ohms.m	$\rho_{\text{HPC}}/\rho_{\text{OPC}}$
0 % de chlorures a)	86,5	680,5	7,9
2 % de chlorures b)	73,1	356,2	4,9
(B-A)/A	-15,5 %	-47,7 %	

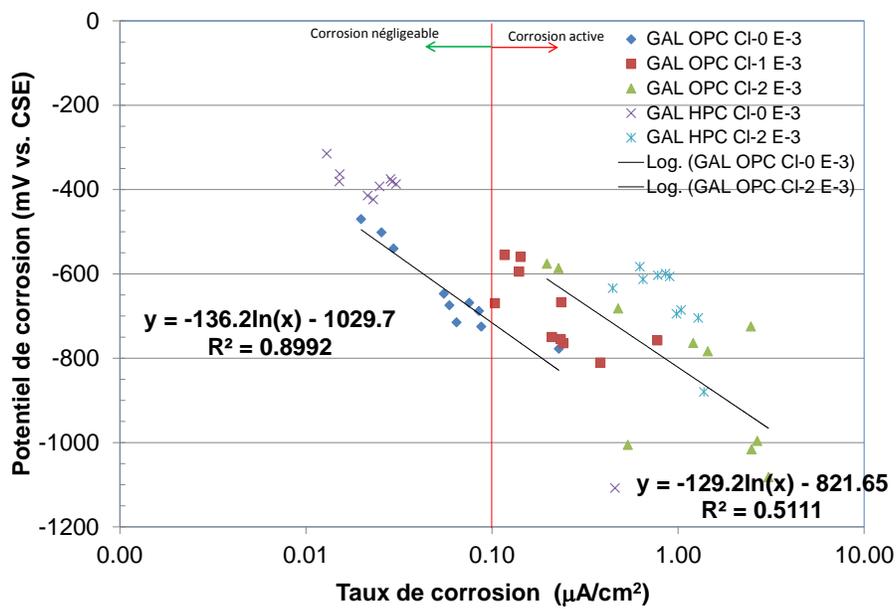


a) I_{corr}

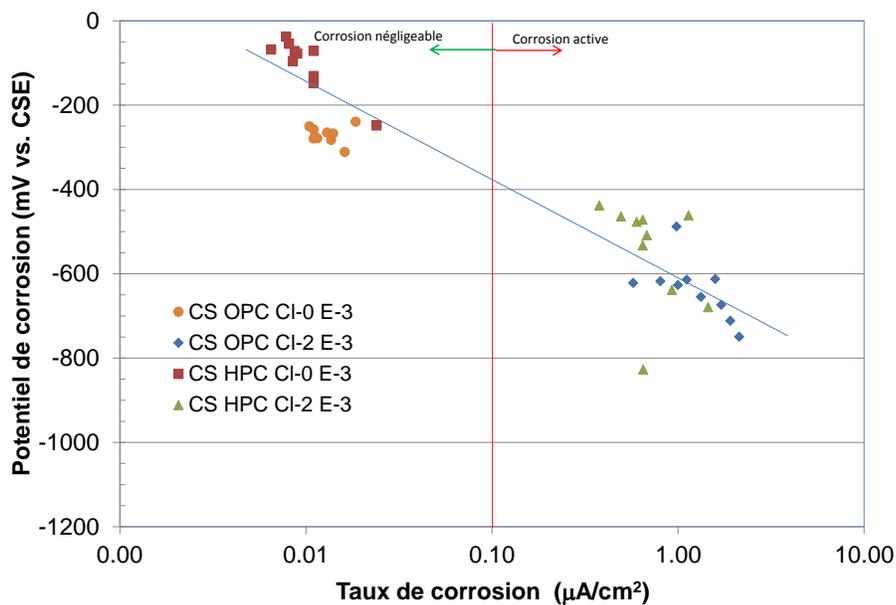


b) E_{corr}

Figure 3 Corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange OPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}

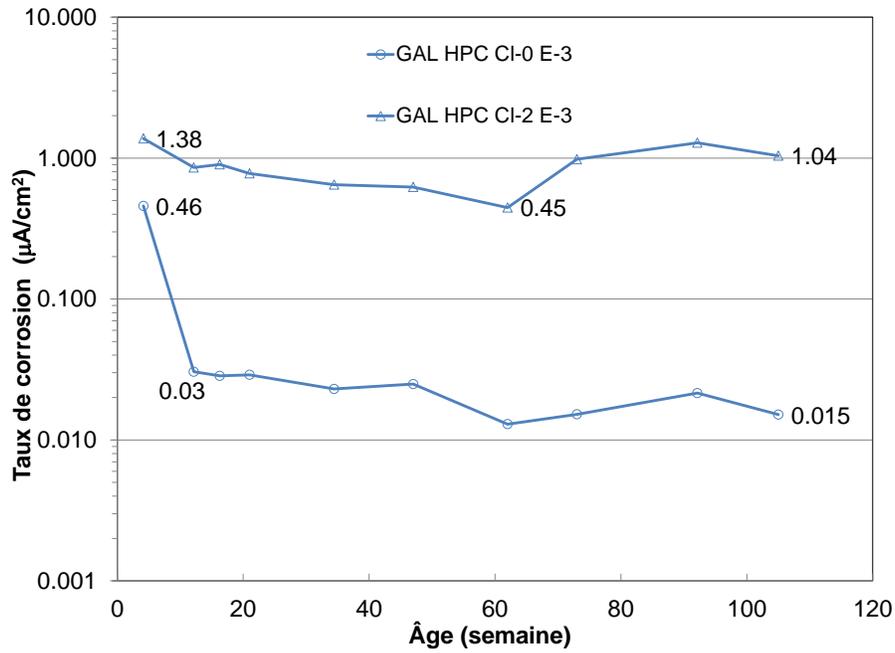


a) Acier galvanisé

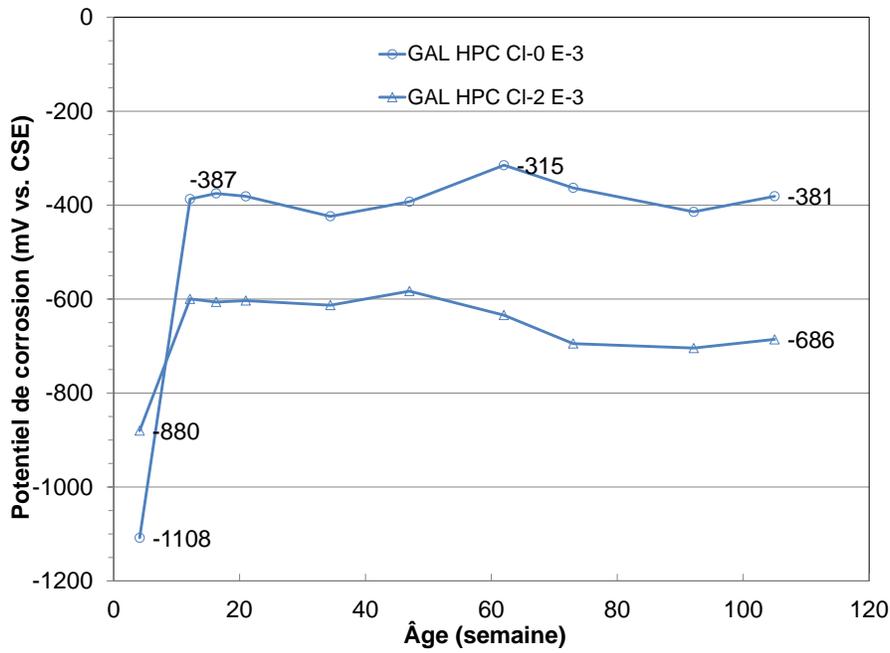


b) Acier au carbone

Figure 4 Corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) acier galvanisé et b) acier au carbone.

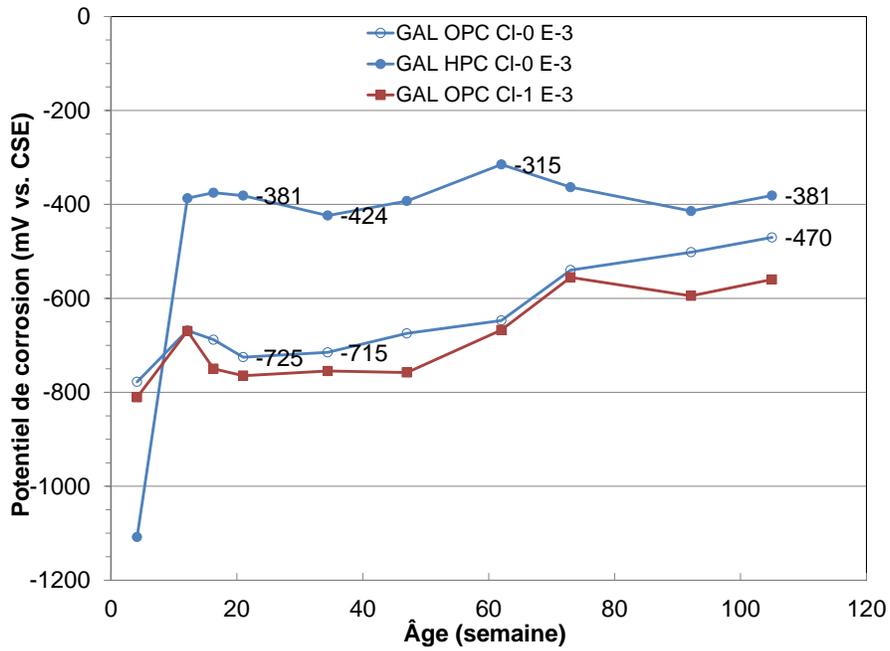


a) I_{corr}

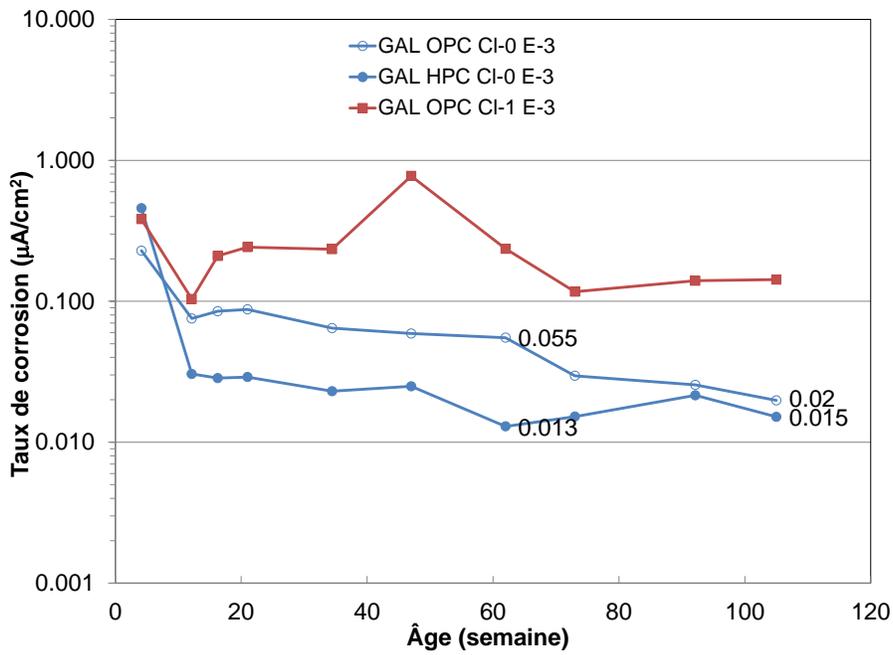


b) E_{corr}

Figure 5 Corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange HPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}

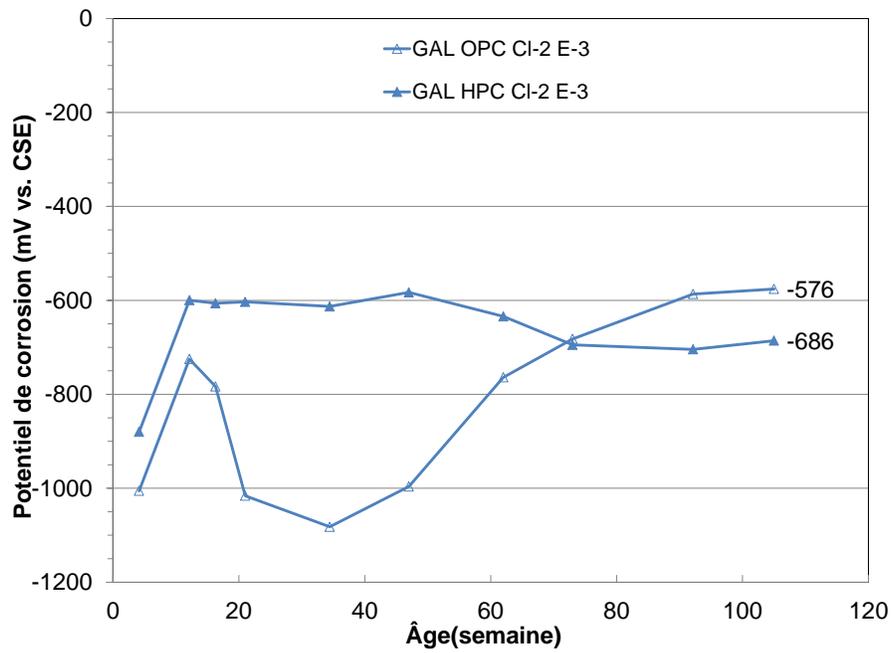


a) E_{corr}

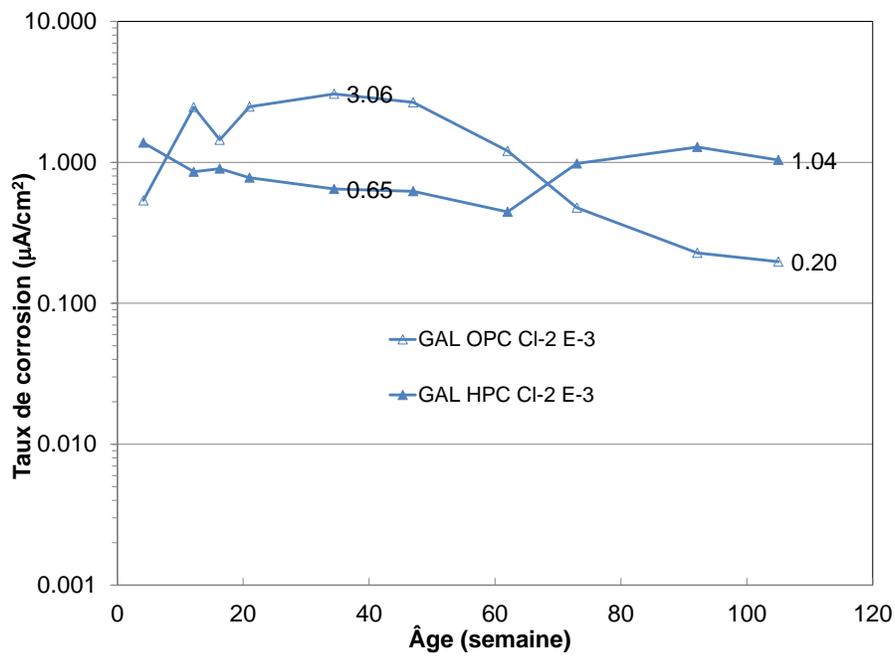


b) I_{corr}

Figure 6 Acier galvanisé passif dans les mélanges OPC et HPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}

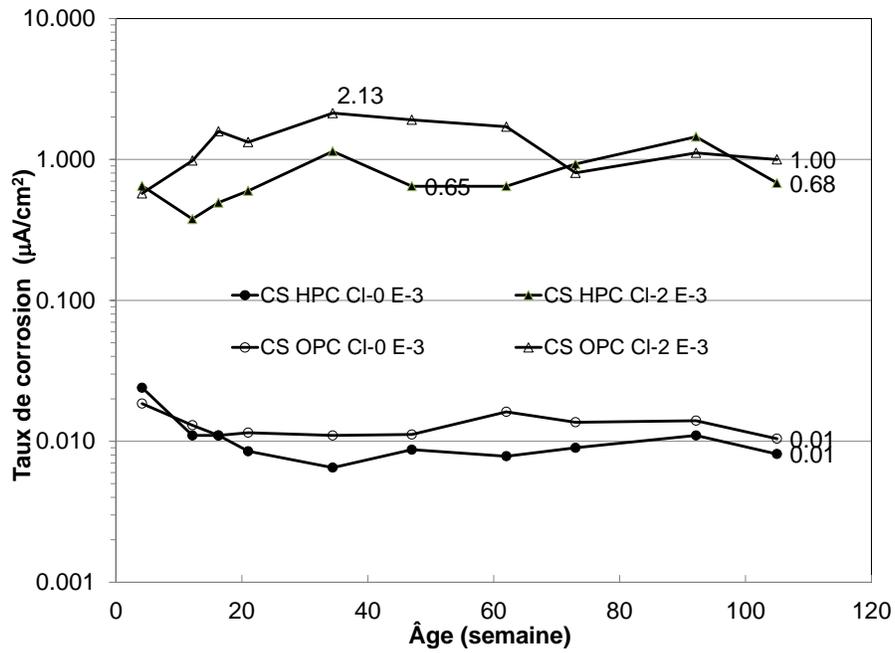


a) E_{corr}

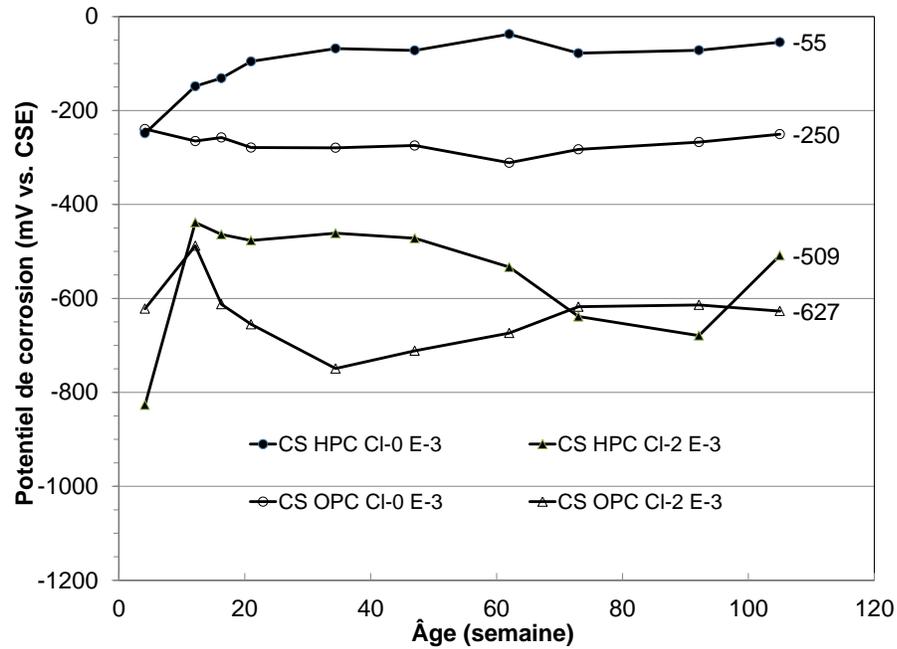


b) I_{corr}

Figure 7 Corrosion active de l'acier galvanisé dans les mélanges OPC et HPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}

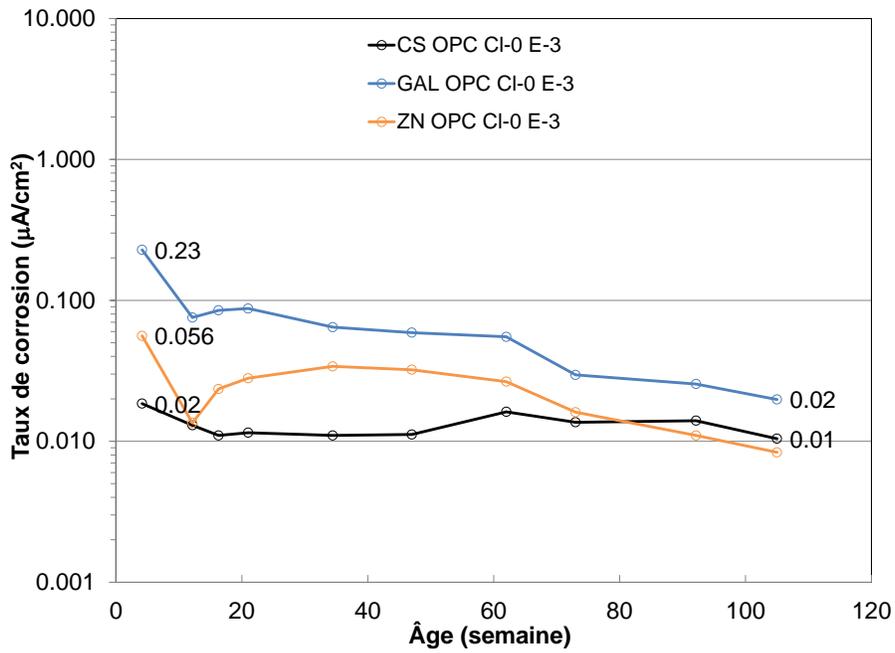


a) I_{corr}

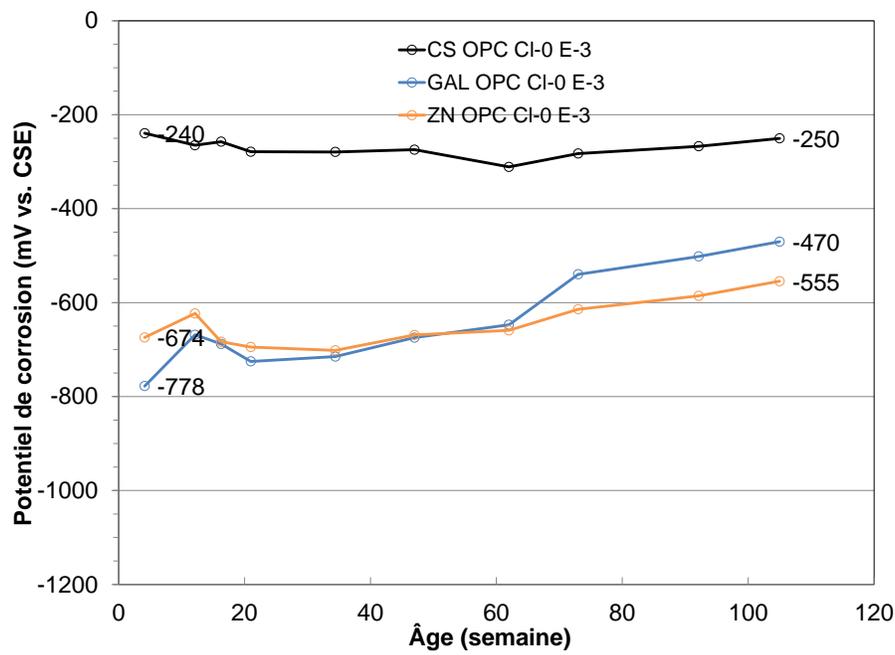


b) E_{corr}

Figure 8 Corrosion de l'acier au carbone dans les mélanges OPC et HPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}

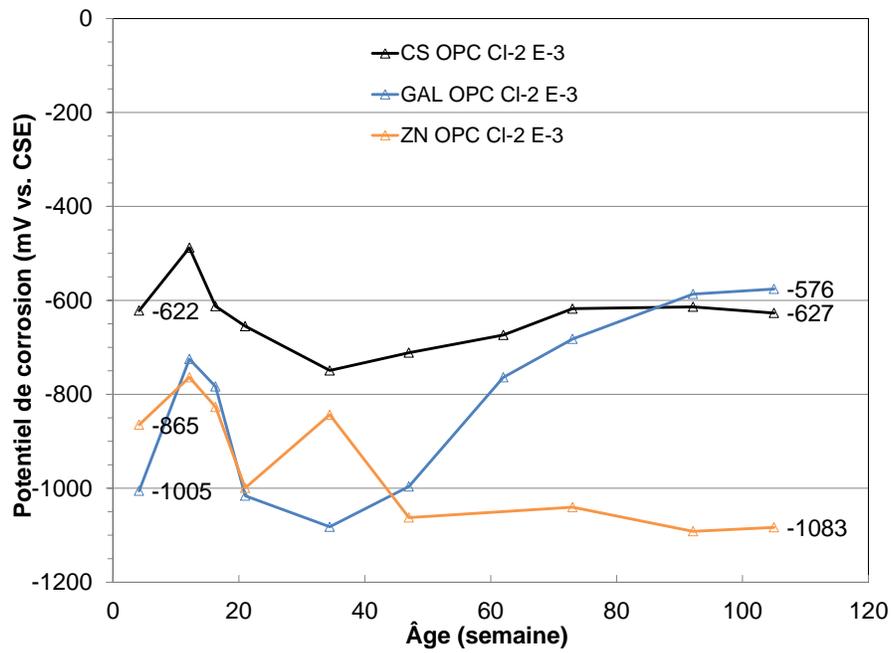


a) I_{corr}

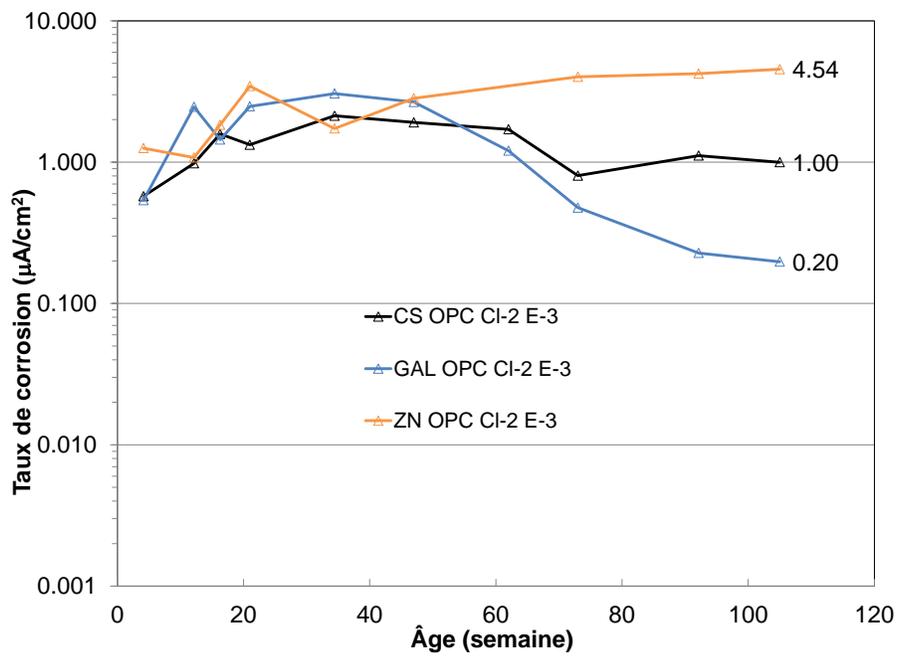


b) E_{corr}

Figure 9 Acier galvanisé et acier au carbone passifs dans le mélange OPC et l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}

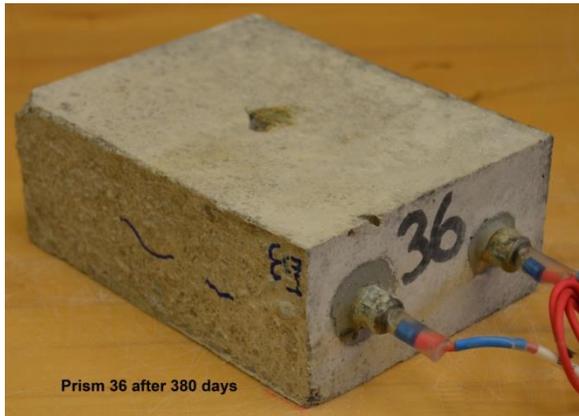


a) E_{corr}



b) I_{corr}

Figure 10 Corrosion active de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone dans le mélange OPC dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}



a) Acier galvanisé



b) Réplicat d'acier galvanisé



c) Acier au carbone



d) Acier au carbone à un moment ultérieur

Figure 11 État des prismes d'OPC avec 2 % de chlorures dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % : a) acier galvanisé, b) réplikat d'acier galvanisé, c) acier au carbone et d) acier au carbone à un moment ultérieur

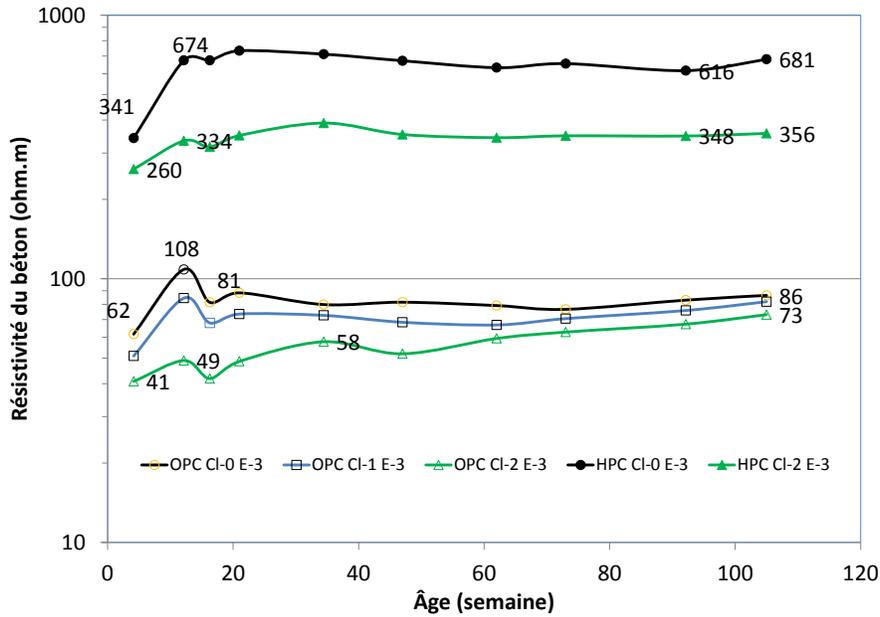


Figure 12 Résistivité du béton dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %

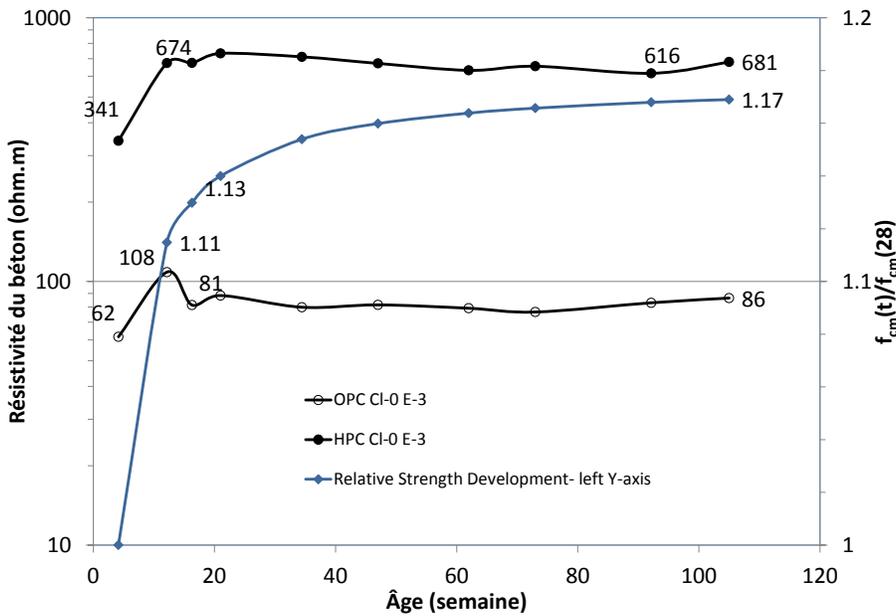


Figure 13 Résistivité du béton et développement de la résistance relative du mélange OPC dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %

3.1.2 Conditions d'exposition dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % et l'environnement E-2 à HR ambiante

Acier galvanisé

La Figure 14 présente la résistance à la corrosion de barres d'acier galvanisé dans le mélange OPC dans l'environnement E-1 à une HR de 50 %. Comme dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %, la Figure 14 a) montre que les valeurs E_{corr} ont été plus négatives dans le béton contenant plus de chlorures. Contrairement à l'environnement E-3 à une HR de 100 %, les valeurs E_{corr} mesurées pour du béton avec trois teneurs en chlorures différentes ont toutes changé de façon similaire avec le temps. Elles ont commencé par des potentiels très négatifs (< -700 mV) après 28 jours de traitement par humidification, mais ont continué à aller vers des valeurs plus positives à mesure que le béton perdait son humidité après avoir été placé dans l'environnement E-1 à une HR de 50 %. Les potentiels de corrosion se sont stabilisés avec le temps pour atteindre -160 mV, -299 mV et -362 mV pour 0 %, 1 % et 2 % de chlorures, respectivement, à l'âge de 105 semaines. La Figure 14 b) montre que les valeurs I_{corr} de toutes les barres d'acier galvanisé ont fini par devenir des taux de corrosion négligeables inférieurs à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ou inexistantes (absence de corrosion). Même dans le béton avec 2 % de chlorures, leurs taux de corrosion sont passés de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (taux de corrosion élevé) à moins de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (négligeable) après environ 40 semaines.

Du point de vue de la résistance à la corrosion, cela signifie que la teneur en humidité du béton joue un rôle vital du fait qu'un manque peut littéralement transformer un état de corrosion active en absence de corrosion, même lorsque la teneur en chlorures est très élevée. Du point de vue de l'évaluation de l'état, il est important de noter que même lorsque le taux de corrosion devenait négligeable (absence de corrosion), le potentiel de corrosion de l'acier galvanisé mesuré était encore plus négatif que -350 mV dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures.

La Figure 15 compare la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange HPC et le mélange OPC. Dans l'environnement E-1 à une HR de 50 %, le comportement en corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange HPC a été très similaire à celui dans le mélange OPC, comme le montrent leurs valeurs E_{corr} et I_{corr} similaires pour chaque teneur en chlorures. Au contraire, dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %, les potentiels de corrosion de l'état passif étaient beaucoup plus négatifs dans le mélange OPC que dans le mélange HPC, ce qui montre que tant les conditions d'exposition que le ratio e/c influent sur les lectures de potentiel de corrosion.

Acier au carbone

Les Figure 16 a) et b) présentent la résistance à la corrosion de l'acier au carbone dans l'environnement E-1, tant pour le mélange OPC que le mélange HPC. Les valeurs E_{corr} et I_{corr} ont changé avec le temps d'une façon similaire à l'acier galvanisé, les valeurs I_{corr} devenant négligeables avec le temps. Contrairement à l'acier galvanisé, toutefois, les potentiels de corrosion de l'acier au carbone sont devenus plus positifs que -200 mV même dans du béton avec 2 % de chlorures, ce qui est conforme aux lectures d'absence de corrosion évaluées au moyen des lignes directrices de la norme ASTM 876. Par comparaison, les potentiels de corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures sont demeurés plus négatifs que -350 , même pour des taux de corrosion négligeables. Dans les environnements E-1 et E-3, qui représentent deux environnements opposés du point de vue de la teneur en humidité du béton, les lignes directrices de la norme ASTM 876 n'interprètent pas l'état réel de corrosion de l'acier galvanisé au moyen du potentiel de corrosion.

Corrosion et résistivité du béton

Comme la corrosion active tant de l'acier galvanisé que de l'acier au carbone dans du béton fortement contaminé avec 2 % de chlorures s'est essentiellement « arrêtée » dans l'environnement E-1 à une HR

de 50 %, cet environnement peut être considéré comme la limite inférieure de la teneur en humidité sous laquelle il n'y aurait pas de risque de corrosion. Les deux extrêmes de teneur en humidité que sont les environnements E-1 et E-3 ont été présentés ci-dessus du point de vue de leur impact sur le comportement en corrosion, et peuvent être mieux compris du point de vue de leur impact sur la résistivité du béton dans les paragraphes qui suivent.

La Figure 17 montre la résistivité du béton dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % par rapport à l'environnement E-3 à une HR de 100 %. Dans l'environnement E-1, la résistivité du béton de tous les mélanges de béton a augmenté en fonction du temps alors que dans l'environnement E-3, elle est demeurée « constante » parce que le béton a été maintenu saturé. La résistivité du mélange OPC sans chlorures dans l'environnement E-1 a atteint 8432 ohms.m à 105 semaines d'âge et n'a pas montré de signes de ralentissement, ce qui confirme que le béton avait perdu de son humidité dans l'air ambiant de l'environnement E-1 et que l'équilibre entre l'humidité relative interne et l'humidité relative ambiante de 50 % n'avait pas encore été établi même après plus de deux années d'exposition.

Ces résultats démontrent qu'avec le temps, la résistivité du mélange OPC avec 2 % dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % est devenue supérieure à 600 ohms.m (60 000 ohms.cm), une valeur supérieure de résistivité du béton qui inhiberait ou préviendrait la corrosion, selon certains auteurs (Tremper et coll., 1958). Cette augmentation de la résistivité du béton a eu un grand impact sur le comportement en corrosion de l'armature en acier. Les Figure 18 a) et b) présentent les taux de corrosion (axe des Y de gauche) de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone dans l'environnement E-1, ainsi que la résistivité correspondante du béton (axe des Y de droite) dans le temps, dans les mélanges OPC et HPC avec 2 % de chlorures, respectivement. Les valeurs présentées montrent clairement la transition de la corrosion active à l'absence de corrosion alors que la résistivité du béton augmente avec le temps. Dans le mélange OPC, les taux de corrosion ont été réduits sous $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lorsque la résistivité a été augmentée à environ 600 ohms.m pour les deux aciers, ce qui est similaire à la valeur supérieure rapportée. Dans le mélange HPC, cependant, la transition s'est produite lorsque la résistivité a été augmentée à environ 1500 ohms.m, une valeur de beaucoup supérieure à la valeur supérieure rapportée de 600 ohms.m.

La transition de la corrosion active à l'absence de corrosion à la suite de l'augmentation de la résistivité du béton est présentée sous un autre jour à la Figure 19, qui illustre la corrélation entre la taux de corrosion et la résistivité du béton. La figure montre que le taux de corrosion a été réduit parallèlement à l'augmentation de la résistivité du béton dans une relation de puissance, ou que le log (taux de corrosion) et le log (résistivité) avaient une relation linéaire pour les deux aciers tant dans le mélange OPC que le mélange HPC. D'autre part, cette figure montre clairement que la valeur de 600 ohms.m, qui était jugée être une valeur supérieure de résistivité du béton prévenant la corrosion, peut dans les faits signifier une variété d'états de corrosion incluant la corrosion active, selon le ratio e/c de la formulation du béton. La résistivité du béton peut donc être utilisée pour une estimation de l'état de corrosion seulement si une valeur de référence est connue, par exemple la résistivité lorsque le béton est saturé. Il faudrait faire preuve de prudence dans l'utilisation d'une résistivité obtenue sur le terrain sans valeurs de référence pour estimer le risque de corrosion, en particulier pour un béton à faible ratio e/c.

Corrosion dans l'environnement E-2

L'environnement E-2 était similaire à l'environnement E-1 à une HR de 50 % à la différence que son humidité relative ambiante n'était pas contrôlée, et fluctuait avec le temps et la saison. Son humidité relative moyenne était de 37,7 %, plus sèche que pour l'environnement E-1 donc, ce qui a été confirmé par la résistivité du béton dans l'environnement E-2, comparativement aux valeurs pour les environnements E-1 et E-3 présentées à la Figure 20. La résistivité du béton dans l'environnement E-2

a fluctué davantage et a augmenté plus rapidement avec le temps que dans l'environnement E-1; à 105 semaines d'âge, la résistivité du mélange OPC sans chlorures avait atteint presque le double de la résistivité dans l'environnement E-1. Le comportement en corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures a été similaire aux valeurs dans l'environnement E-1, comme on peut le voir à la Figure 21. Les taux de corrosion initialement élevés ont diminué rapidement après la mise en place des prismes de béton dans l'environnement E-2. À environ 40 semaines, la corrosion des deux aciers était devenue négligeable. Les valeurs I_{corr} ont alors diminué sous $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, ce qui correspond au moment où la résistivité du béton a augmenté à près de 1000 ohms.m, comme on peut le voir à la Figure 22.

Pour mieux illustrer le fait que la teneur en humidité peut changer extraordinairement la corrosion de l'acier, un prisme (n° 32, Gal OPC Cl-2 E-2) avec deux barres d'acier galvanisé encastrées a été déplacé de l'environnement E-2 à l'environnement E-3 à une HR de 100 % pour trois mois vers la fin de la période de contrôle. Les taux de corrosion ont été mesurés à 105 semaines, comme le montre la Figure 23. Après la mise en place du prisme dans l'environnement E-3 pendant trois mois, les taux de corrosion ont augmenté pour devenir des taux de corrosion élevés, comparativement à l'état d'absence de corrosion des quatre autres répliqués demeurés dans l'environnement E-2, ce qui montre encore une fois que la teneur en humidité est aussi importante que la teneur en chlorures en ce qui a trait à la corrosion de l'armature en acier. Il doit exister une valeur seuil sous laquelle aucune corrosion active ne se produira quelle que soit la teneur en chlorures, ce qui implique que le concept des valeurs seuils de teneur en chlorure (Glass et Buenfeld, 1997) pour l'initiation de la corrosion devrait incorporer l'influence cruciale de la teneur en humidité dans le béton.

Potentiels de corrosion dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % et l'environnement E-3 à une HR de 100 %

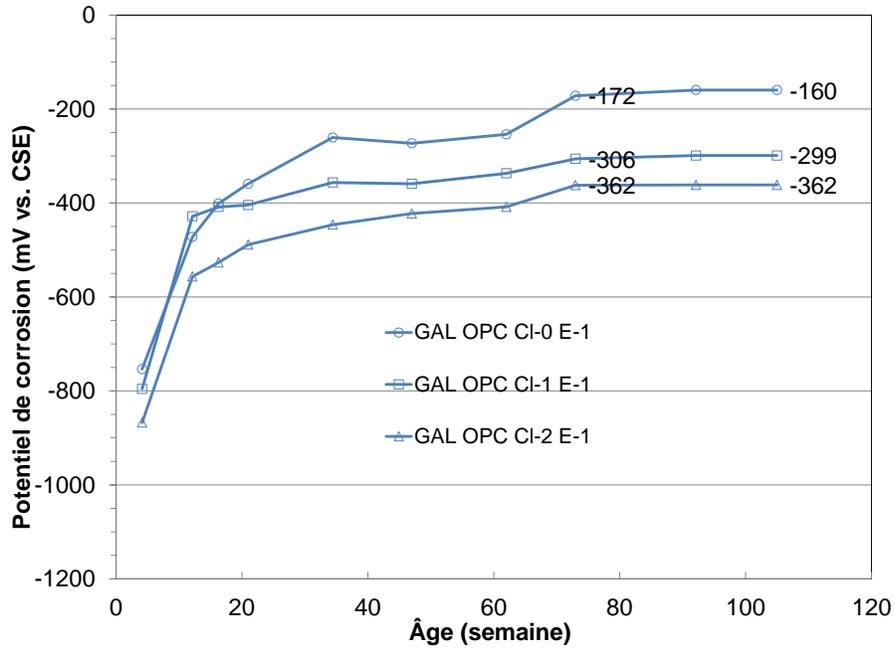
Les paragraphes qui précèdent ont porté sur le comportement en corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % et l'environnement E-1 à une HR de 50 %, qui représentent deux extrêmes de teneur en humidité du point de vue de la corrosion. Par exemple, le même mélange OPC sans chlorures dans l'environnement E-3 avait une résistivité du béton de 87 ohms.m à 105 semaines d'âge, comparativement à 8432 ohms.m dans l'environnement E-1, ce qui est au-delà de la valeur qui prévient la corrosion active. La présente sous-section examine l'impact de la teneur en humidité du point de vue de l'évaluation de l'état. Le Tableau 8 dresse une liste des potentiels de corrosion et des taux de corrosion dans les environnements E-1 et E-3 pour permettre de comparer les effets de la teneur en chlorures et de la formulation du béton dans ces deux environnements. Les trois observations suivantes peuvent être tirées du tableau.

1. La teneur en chlorures et la teneur en humidité sont deux facteurs qui peuvent transformer l'état de corrosion de l'armature en acier dans le béton, le faisant passer de la corrosion active à l'absence de corrosion et inversement; le ratio e/c d'autre part influe sur le potentiel de corrosion, mais ne changerait pas l'état de corrosion pour une teneur en chlorures et une teneur en humidité données.
2. Dans les deux environnements extrêmes que sont E-1 et E-3, les potentiels de corrosion de l'acier galvanisé ont été régulièrement beaucoup plus négatifs que ceux de l'acier au carbone, de l'ordre de -177 mV pour -326 mV, sauf dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %, où l'acier au carbone avait un taux de corrosion plus grand ($1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) que l'acier galvanisé ($0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). On peut en déduire que pour une teneur en humidité entre ces deux extrêmes, l'acier galvanisé aurait des potentiels de corrosion plus négatifs que l'acier au carbone.
3. Contrairement à l'environnement E-3 à une HR de 100 %, les potentiels de corrosion ont été très similaires dans les mélanges OPC et HPC dans l'environnement E-1 à une HR de 50 %, ce qui indique que le ratio e/c influencerait moins sur les lectures de potentiel de corrosion à mesure que le béton devient plus sec.

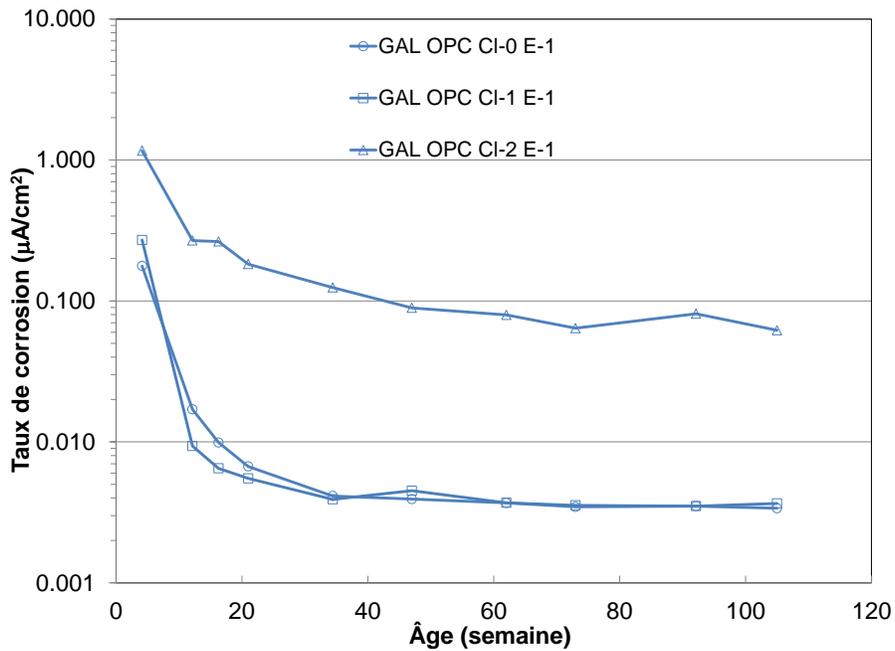
En outre, dans le Tableau 8, six potentiels de corrosion ont été plus négatifs que -350 mV pour l'acier galvanisé, et deux pour l'acier au carbone, tandis que deux cas d'états de corrosion active ont été enregistrés pour l'acier galvanisé et l'acier au carbone, ce qui infirme l'utilisation des lignes directrices de l'ASTM pour l'évaluation de l'état de l'acier galvanisé.

Tableau 8 Corrosion des barres d'acier dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % et l'environnement E-3 à une HR de 100 % à 105 semaines

Acier	Teneur en chlorures	Potentiel de corrosion E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)				Taux de corrosion i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		OPC		HPC		OPC		HPC	
		E-1	E-3	E-1	E-3	E-1	E-3	E-1	E-3
Gal	0 %	-160	-470	-162	-381	0,004	0,02	0,007	0,02
CS		40	-250	125	-55	0,008	0,01	0,006	0,008
Δ (Gal-C)		-200	-220	-287	-326				
Gal	2 %	-362	-575	-325	-686	0,06	0,20	0,05	1,04
CS		-157	-627	-113	-509	0,02	1,00	0,03	0,68
Δ (Gal-C)		-205	52	-212	-177				

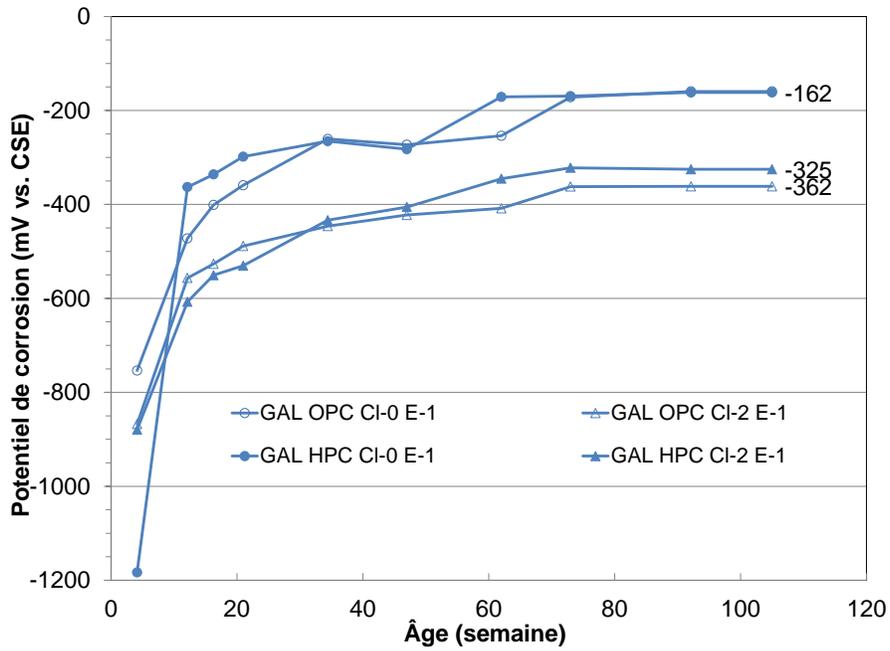


a) E_{corr}

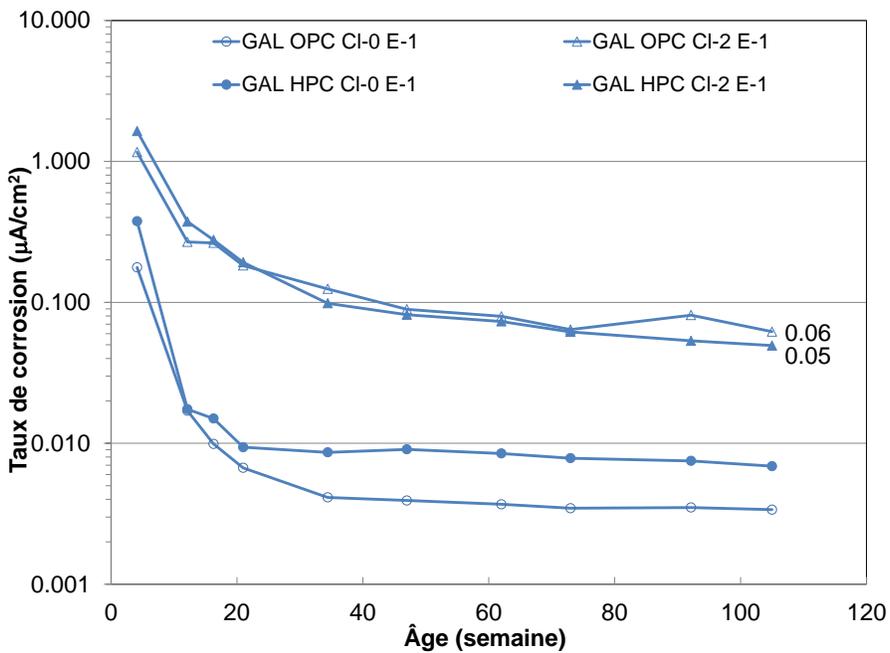


b) I_{corr}

Figure 14 Corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange OPC et l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}

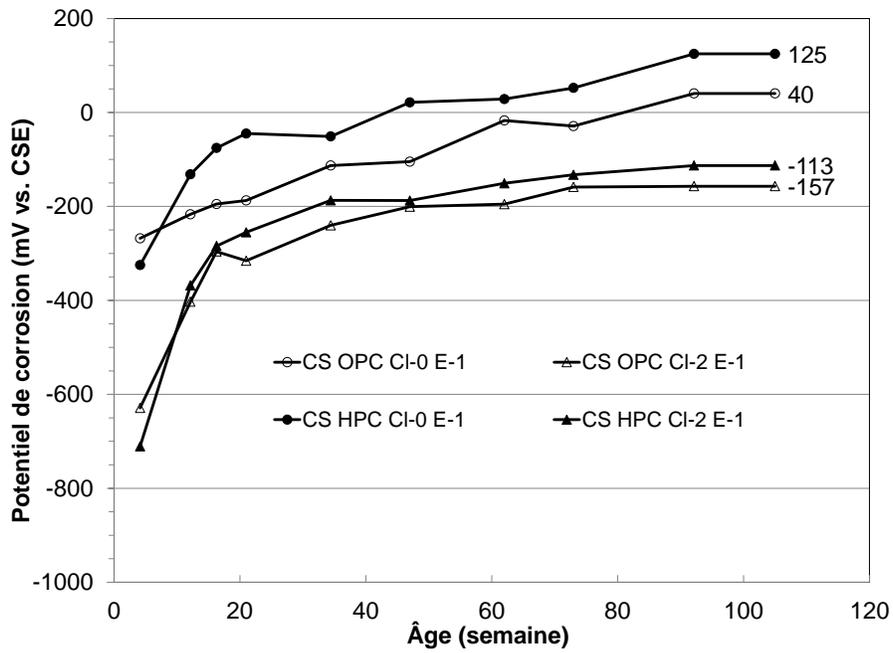


a) E_{corr}

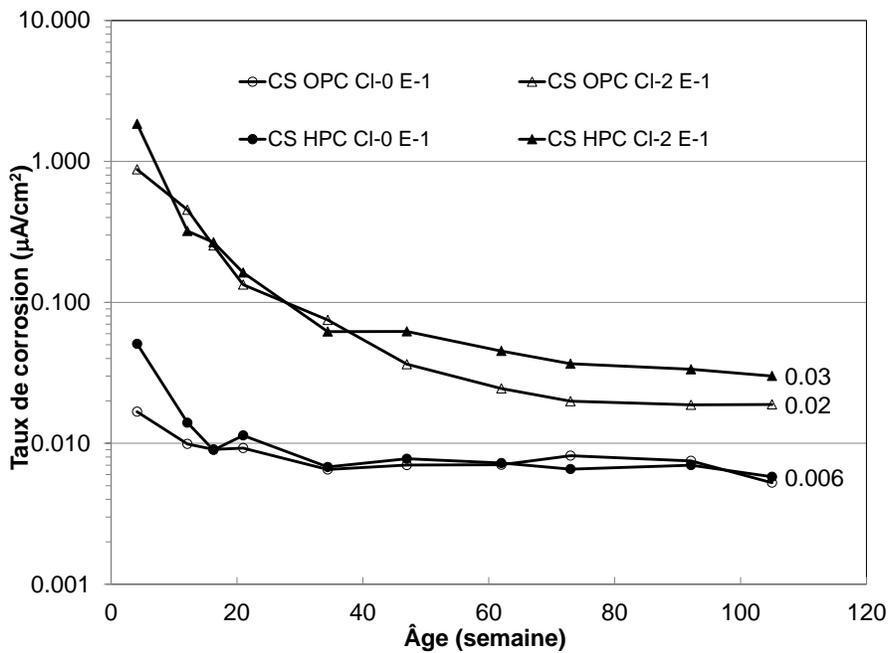


b) I_{corr}

Figure 15 Corrosion de l'acier galvanisé dans le mélange HPC et l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}

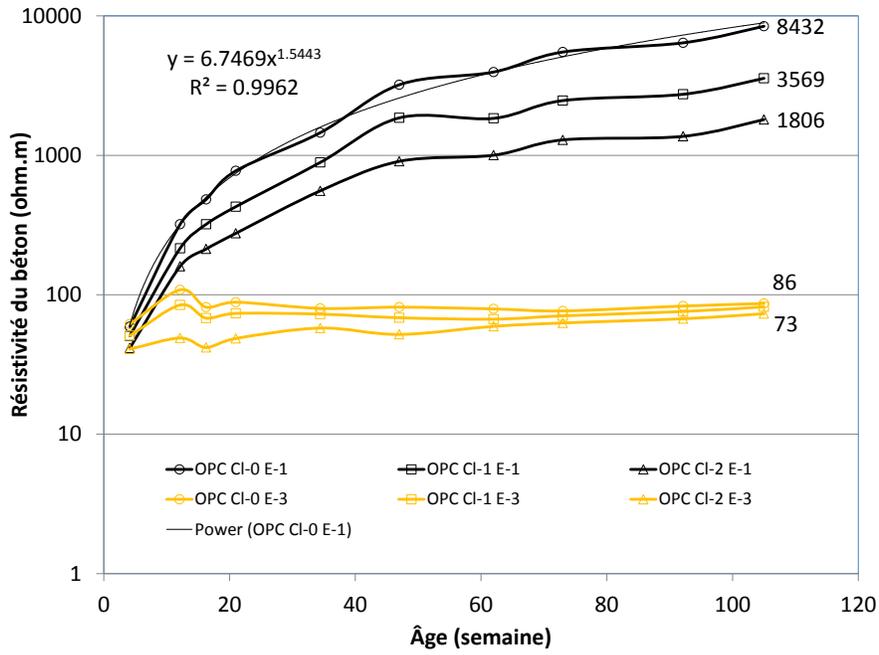


a) E_{corr}

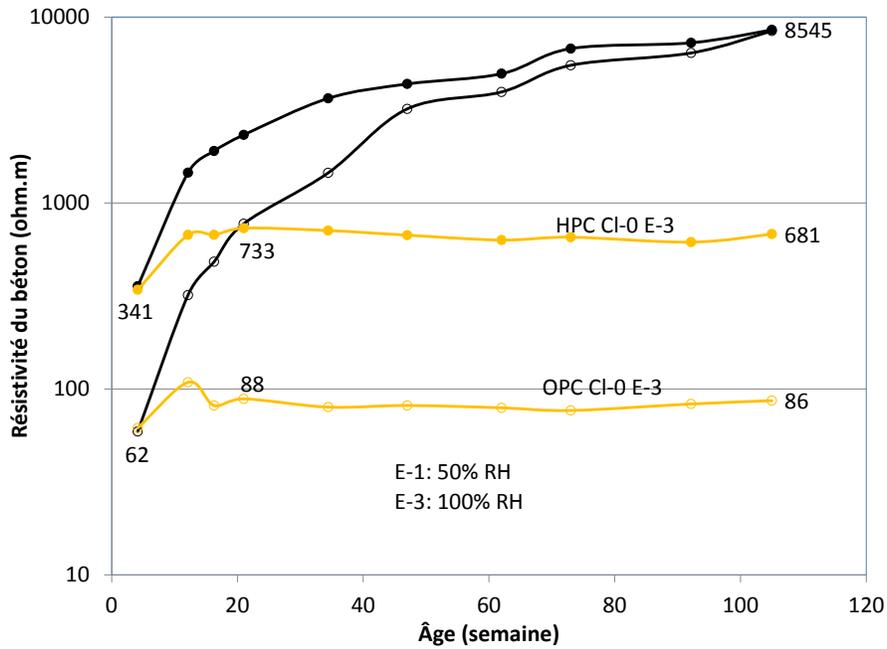


b) I_{corr}

Figure 16 Corrosion de l'acier au carbone dans les mélanges OPC et HPC, et l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}

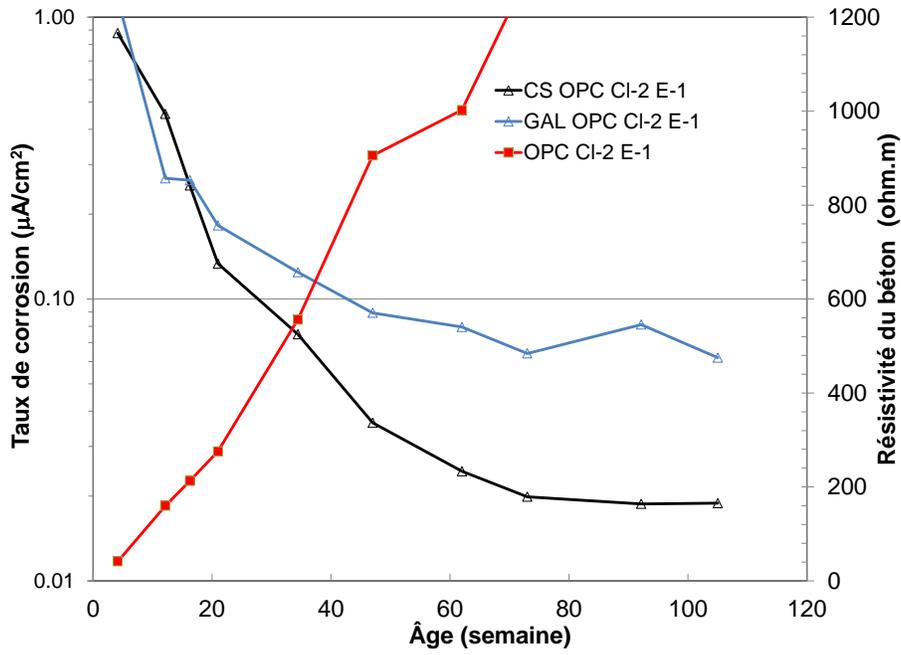


a) OPC

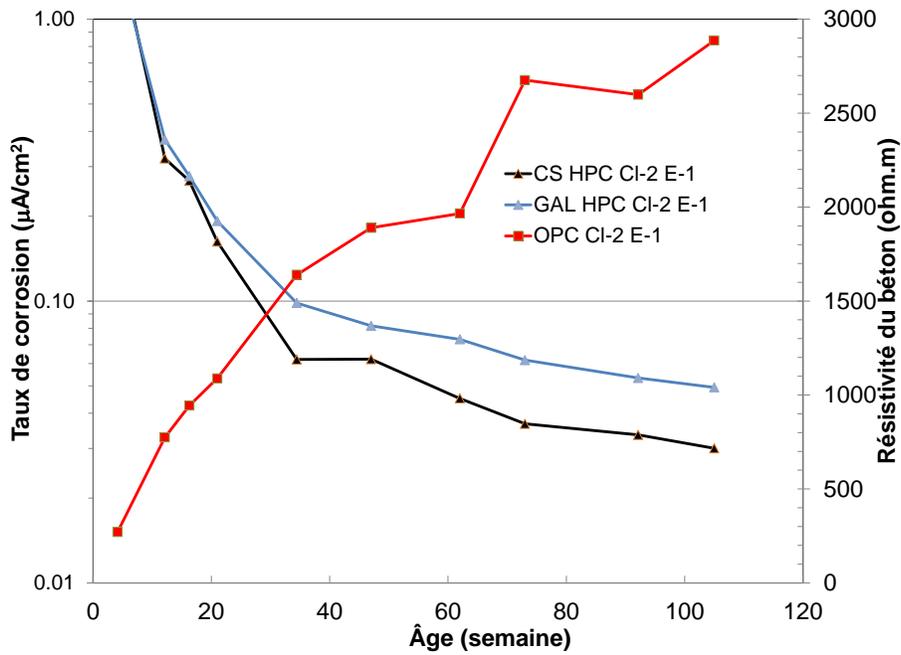


b) HPC

Figure 17 Résistivité du béton avec le temps dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) OPC et b) HPC



a) OPC



b) HPC

Figure 18 Impact de la résistivité du béton sur la corrosion de l'acier dans l'environnement E-1 à une HR de 50 % : a) OPC et b) HPC

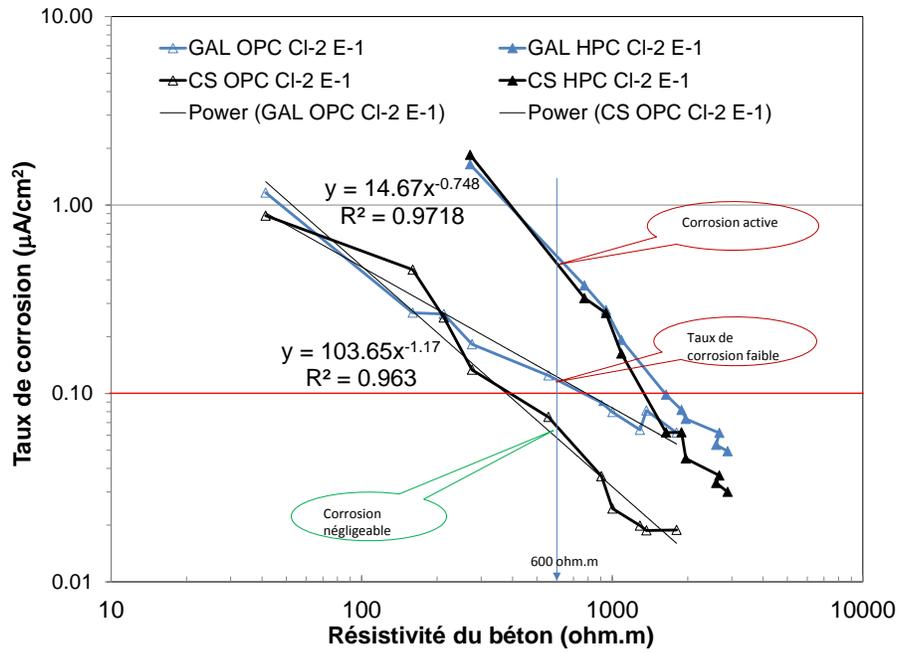


Figure 19 Corrélation entre la résistivité du béton et le taux de corrosion dans du béton avec 2 % de chlorures

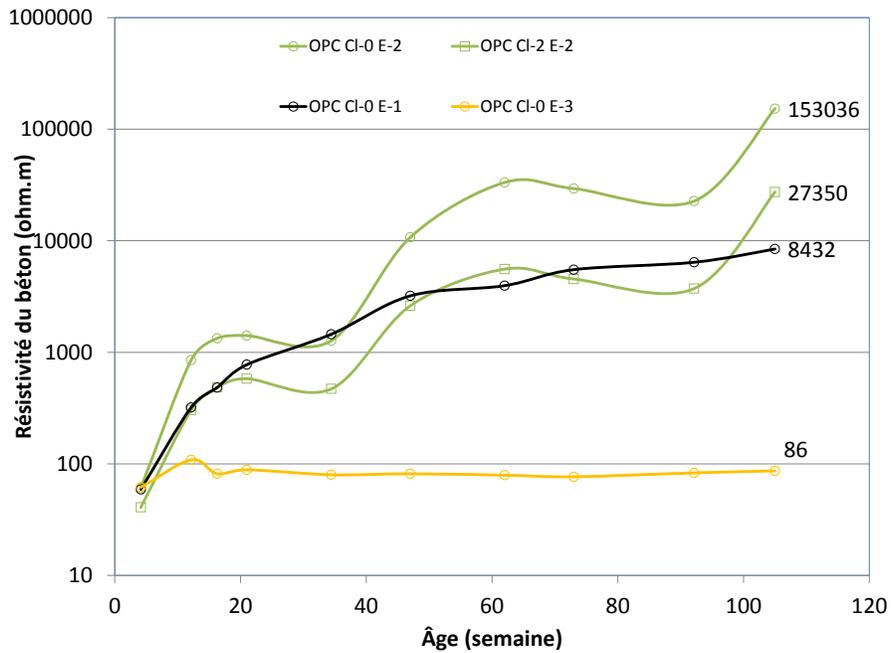


Figure 20 Résistivité du béton du mélange OPC avec le temps dans l'environnement E-2 à HR ambiante

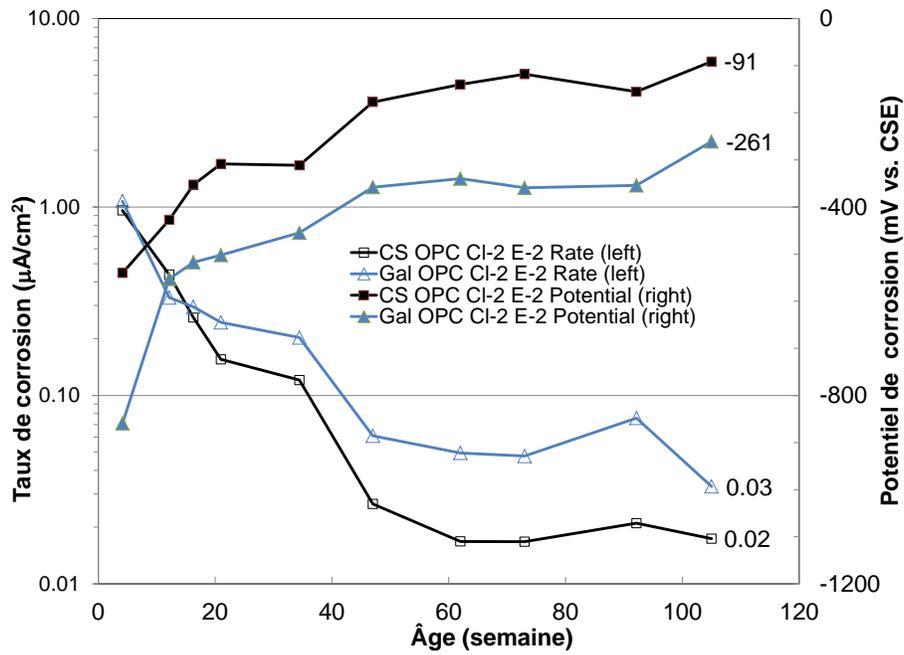


Figure 21 Corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone avec le temps dans l'environnement E-2 à HR ambiante

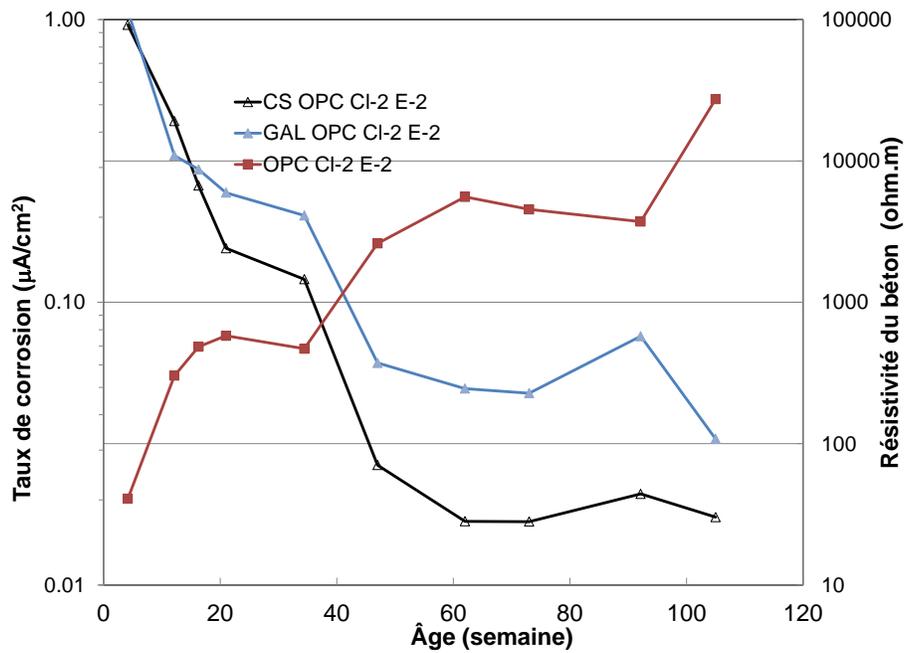


Figure 22 Impact de la résistivité du béton sur la corrosion de l'acier dans l'environnement E-2 à HR ambiante

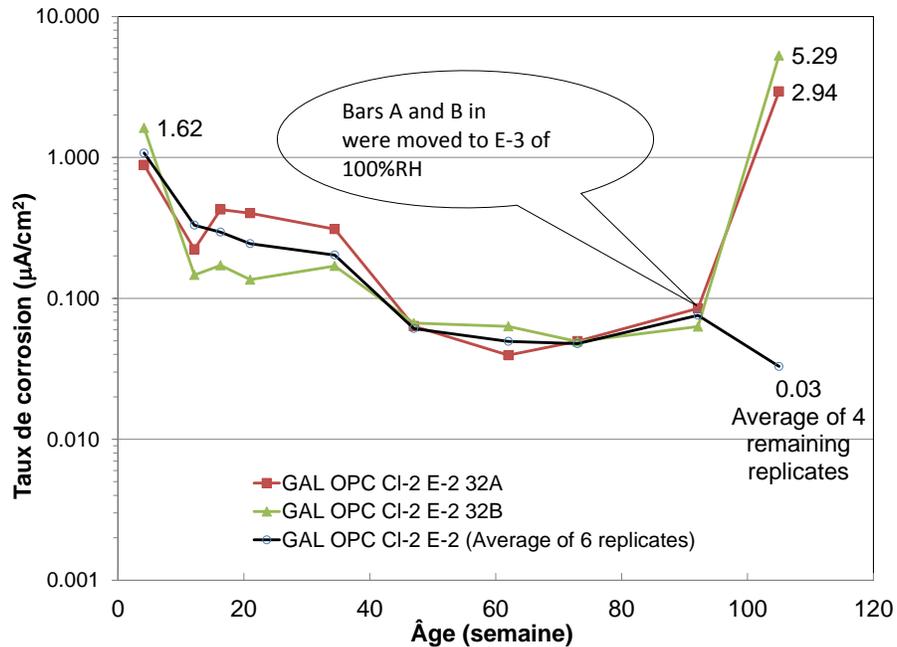


Figure 23 Impact de la teneur en humidité sur la corrosion de l'acier galvanisé

3.1.3 Environnement E-4 à une HR de 80 % et environnement à corrosion accélérée

L'environnement E-4 a été créé dans l'enceinte à atmosphère contrôlée réglée de manière à fournir une humidité relative de 80 % et un cycle de températures quotidien de 25 °C à 40 °C. La température devait accélérer les dommages causés par la corrosion, mais le taux de corrosion et le potentiel de corrosion ont été mesurés chaque fois après que les prismes ont eu suffisamment de temps pour retourner à la température ambiante comme dans les autres environnements de l'étude.

Acier galvanisé et acier au carbone

Les Figure 24 a) et b) montrent les valeurs I_{corr} et E_{corr} de l'acier galvanisé dans les mélanges OPC à différentes teneurs en chlorures. L'acier galvanisé a présenté trois états de corrosion distincts du point de vue des valeurs I_{corr} , soit un état passif pour 0 % de chlorures, un taux de corrosion faible ($< 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) pour 1 % de chlorures et un taux de corrosion élevé ($> 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) pour 2 % de chlorures, ce qui est confirmé par le niveau croissant d'endommagement des prismes de béton par la corrosion montré à la Figure 26. La Figure 24b) montre toutefois que ces trois états de corrosion distincts avaient des potentiels de corrosion, E_{corr} , mesurés dans le temps remarquablement similaires, ce qui signifie que dans ces conditions d'humidité du béton, il serait difficile de différencier les états de corrosion de l'acier galvanisé au moyen des potentiels de corrosion.

Les Figure 25 a) et b) montrent les valeurs I_{corr} et E_{corr} de l'acier au carbone dans les mélanges OPC à différentes teneurs en chlorures. L'acier au carbone a également présenté des états de corrosion distincts du point de vue des valeurs I_{corr} , soit un état passif pour 0 % de chlorures, un taux de corrosion élevé ($> 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) qui s'est stabilisé avec le temps pour 1 % de chlorures et un taux de corrosion élevé pour 2 % de chlorures qui a continué à augmenter avec le temps et a fini par causer la délamination du béton, ce qui est confirmé ici également par le niveau croissant d'endommagement des prismes de béton par la corrosion montré à la Figure 26. Contrairement à l'acier galvanisé, cependant, on voit à la Figure 25b) que le potentiel de corrosion (E_{corr}) de l'acier au carbone avait des valeurs distinctes se situant entre la corrosion active et l'absence de corrosion. À l'état passif, les valeurs E_{corr} ont été plus positives que -200 mV. Aux taux de corrosion élevés, les valeurs E_{corr} ont initialement été plus

négatives que -350 mV et sont passées à des valeurs plus positives avec le temps pour se stabiliser aux environs de -340 mV. Ces valeurs de potentiel de corrosion reflétaient les différents états de corrosion tels que déterminés au moyen des lignes directrices de la norme ASTM C876.

Comparaison de la résistance à la corrosion dans l'environnement E-4

Les Figure 27 a) et b) montrent les valeurs I_{corr} et E_{corr} des barres d'acier galvanisé, d'acier au carbone et de zinc dans le mélange OPC sans chlorures. Leur taux de corrosion $I_{corr} < 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dans le temps a confirmé leur état passif d'absence de corrosion. L'acier galvanisé avait des potentiels de corrosion très similaires à ceux des barres de zinc, ce qui confirme que la corrosion était due dans les deux cas à la passivation du zinc pur. L'acier galvanisé avait un potentiel de corrosion beaucoup plus négatif que l'acier au carbone, la différence étant d'environ 400 mV sur l'ensemble de la période de contrôle, malgré le fait que les deux aciers présentaient une absence de corrosion.

Les Figure 28 a) et b) montrent les valeurs E_{corr} et I_{corr} des barres d'acier galvanisé et d'acier au carbone dans le mélange OPC avec 1 % de chlorures. Le potentiel de corrosion E_{corr} initial de l'acier galvanisé était beaucoup plus négatif que celui de l'acier au carbone, mais les deux sont devenus similaires avec le temps, à -360 mV et -334 mV après 105 semaines de contrôle. Leurs taux de corrosion (I_{corr}) toutefois, présentaient une énorme différence. Les taux de corrosion des barres d'acier galvanisé étaient environ dix fois inférieurs à ceux des barres d'acier au carbone, soit $0,32 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour l'acier galvanisé et $3,89 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour l'acier au carbone. Les Figure 29 a) et b) montrent les valeurs E_{corr} et I_{corr} des barres d'acier galvanisé et d'acier au carbone dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures. Leurs potentiels de corrosion (E_{corr}) sont également devenus très similaires peu après la mise en place des prismes dans l'environnement E-4, à environ -400 mV. Leurs taux de corrosion (I_{corr}) ont toutefois montré une différence encore plus grande que pour les mélanges avec 1 % de chlorures.

Dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures, le taux de corrosion de l'acier au carbone n'a pas seulement été plus de dix fois supérieur à celle de l'acier galvanisé, mais il a également augmenté de façon exponentielle avec le temps jusqu'à ce que la délamination du béton se produise, à $35,67 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. L'examen visuel des Figure 26 b) et d) montre l'énorme différence dans l'état du béton, ce qui confirme la différence de taille entre les taux de corrosion mesurés.

Au cours de cette étude, nous avons observé que cette accélération du taux de corrosion de l'acier au carbone se produisait dans du béton avec 2 % de chlorures. Le même phénomène a également été observé au cours de notre étude précédente (Zhang et coll., 2012) dans du béton avec 3 % de chlorures, mais pas dans du béton avec 1,5 % de chlorures. Il semble donc qu'au-dessus d'une certaine teneur en chlorures, soit entre 1,5 % et 2 % de chlorures dans le cas présent, le taux de corrosion de l'acier au carbone ne peut pas maintenir un niveau constant relatif et augmente exponentiellement avec le temps, ce qui accélérera la fissuration et l'endommagement du béton, comme le montre l'examen visuel. Par contre, le taux de corrosion de l'acier galvanisé n'a pas accéléré dans le béton avec 2 % de chlorures non plus que dans le béton avec 3 % de chlorures dans l'étude précédente.

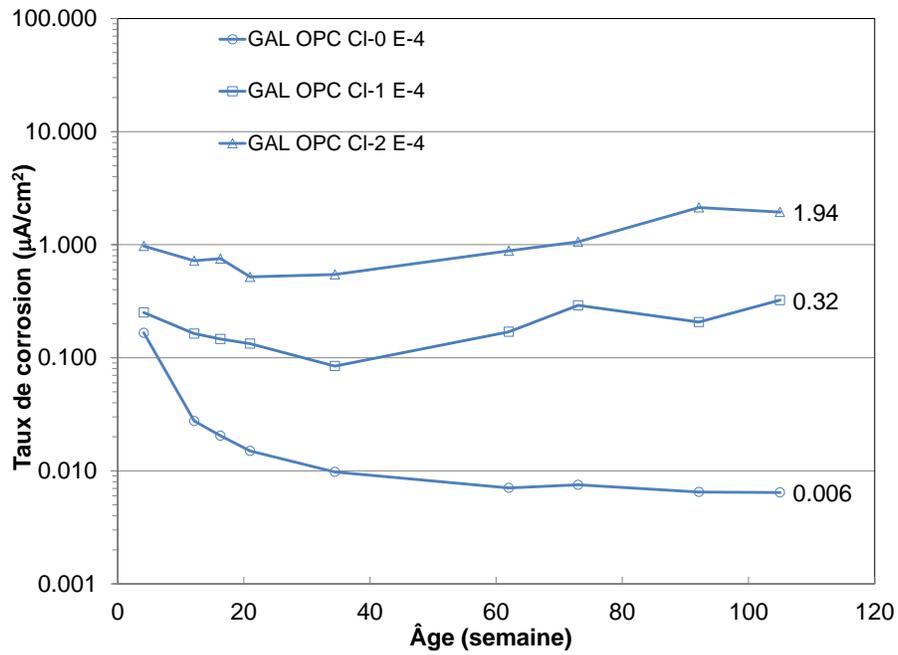
Les taux de corrosion obtenus pour les cylindres avec barres encastrées dans l'environnement E-4 sont également présentés à la Figure 30. Cette figure montre qu'un enrobage de béton de 40 mm mène à un taux de corrosion de l'acier au carbone plus faible qu'un enrobage de 30 mm, dans le même mélange OPC avec les mêmes 2 % de chlorures. Une fissuration verticale a été trouvée dans les cylindres à enrobage de 40 mm à 94 semaines, et dans les cylindres à enrobage de 30 mm à 73 semaines. Augmenter l'enrobage de béton de l'armature en acier a été une façon efficace de retarder le début de la corrosion (Zhang et Lounis, 2006) et la présente étude montre en outre que cela peut également abaisser le taux de corrosion après l'initiation de la corrosion. Cette figure montre aussi qu'avec le même enrobage de 30 mm, l'acier au carbone avait un taux de corrosion environ dix fois plus élevé que l'acier galvanisé similaire aux taux dans les prismes de béton.

Pour résumer, même si leurs potentiels de corrosion sont devenus similaires dans le béton contaminé par des chlorures dans l'environnement E-4, l'acier galvanisé avait un taux de corrosion dix fois plus faible que l'acier au carbone. Dans le béton fortement contaminé simulé par 2 % de chlorures par masse de ciment, non seulement l'acier au carbone avait un taux de corrosion beaucoup plus élevé que l'acier galvanisé, mais ce taux de corrosion a augmenté de façon exponentielle avec le temps, menant à une fissuration beaucoup plus rapide du béton. Dans du béton fortement contaminé, l'acier galvanisé se comporterait beaucoup mieux que l'acier au carbone en ayant et maintenant un faible taux de corrosion même dans un environnement très corrosif.

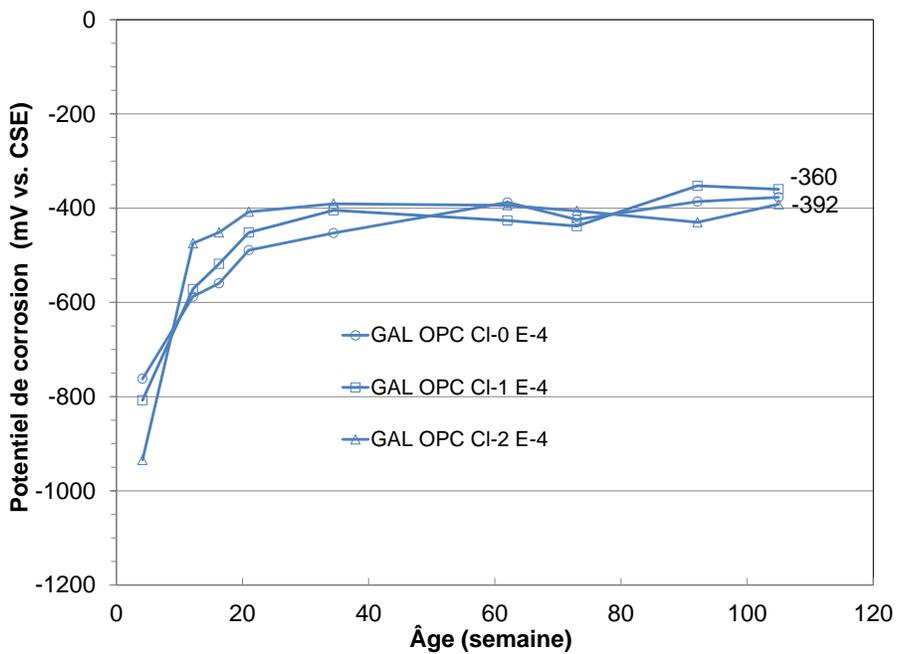
Résistivité du béton

Comme dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %, la résistivité du béton dans l'environnement E-4 à une HR de 80 % illustrée à la Figure 31 est demeurée presque constante après les douze premières semaines d'âge. La résistivité du mélange OPC avec 1 % de chlorures se situait autour de 161 à 171 ohms.m, soit une résistivité environ deux fois plus élevée que dans l'environnement E-4. Il y a toutefois eu une fenêtre de quatre semaines vers les 47 semaines d'âge pendant laquelle les détecteurs d'humidité dans l'enceinte à atmosphère contrôlée étaient défectueux et ont été réparés. Pendant cette période, le niveau d'humidité relative réel a été de seulement 10 %, ce qui s'est reflété dans l'augmentation à 1938 ohms de la résistivité mesurée à 47 semaines d'âge, soit la même valeur que pour le béton placé dans l'environnement E-1 à une HR de 50 %, comme le montre la figure. Une fois les détecteurs d'humidité relative réparés, la résistivité du béton est retournée aux valeurs constantes relatives, c'est-à-dire que la résistivité du mélange OPC avec 1 % de chlorures a été relativement stable avec le temps, allant de 359 à 431 ohms.m.

La résistivité du béton dans l'environnement E-4 est demeurée relativement constante (161 à 171 ohms.m) dans le temps, indiquant que le béton avait établi l'équilibre avec l'humidité relative ambiante de l'environnement E-4. Après la période de séchage accidentel, la résistivité du béton est redevenue relativement constante (359 à 431 ohms.m), indiquant que le béton avait rétabli l'équilibre avec l'humidité relative ambiante de l'environnement E-4. Les deux équilibres qui avaient commencé à partir d'un état humide (désorption, à partir du début) et d'un état sec (adsorption, après le séchage accidentel), respectivement, ont manifestement mené à deux teneurs en humidité différentes dans le béton, comme le montrent les deux niveaux de résistivité du béton. Ceci peut s'expliquer par le fait que les trajets de désorption et d'adsorption mèneront à des teneurs en humidité différentes au même niveau d'humidité relative (Hansen, 1986). Comme l'illustre la Figure 32, une HR de 80 % correspondrait à 3,7 % d'humidité par désorption et 2,5 % d'humidité par adsorption dans un béton d'un ratio e/c égal à 0,48, menant ainsi à la différence de résistivité du béton.

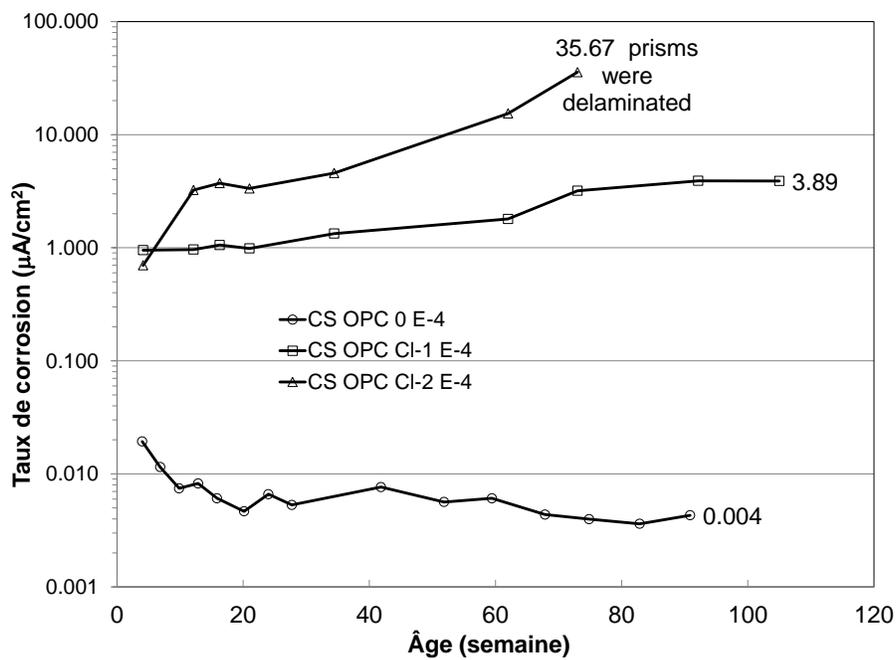


a) I_{corr}

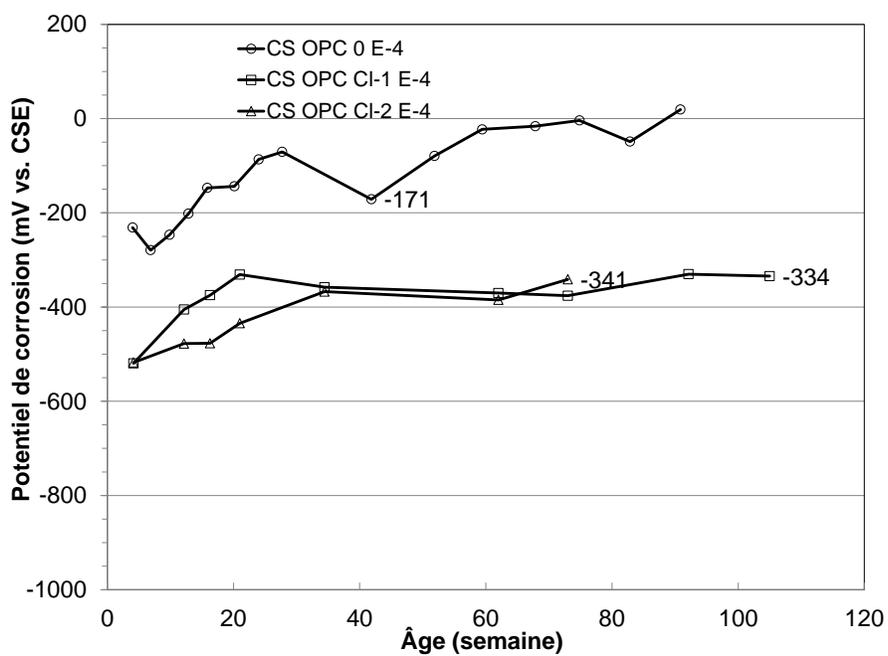


b) E_{corr}

Figure 24 Corrosion de l'acier galvanisé dans l'environnement E-4 à une HR de 80 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}



a) I_{corr}

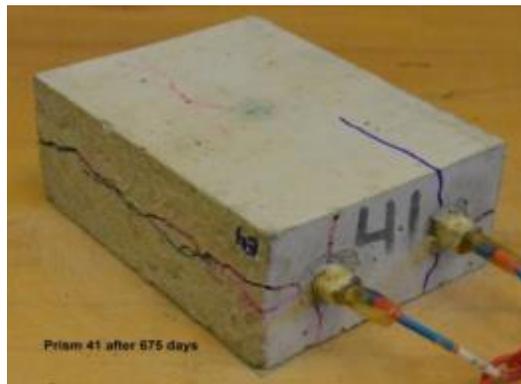


b) E_{corr}

Figure 25 Corrosion de l'acier au carbone dans l'environnement E-4 à une HR de 80 % : a) I_{corr} et b) E_{corr}



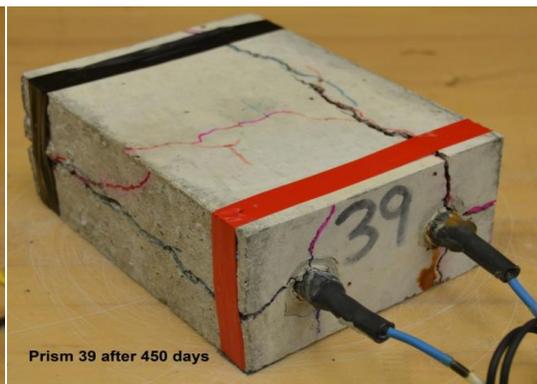
a) Acier galvanisé à 1 % de chlorures



b) Acier galvanisé à 2 % de chlorures

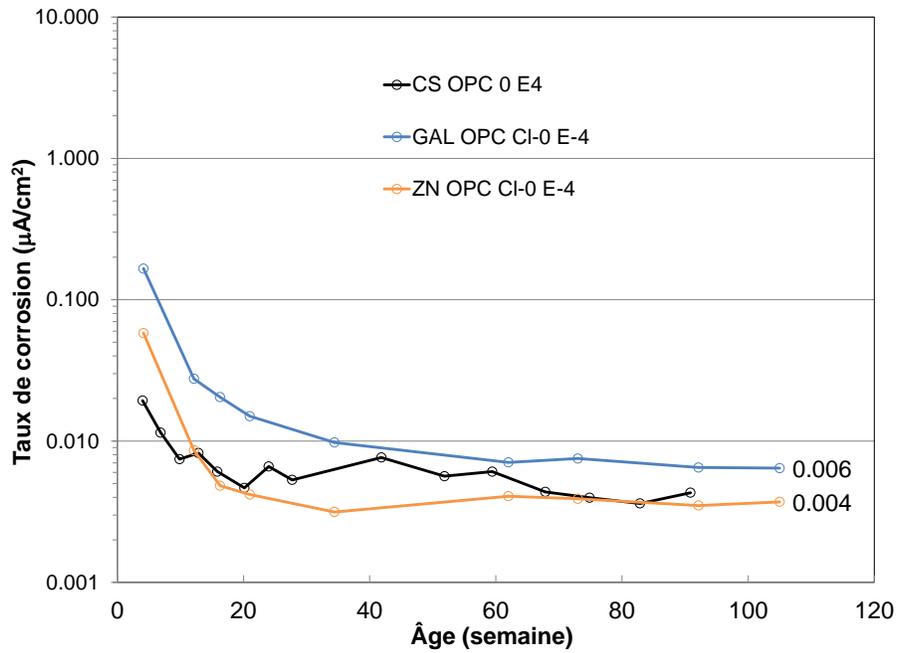


c) Acier au carbone à 1 % de chlorures

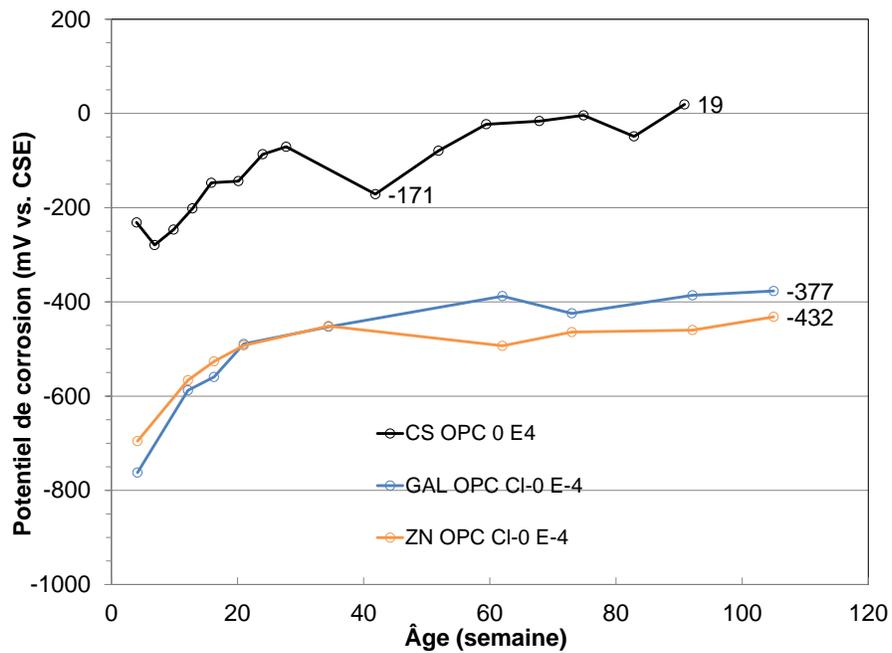


d) Acier au carbone à 2 % de chlorures

Figure 26 Endommagement de prismes de béton : a) acier galvanisé à 1 % de chlorures, b) acier galvanisé à 2 % de chlorures, c) acier au carbone à 1 % de chlorures et d) acier au carbone à 2 % de chlorures.

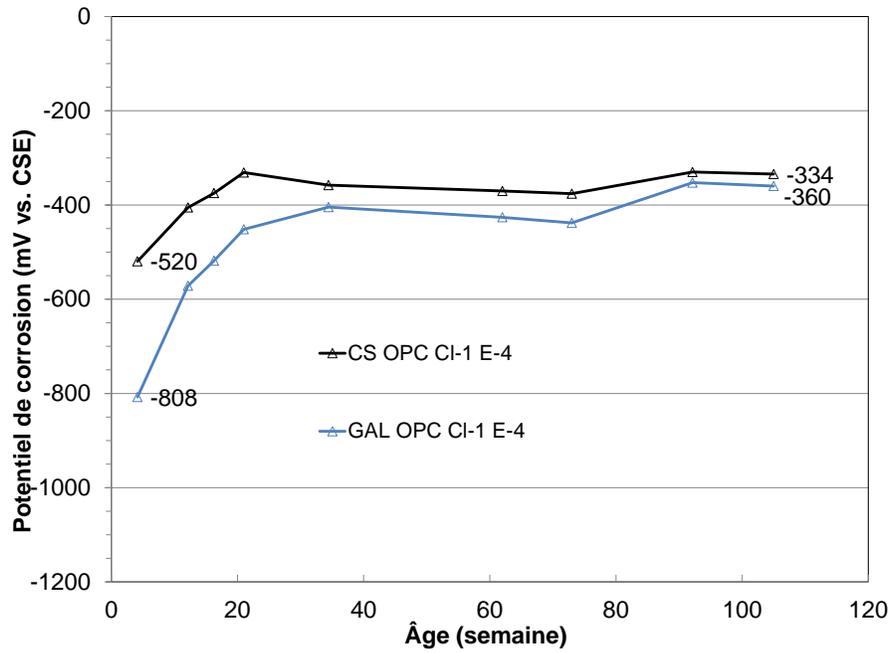


a) I_{corr}

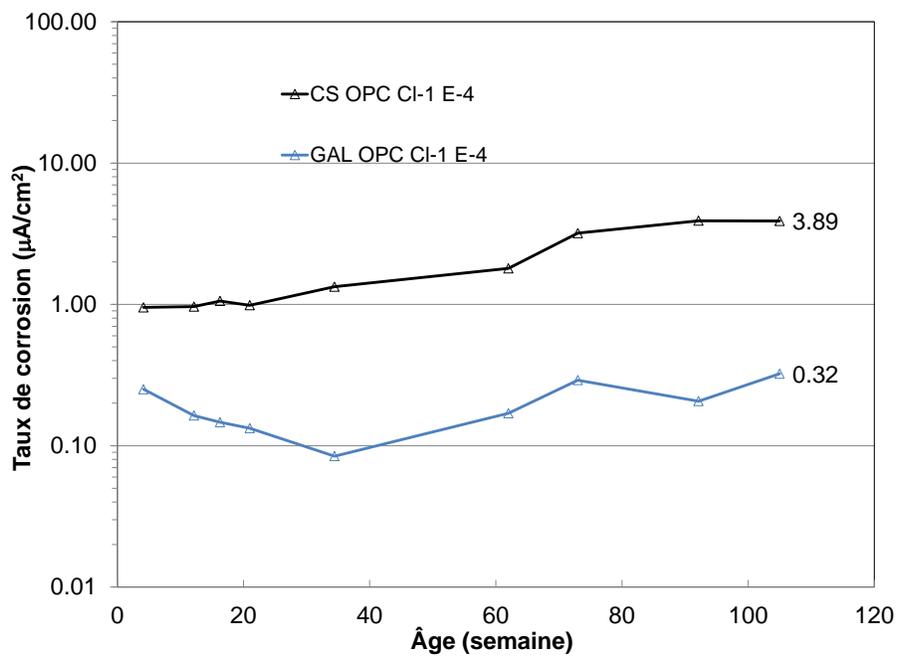


b) E_{corr}

Figure 27 État passif des aciers dans un mélange OPC et l'environnement E-4 à une HR de 80 % :
a) I_{corr} et b) E_{corr}

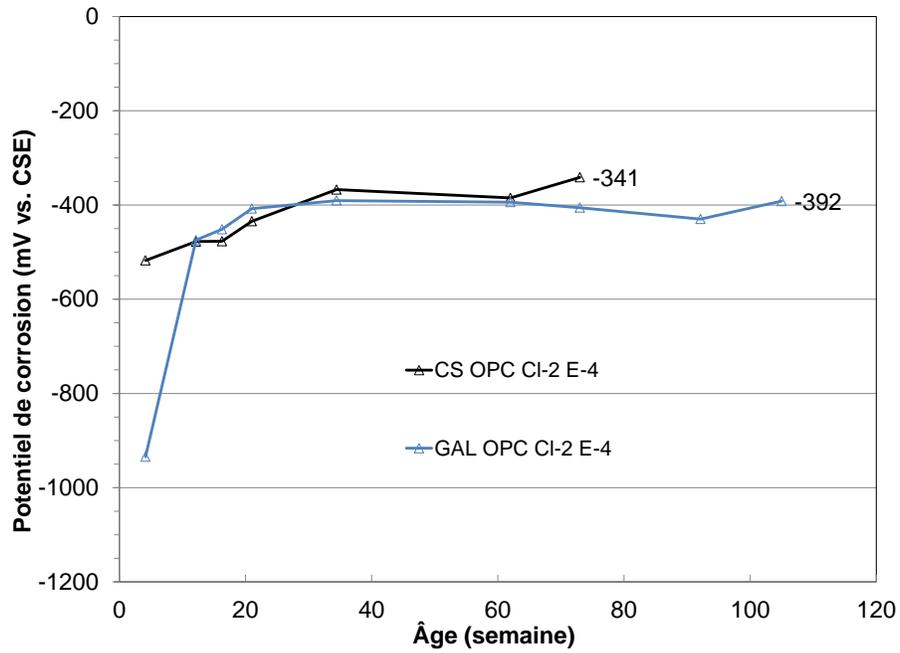


a) E_{corr}

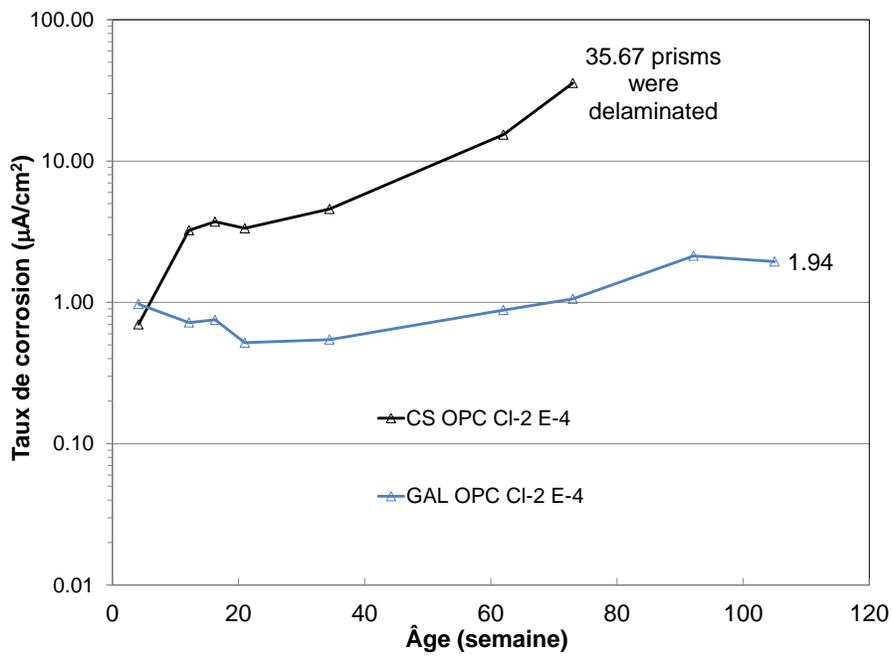


b) I_{corr}

Figure 28 Corrosion des aciers dans un mélange OPC avec 1 % de chlorures dans l'environnement E-4 à une HR de 80 % : a) E_{corr} et b) I_{corr}



a) E_{corr}



b) I_{corr}

Figure 29 Potentiel de corrosion et taux de corrosion des aciers dans le temps à 2 % de chlorures dans l'environnement E-4 : a) E_{corr} et b) I_{corr}

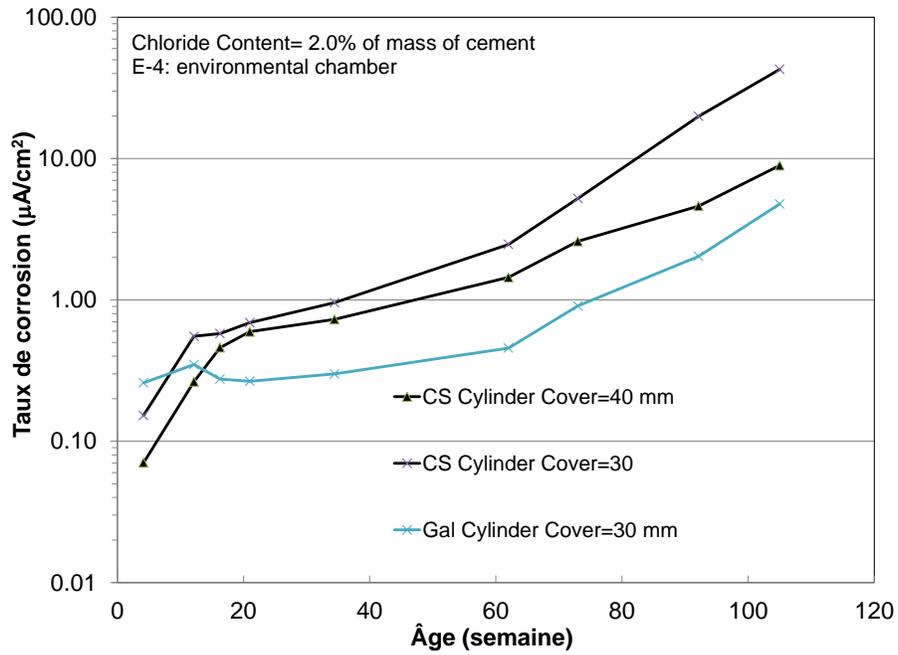


Figure 30 Effet de l'enrobage de béton sur le taux de corrosion

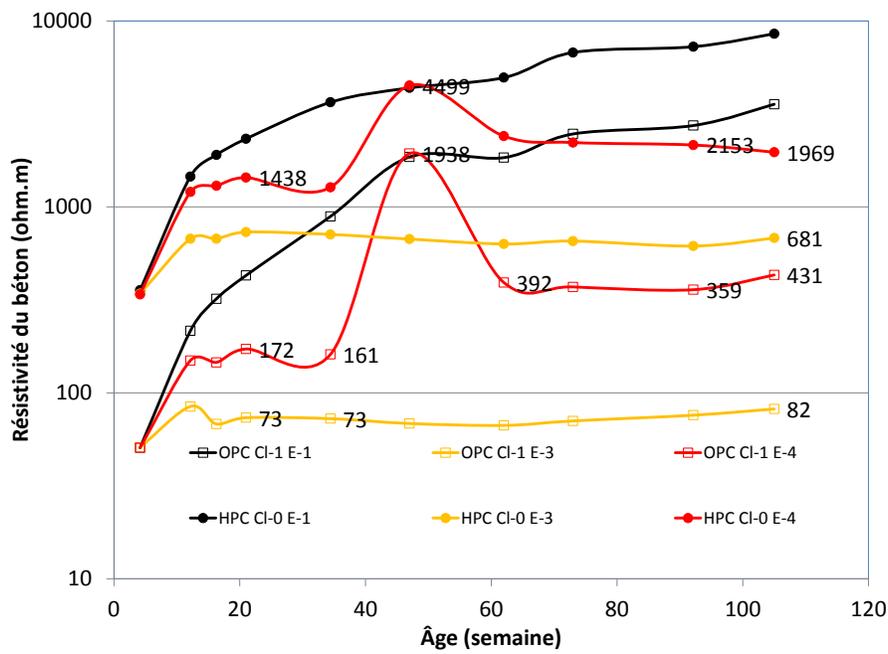


Figure 31 Résistivité du béton dans l'environnement E-4 à une HR de 80 %

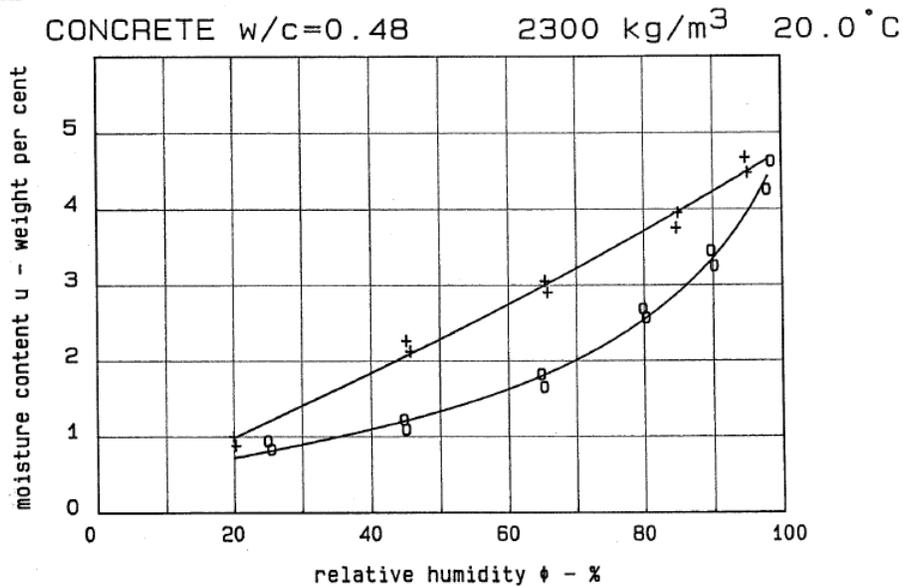


Figure 32 Teneur en humidité et humidité ambiante : désorption (croix) et adsorption (cercle), adaptée de Hansen (1986)

3.2 Effet de l'exposition aux conditions environnementales

L'analyse qui précède s'est concentrée sur l'effet de la teneur en chlorures et du ratio e/c dans différents environnements. La présente section étudiera l'effet de l'humidité relative ambiante sur le comportement en corrosion de barres d'acier galvanisé et d'acier au carbone, en particulier sur leur potentiel de corrosion en vue d'une évaluation de leur état, tant pour un état d'absence de corrosion que pour un état de corrosion active.

3.2.1 Acier galvanisé et acier au carbone dans du béton sans chlorures

Comme nous l'avons mentionné précédemment, dans les prismes de béton sans chlorures, l'acier galvanisé et l'acier au carbone étaient à l'état passif d'absence de corrosion dans tous les environnements. La teneur en humidité dans le béton, après la mise en place des prismes dans les différents environnements, s'est cependant révélée avoir un grand impact sur les potentiels de corrosion. Les conditions d'exposition de différentes humidités relatives ambiantes peuvent être échangées avec la teneur en humidité du béton dans l'analyse suivante.

Les Figure 33 a) et b) montrent le potentiel de corrosion (E_{corr}) de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone, respectivement, dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %, l'environnement E-4 à une HR de 80 % et l'environnement E-1 à une HR de 50 % dans le mélange OPC. Elles montrent que plus la teneur en humidité dans le béton était élevée, plus le potentiel de corrosion mesuré était négatif. Le Tableau 9 résume les potentiels de corrosion mesurés à 105 semaines; le potentiel de corrosion E_{corr} mesuré dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % était plus négatif que dans l'environnement E-1 à une HR de 50 %, la différence étant de 290 mV pour l'acier au carbone et de 310 mV pour l'acier galvanisé. Dans le mélange HPC, la différence de potentiel de corrosion causée par la teneur en humidité était de 180 mV pour l'acier au carbone et de 220 mV pour l'acier galvanisé.

Le Tableau 9 montre également que les barres d'acier galvanisé à l'état passif d'absence de corrosion avaient des potentiels de corrosion plus négatifs que les barres d'acier au carbone dans tous les environnements, et que la différence allait de 200 mV à 388 mV. D'autre part, l'acier au carbone à l'état d'absence de corrosion avait un potentiel de corrosion (E_{corr}) plus positif que -250 mV quels que

soient les environnements, tandis que l'acier galvanisé avait un potentiel de corrosion allant de -160 mV à -470 mV. Les potentiels de corrosion de l'acier galvanisé inférieurs à -350 mV, qui sont un résultat des caractéristiques de corrosion intrinsèques du revêtement galvanisé, ne révéleraient pas l'état d'absence de corrosion de l'acier s'ils étaient interprétés à la lumière des lignes directrices de la norme ASTM C876.

Tableau 9 Potentiel de corrosion de l'armature en acier à l'état passif mesuré à 105 semaines

	Chlorures	Potentiel de corrosion E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)				
		HR de 50 % E-1	HR de 80 % E-4	HR de 100 % E-3	$\Delta E_{corr}(E-3-E-1)$	$\Delta E_{corr}(E-4-E-1)$
CS	OPC	40	19	-250	-290	-21
GAL		-160	-377	-470	-310	-217
$\Delta E_{corr}(GAL-CS)$		-200	-388	-220		
CS	HPC	125	S.O.	-55	-180	S.O.
GAL		-162	S.O.	-381	-219	S.O.
$\Delta E_{corr}(GAL-CS)$		-287		-326		

3.2.2 Acier galvanisé et acier au carbone dans du béton avec chlorures

Les Figure 34 a) et b) montrent le potentiel de corrosion (E_{corr}) et le taux de corrosion (I_{corr}) de l'acier au carbone, respectivement, dans le mélange OPC avec 2 % de chlorures dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %, l'environnement E-4 à une HR de 80 % et l'environnement E-1 à une HR de 50 %. Les potentiels de corrosion dans l'environnement E-3 ont été plus négatifs que -600 mV, ce qui en fait les potentiels les plus négatifs des quatre environnements, parce que les pores du béton étaient saturés et que l'oxygène était donc à son niveau le moins disponible par rapport aux autres environnements. Dans l'environnement E-4 à une HR de 80 %, les potentiels de corrosion se situaient autour de -350 mV après s'être stabilisés. Dans l'environnement E-1 à une HR de 50 %, les potentiels de corrosion sont devenus plus positifs que -200 mV avec le temps.

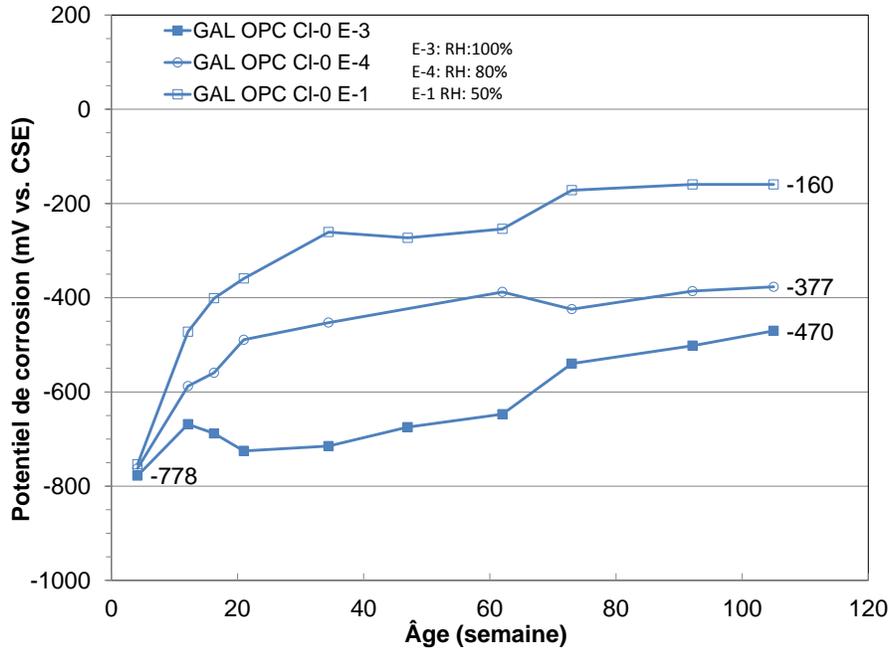
Il est à noter que si les valeurs d' E_{corr} dans l'environnement E-4 étaient plus positives que dans l'environnement E-3 de plus de 250 mV, les taux de corrosion dans l'environnement E-4 étaient beaucoup plus élevés que dans l'environnement E-3. Un potentiel plus négatif ne signifie donc pas nécessairement un taux de corrosion plus élevé s'il est causé par une teneur en humidité élevée du béton et donc par l'absence d'oxygène. La règle générale selon laquelle le taux de corrosion est plus élevé pour un potentiel de corrosion plus négatif s'applique à l'acier dans du béton soumis à différents chlorures, mais seulement dans des environnements similaires parce que la teneur en humidité du béton peut avoir un impact contraire sur le potentiel de corrosion et le taux de corrosion du point de vue de leur représentation de l'état de corrosion.

Comme pour l'acier au carbone, les potentiels de corrosion de l'acier galvanisé dans l'environnement E-3 à une HR de 100 % ont également été beaucoup plus négatifs que ceux dans l'environnement E-4 à une HR de 80 %, mais les taux de corrosion dans l'environnement E-3 sont devenus plus bas que dans l'environnement E-4, comme le montre la Figure 35. Contrairement à l'acier au carbone, les potentiels de corrosion de l'acier galvanisé étaient très similaires entre la corrosion active dans l'environnement E-4 à une HR de 80 % et l'absence de corrosion dans l'environnement E-1 à une HR de 100 % (pour une comparaison facile de ces valeurs, voir le Tableau 10), ce qui rendrait l'évaluation de l'état au moyen des potentiels de corrosion plus difficile pour l'acier galvanisé.

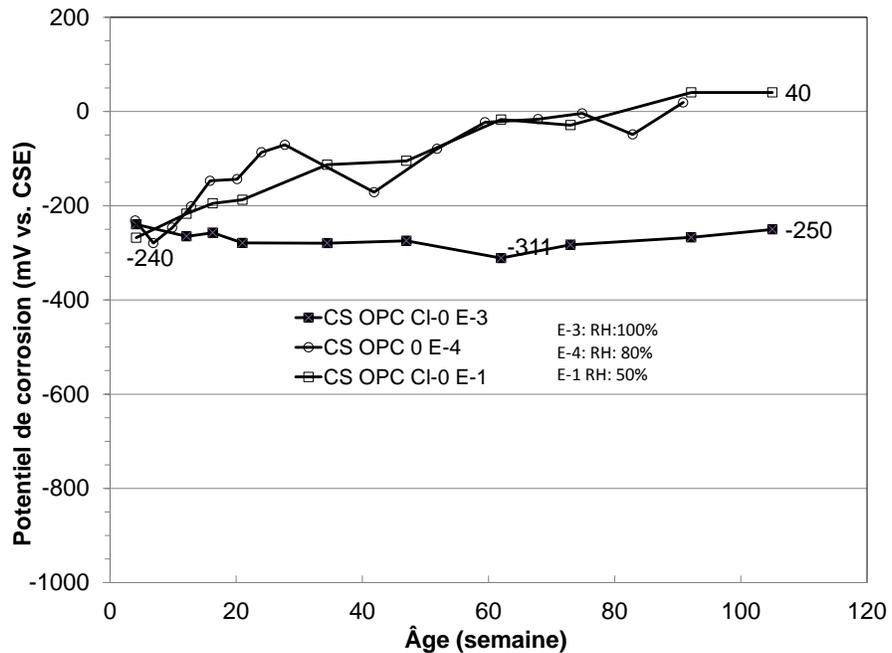
Tableau 10 Potentiel de corrosion de l'acier dans du béton avec 2 % de chlorures à 105 semaines

	Chlorures	Potentiel de corrosion E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)				
		HR de 50 % E-1	HR de 80 % E-4	HR de 100 % E-3	$\Delta E_{corr}(E-3 - E-1)$	$\Delta E_{corr}(E-4-E-1)$
CS	0 %	40	19	-250	-290	-21
Gal		-160	-377	-470	-310	-217
$\Delta E_{corr}(Gal-CS)$		-200	-388	-220		
CS	2 %	-157	S.O.*	-627	-470	S.O.*
Gal		-362	-392	-576	-214	-30
$\Delta E_{corr}(GAL-CS)$		-205	S.O.*	+51		

* Béton délaminé et contrôle arrêté à 73 semaines d'âge.

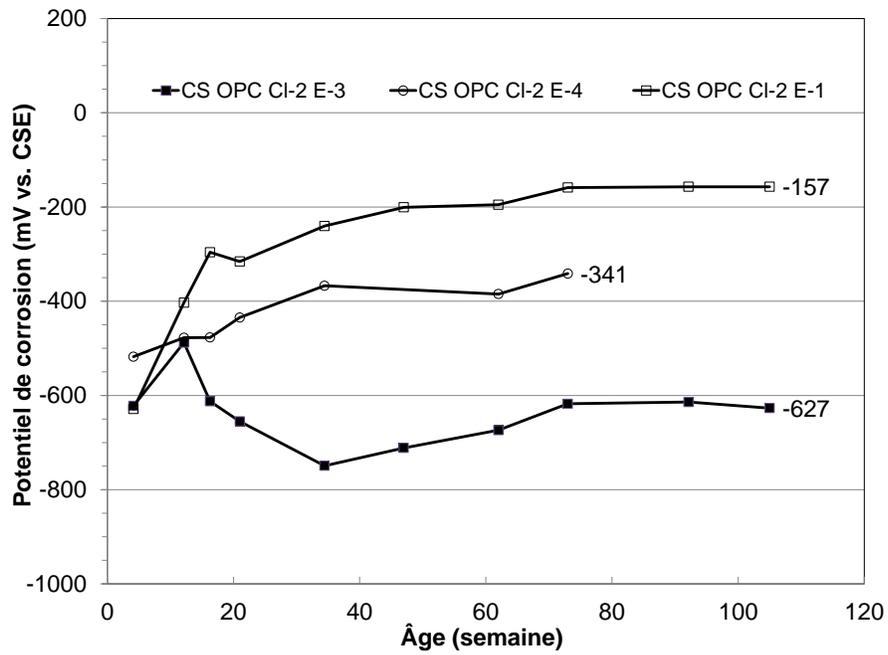


a) Acier galvanisé

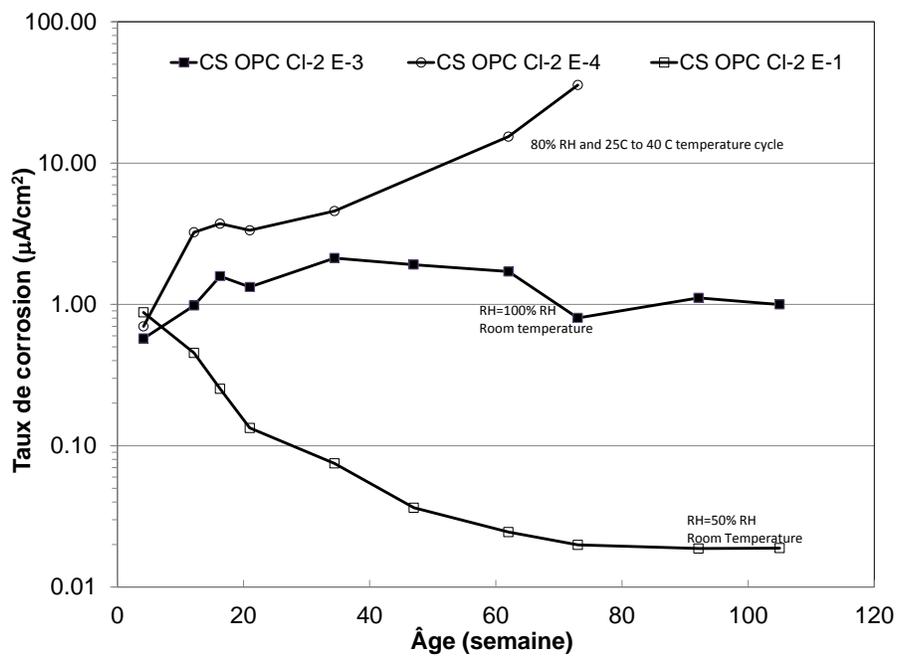


b) Acier au carbone

Figure 33 Effet de la teneur en humidité sur le potentiel de corrosion à l'état passif : a) acier galvanisé et b) acier au carbone

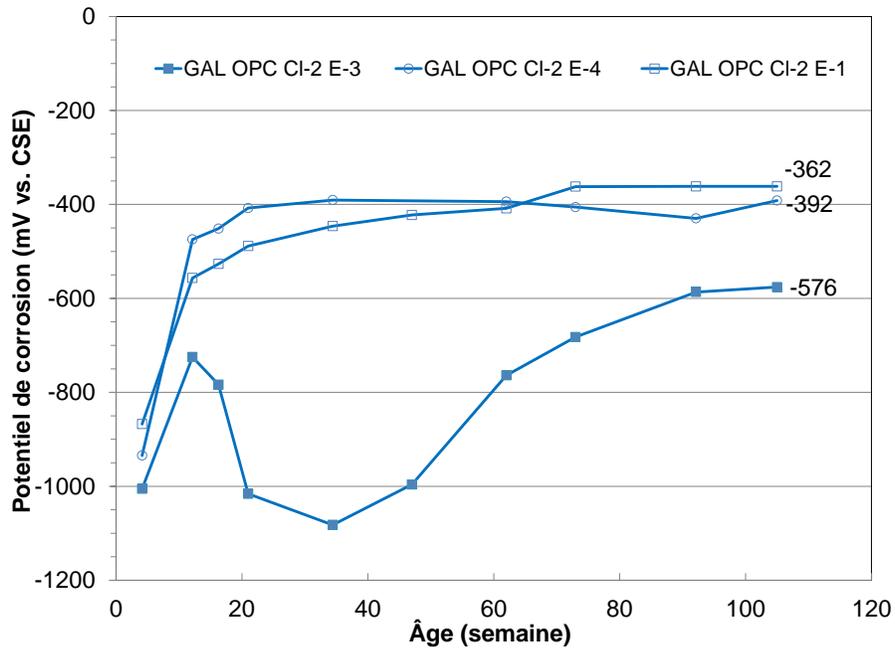


a) E_{corr}

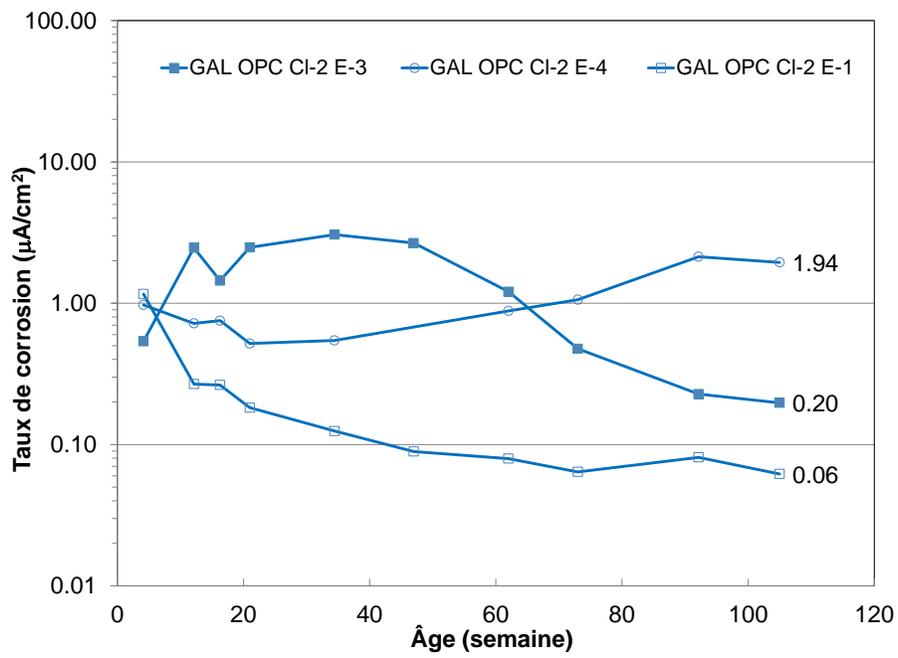


b) I_{corr}

Figure 34 Effet de la teneur en humidité sur la corrosion de l'acier au carbone : a) E_{corr} et b) I_{corr}



a) E_{corr}



b) I_{corr}

Figure 35 Effet de la teneur en humidité sur la corrosion de l'acier galvanisé : a) E_{corr} et b) I_{corr}

3.3 Effet de la teneur en humidité dans le béton

Comme le montre l'analyse qui précède, différents environnements ont mené à différents comportements en corrosion tant de l'acier au carbone que de l'acier galvanisé. La présente section traite davantage de l'effet de la teneur en humidité sur l'état de corrosion réel mesuré par le taux de corrosion et son effet sur les indicateurs de l'état de corrosion, dont le potentiel de corrosion et la résistivité du béton. Elle vise une meilleure compréhension de l'évaluation de l'état de la corrosion au moyen de ces indicateurs.

3.3.1 Effet de la teneur en humidité sur le taux de corrosion

Après avoir été exposé à des environnements ambiants de diverses humidités relatives, le béton au point d'équilibre aura différentes teneurs en humidité. Une courbe de sorption du béton à la Figure 36 (Cunningham, 2008) donne une idée générale de la corrélation. Par exemple, un béton pourrait avoir 3,5 % de teneur en humidité lorsqu'il est en équilibre avec l'air ambiant à une HR de 50 %, ce qui représente 50 % du niveau de saturation dans l'hypothèse que 7 % du niveau d'humidité est en équilibre avec une humidité relative de 100 %. Il convient de noter que la corrélation entre la teneur en humidité du béton et l'humidité relative de l'environnement ambiant est beaucoup plus complexe, comme le montre la Figure 36, en raison de nombreux autres facteurs cruciaux comme la formulation du béton et le trajet de désorption ou d'adsorption. Malgré cela, nous discuterons de l'impact de la teneur en humidité dans les prismes de béton en nous basant sur l'humidité relative ambiante respective de ceux-ci dans les quatre environnements.

La teneur en humidité du béton est une composante clé dans de nombreux processus de détérioration et son rôle dans le processus de corrosion est double : i) transport des matières nécessaires à la réaction de corrosion : gaz, eau et ions, comme O_2 , CO_2 et Cl^- , etc. (Nilsson, 1995), comme l'illustre la Figure 37, et ii) participation aux réactions chimiques comme électrolyte. La Figure 38 montre l'impact de la teneur en humidité sur les taux de corrosion de l'acier au carbone et de l'acier galvanisé dans les mélanges OPC, mesurées après 105 semaines dans l'environnement E-1 à une HR de 50 %, l'environnement E-4 à une HR de 80 % et l'environnement E-3 à une HR de 100 %, sauf que la courbe (CS OPC CI-2) pour l'acier au carbone a été obtenue à 73 semaines, après quoi les prismes à armature d'acier au carbone dans l'environnement E-4 ont été délaminés. Clairement, avec une quantité suffisante de chlorures dans le béton pour initier un état de corrosion active, le taux de corrosion n'a pas augmenté régulièrement avec la teneur en humidité. Le taux de corrosion le plus élevé est au contraire survenu dans l'environnement E-4 à une HR de 80 %. Ces constatations expérimentales ont confirmé les spéculations de longue date concernant la possibilité qu'une corrosion rapide se produise entre l'état sec et l'état saturé (Tuutti, 1982; Nilsson, 1995).

La raison en est que l'humidité dans le béton joue des rôles opposés dans le processus de corrosion, comme le montre la Figure 37. Elle retarde l'intrusion de gaz comme l'oxygène (O_2), qui est nécessaire à la réaction de corrosion, mais elle facilite la réaction de corrosion en tant qu'électrolyte. Elle facilite également le transport des ions chlorure, ce qui n'était pas pertinent pour les prismes de béton avec des chlorures prémélangés. Le taux de corrosion peut donc être bas dans des conditions sèches en raison de l'absence d'électrolyte et bas également dans des conditions saturées en raison d'un manque d'oxygène. On a constaté que les états de corrosion optimaux surviennent lorsque l'enrobage de béton a des niveaux de saturation de l'humidité se situant entre 60 % et 70 % (López et González, 1993), ce qui correspond approximativement à un environnement ambiant d'une HR de 70 % à 85 % selon la courbe de sorption de la Figure 36. L'environnement E-4 à une HR de 80 % de la présente étude se situait dans cette plage optimale où la corrosion s'est révélée être la plus rapide.

L'effet de la teneur en chlorures sur le taux de corrosion, comparativement à l'effet de la teneur en humidité, est montré à la Figure 39. Le taux de corrosion a augmenté substantiellement avec la teneur

en chlorures tant pour l'acier au carbone que pour l'acier galvanisé, mais le taux de corrosion de l'acier au carbone a augmenté beaucoup plus rapidement que celle de l'acier galvanisé. Si l'on compare la Figure 38 et la Figure 39, on peut tirer les conclusions qui suivent relativement aux effets de l'humidité et de la teneur en chlorures sur le taux de corrosion.

1. La teneur en humidité et la teneur en chlorures sont des paramètres clés du taux de corrosion de l'acier au carbone et de l'acier galvanisé. Les deux sont nécessaires pour que la corrosion active se produise. Par exemple, même avec 2 % de chlorures, les deux aciers peuvent présenter un taux de corrosion négligeable ou une absence de corrosion dans du béton sec.
2. Ces constatations impliquent que tant la teneur en chlorures que la teneur en humidité sont des données nécessaires à une évaluation fiable de la corrosion lorsqu'une mesure du taux de corrosion n'est pas disponible.
3. Contrairement à ce qui se passe avec la teneur en chlorures, le taux de corrosion n'augmente pas régulièrement parallèlement à la teneur en humidité.

Sur la base du raisonnement que la corrosion dépend largement de la teneur en humidité du béton et de la carbonatation et/ou de l'attaque par les chlorures, le taux de corrosion peut être estimé à partir de l'état d'exposition d'un ouvrage en béton comme le montre le Tableau 11, conformément à la recommandation du TC-154 de la RILEM (Polder, 2001).

Tableau 11 Taux de corrosion prévus dans du béton non protégé et dans l'environnement (Polder, 2001)

Cause	Environnement	Taux/état de corrosion
Carbonatation	Intérieur sec	Négligeables
	Extérieur : protégé contre la pluie et les éclaboussures	Modérés
	Extérieur : Mouillage et séchage en alternance	Élevés
Chlorures	Intérieur sec	Modérés
	Extérieur : protégé contre la pluie et les éclaboussures	Élevés
	Extérieur : Mouillage et séchage en alternance	Très élevés

3.3.2 Effet de la teneur en humidité sur les indicateurs de l'état de corrosion

La section 3.3.1 a étudié l'effet de la teneur en humidité dans le béton sur l'état de corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone, et la présente section traite de la façon dont cet effet influe sur le potentiel de corrosion et la résistivité du béton qui sont utilisés pour l'évaluation in situ de l'état. La Figure 40 et la Figure 41 montrent les potentiels de corrosion de l'acier au carbone et de l'acier galvanisé en fonction de la teneur en humidité et de la teneur en chlorures, respectivement. Contrairement au taux de corrosion, le potentiel de corrosion des deux aciers est devenu régulièrement plus négatif à mesure que la teneur en chlorures ou le niveau d'humidité dans le béton augmentaient, ce qui montre que la corrélation empirique entre le potentiel de corrosion (E_{corr}) et le $\log(I_{corr})$, selon laquelle un potentiel de corrosion plus négatif signifie un taux de corrosion plus élevé, n'est pas applicable lorsque la teneur en humidité est différente.

Contrairement aux conditions en laboratoire contrôlées, toutefois, la teneur en humidité du béton au niveau des barres d'armature sur le terrain, en particulier sur les tabliers de ponts et dans les garages de stationnement, varie avec l'humidité relative ambiante, l'emplacement et le temps, et un ouvrage en béton peut également présenter différentes teneurs en humidité à différents endroits. La présente étude montre que les potentiels de corrosion les plus négatifs ne correspondent pas nécessairement à l'état de corrosion le plus rapide.

La résistivité du béton est un autre indicateur pour l'évaluation de l'état de la corrosion. Comme le potentiel de corrosion, elle change également régulièrement avec la teneur en chlorures (Figure 42) et le niveau d'humidité (Figure 43). À partir de ces données limitées, il semble que la résistivité du béton ait diminué de façon exponentielle avec la teneur en chlorures et le niveau d'humidité. Une résistivité dans un environnement à une HR de 80 % qui serait plus grande que dans un environnement à une HR de 100 % ne signifie pas non plus un taux de corrosion plus bas.

Il est également important de souligner que le ratio e/c a un impact beaucoup plus grand sur la résistivité du béton que sur le potentiel de corrosion de la corrosion active, tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone. Comme le montre le Tableau 12, la résistivité du mélange HPC à une HR de 100 % était presque cinq fois plus élevée que celle du mélange OPC mesurée à 105 semaines d'âge, tandis que les potentiels de corrosion et les taux de corrosion réelles n'étaient pas nécessairement plus positifs ou bas dans le mélange HPC que dans le mélange OPC. En raison de l'énorme impact du ratio e/c , il ne faut pas se fier uniquement à la résistivité du béton mesurée sur le terrain pour l'évaluation du risque de corrosion s'il n'existe pas d'information de référence, en particulier l'information sur le ratio e/c . Pour résumer, il est important de comprendre ces facteurs clés que sont la teneur en humidité, la teneur en chlorures et le ratio e/c , de même que leur impact sur l'état de corrosion réel et ses indicateurs, pour obtenir l'information cruciale à une évaluation plus fiable de l'état de la corrosion.

Tableau 12 Impact du ratio e/c sur la résistivité du béton et le potentiel de corrosion à 105 semaines d'âge

Béton avec 2 % de chlorures dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %		OPC e/c=0,5	HPC e/c=0,37
Résistivité du béton		73 ohms.m	356 ohms.m
Acier au carbone	Potentiel de corrosion	-627 mV	-509 mV
	Taux de corrosion	1,0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0,68 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Acier galvanisé	Potentiel de corrosion	-576 mV	-686 mV
	Taux de corrosion	0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	1,04 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

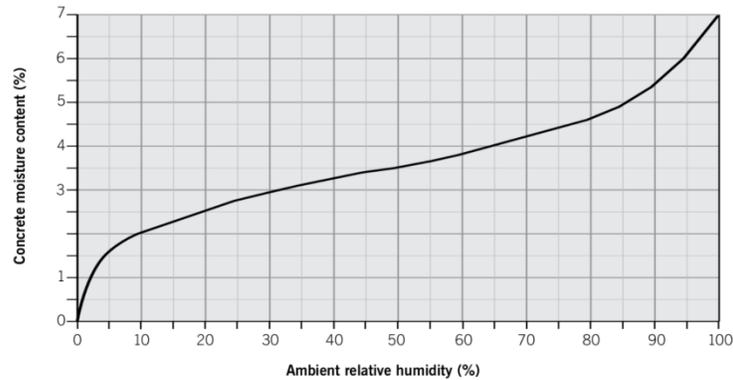


Figure 36 Courbe de sorption du béton (adapté de Cunningham, 2008)

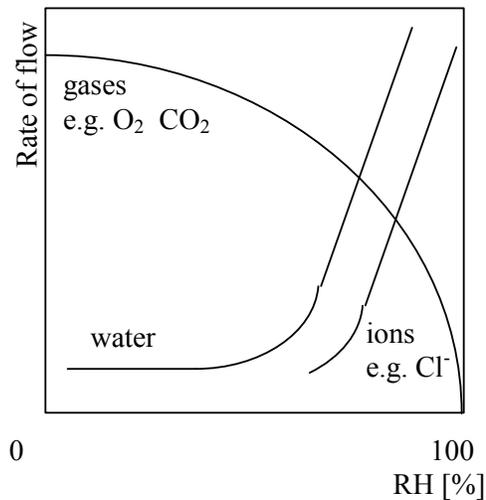


Figure 37 Impact de la teneur en humidité sur le taux de pénétration de substances agressives

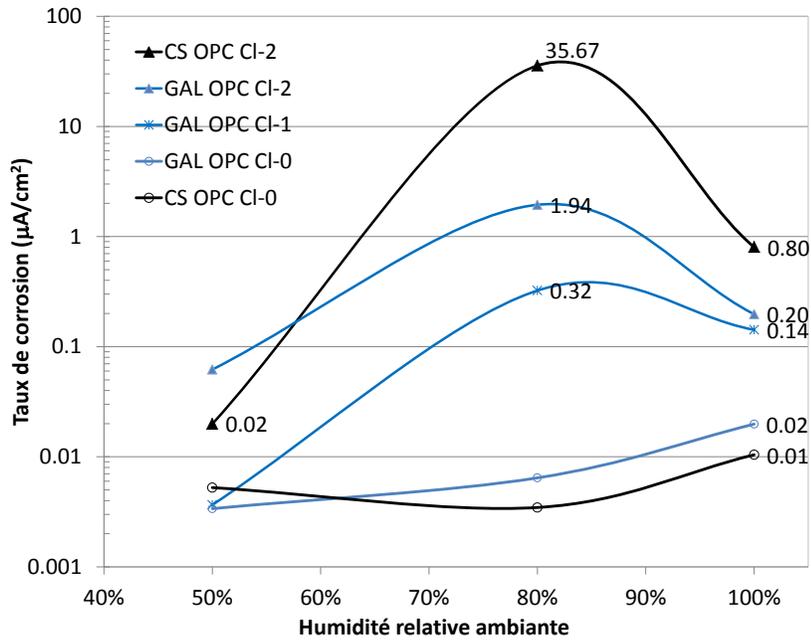


Figure 38 Impact de la teneur en humidité sur le taux de corrosion

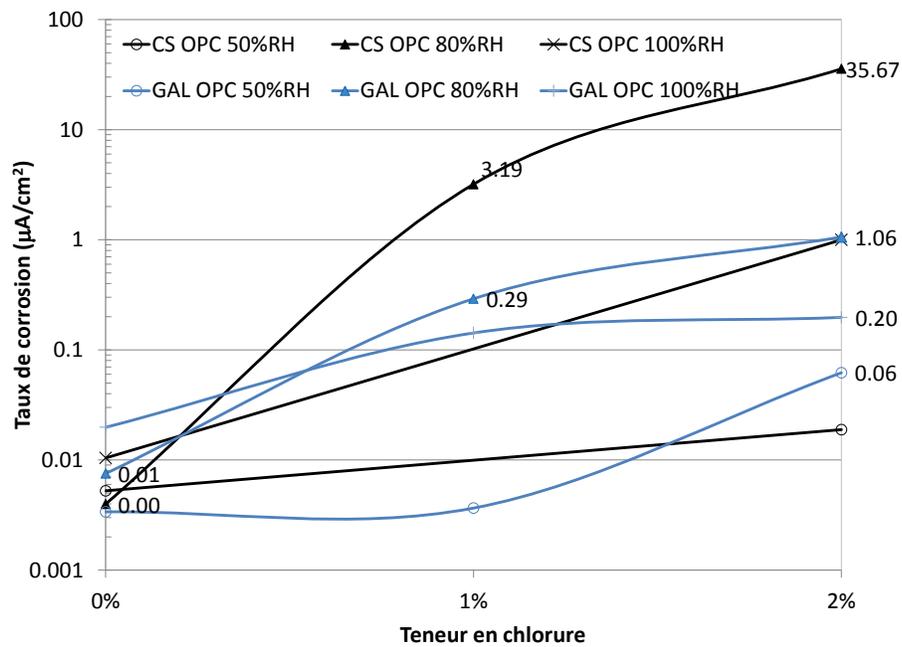


Figure 39 Impact de la teneur en chlorures sur le taux de corrosion

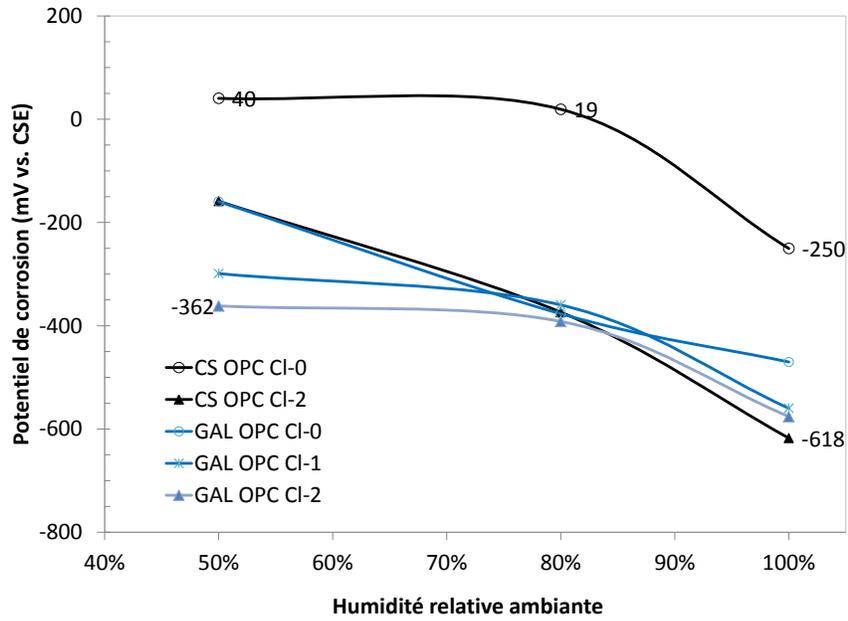


Figure 40 Impact de la teneur en humidité sur le potentiel de corrosion

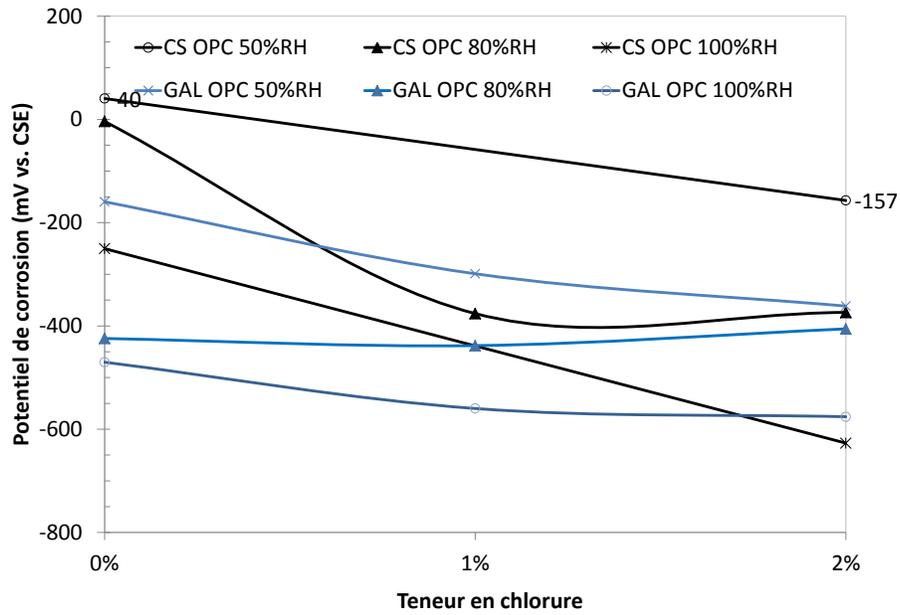


Figure 41 Impact de la teneur en chlorures sur le potentiel de corrosion

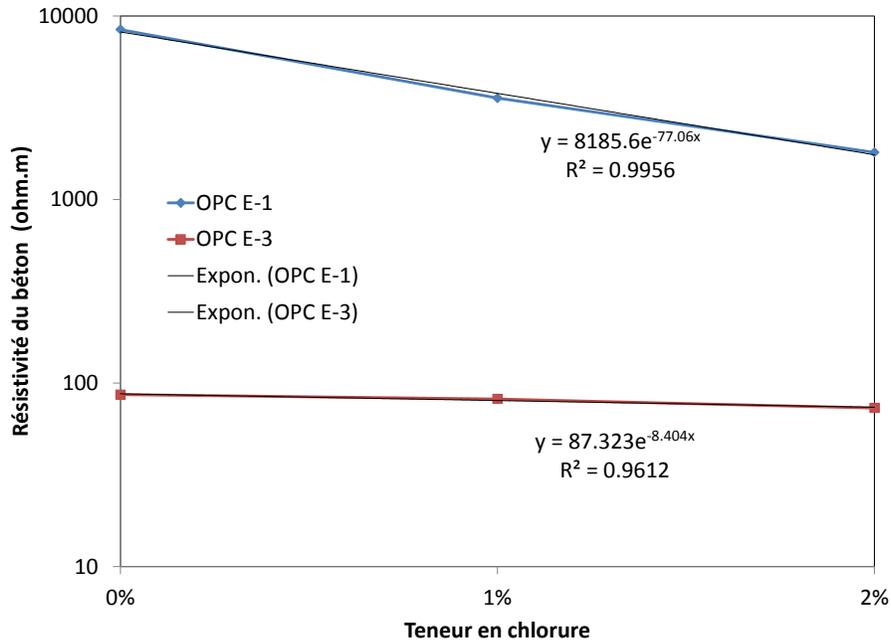


Figure 42 Impact de la teneur en chlorures sur la résistivité du béton

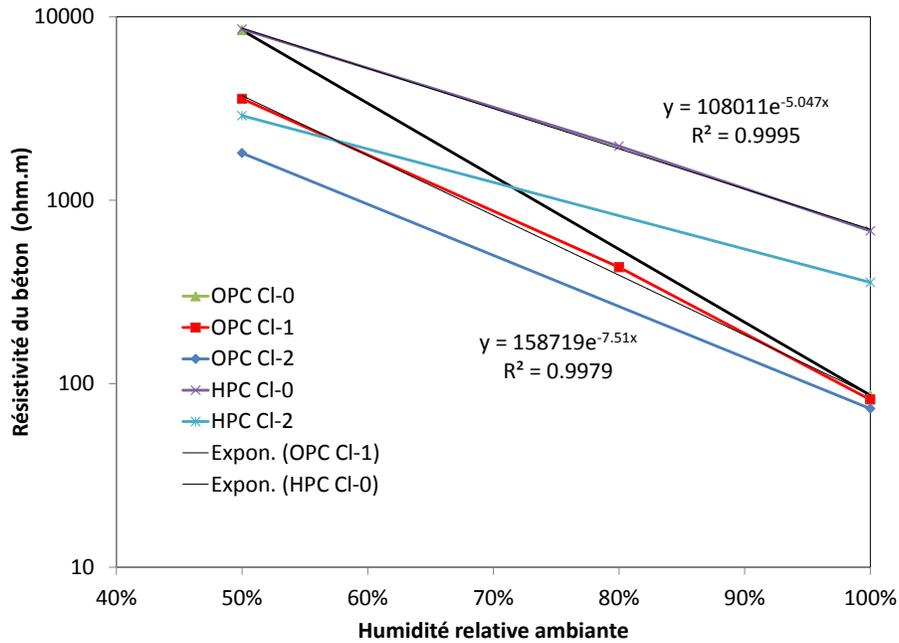


Figure 43 Impact de la teneur en humidité sur la résistivité du béton

3.4 Résistance à la corrosion dans des dalles de béton soumises à un cycle de mouillage-séchage

L'acier galvanisé et l'acier au carbone dans les dalles de béton soumises à un cycle de mouillage-séchage ont été conçus pour permettre d'étudier : i) l'effet de la préfissuration du béton, ii) l'utilisation d'un inhibiteur de corrosion à base de nitrites de calcium (DCI), iii) l'utilisation d'un mélange HPC et iv) l'effet d'un endommagement superficiel intentionnel du revêtement galvanisé. Ces paramètres ont été conçus pour permettre de mieux comprendre la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé par rapport à celle de l'acier au carbone.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les prismes de béton avec différents niveaux de chlorures prémélangés exposés à différents environnements ont permis d'établir la résistance à la corrosion dans des conditions extrêmes et entre celles-ci. En revanche, les dalles de béton soumises à un cycle de mouillage-séchage ont été utilisées pour simuler le processus de pénétration des chlorures. Les conditions d'exposition environnementale de ces dalles de béton sont similaires à l'environnement E-3 pour les prismes de béton dans une humidité relative de 100 % et à la température ambiante. Dans une partie de l'analyse qui suit, donc, les résistances à la corrosion dans les prismes de béton dans l'environnement E-3 avec 0 % et 2 % de chlorures seront utilisées comme références; p. ex. GAL OPC Cl-0 E-3 et GAL OPC Cl-2 E-3 renvoient à l'acier galvanisé dans le mélange OPC avec 0 % et 2 % de chlorures dans l'environnement E-3.

La Figure 44 montre la résistance à la corrosion de l'acier au carbone avec le temps dans les dalles soumises à un cycle de mouillage-séchage. Les mesures de potentiel de corrosion et de taux de corrosion montrent quatre résultats distinctifs en matière de résistance à la corrosion de l'acier au carbone dans une dalle OPC (ligne noire), dans une dalle OPC avec préfissuration du béton, dans une dalle OPC renfermant un inhibiteur de corrosion (dalle DCI) et dans une dalle HPC, respectivement. Les taux de corrosion ont été les plus faibles dans la dalle HPC et les plus élevés dans la dalle OPC avec préfissuration, et l'ordre a été inversé pour les potentiels de corrosion comme on pouvait s'y attendre. Chacun des quatre types de dalles soumises à un cycle de mouillage-séchage avait deux répliqués de barres d'acier au carbone, ce qui a démontré une résistance hautement reproductible sauf dans la dalle DCI. Une barre d'acier au carbone dans la dalle DCI avait un taux de corrosion inférieur aux barres dans la dalle OPC, mais l'autre barre s'est comportée comme les deux barres dans la dalle OPC.

La Figure 45 montre l'effet de la préfissuration dans le béton sur la corrosion de l'acier galvanisé. Les huit barres au total, quatre dans la dalle OPC avec préfissuration et quatre sans, ont été très similaires du point de vue de leur potentiel de corrosion et leur taux de corrosion, ce qui donne à penser que les barres d'acier galvanisé n'étaient pas sensibles à la fissuration du béton même lorsqu'elles étaient soumises au cycle de mouillage-séchage juste après la cure par humidification de 28 jours.

Contrairement à l'acier au carbone, les quatre répliqués de barres d'acier galvanisé ont montré une résistance uniforme et considérablement améliorée par l'utilisation de l'inhibiteur de corrosion DCI (lignes vertes), comme on peut le voir à la Figure 46. Comparativement à l'acier galvanisé dans la dalle OPC, l'inhibiteur de corrosion a clairement prolongé le délai d'initiation de la corrosion, qui a été de 40 à 60 semaines dans la dalle DCI, pour environ 20 semaines dans la dalle OPC. Il est à noter que le délai d'initiation de la corrosion a été obtenu dans un contexte d'expériences en laboratoire accélérées non représentatif des conditions sur le terrain. En outre, les taux de corrosion dans la dalle DCI ont également été uniformément plus bas que dans la dalle OPC et les potentiels de corrosion ont été uniformément plus positifs que dans la dalle OPC.

Pour faciliter les comparaisons, les Figure 47 a) et b) montrent les taux de corrosion moyens des répliqués de barres d'acier galvanisé et d'acier au carbone, respectivement. Les observations sur la résistance à la corrosion des barres sont présentées ci-dessous.

1. Si la préfissuration dans le béton a clairement arrêté la passivation de l'acier galvanisé (la courbe en rouge à la Figure 47), les taux de corrosion à un âge plus avancé ont montré une différence négligeable par rapport à ceux de la dalle OPC sans préfissuration. Pour l'acier au carbone, au contraire, la préfissuration dans le béton a causé une augmentation significative du taux de corrosion par rapport à la dalle OPC sans préfissuration, ce qui implique qu'une fissuration précoce et prématurée du béton aurait un effet beaucoup plus négatif sur l'acier au carbone que sur l'acier galvanisé. Macias et Andrade (1990) ont montré qu'il existait une différence négligeable entre les taux de corrosion de l'acier galvanisé pour trois concentrations très différentes de NaCl, soit 0,3 M, 0,6 M et 0,9 M, ce qui pourrait aider à expliquer l'effet négligeable de la préfissuration dans le béton sur la corrosion de l'acier galvanisé, ce dernier n'étant pas sensible à la teneur en chlorures une fois la corrosion est initiée.

2. L'utilisation de l'inhibiteur de corrosion DCI n'a pas seulement prolongé d'une moyenne de 20 semaines à environ 50 semaines le délai d'initiation de la corrosion des quatre barres d'acier galvanisé, mais a également réduit le taux de corrosion de 1 à 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, soit environ cinq fois. Les potentiels de corrosion plus positifs dans la dalle DCI ont confirmé que le mécanisme était attribuable à l'effet de polarisation anodique des nitrites de calcium (Berke et Rosenberg, 1990). Dans notre étude, l'effet de l'inhibiteur de corrosion n'a pas été concluant pour l'acier au carbone, car il n'a pas fonctionné sur un des deux répliqués de barres.

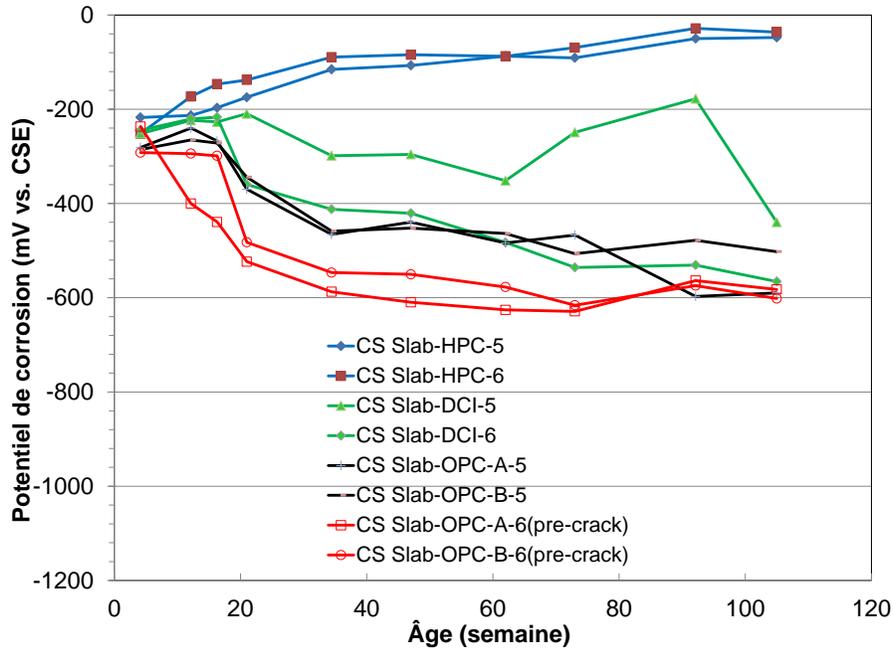
La Figure 47 montre également les courbes en pointillé noir pour les prismes de béton OPC dans l'environnement E-3 avec 0 % et 2 % de chlorures. On s'attendait que la résistance à la corrosion à partir du début dans les dalles OPC se situe entre ces deux teneurs en chlorures. Avec le temps, les taux de corrosion dans les dalles pourraient finir par dépasser ceux des prismes avec 2 % de chlorures, vu que plus de chlorures pénètrent dans les dalles. Cette prédiction a été confirmée en ce que les taux de corrosion obtenus dans la dalle OPC ont en fait dépassé par la suite les taux de corrosion dans les prismes OPC avec 2 % de chlorures. Le Tableau 13 montre les teneurs en chlorures (ASTM C 1152/C 1152M-04) à trois profondeurs dans les quatre sites de carottage de chaque type de dalles, carottage effectué à 105 semaines d'âge après la dernière ronde de mesures. Les teneurs en chlorures à une profondeur de 20 mm autour du niveau des barres étaient de 2,02 % par masse de ciment dans la dalle DCI et de 2,60 % dans la dalle OPC, ce qui, dans les deux cas, est au-dessus des 2 % de chlorures prémélangés dans les prismes de béton.

La Figure 48 montre que dans la dalle HPC, si le potentiel de corrosion des barres d'acier galvanisé était plus négatif que celui des barres d'acier au carbone par plus de 250 mV en moyenne, les deux aciers sont demeurés à l'état passif tout au long de la période de contrôle. Le Tableau 13 montre que la teneur en chlorures au niveau des barres d'armature était de 0,69 % en moyenne par masse de ciment, soit environ quatre fois moins que dans la dalle OPC, ce qui démontre que l'utilisation du mélange HPC peut ralentir de façon significative la pénétration des chlorures et peut être une façon efficace d'améliorer la résistance à la corrosion des ouvrages en béton (Zhang et Lounis, 2006).

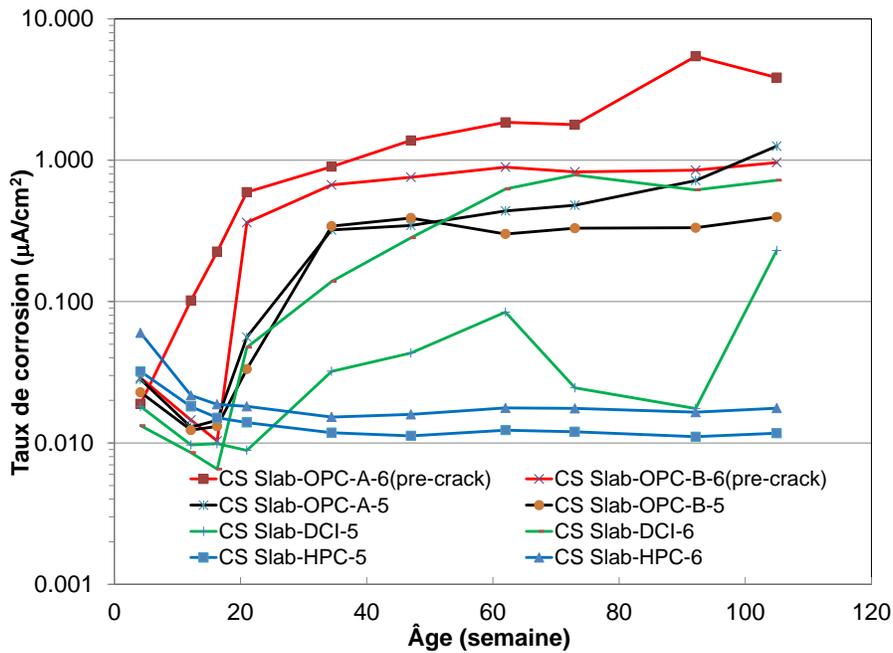
La Figure 49 montre la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé dont le revêtement galvanisé a été endommagé superficiellement de façon intentionnelle. Aucune différence n'a été trouvée du point de vue des taux de corrosion comparativement aux barres d'acier galvanisé intact. Les potentiels de corrosion ont été légèrement plus élevés que ceux de l'acier galvanisé intact, ce qui donne à penser que le revêtement de zinc agissait comme une anode protégeant l'acier au carbone exposé. Ceci montre qu'un endommagement mineur du revêtement galvanisé causé par le transport et/ou la manutention ne changera pas la nature protectrice de l'acier galvanisé contre une attaque par les chlorures.

Tableau 13 Teneur en chlorures dans des dalles de béton selon les normes ASTM C 1152/C 1152M-04

Dalles	Profondeur (mm)	Teneur en chlorures par masse de béton (%)						Teneur en chlorures par masse de ciment (%)
		Carotte 1	Carotte 2	Carotte 3	Carotte 4	Moyenne	Écart type	
OPC	10	0,56	0,59	0,54	0,55	0,56	0,017	3,66
	20	0,35	0,43	0,42	0,40	0,40	0,033	2,60
	30	0,30	0,32	0,32	0,31	0,31	0,009	2,03
HPC	10	0,42	0,37	0,49	0,53	0,45	0,063	2,42
	20	0,12	0,09	0,17	0,14	0,13	0,029	0,69
	30	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,002	0,08
OPC-DCI	10	0,66	0,65	0,54	0,75	0,65	0,074	4,23
	20	0,28	0,30	0,34	0,33	0,31	0,023	2,02
	30	0,23	0,25	0,28	0,29	0,26	0,022	1,71

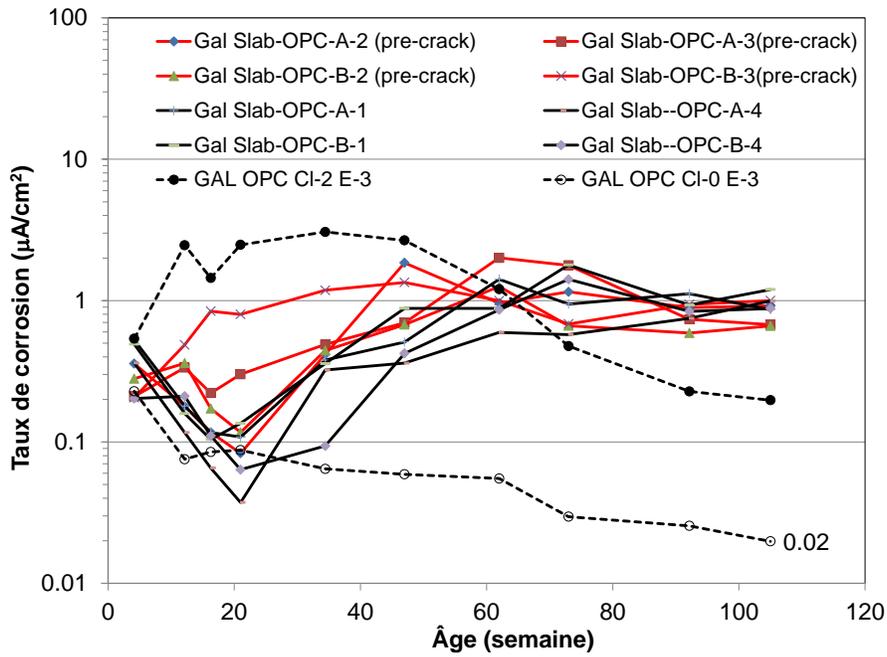


a) E_{corr}

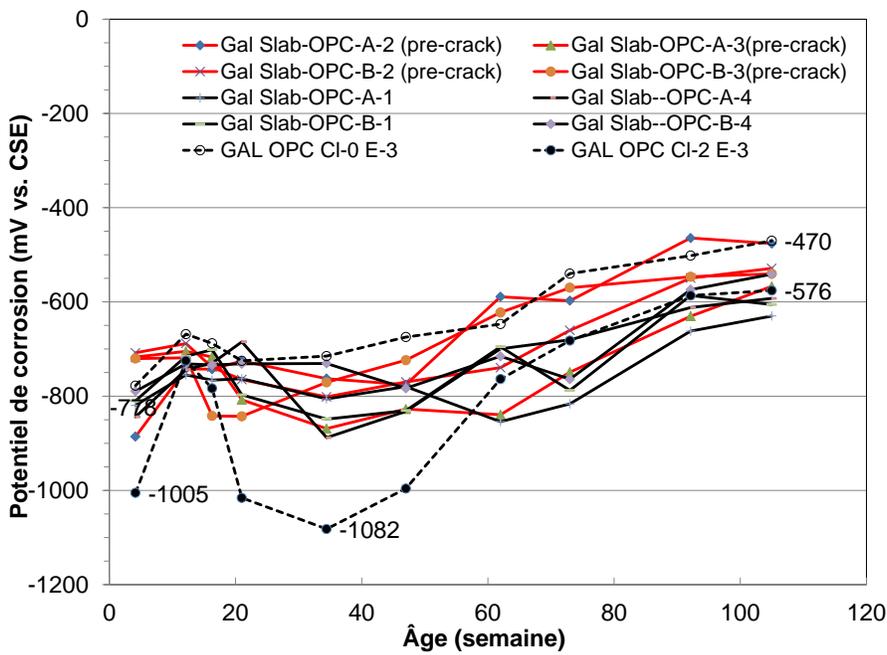


b) I_{corr}

Figure 44 Corrosion de l'acier au carbone dans des dalles soumises à un cycle de mouillage-séchage :
a) E_{corr} et b) I_{corr}

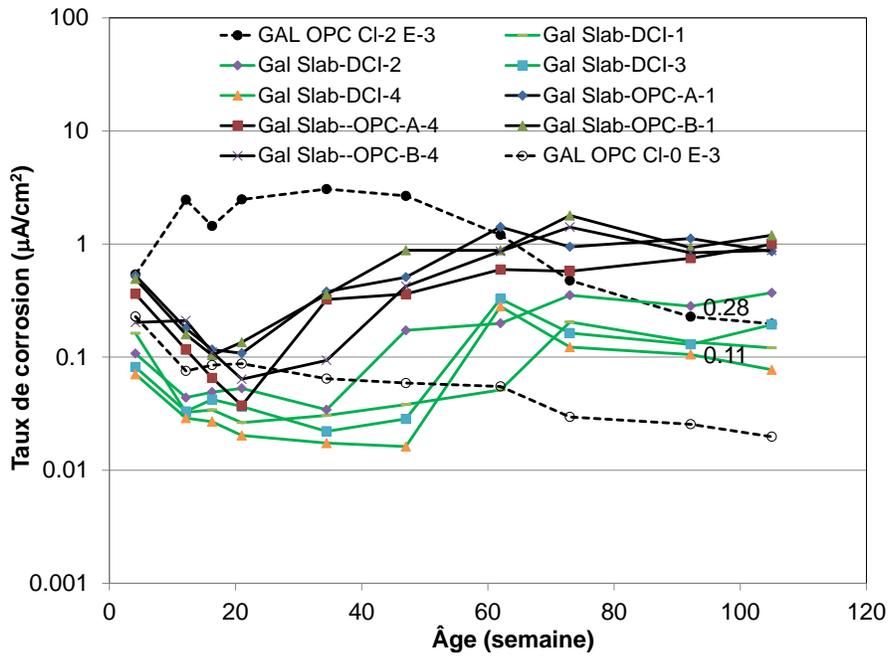


a) I_{corr}

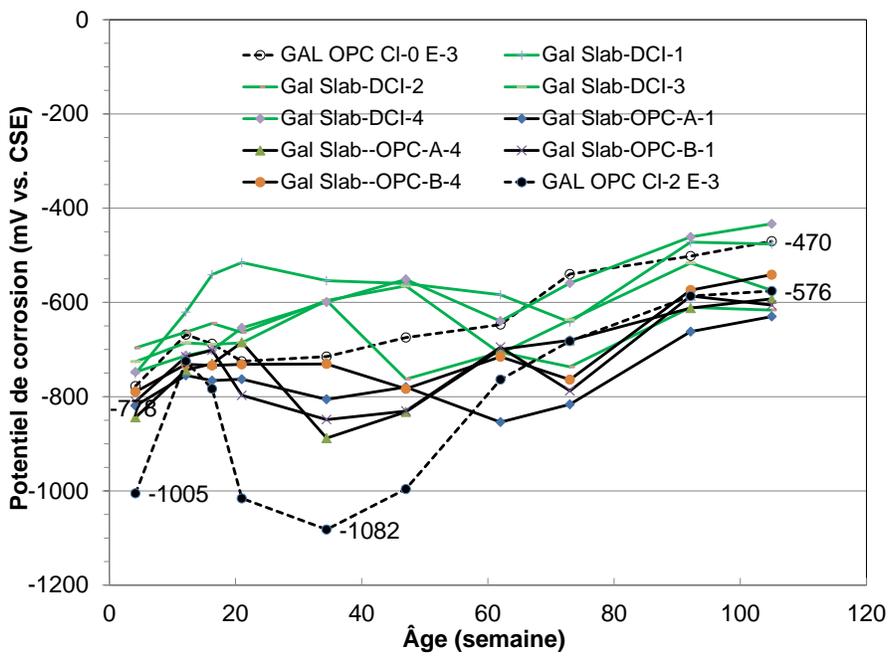


b) E_{corr}

Figure 45 Effet de la préfissuration du béton sur la corrosion de l'acier galvanisé : a) I_{corr} et b) E_{corr}

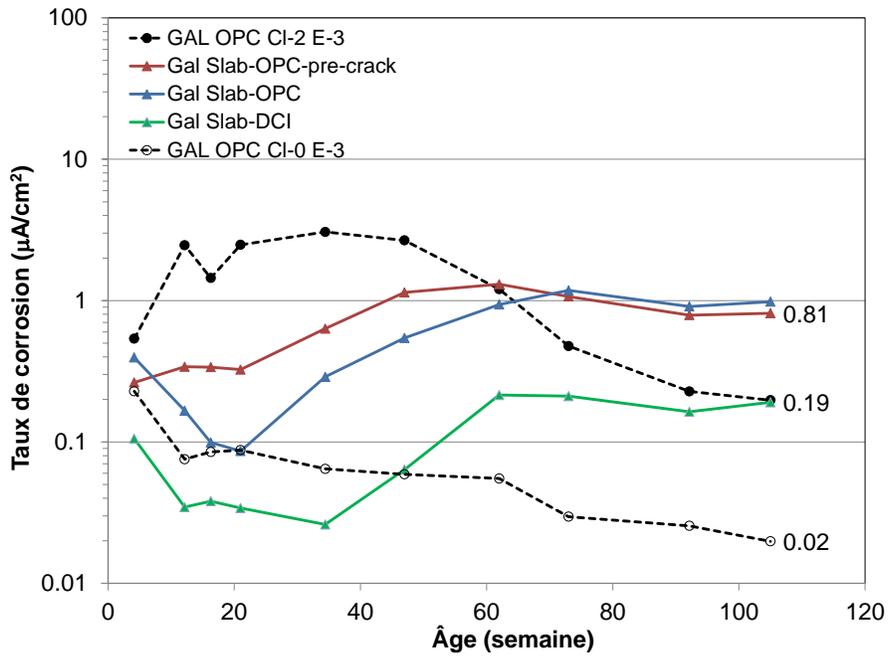


a) I_{corr}

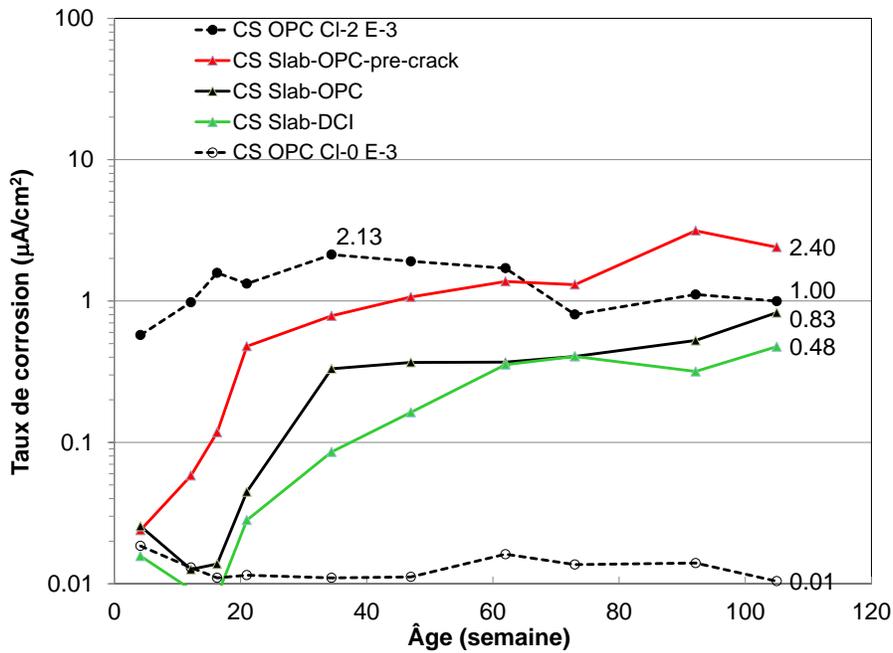


b) E_{corr}

Figure 46 Résistance à la corrosion de l'acier galvanisé dans des dalles OPC et DCI : a) I_{corr} et b) E_{corr}

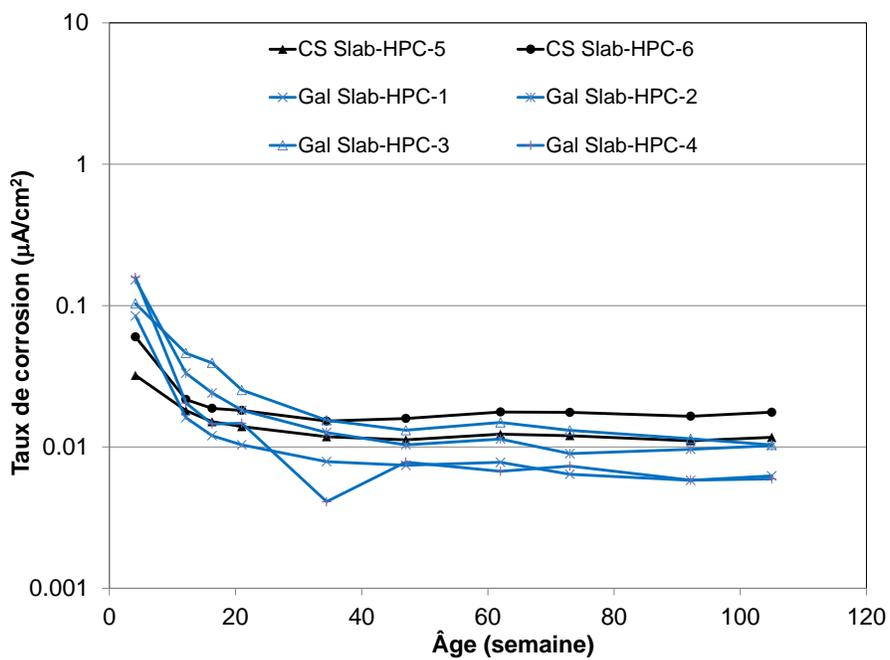


a) Acier galvanisé

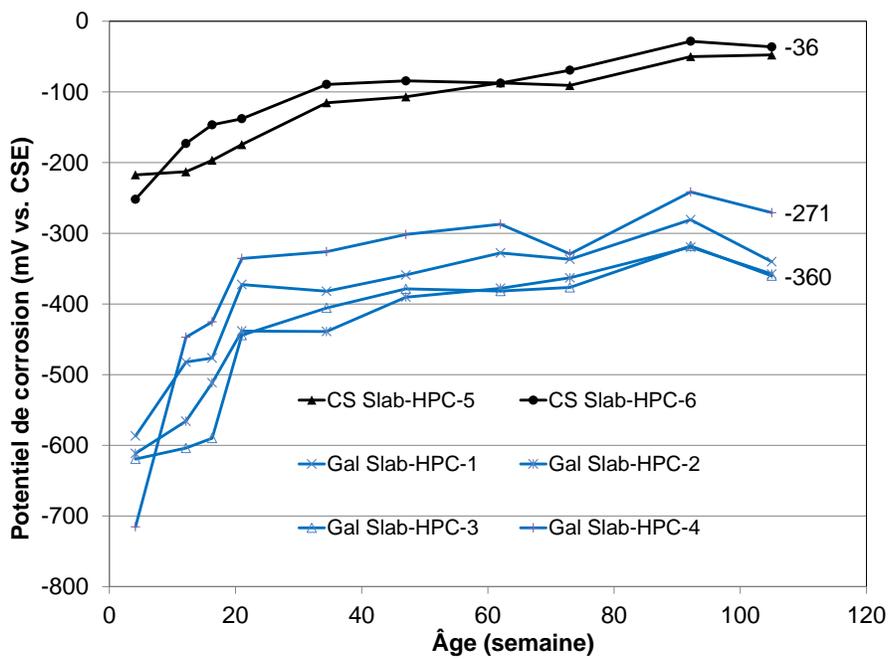


b) Acier au carbone

Figure 47 Résistance à la corrosion dans des dalles OPC : a) acier galvanisé et b) acier au carbone

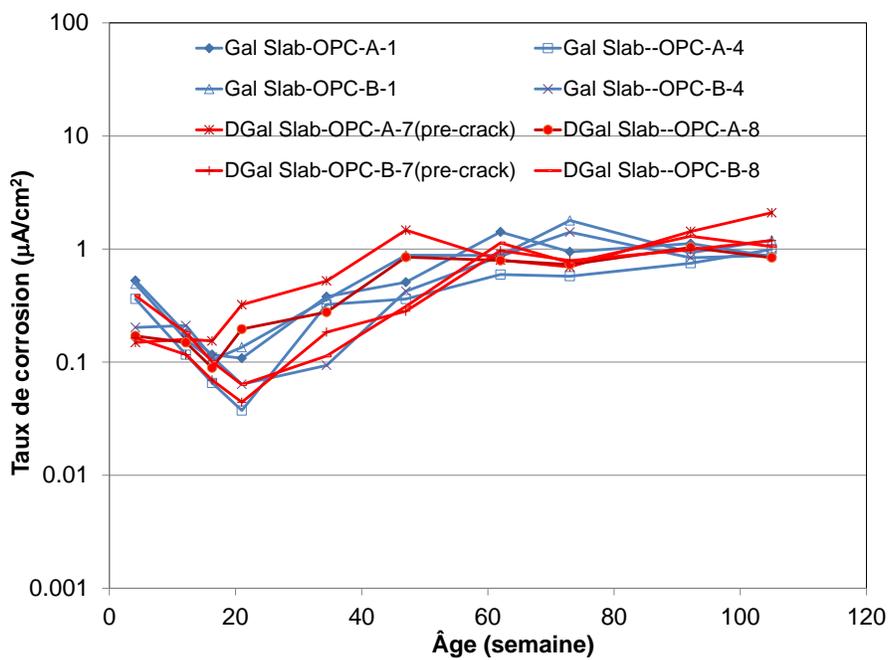


a) I_{corr}

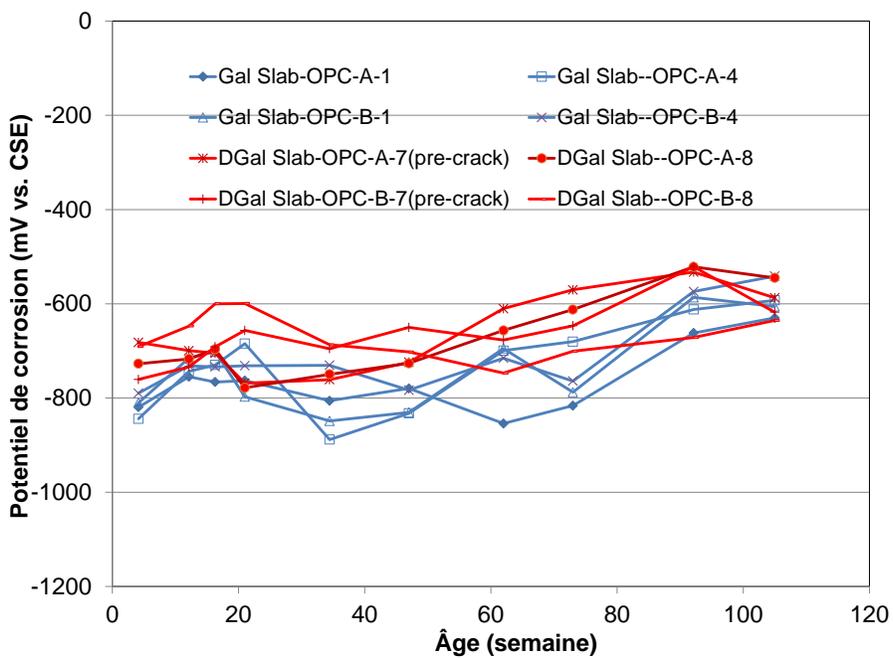


b) E_{corr}

Figure 48 Corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone dans des dalles HPC : a) I_{corr} et b) E_{corr}



a) I_{corr}



b) E_{corr}

Figure 49 Corrosion et endommagement superficiel de l'acier galvanisé : a) I_{corr} et b) E_{corr}

3.5 Résumé

Le présent chapitre a porté sur le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier galvanisé dans les mélanges de béton OPC et HPC dont la teneur en chlorures allait de zéro à une teneur élevée et qui étaient soumis à différents environnements allant d'une HR de 50 % à une HR de 100 %. L'analyse du taux de corrosion a permis une meilleure compréhension de la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé comparativement à l'acier au carbone, et l'analyse du potentiel de corrosion a visé à aider à comprendre l'utilisation de ce dernier dans l'évaluation de l'état des ouvrages en béton.

Résistance à la corrosion

Dans du béton fortement contaminé par les chlorures à la température ambiante, l'acier galvanisé a montré un taux de corrosion cinq fois inférieur à celle de l'acier au carbone au stade de la propagation. En raison de ces taux de corrosion inférieur et du volume moindre des produits de corrosion du zinc par rapport aux oxydes de fer, il a fallu beaucoup plus de temps pour que la corrosion de l'acier galvanisé cause la fissuration du béton, par rapport à la corrosion de l'acier au carbone. Un examen visuel a confirmé que le délai de fissuration du béton a été doublé dans les prismes de béton saturés.

Dans du béton fortement contaminé par les chlorures et un environnement de corrosion accélérée, il a été constaté que l'acier galvanisé résistait beaucoup mieux que l'acier au carbone en ayant et maintenant un taux de corrosion beaucoup plus bas que l'acier au carbone. Lorsque la teneur en chlorures était supérieure à une certaine valeur, le taux de corrosion de l'acier au carbone s'est révélé incapable de maintenir un niveau stable et a augmenté exponentiellement avec le temps, ce qui a mené à une accélération de la fissuration et de la délamination du béton, un phénomène qui a été observé sur l'acier au carbone dans le béton avec 2 % et 3 % de chlorures par masse de ciment. Le taux de corrosion de l'acier galvanisé est demeuré dix fois inférieur à celle de l'acier au carbone, comme en témoigne l'examen visuel du béton.

La teneur en humidité dans le béton s'est révélée jouer un rôle important en ce que son absence peut amener la corrosion active à un taux de corrosion négligeable, même dans du béton fortement contaminé avec 2 % de chlorures. Contrairement à l'effet de la teneur en chlorures, toutefois, l'augmentation de la teneur en humidité n'a pas causé une augmentation régulière du taux de corrosion et la corrosion la plus rapide s'est produite à environ 80 % d'humidité relative ambiante.

Avec le même niveau de teneur en chlorures, il a été constaté que le ratio e/c n'influe pas beaucoup sur le taux de corrosion. Ceci signifie qu'une fois la corrosion active initiée, on peut s'attendre à un taux de corrosion similaire tant dans le mélange OPC que dans le mélange HPC, quoique ce dernier mélange puisse, sur le terrain, retarder l'initiation de la corrosion en ralentissant la pénétration des chlorures, comme le confirme l'étude des dalles soumises à un cycle de mouillage-séchage.

En outre, les dalles soumises à un cycle de mouillage-séchage montrent que l'inhibiteur de corrosion à base de nitrites de calcium est une façon efficace d'améliorer la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé. Non seulement retarde-t-il l'initiation de la corrosion de l'acier galvanisé, mais il réduit également le taux de corrosion environ cinq fois. La pré-fissuration dans le béton s'est révélée avoir un effet négligeable sur la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé, mais a eu un effet beaucoup plus négatif sur l'acier au carbone. Les taux de corrosion de l'acier galvanisé dont le revêtement de zinc avait été gravement endommagé ne présentaient pas de différence par rapport à celles des barres d'acier galvanisé intact, ce qui donne à penser qu'un endommagement mineur du revêtement galvanisé causé par le transport et/ou la manutention n'aurait d'impact nuisible sur la nature protectrice de l'acier galvanisé contre les attaques par les chlorures.

Évaluation de l'état

La teneur en chlorures et la teneur en humidité dans le béton sont deux facteurs qui peuvent faire passer l'état de corrosion de l'armature en acier dans le béton de la corrosion active à l'absence de corrosion. La connaissance de ces deux paramètres mènerait à une évaluation fiable de l'état de la corrosion lorsqu'une mesure du taux de corrosion n'est pas disponible.

La teneur en humidité dans le béton et le ratio e/c de la formulation du béton ont toutefois montré un impact différent sur le potentiel de corrosion et le taux de corrosion. Ils peuvent même avoir un impact opposé sur le potentiel de corrosion et le taux de corrosion du point de vue de leurs représentations respectives de l'état de corrosion. Plus la teneur en humidité dans le béton est élevée, plus le potentiel de corrosion mesuré sera négatif. La corrosion la plus rapide ne s'est toutefois pas produite dans le béton saturé, mais dans le béton exposé à une humidité relative d'environ 80 %. Un potentiel très négatif, s'il est causé par la teneur en humidité élevée du béton et donc un manque d'oxygène, ne signifie pas nécessairement un taux de corrosion plus élevé. La règle générale selon laquelle le taux de corrosion est plus élevé lorsque le potentiel de corrosion est plus négatif s'applique seulement à l'acier dans du béton exposé à des conditions similaires.

S'il a été démontré que le ratio e/c n'influe pas beaucoup sur le taux de corrosion dans le mélange OPC et le mélange HPC ayant la même teneur en chlorures, il a eu une incidence sur les lectures de potentiel de corrosion lorsque l'armature en acier était à l'état passif d'absence de corrosion. Des lectures beaucoup plus négatives ont été obtenues pour le mélange OPC par rapport au mélange HPC, en particulier à l'état saturé. On peut s'attendre à une différence de plus de 200 mV entre les mélanges OPC et HPC saturés tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone. De plus, il a été démontré que le ratio e/c influait sur la résistivité du béton beaucoup plus que la teneur en chlorures. La résistivité du béton dans du mélange HPC est demeurée beaucoup plus élevée que 200 ohms.m, même dans du béton fortement contaminé et saturé. La résistivité du mélange HPC a été cinq fois supérieure à la résistivité du mélange OPC, mais le taux de corrosion dans le mélange HPC a été similaire à le taux dans le mélange OPC, tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone, ce qui implique qu'une résistivité mesurée sur le terrain sans information de référence ne peut pas servir à l'évaluation de l'état de la corrosion.

Dans l'état d'absence de corrosion, du fait du béton sans chlorures ou de l'absence d'humidité, l'acier galvanisé s'est révélé avoir un potentiel de corrosion beaucoup plus négatif que l'acier au carbone, quel que soit l'environnement, pouvant atteindre -350 mV. Dans le béton fortement contaminé et un environnement suffisamment humide pour que de la corrosion active se produise, les potentiels de corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone peuvent être similaires. Pour des potentiels de corrosion similaires, cependant, l'acier galvanisé avait un taux de corrosion beaucoup plus bas que l'acier au carbone, de cinq à dix fois plus bas selon les conditions d'exposition. De toute évidence, les lignes directrices relatives à l'évaluation de l'état de corrosion de l'acier galvanisé ne peuvent pas être les mêmes que les lignes directrices de la norme ASTM C 876 pour l'acier au carbone.

Les données expérimentales présentées visaient à fournir une meilleure compréhension de la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé par rapport à l'acier au carbone, ainsi qu'un large éventail d'états de corrosion conçus à partir des paramètres clés qui régissent le potentiel de corrosion et le taux de corrosion. Le chapitre a montré que l'état de corrosion tel qu'il est mesuré par le taux de corrosion est un effet complexe et combiné de la teneur en chlorures et de l'état d'humidité du béton. Pour compliquer encore plus les choses, le potentiel de corrosion, qui est également un effet combiné de la teneur en chlorures et de l'état d'humidité ainsi que du ratio e/c de la formulation du béton, n'est pas touché de la même façon que le taux de corrosion par ces paramètres clés. Des outils statistiques seront utilisés pour analyser la corrélation complexe entre l'état de corrosion et le potentiel de corrosion de l'acier galvanisé, et élaborer les modèles et les lignes directrices en vue de l'évaluation de l'état de

corrosion au moyen du potentiel de corrosion tel qu'il est mesuré par la technique des relevés de potentiel par demi-pile.

CHAPITRE 4 : ÉLABORATION DE MODÈLES ET DE LIGNES DIRECTRICES POUR ÉVALUER LA PROBABILITÉ DE CORROSION DE L'ACIER GALVANISÉ DANS LES OUVRAGES EN BÉTON

Le présent chapitre se compose de trois parties : i) une analyse statistique des données recueillies sur le taux de corrosion et le potentiel de corrosion (relevés de potentiel par demi-pile) qui améliore la compréhension que nous avons de la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone; ii) une partie portant sur l'élaboration de modèles et de lignes directrices, touchant l'utilisation du potentiel de corrosion pour l'évaluation de l'état de corrosion de l'acier galvanisé, équivalant aux lignes directrices de la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone; iii) une partie sur l'élaboration d'un modèle avancé qui calcule la probabilité de corrosion en tant que fonction continue du potentiel de corrosion.

4.1 Analyse statistique de la résistance à la corrosion

4.1.1 Taux de corrosion

Le chapitre 3 a porté sur l'impact des paramètres clés qui régissent les comportements en corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone, soit la teneur en chlorures, la teneur en humidité et la formulation du béton du point de vue du ratio eau/ciment. Chaque paramètre clé a été conçu de manière à se composer de valeurs extrêmes et de valeurs intermédiaires. P. ex. pour la teneur en chlorures, les valeurs 0 %, 1 % et 2 % par masse de ciment ont été utilisées, et pour la teneur en humidité, les environnements contrôlés à une HR de 100 %, de 80 % et de 50 % ont été utilisés. Dans l'environnement à une HR de 50 %, il n'y a pas eu de corrosion active même dans le béton avec 2 % de chlorures, ce qui fait que cet environnement représente un état de sécheresse extrême pour la corrosion. Cette façon de procéder visait à faire en sorte que les données expérimentales obtenues à l'intérieur des limites de temps imparties au projet soient représentatives, dans la mesure du possible, des divers états de corrosion rencontrés sur le terrain et à garantir que les données expérimentales soient statistiquement représentatives en vue de la modélisation. On se rappellera que la corrosion passive/négligeable s'applique aux taux de corrosion inférieure à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Tableau 2) et que la corrosion active s'applique aux taux de corrosion supérieurs à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; les vocables absence de corrosion et corrosion active, respectivement, sont utilisés dans l'analyse.

La distribution des taux de corrosion I_{corr} mesurés présentés par l'histogramme de la Figure 50 montre que les données sur la corrosion présentent un bon équilibre entre les données sur l'état d'absence de corrosion et les données sur la corrosion active; à l'intérieur de chacun de ces deux états de corrosion, des données sur divers niveaux de taux de corrosion sont également incluses. Les potentiels de corrosion, E_{corr} , correspondants représenteraient donc un large éventail d'états de corrosion de conception équilibrée, ce qui est essentiel parce que les potentiels de corrosion seront utilisés en vue de l'élaboration de modèles/lignes directrices visant à prévoir l'état de corrosion.

En même temps, l'analyse statistique a également fourni des aperçus sur la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone, respectivement, comme le montrent les histogrammes de la Figure 51. Les deux histogrammes peuvent également être présentés du point de vue du pourcentage de distribution, comme le montre la Figure 52, ce qui facilite la comparaison. Pour l'acier au carbone, le nombre de mesures de taux de corrosion élevés ($I_{corr} \geq 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) enregistré a été supérieur au nombre de taux de corrosion faibles et modérés combinés ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \leq I_{corr} < 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Beaucoup moins de taux de corrosion élevés par rapport aux taux de corrosion faibles et modérés ont toutefois été enregistrés pour l'acier galvanisé.

Une autre observation importante est que contrairement à l'acier au carbone, aucune des taux de corrosion enregistrés pour l'acier galvanisé ne fait partie de la catégorie des taux de corrosion les plus

élevés (Figure 52), soient les taux supérieures à $5,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, ce qui démontre que le revêtement de zinc de l'acier galvanisé a un effet modulateur en évitant que le taux de corrosion atteigne des valeurs trop élevés, comme l'indique l'analyse de la résistance présentée au chapitre 3. On trouvera par ailleurs au Tableau 14 un résumé de détails plus statistiques comme le taux de corrosion moyen, l'écart type et la fréquence observée pour cinq niveaux d'état de corrosion.

Les cinq états de corrosion incluant l'absence d'état de corrosion et quatre états de corrosion active, sont divisés comme suit :

1. Taux de corrosion faible, où $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \leq I_{corr} < 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;
2. Taux de corrosion modéré, où $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \leq I_{corr} < 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;
3. Taux de corrosion élevé, où $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \leq I_{corr} < 5,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;
4. Taux de corrosion extrême, où $I_{corr} \geq 5,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Parmi les quatre états de corrosion active, les trois premiers ont été définis au Tableau 2. Le taux de corrosion extrême a été séparé de le taux de corrosion élevé aux fins de la comparaison des deux aciers parce qu'en vertu du même protocole expérimental, seulement une des 668 mesures de taux de corrosion de l'acier galvanisé dans les prismes de béton était de $5,12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, à peine plus que $5,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ et ne présentait donc aucune signification statistique. En revanche, il y a eu 16 taux de corrosion extrêmes de l'acier au carbone sur un total de 362 mesures, ou 16 sur 208 mesures de corrosion active (soit 8 %). Ceci signifie que dans un même environnement corrosif, le pourcentage d'acier au carbone qui développe des taux de corrosion extrêmes serait beaucoup plus élevé.

Le Tableau 14 montre également que pour chaque niveau de corrosion active, l'acier au carbone avait un taux de corrosion moyen plus élevé que l'acier galvanisé, mais l'acier galvanisé avait un taux moyen d'absence de corrosion (ou densité de courant passif) plus élevé que l'acier au carbone, ce qui confirme les conclusions de l'analyse de la résistance effectuée au chapitre 3 selon lesquelles l'acier galvanisé avait une densité de corrosion passive plus élevée, mais une fois la corrosion active initiée, avait un taux de corrosion plus bas que l'acier au carbone. En résumé, l'analyse statistique des taux de corrosion a produit de l'information comparative précieuse, sur la résistance à la corrosion des deux aciers, qui complète l'analyse de la résistance à la corrosion. Elle a également confirmé que les données sur la corrosion utilisées pour la modélisation provenaient d'un protocole expérimental équilibré représentant un large éventail d'états de corrosion.

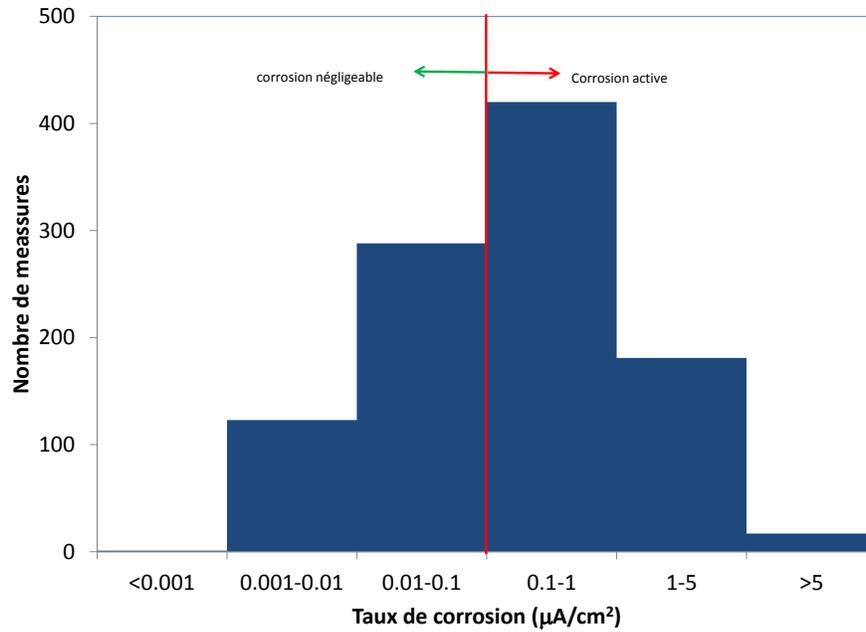
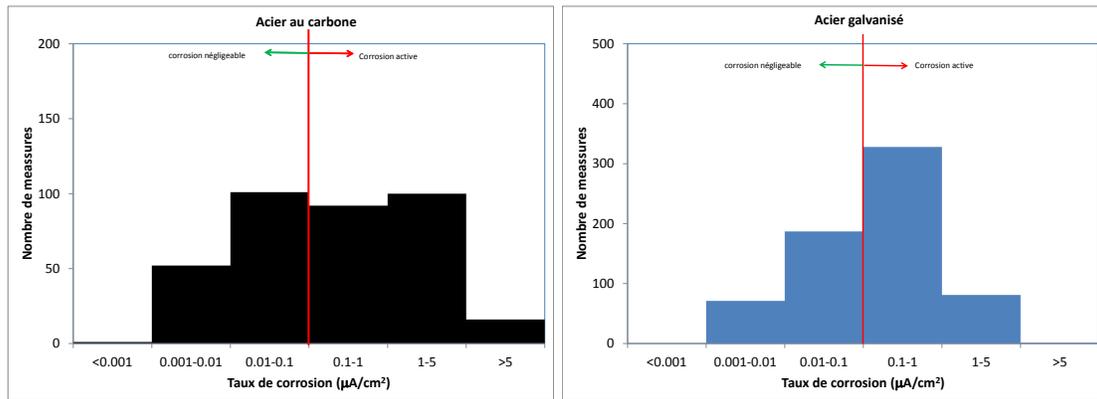


Figure 50 Histogramme des taux de corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone



(a) Acier au carbone

b) Acier galvanisé

Figure 51 Histogramme des taux de corrosion : a) acier au carbone et b) acier galvanisé

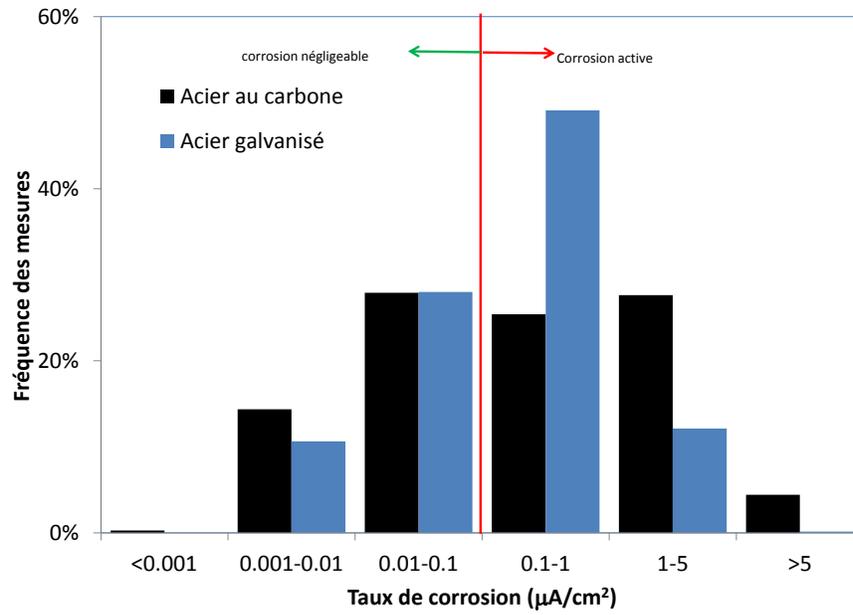


Figure 52 Histogramme des taux de corrosion en pourcentage

Tableau 14 Statistiques sur les taux de corrosion pour l'acier galvanisé et l'acier au carbone

État de corrosion	Taux de corrosion I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Acier au carbone				Acier galvanisé			
		Moyenne des I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Écart type σ	Observations (fois)	Observations (pourcentage)	Moyenne des I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Écart type σ	Observations (fois)	Observations (pourcentage)
Absence de corrosion	<0,1	0,02	0,02	154	42 %	0,04	0,03	257	38 %
Taux de corrosion faible	0,1-0,5	0,32	0,12	56	15 %	0,24	0,10	269	40 %
Taux de corrosion modéré	0,5-1	0,77	0,15	36	10 %	0,68	0,14	60	9 %
Taux de corrosion élevé	1-5	2,18	1,01	100	28 %	2,14	0,83	81	12 %
Taux de corrosion extrême	>5	16,95	18,38	16	4 %	5,12	S.O.	1	0 %

4.1.2 Potentiels de corrosion

Histogramme des potentiels de corrosion

Les Figure 53 a) et b) montrent l'histogramme des potentiels de corrosion, E_{corr} , pour l'acier au carbone et l'acier galvanisé, respectivement, avec un intervalle de 100 mV allant de -1000 mV à 0 mV. Pour chaque intervalle, la valeur en ordonnée (axe des Y) est la fréquence observée des potentiels de corrosion mesurés par rapport aux mesures totales pour cet acier. Chaque valeur est subdivisée en deux parties : absence de corrosion en noir/bleu et corrosion active en rouge. L'histogramme montre que les fréquences de pointe sont réparties entre -500 et -100 mV pour l'acier au carbone, et entre -700 mV et -300 mV pour l'acier galvanisé, montrant clairement des potentiels beaucoup plus négatifs pour l'acier galvanisé.

Les Figure 54 a) et b) présentent une comparaison de l'acier au carbone et de l'acier galvanisé du point de vue de l'état d'absence de corrosion et de l'état de corrosion active. Dans l'état d'absence de corrosion, la distribution des valeurs E_{corr} est distincte pour les deux aciers. Les fréquences de pointe surviennent entre -200 et -100 mV pour l'acier au carbone, et entre -400 et -300 mV pour l'acier galvanisé. Dans l'état de corrosion active, les fréquences de pointe se produisent entre -500 et -300 mV pour l'acier au carbone, et entre -600 et -400 mV pour l'acier galvanisé. Ces fréquences de pointe n'ont pas seulement montré que l'acier galvanisé avait des potentiels de corrosion beaucoup plus négatifs que l'acier au carbone, mais ont également permis de quantifier statistiquement la différence entre les deux aciers. La Figure 55 présente un découpage de la distribution des potentiels de corrosion entre les quatre états de corrosion active : taux de corrosion bas, taux de corrosion modéré, taux de corrosion élevé et taux de corrosion extrême.

Le Tableau 15 résume les détails statistiques des potentiels de corrosion, y compris les valeurs moyennes et les coefficients de variation, tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone. Les valeurs moyennes de l'acier galvanisé dans les états d'absence de corrosion, de taux de corrosion bas, de corrosion modéré et de taux de corrosion élevé sont plus négatives que celles de l'acier au carbone de -221 mV, -122 mV, -128 mV et -305 mV, respectivement. Il est à noter que le coefficient de variation dans chacun des états de corrosion reflète le fait que dans un même état de corrosion, les potentiels de corrosion varient grandement parce que les états de corrosion ont été atteints par l'entremise de l'effet combiné des paramètres clés mentionnés au chapitre 3. Par exemple, un taux de corrosion bas peut être le résultat d'une teneur en chlorures élevée dans un béton sec ou d'une teneur en chlorures basse dans un béton humide, ces deux états du béton menant à deux potentiels de corrosion très différents. Ces constatations montrent non seulement que les données sur la corrosion correspondent à des états de corrosion divers, mais également qu'une modélisation statistique est nécessaire pour établir les lignes directrices relatives à l'utilisation des potentiels de corrosion mesurés au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile, en matière d'évaluation de l'état.

Vers une modélisation statistique plus avancée des potentiels de corrosion

Il est possible, à partir des statistiques de base (p. ex. Ang et Tang, 2007), d'utiliser un histogramme pour présenter un diagramme des fréquences empiriques. On peut obtenir la distribution des fréquences empiriques en divisant chacune des ordonnées d'un histogramme par l'aire totale de façon que l'aire totale de la distribution des fréquences empiriques soit l'unité. Par exemple, on peut obtenir la distribution des fonctions empiriques des Figure 53 a) et b) en divisant chacune des ordonnées par 100 mV (l'intervalle) \times 1. Outre le diagramme des

fréquences empiriques de l'histogramme, nous nous sommes efforcés dans cette étude d'établir la distribution des fréquences théoriques du potentiel de corrosion, du point de vue de la fonction de distribution de probabilités (PDF ou *Probabilité Density Function*), en utilisant une analyse statistique plus avancée.

À cette fin, nous avons d'abord défini comme suit la probabilité d'un potentiel de corrosion mesuré, $P(a < E_{corr} \leq b)$, par rapport à une plage des potentiels de corrosion entre a et b ($a < b$) :

$$P(a < E_{corr} \leq b) = \frac{\text{Nombre de } E_{corr} \in (a, b]}{\text{Nombre total de mesures}} \quad (1)$$

où le potentiel de corrosion, E_{corr} , est une variable aléatoire continue (communément dénotée X en statistiques).

Après avoir établi que $P(a < E_{corr} \leq b)$, la fonction de distribution de probabilités (PDF) pour le potentiel de corrosion, dénotée $f(x)$, où x est toute valeur de potentiel de corrosion mesurée, peut être définie et calculée comme étant la distribution de probabilités dans l'intervalle infinitésimal de $(x - \frac{1}{2} dx, x + \frac{1}{2} dx]$, comme suit :

$$f(x) = \frac{P(x - \frac{1}{2} dx < E_{corr} \leq x + \frac{1}{2} dx)}{dx} \quad (2)$$

Cette formulation théorique exige une quantité significative de données dans les intervalles infinitésimaux dx . Par exemple, si un intervalle est de 1 mV, des quantités significatives de données sont nécessaires pour calculer, disons, $f(-300mV)$, sur un intervalle de $(-300,5 \text{ mV}, -299,5 \text{ mV}]$, ce qui n'est ni faisable ni nécessaire en génie civil.

À cette fin, $f(x)$ peut être approximée comme étant $\hat{f}(x)$, qui est définie comme suit :

$$\hat{f}(x) = \frac{P(x - \frac{1}{2} \Delta x < E_{corr} \leq x + \frac{1}{2} \Delta x)}{\Delta x} \quad (3)$$

où Δx est l'intervalle faisable pour le potentiel de corrosion, qui doit être assez grand pour contenir suffisamment de données. Il a été décidé, par tâtonnements, d'attribuer à Δx une valeur de 100 mV dans cette étude. Le résultat est que pour une valeur de potentiel de corrosion mesurée x , la probabilité est considérée sur un intervalle ou une plage de plus ou moins 50 mV. Également, cet intervalle de 100 mV est pratique étant donné que, dans les recherches sur le terrain, de nombreux facteurs peuvent faire dévier un potentiel mesuré de 50 mV par rapport à un potentiel de corrosion vrai. Il faut toutefois noter que plus l'intervalle est petit, mieux c'est, et si des données crédibles sur la corrosion peuvent être recueillies à l'avenir, l'exactitude s'en trouvera améliorée d'autant.

Ainsi, la PDF approximative du potentiel de corrosion dans cette étude est établie comme suit :

$$\hat{f}(x) = \frac{P(x - 50 \text{ mV} < E_{corr} \leq x + 50 \text{ mV})}{100 \text{ mV}} \quad (4)$$

Contrairement à un histogramme d'intervalles discrets, cette PDF permet le calcul des probabilités sur un intervalle qui est « continu », à partir de toute valeur de potentiel de corrosion. Par exemple, un histogramme peut présenter les deux valeurs de potentiel de corrosion -300 mV et -301 mV dans le même intervalle discret de (-400,-300], mais les fonctions de distribution de probabilités de ces valeurs, $\hat{f}(-300 \text{ mV})$ et $\hat{f}(-301 \text{ mV})$, sont différentes parce qu'elles sont calculées sur deux intervalles différents, soit (-350 mV,-250 mV] et (-351 mV, -251 mV], respectivement. Elle fournit donc un outil puissant pour comprendre la distribution continue des potentiels de corrosion au-delà des intervalles discrets d'un histogramme, comme nous l'avons mentionné précédemment.

La Figure 56 montre les $\hat{f}(x)$ de l'acier au carbone et de l'acier galvanisé calculées à partir de l'équation ci-dessus. Par exemple, pour une valeur de potentiel de corrosion choisie aléatoirement, disons $x = -339 \text{ mV}$, l'information sera obtenue pour l'intervalle $-339-50 = -389 \text{ mV}$ à $-339+50 = -289 \text{ mV}$. Dans ce cas, comme il est résumé au Tableau 16, $\hat{f}(-339 \text{ mV}) = 2,072 \times 10^{-3} / \text{mV}$ pour l'acier au carbone et $\hat{f}(-339 \text{ mV}) = 2,275 \times 10^{-3} / \text{mV}$ pour l'acier galvanisé. Cela signifie que $\hat{f}(-339 \text{ mV}) \times \Delta x = 20,7 \%$ des mesures totales de l'acier au carbone se situent entre -389 et -289 mV, et 22,8 % des mesures totales de l'acier galvanisé se situent à l'intérieur de cet intervalle, comme il est résumé au Tableau 16.

À la suite de l'établissement des équations 1 à 4, la probabilité de potentiel de corrosion pour la corrosion active (A-C pour la simplicité des équations) et l'absence de corrosion (N-C) peut être établie respectivement, ainsi que leur PDF approximative, comme suit :

$$P(a < E_{corr} \leq b | N - C) = \frac{\text{Nombre de } E_{corr} \in (a, b] \text{ pour } I_{corr} < 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2}{\text{Nombre total de mesures pour } I_{corr} < 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2} \quad (5)$$

$$P(a < E_{corr} \leq b | A - C) = \frac{\text{Nombre de } E_{corr} \in (a, b] \text{ pour } I_{corr} \geq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2}{\text{Nombre total de mesures pour } I_{corr} \geq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2} \quad (6)$$

$$\hat{f}(x | N - C) = \frac{P(x - 50 \text{ mV} < E_{corr} \leq x + 50 \text{ mV} | N - C)}{100 \text{ mV}} \quad (7)$$

$$\hat{f}(x | A - C) = \frac{P(x - 50 \text{ mV} < E_{corr} \leq x + 50 \text{ mV} | A - C)}{100 \text{ mV}}$$

(8)

La Figure 57 montre les PDF approximatives pour l'absence de corrosion, $\hat{f}(x|N - C)$, et la corrosion active, $\hat{f}(x|A - C)$, pour l'acier galvanisé, et la Figure 58 montre ces mêmes PDF pour l'acier au carbone. Ces PDF approximatives permettent pour la première fois de comprendre que pour tout potentiel de corrosion mesuré, il existe une probabilité de corrosion active et d'absence de corrosion de l'armature en acier dans les ouvrages en béton. Une fonction déterministe qui utilise le potentiel de corrosion pour calculer le taux de corrosion ne conviendrait pas pour les deux aciers dans les ouvrages en béton. La Figure 59 présente les PDF de l'acier galvanisé et de l'acier dans l'état d'absence de corrosion. Elle montre clairement la différence des deux aciers dans le même état de corrosion. La Figure 60 présente les PDF des deux aciers dans l'état de corrosion active; la différence de potentiel de corrosion y est moindre que dans l'état d'absence de corrosion.

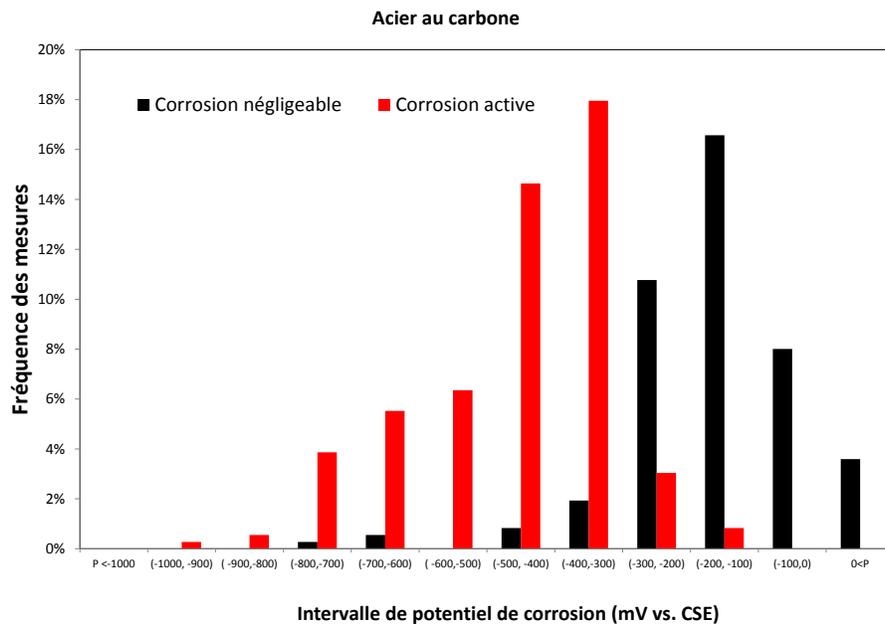
Ces PDF approximatives fournissent également de l'information précieuse sur un potentiel de corrosion mesuré, information que l'on illustrera en poursuivant avec l'exemple de l'utilisation d'une valeur de potentiel de corrosion choisie aléatoirement (ou mesurée), $x = -339$ mV. Comme le Tableau 16 le résume, dans cet intervalle/plage de potentiels de -389 à -289, on retrouve 45,5 % des mesures totales d'absence de corrosion pour l'acier galvanisé, mais seulement 5,8 % de ces mesures pour l'acier au carbone. Cela signifie que les potentiels de corrosion mesurés de presque la moitié des barres d'acier galvanisé dans l'état d'absence de corrosion se situaient entre -389 et -289 mV, tandis que les potentiels de corrosion de moins de 6 % des barres d'acier au carbone dans l'état d'absence de corrosion se situaient dans cet intervalle. D'autre part, les potentiels de corrosion mesurés de moins de 10 % des barres d'acier galvanisé en corrosion active se situaient dans cet intervalle, mais ce pourcentage grimpait à 31,7 % pour l'acier au carbone. Ainsi, entre -389 et -289 mV, il existe une plus grande probabilité de corrosion active pour l'acier au carbone, mais une plus grande probabilité d'absence de corrosion pour l'acier galvanisé. Ces constatations sont une importante étape dans la méthodologie d'élaboration de modèles/lignes directrices pour l'évaluation de l'état de la corrosion au moyen des potentiels de corrosion, lesquels modèles/lignes directrices seront présentés dans les sections qui suivent.

Tableau 15 Statistiques sur les potentiels de corrosion pour l'acier galvanisé et l'acier au carbone

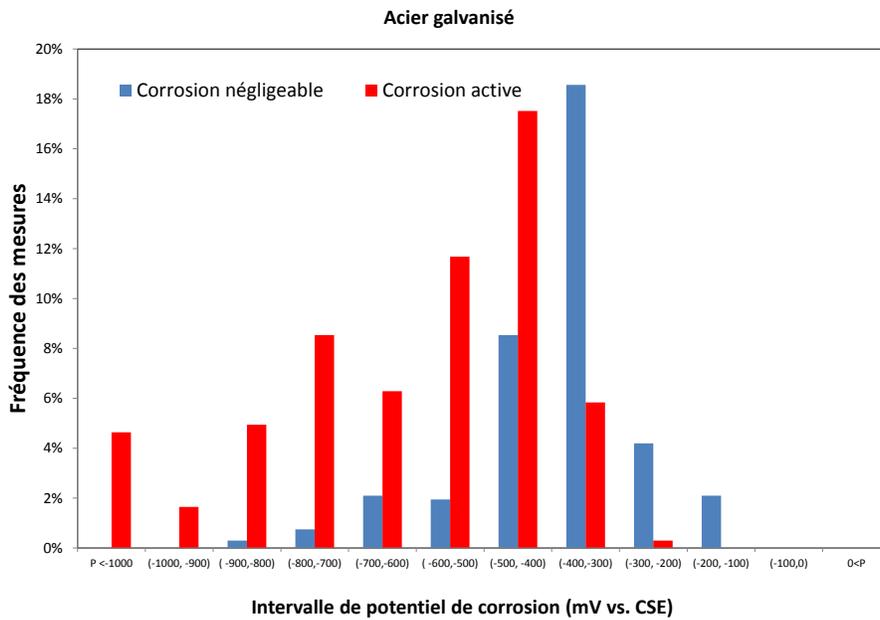
État de corrosion	Taux de corrosion I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Acier au carbone			Acier galvanisé			ΔE_{corr} (acier galvanisé – acier au carbone) (mV par rapport à l'ESC)
		Moyenne des E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)	Coefficient de variation	Observations (pourcentage)	Moyenne des E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)	Coefficient de variation	Observations (pourcentage)	
Absence de corrosion	<0,1	-167	70 %	42 %	-387	32 %	38 %	-221
Taux de corrosion bas	0,1-0,5	-448	28 %	15 %	-570	30 %	40 %	-122
Taux de corrosion modéré	0,5-1	-481	28 %	10 %	-609	37 %	9 %	-128
Taux de corrosion élevé	1-5	-465	34 %	28 %	-769	31 %	12 %	-305
Taux de corrosion extrême	>5	-341	22 %	4 %	S.O.	S.O.	0 %	S.O.

Tableau 16 Probabilité de potentiel de corrosion pour un potentiel de corrosion choisi aléatoirement $x=-339$ mV

$x=-339$ mV (-389,-289]	$\hat{f}(x)$ (/mV)	$\hat{f}(x) \times 100$ mV	$\hat{f}(x N - C)$ (/mV)	$\hat{f}(x N - C) \times 100$ mV	$\hat{f}(x A - C)$ (/mV)	$\hat{f}(x A - C) \times 100$ mV
Acier galvanisé	2,28E-03	22,8 %	4,55E-03	45,5 %	8,52E-04	8,52 %
	22,8 % des mesures totales se situent dans l'intervalle		45,5 % des mesures totales d'absence de corrosion se situent dans l'intervalle		8,52 % des mesures totales de corrosion active se situent dans l'intervalle	
Acier au carbone	2,07E-03	20,7 %	5,84E-04	5,84 %	3,17E-03	31,7 %
	20,7 % des mesures totales se situent dans l'intervalle		5,84 % des mesures totales d'absence de corrosion se situent dans l'intervalle		31,7 % des mesures totales de corrosion active se situent dans l'intervalle	

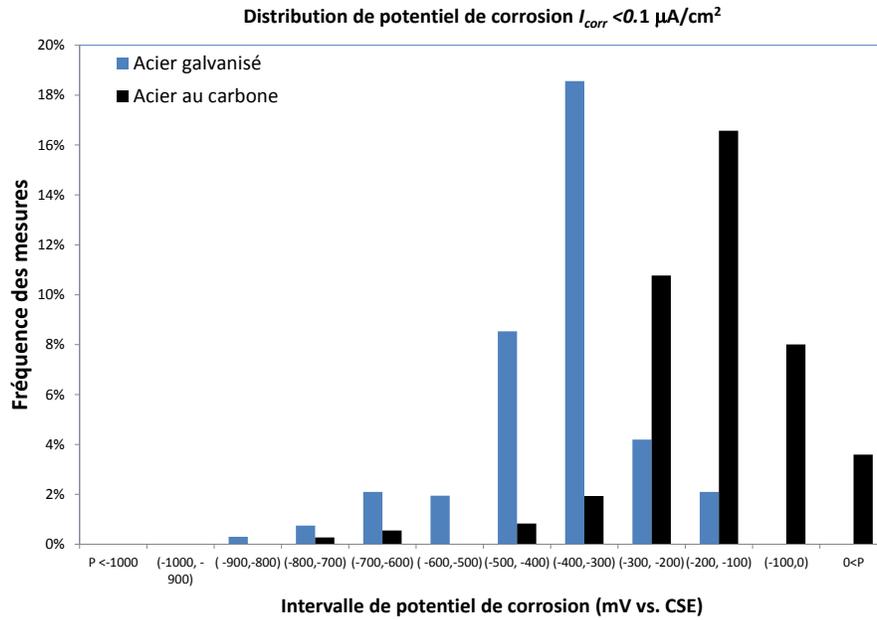


(a) Acier au carbone

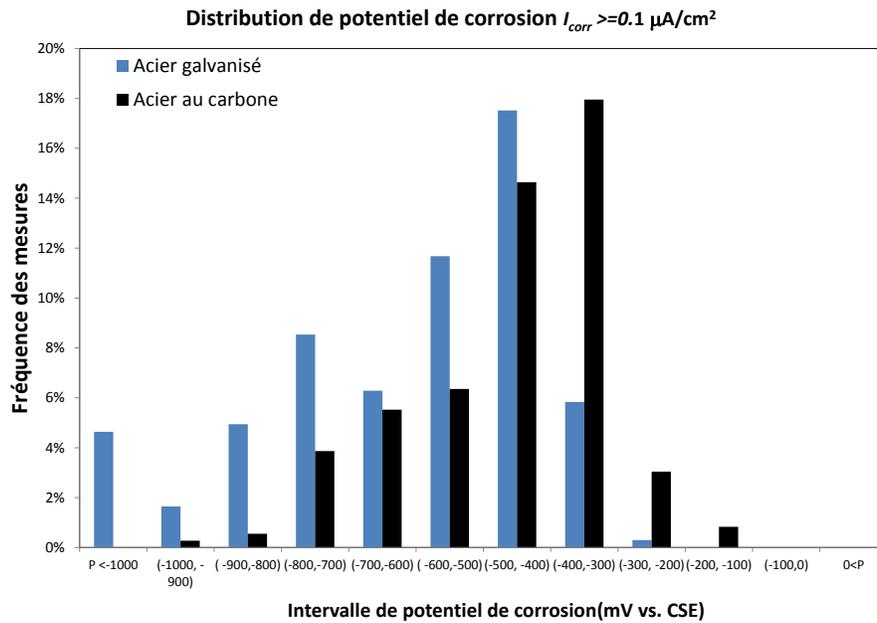


(b) Acier galvanisé

Figure 53 Histogramme des potentiels de corrosion : a) acier au carbone et b) acier galvanisé



(a) Absence de corrosion



(b) Corrosion active

Figure 54 Histogramme des potentiels de corrosion : a) absence de corrosion et b) corrosion active

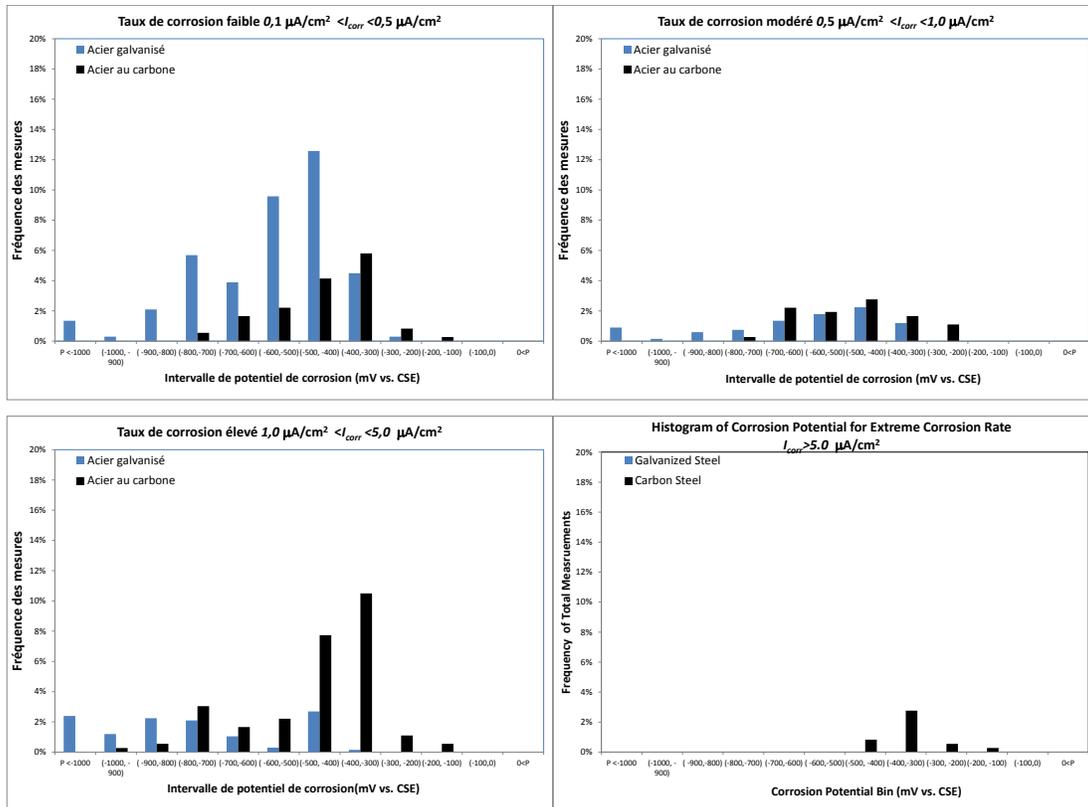


Figure 55 Histogramme des potentiels de corrosion de divers états de corrosion

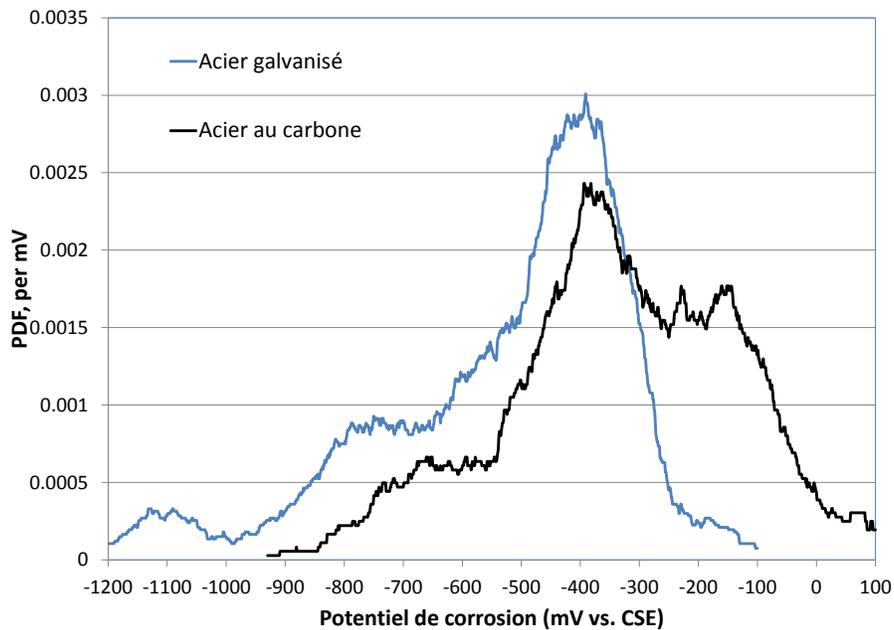


Figure 56 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de l'acier galvanisé et de l'acier au carbone

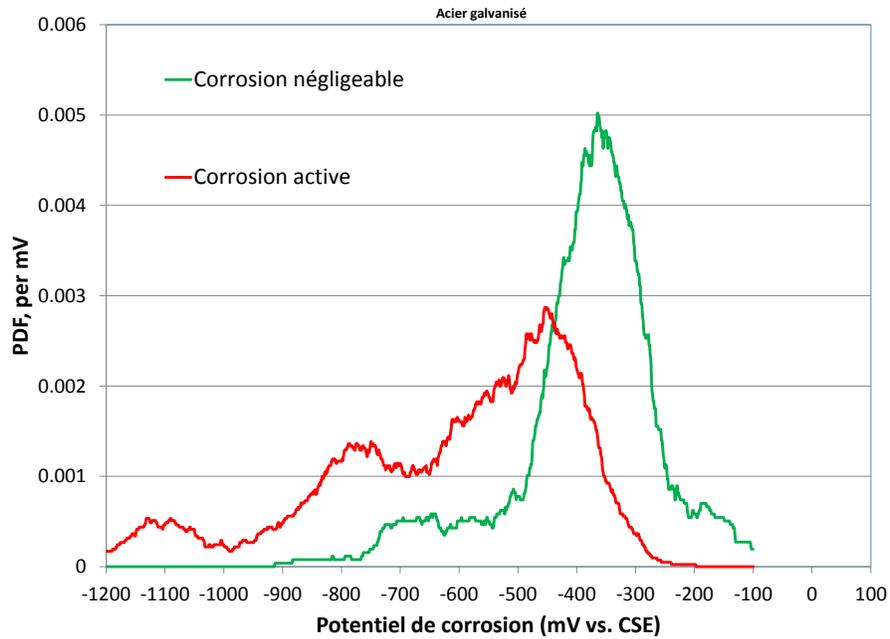


Figure 57 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de l'acier galvanisé

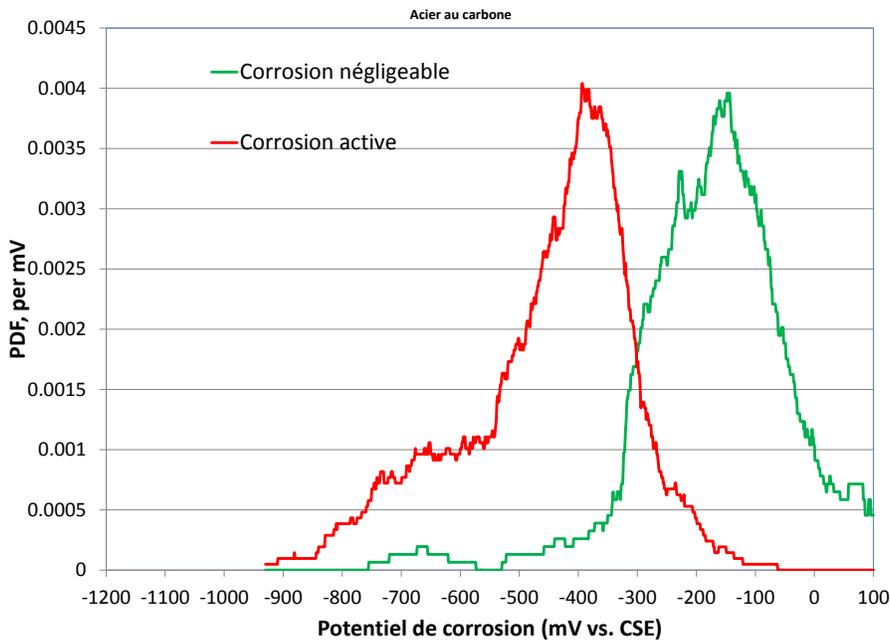


Figure 58 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de l'acier au carbone

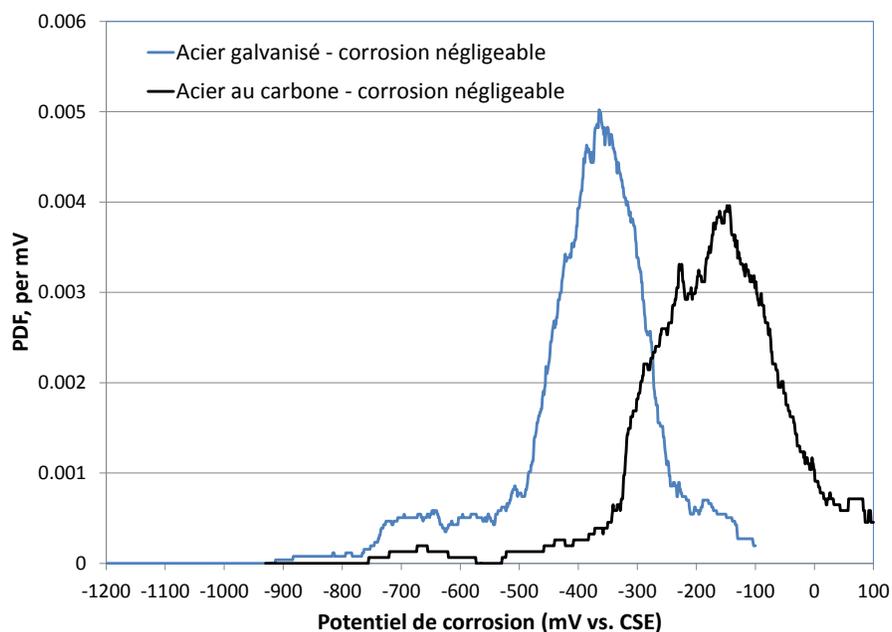


Figure 59 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de l'absence de corrosion

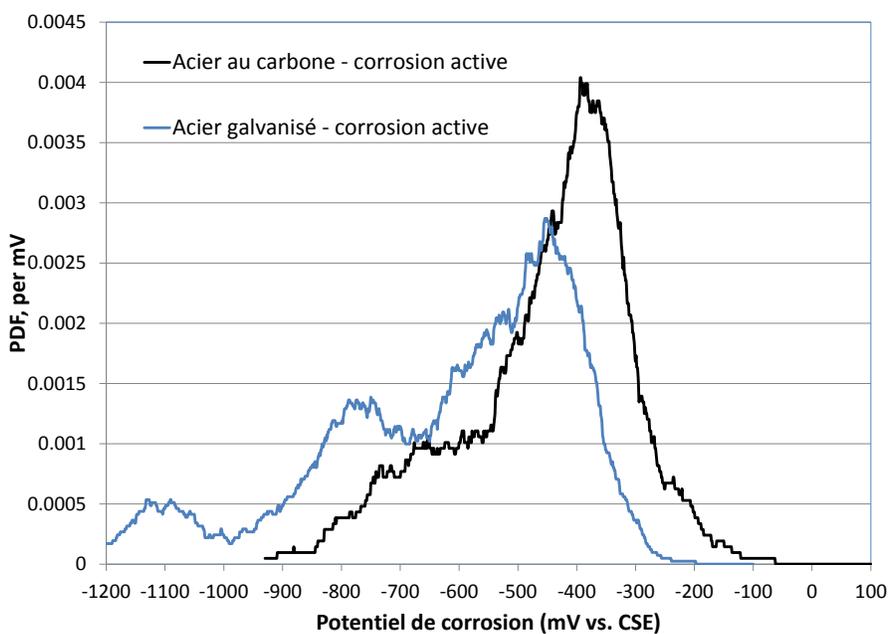


Figure 60 Fonction de distribution de probabilités du potentiel de corrosion de la corrosion active

4.2 Lignes directrices relatives aux catégories de probabilité de corrosion

4.2.1 Lignes directrices basées sur la résistance à la corrosion

La norme ASTM C876 fournit des lignes directrices pour l'évaluation de la corrosion de l'acier au carbone dans les ouvrages en béton en définissant trois catégories de probabilité de corrosion en fonction des potentiels de corrosion mesurés, comme on a pu le voir précédemment au Tableau 3. Pour commencer, on vérifiera si les corrélations entre les potentiels de corrosion et les taux de corrosion de l'acier au carbone obtenues dans le cadre de la présente étude sont conformes à ces lignes directrices. Cette étape est importante pour valider les mesures de corrosion puisque le comportement en corrosion de l'acier au carbone dans les ouvrages en béton est bien connu.

Acier au carbone

La Figure 61 montre la corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier au carbone obtenue dans quatre environnements pour des mélanges OPC et HPC contenant des teneurs en chlorures de 0 %, 1 % et 2 %, pour un total de 362 points de données de potentiel de corrosion et 362 points de données de taux de corrosion correspondants. Les taux de corrosion sont répartis entre cinq ordres de grandeur allant de 0,001 à 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ qui représentent un large éventail d'états de corrosion. Malgré la distribution étendue, on observe que l'acier au carbone à la Figure 61 présente trois aires de taux de corrosion distinctes séparées par les valeurs de potentiel de corrosion.

1. Au-dessus de la ligne verte à -200 mV (par rapport à l'ESC) : Des 106 données qui se sont révélées être plus positives que -200 mV, 102 présentaient un taux de corrosion mesuré inférieur à 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ correspondant à une absence de corrosion à l'état passif ou à une corrosion négligeable en raison du béton sec. Les quatre données dans la partie Corrosion active ont été obtenues dans l'enceinte à atmosphère contrôlée E-4 représentant l'environnement le plus corrosif de notre étude.

2. Sous la ligne rouge à -350 mV : Des 172 données qui se sont révélées être plus négatives que -350 mV, 163 présentaient un taux de corrosion mesuré supérieur à 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ correspondant à une corrosion active, et neuf présentaient un taux de corrosion légèrement inférieur à 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

3. Entre la ligne verte et la ligne rouge : Les taux de corrosion de l'acier au carbone allaient de dix fois moins à cent fois plus que 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, s'étalant sur quatre ordres de grandeur. Autrement dit, pour des potentiels de corrosion mesurés entre -350 et -200 mV, certaines correspondaient à une corrosion active et d'autres à une absence de corrosion, ce qui est le résultat de l'effet combiné de paramètres de corrosion clés qui avaient parfois des impacts contraires sur l'état de corrosion (taux) et le potentiel de corrosion, comme nous l'avons mentionné au chapitre 3. Cela implique surtout qu'un modèle déterministe qui prédit le taux de corrosion à partir d'une valeur unique de potentiel de corrosion ne serait pas applicable à l'armature en acier dans des ouvrages en béton.

L'information ci-dessus est également résumée au Tableau 17 et comparée aux lignes directrices de la norme ASTM C876. Les données sur la corrosion recueillies pour l'acier au carbone se conforment très bien aux lignes directrices de la norme ASTM C876. Il s'agit d'une importante étape de validation pour l'étude de la corrosion de l'armature en acier, car les mesures de la corrosion peuvent varier considérablement selon la qualité d'exécution et l'équipement. Une

méthode similaire sera ensuite suivie pour l'acier galvanisé, pour lequel les données sur le potentiel de corrosion et le taux de corrosion ont été obtenues au moyen des mêmes méthodes que celles qui ont été utilisées pour les données sur l'acier au carbone.

Acier galvanisé

La Figure 62 présente la corrélation entre les potentiels de corrosion et les taux de corrosion de l'acier galvanisé pour un total de 668 points de données sur les potentiels de corrosion et 668 points de données sur les taux de corrosion. L'acier galvanisé présente des caractéristiques distinctes de l'acier au carbone parce que ses potentiels de corrosion sont généralement plus négatifs que ceux de l'acier au carbone. Ses taux de corrosion présentent également trois aires séparées par les valeurs de potentiel, mais les valeurs de potentiel de corrosion qui les séparent sont très différentes de celles de l'acier au carbone et des lignes directrices de la norme ASTM C876:

1. Au-dessus de la ligne verte à -300 mV (par rapport à l'ESC) : Sur un total de 44 données, 42 données plus positives que -300 mV étaient assorties de taux de corrosion mesurés inférieurs à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ correspondant à un état d'absence de corrosion. Deux données assimilables à de la corrosion active provenaient de l'enceinte à atmosphère contrôlée E-4.
2. Sous la ligne rouge à -700 mV : Sur un total de 140 données, 133 données plus négatives que -700 mV étaient assorties de taux de corrosion mesurés supérieurs à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ correspondant à un état de corrosion active. Sept données étaient assorties de taux de corrosion mesurés légèrement inférieurs à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.
3. Entre la ligne verte et la ligne rouge : Les taux de corrosion allaient de presque cent fois moins à plus de dix fois plus que $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Autrement dit, pour des potentiels de corrosion entre -700 et -300 mV, certaines correspondaient à une corrosion active et d'autres à une absence de corrosion.

L'information ci-dessus est également résumée au Tableau 18 et peut servir de lignes directrices, appelées lignes directrices G, pour l'évaluation de l'état de l'acier galvanisé dans des ouvrages en béton. Ces lignes directrices G basées sur la résistance à la corrosion indiquent les limites « strictes » qui déterminent l'aire de corrosion active, principalement, qui est plus négative que -700 mV, et l'aire d'absence de corrosion, principalement, qui est plus positive que -300 mV. Il reste naturellement une large aire « incertaine » entre -700 mV et -300 mV. Cette aire sera utile lorsque des ressources et du temps sont disponibles pour mesurer le taux de corrosion lorsque les relevés de potentiel par demi-pile tombent dans l'aire « incertaine ».

Les inspecteurs des ouvrages en béton font toutefois face souvent, sinon la majeure partie du temps, à des situations de ressources et de temps limités, et plus d'information sur l'aire « incertaine » comprise entre -700 mV et -300 mV est requise. À la suite de l'analyse des probabilités effectuée dans les pages qui précèdent, une modélisation plus avancée de la probabilité de corrosion est présentée dans les sections qui suivent.

D'autre part, si l'environnement sur le terrain est connu, il est possible d'établir des lignes directrices plus perfectionnées en suivant la même méthode, mais en utilisant les données obtenues dans cet environnement seulement. Par exemple, la Figure 63 montre la corrélation entre les 220 potentiels de corrosion et les 220 taux de corrosion de l'acier galvanisé obtenus pour le béton saturé dans l'environnement E-3 à une HR de 100 %. Dans cet environnement, les

taux de corrosion se sont également subdivisés en trois aires distinctes, séparées par les valeurs de potentiel de corrosion, qui peuvent servir de lignes directrices pour les états saturés :

1. Au-dessus de la ligne verte à -450 mV (par rapport à l'ESC) : La majorité des données (20 sur 22) qui se sont révélées plus positives que -450 mV avaient un taux de corrosion mesuré inférieur à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ correspondant à une absence de corrosion.

2. Sous la ligne rouge à -700 mV : La majorité des données (92 sur 97) qui se sont révélées être plus négatives que -700 mV avaient un taux de corrosion mesuré supérieur à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ correspondant à un état de corrosion active.

3. Entre la ligne verte et la ligne rouge, soit de -700 mV à -450 mV : Certaines données se rapprochaient de l'aire de corrosion active et certaines de l'aire d'absence de corrosion, se situant dans l'aire « incertaine ».

Les lignes qui précèdent montrent que plus d'information sur les paramètres clés de la corrosion, l'état d'humidité du béton dans ce cas, générerait une évaluation de l'état plus exacte; p. ex. l'aire incertaine peut être réduite de -150 mV en raison de l'état saturé connu.

Pour résumer, la méthodologie d'élaboration de ces lignes directrices basées sur la résistance à la corrosion a servi aux quatre fins suivantes.

- i) Les lignes directrices élaborées pour l'acier au carbone au moyen des données sur la corrosion obtenues au cours de notre étude sont conformes aux lignes directrices de la norme ASTM C876, validant les données sur la corrosion du point de vue du protocole et des mesures.
- ii) La méthodologie confirme la nécessité d'élaborer des lignes directrices d'évaluation de l'état différentes pour l'acier galvanisé, car il existe une corrélation distincte entre le taux de corrosion et le potentiel de corrosion de l'acier galvanisé, par rapport à l'acier au carbone.
- iii) Plus d'information sur les paramètres clés de la corrosion, soit la teneur en chlorures, l'état d'humidité du béton, sa formulation, etc. mène à une évaluation de l'état plus précise.
- iv) Surtout, la méthodologie démontre que la modélisation de l'évaluation de l'état peut ne pas être déterministe, mais être basée sur une analyse statistique constituant une étape importante en vue d'une modélisation plus avancée, comme nous verrons dans les sections qui suivent.

Tableau 17 Taux de corrosion et potentiel de corrosion de l'acier au carbone, et comparaison avec la norme ASTM C876

Relevé de potentiel par demi-pile (par rapport à l'ESC)	$E_{corr} > -200$ mV		$E_{corr} \leq -350$ mV		$-350\text{mV} < E_{corr} \leq -200$ mV		Total	
Données totales	106		172		84		362	
Absence de corrosion ($< 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)	102	96 %	9	5 %	44	52 %	155	43 %
Corrosion active ($\geq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)	4	4 %	163	95 %	40	48 %	207	57 %
Observation	Principalement absence de corrosion		Principalement corrosion active		Incertain, 52 % par rapport à 48 %			
Lignes directrices de la norme ASTM C876	Faible, probabilité de corrosion de 10 %		Élevé, probabilité de corrosion de 90 %		Incertain			

Tableau 18 Données sur la corrosion de l'acier galvanisé et lignes directrices G sur l'évaluation de l'état de corrosion

Relevé de potentiel par demi-pile (par rapport à l'ESC)	$E_{corr} > -300$ mV		$E_{corr} \leq -700$ mV		$-700\text{ mV} < E_{corr} \leq -300$ mV		Total	
Données totales	44		140		484		668	
Absence de corrosion ($< 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)	42	95 %	7	5 %	209	44 %	258	39 %
Corrosion active ($\geq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)	2	5 %	133	95 %	275	57 %	410	61 %
Lignes directrices	Principalement absence de corrosion		Principalement corrosion active		Incertain			

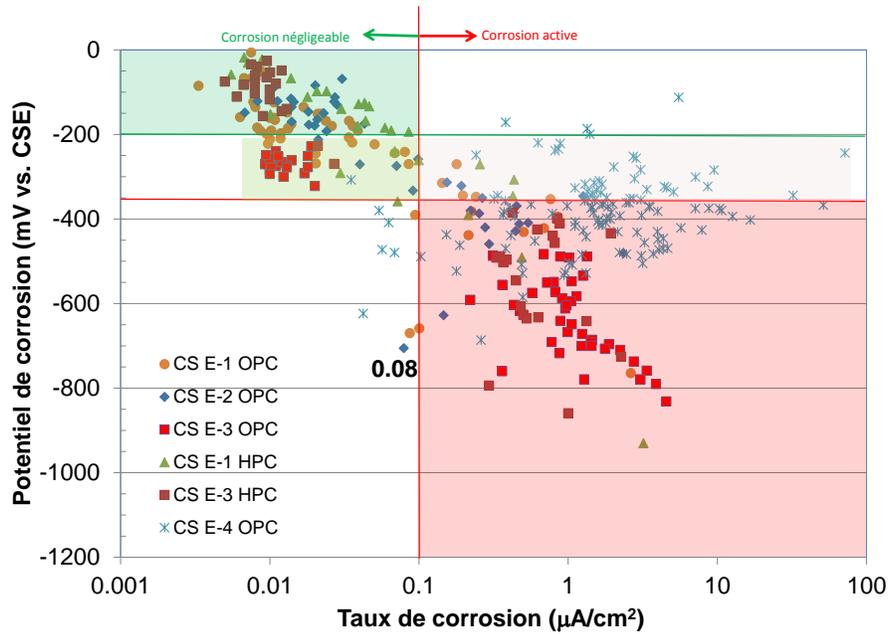


Figure 61 Corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier au carbone

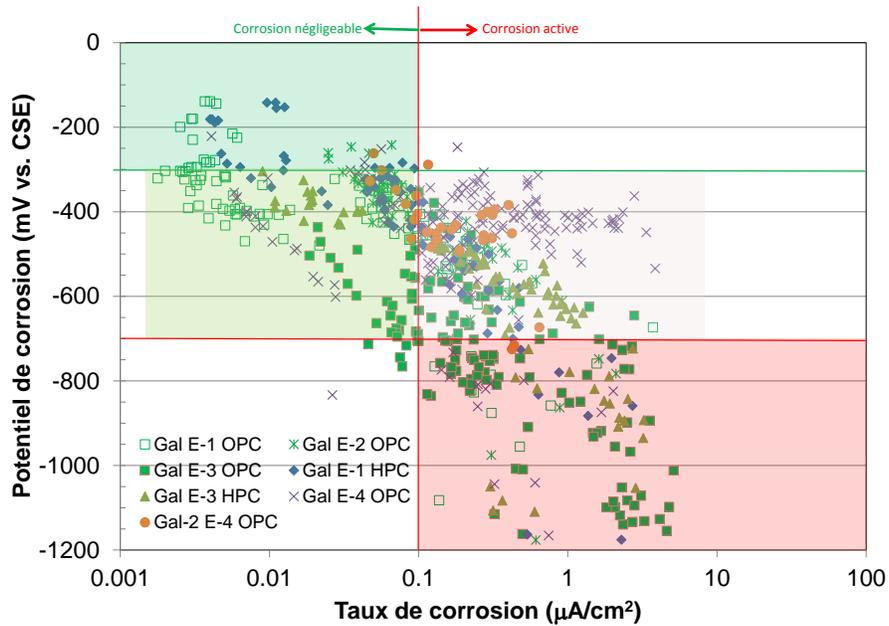


Figure 62 Corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier galvanisé

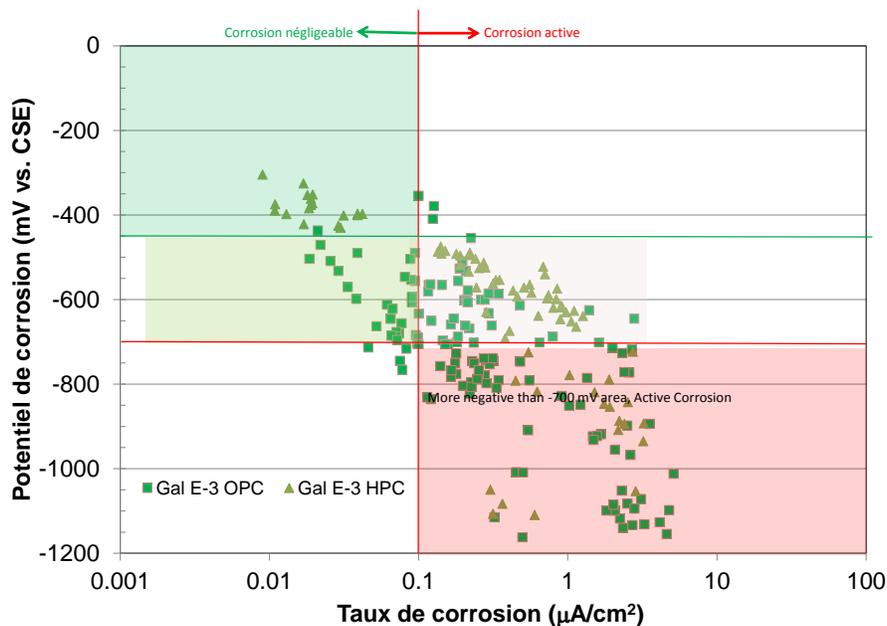


Figure 63 Corrélation entre le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier galvanisé dans du béton saturé

4.2.2 Modélisation basée sur des probabilités cumulatives

La modélisation basée sur des probabilités vise à obtenir plus d'information sur l'état de corrosion à partir d'un potentiel de corrosion mesuré en utilisant la technique des relevés de potentiel par demi-pile, en particulier dans l'aire « incertaine » telle qu'elle est déterminée dans les lignes directrices G, soit entre -700 mV et -300 mV pour l'acier galvanisé. Comme première étape, les données recueillies sont discrétisées en plages de potentiels de corrosion rétrécies et la probabilité de corrosion est calculée pour ces plages.

Comme il est défini à la section 4.1.2, dans un intervalle de potentiels de corrosion $E_{corr} \in (a, b]$, où $a < b$, une valeur de potentiel de corrosion $E_{corr} = x$ est associée à l'événement de corrosion active si le taux de corrosion mesuré $I_{corr} \geq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ou à l'événement d'absence de corrosion si le taux de corrosion mesuré $I_{corr} < 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. L'état de corrosion, la valeur que l'on cherche à prédire, peut donc être modélisé comme étant un événement aléatoire discret (variable) avec deux issues (valeurs), corrosion active (A-C) ou absence de corrosion (N-C), dont les probabilités sont définies comme suit :

$$P(N - C) = \frac{\text{Nombre de } I_{corr} < 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2}{\text{Nombre total de mesures}}$$

(9)

$$P(A - C) = \frac{\text{Nombre de } I_{corr} \geq 0,1 \mu A/cm^2}{\text{Nombre total de mesures}} \quad (10)$$

Il est à noter que $P(N - C) + P(A - C) = 1$. Le Tableau 19 résume les mesures totales d'absence de corrosion et de corrosion active tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone, ainsi que le pourcentage des mesures totales, qui sont au nombre de 668 pour l'acier galvanisé et de 362 pour l'acier au carbone, qui comptait le moins de réplicats pour chaque état du protocole expérimental.

Étant donné que le potentiel de corrosion plus positif est souvent associé au risque de corrosion le plus faible, la probabilité suivante peut être établie :

$$P(A - C | E_{corr} \leq x) = \frac{\text{Nombre de } I_{corr} \geq 0,1 \mu A/cm^2 \text{ pour } E_{corr} \leq x}{\text{Nombre total de mesures de } E_{corr} \leq x} \quad (11)$$

$$P(N - C | E_{corr} > x) = \frac{\text{Nombre de } I_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2 \text{ pour } E_{corr} > x}{\text{Nombre total de mesures de } E_{corr} > x} \quad (12)$$

Le résultat de l'équation 11 est la probabilité de corrosion active pour les potentiels de corrosion mesurés qui se sont révélés être plus négatifs que x . Le résultat de l'équation 12 est la probabilité d'absence de corrosion pour les potentiels de corrosion mesurés qui se sont révélés être plus positifs que x . Ces résultats sont essentiellement les probabilités cumulatives de corrosion en fonction du potentiel de corrosion x , et les courbes $P(A - C | E_{corr} \leq x)$ tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone sont présentées à la Figure 64.

Contrairement à la modélisation basée sur la résistance par observation des données, cette méthodologie basée sur les probabilités permet de choisir les limites de potentiel pour différents événements de corrosion avec la probabilité voulue. Par exemple, on peut utiliser la méthode suivante pour établir des lignes directrices pour une probabilité de corrosion active et d'absence de corrosion, respectivement, de 90 % :

1. Pour trouver une valeur de potentiel de corrosion m à partir des données recueillies, de sorte que $P(N - C | E_{corr} > m) = 90 \%$, signifie que lorsqu'un potentiel de corrosion mesuré est plus positif que m , une limite supérieure, il y aurait une probabilité d'absence de corrosion de 90 %.
2. Pour trouver une valeur de potentiel de corrosion n , de sorte que $P(A - C | E_{corr} \leq n) = 90 \%$, signifie que lorsqu'un potentiel de corrosion mesuré est plus négatif que n , une limite inférieure, il y aurait une probabilité de corrosion active de 90 %.

L'utilisation de cette méthodologie permet pour la première fois de déterminer différentes probabilités, et pas seulement une probabilité de 90 % prévue par la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone. Les valeurs limites supérieure et inférieure, m et n , pour plusieurs autres probabilités, soit 95 %, 90 %, 85 % et 80 %, pour l'acier galvanisé, et 95 % et 90 % pour l'acier

au carbone sont présentées au Tableau 20. Par exemple, si la limite supérieure choisie est de -300 mV pour l'acier galvanisé, cela signifie une probabilité d'absence de corrosion de 95 % pour les potentiels de corrosion plus positifs que -300 mV.

Les lignes directrices d'évaluation de l'état peuvent être élaborées au moyen de la méthodologie ci-dessus et avec les choix de probabilité recherchés. Choisir une limite supérieure avec une valeur de potentiel de corrosion plus positive générera une probabilité d'absence de corrosion plus élevée. Par exemple, si la limite supérieure choisie est de -335 mV pour l'acier galvanisé, un potentiel de corrosion mesuré plus positif que -335 mV signifierait une probabilité d'absence de corrosion de 90 %, tandis qu'une limite supérieure de -300 mV signifie une probabilité d'absence de corrosion de 95 %. Si la limite supérieure choisie est de -365 mV, un potentiel de corrosion mesuré plus positif que -365 mV aura une probabilité d'absence de corrosion de 85 %. De la même façon, choisir une limite inférieure avec une valeur de potentiel de corrosion plus négative mènera à une probabilité de corrosion active élevée.

Une limite supérieure plus positive et une limite inférieure plus négative mèneront cependant à un plus large éventail de valeurs d'incertitude. En pareil cas, on peut évidemment chercher à mieux évaluer l'état de corrosion en utilisant des techniques de mesure de le taux de corrosion. Pour un élément de structure critique ou si l'on dispose de suffisamment de temps et de ressources, un tel choix serait souhaitable. Il est d'autre part possible d'obtenir plus d'information en modélisant les probabilités de corrosion entre les limites supérieure et inférieure. La probabilité suivante est définie pour le potentiel de corrosion se situant entre les valeurs a et b où $a < b$:

$$P(A - C | a < E_{corr} \leq b) = \frac{\text{Nombre de } I_{corr} \geq 0,1 \mu A/cm^2 \text{ pour } E_{corr} \in (a, b]}{\text{Nombre total de mesures de } E_{corr} \in (a, b]} \quad (13)$$

$$P(N - C | a < E_{corr} \leq b) = \frac{\text{Nombre de } I_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2 \text{ pour } E_{corr} \in (a, b]}{\text{Nombre total de mesures de } E_{corr} \in (a, b]} \quad (14)$$

Il est à noter que $P(A - C | a < E_{corr} \leq b) + P(N - C | a < E_{corr} \leq b) = 1$, de sorte que lorsqu'un terme est calculé, l'autre peut être connu.

Conformément aux définitions ci-dessus, des lignes directrices améliorées pour l'évaluation de la corrosion de l'acier galvanisé ont été élaborées et sont résumées au Tableau 21. Elles sont basées sur une probabilité de 90 % comme dans la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone : une limite supérieure de 90 % de probabilité d'absence de corrosion, soit -335 mV, et une limite inférieure de 90 % de probabilité de corrosion active, soit -610 mV, comme le montre le Tableau 20. Les potentiels de corrosion entre les limites inférieure et supérieure sont également découpés en deux plages : (-610 mV, -500 mV] et (-500 mV, -335 mV]. Les probabilités de corrosion active connexes calculées au moyen de l'équation 13 sont de 85 % et 51 %, respectivement. Ces lignes directrices d'évaluation du potentiel de corrosion, qui sont présentées au Tableau 21, sont appelées modèle/lignes directrices-1 pour l'acier galvanisé.

1. Pour un potentiel de corrosion mesuré au moyen de la technique des relevés par demi-pile de la norme ASTM C876 qui se révèle plus positif que -335mV (par rapport à l'ESC), la probabilité d'absence de corrosion est de 90 %.
2. Pour un potentiel de corrosion mesuré plus négatif que -610 mV (par rapport à l'ESC), la probabilité de corrosion active est de 90 %.
3. Pour un potentiel de corrosion mesuré se situant entre -610 et -500 mV (par rapport à l'ESC), la probabilité de corrosion active est de 85 %.
4. Pour un potentiel de corrosion mesuré se situant entre -500 et -335 mV (par rapport à l'ESC), l'état de corrosion est jugé incertain au sens des lignes directrices de la norme ASTM C876 parce que la probabilité d'absence de corrosion est très similaire à la probabilité de corrosion active, qui sont de 48 % et 52 %, respectivement.

Le modèle/lignes directrices n° 1 basé sur les probabilités cumulatives a trois avantages sur les lignes directrices G basées sur la résistance à la corrosion : 1) choix de probabilités de corrosion, qui sont de 90 % pour la corrosion active et de 90 % pour l'absence de corrosion; 2) plus d'information grâce à une plage additionnelle de potentiels de corrosion et une probabilité de corrosion de 85 %; 3) aire incertaine réduite, qui est de -335 mV à -500 mV dans le modèle/lignes directrices n° 1, et de -700 mV à -300 mV dans les lignes directrices G.

On peut également utiliser l'équation 13 pour réduire davantage l'aire d'incertitude du modèle/lignes directrices n° 1 en calculant plus de probabilités. Cette façon de procéder sera plus utile pour les situations où les ressources sont encore plus limitées ou pour disposer de données quantitatives en vue d'une gestion du risque des ouvrages en béton vieillissants basée sur les probabilités. Ces lignes directrices pour l'évaluation des potentiels de corrosion sont présentées au Tableau 22 et appelées modèle/lignes directrices n° 2 :

1. Pour un potentiel de corrosion mesuré plus positif que -335 mV (par rapport à l'ESC), la probabilité d'absence de corrosion est de 90 % (comme pour le modèle/lignes directrices n° 1).
2. Pour un potentiel de corrosion mesuré plus négatif que -610 mV (par rapport à l'ESC), la probabilité de corrosion active est de 90 % (comme pour le modèle/lignes directrices n° 1).
3. Pour un potentiel de corrosion mesuré se situant entre -610 et -500 mV (par rapport à l'ESC), la probabilité de corrosion active est de 85 % (comme pour le modèle/lignes directrices n° 1).
4. Pour un potentiel de corrosion mesuré se situant entre -500 et -400 mV (par rapport à l'ESC), la probabilité de corrosion active est de 67 % ou, après arrondissement, de 70 %.
5. Pour un potentiel de corrosion mesuré se situant entre -400 et -335 mV (par rapport à l'ESC), la probabilité de corrosion active est de 28 % ou, après arrondissement, de 30 %.

L'évolution allant des lignes directrices G au modèle/lignes directrices no 1 et au modèle/lignes directrices n° 2 grâce à l'utilisation de deux méthodologies différentes reflète les progrès de l'analyse et, de ce point de vue, ces lignes directrices deviennent d'un usage plus approprié lorsque les ressources pour effectuer des mesures de taux de corrosion sur le terrain deviennent plus limitées. Par exemple, lorsque suffisamment de ressources sont disponibles ou que l'importance d'un ouvrage l'exige, les lignes directrices G sembleraient indiquer que pour tout potentiel de corrosion entre -700 et -300 mV, on doit effectuer des mesures de taux de corrosion pour obtenir l'état de corrosion réel. En revanche, le modèle/lignes directrices n° 1

exige que pour tout potentiel de corrosion entre -500 et -335 mV, on effectue des mesures de taux de corrosion pour obtenir l'état de corrosion réel. Lorsque les contraintes pratiques sont encore plus importantes, le modèle/lignes directrices n° 2 offre de l'information additionnelle pour les potentiels de corrosion entre -500 et -335 mV.

Il convient de noter encore une fois que la disponibilité de données plus crédibles rendra toutes ces lignes directrices d'évaluation de l'état plus précises. En outre, comme le même ensemble de données, soit 668 potentiels de corrosion et 668 taux de corrosion, a été utilisé pour les trois jeux de lignes directrices, les plages de potentiel les mieux définies, comme dans le modèle/lignes directrices n° 2, signifient que la quantité de données la plus petite a servi au calcul des probabilités dans chaque plage. Si le modèle/lignes directrices n° 1 et le modèle/lignes directrices n° 2 utilisent une méthodologie plus avancée pour le calcul des probabilités, fournissant plus d'information, elles ne sont pas nécessairement plus « précises » que les lignes directrices G. Ces dernières offrent la plus grande plage d'incertitude, dont l'information est plus « précise » parce qu'elle représente un plus large éventail de possibilités.

Il est toutefois préférable d'obtenir la probabilité de corrosion en fonction du potentiel de corrosion au lieu d'attribuer un potentiel de corrosion mesuré dans les intervalles limités et discrets. Par exemple, deux potentiels de corrosion de -334 mV et -336 mV devraient présenter des probabilités de corrosion plus similaires que la paire -336 mV et -399 mV. À la place, -334 mV appartient à une plage de potentiels de corrosion de >-335 mV et correspond à 10 % de corrosion active, tandis que -336 mV et -399 mV appartiennent à une plage de potentiels de corrosion différente correspondant à 30 % de corrosion active (modèle/lignes directrices n° 2). La première paire implique une plus grande différence du point de vue de l'état de corrosion que la seconde. Cet exemple montre la limitation fondamentale de ces trois lignes directrices relatives à l'acier galvanisé ainsi que des lignes directrices de la norme ASTM C876 relatives à l'acier au carbone, en particulier pour les potentiels de corrosion proches des valeurs limites.

La limitation est attribuable à la nature cumulative des probabilités de corrosion, qui se manifeste surtout aux potentiels limites, c'est-à-dire lorsque deux potentiels de corrosion sont très proches d'un potentiel limite qui les sépare en deux catégories adjacentes de probabilités de corrosion. Seule une probabilité de corrosion qui est une fonction continue d'une valeur de potentiel de corrosion peut casser cette limitation en éliminant les potentiels limites, ce qui n'est pas démontré dans la littérature existante à notre connaissance. Les sections qui précèdent ont établi la PDF approximative, $\hat{f}(x)$, de la distribution des potentiels de corrosion sur la base de laquelle la section qui suit modélisera la probabilité de corrosion en tant que fonction continue d'une valeur de potentiel de corrosion.

Tableau 19 Statistiques de potentiel de corrosion pour la corrosion active et l'absence de corrosion

	Acier au carbone		Acier galvanisé	
	Moyenne des E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)	Observations (fois)	Moyenne des E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)	Observations (fois)
Absence de corrosion	-167	154 (43 %)	-387	257 (38 %)
Corrosion active	-453	208 (57 %)	-616	411(62 %)

Tableau 20 Seuils de potentiels de corrosion pour différentes probabilités de corrosion

	Acier au carbone		Acier galvanisé			
	Probabilité d'absence de corrosion pour les potentiels de corrosion plus positifs que m					
$P(N - C E_{corr} > m)$	95 %	90 %	95 %	90 %	85 %	80 %
m , limite supérieure	-225	-280	-300 mV	-335 mV	-365 mV	-400 mV
Probabilité de corrosion active pour les potentiels de corrosion plus négatifs que n						
$P(A - C E_{corr} \leq n)$	95 %	90 %	95 %	90 %	85 %	80 %
n , limite inférieure	-340 mV	-280	-700 mV	-610 mV	-430 mV	-400 mV

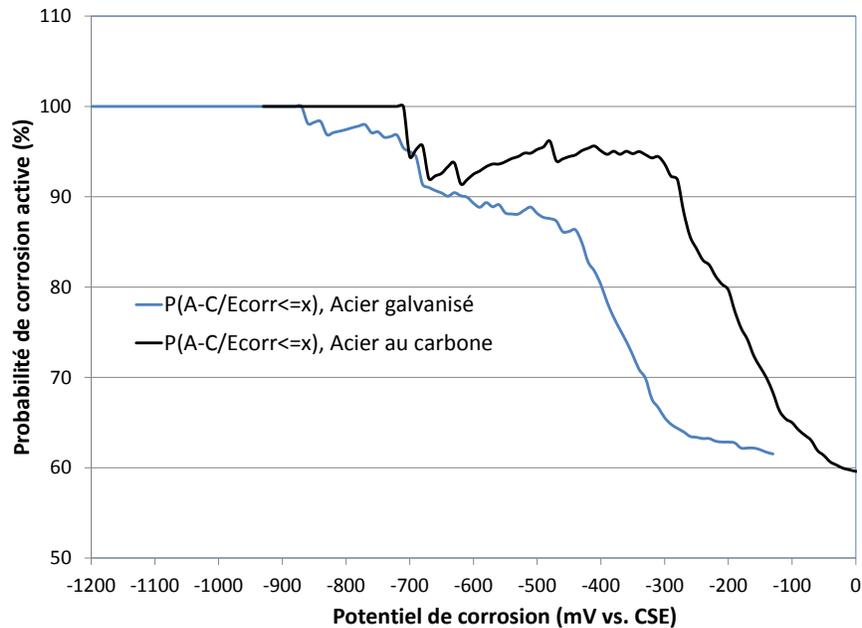


Figure 64 Probabilité de corrosion active cumulative en fonction du potentiel de corrosion

Tableau 21 Modèle/lignes directrices n° 1 basé sur des probabilités cumulatives pour l'acier galvanisé

Intervalle de relevés de potentiel par demi-pile (mV par rapport à l'ESC)	$E_{corr} > -335$		$-500 < E_{corr} \leq -335$		$-610 < E_{corr} \leq -500$		$E_{corr} \leq -610$		Total
	Données totales	105		262		130		171	
Absence de corrosion	84	90 %	139	48 %	15	15 %	19	10 %	257
Corrosion active	9	10 %	149	52 %	83	85 %	170	90 %	411
Lignes directrices	10 % de probabilité de corrosion active		Incertain		85 % de probabilité de corrosion active		90 % de probabilité de corrosion active		

Tableau 22 Modèle/lignes directrices n° 2 basé sur des probabilités cumulatives pour l'acier galvanisé

Intervalle de relevés de potentiel par demi-pile (mV par rapport à l'ESC)	$E_{corr} > -335$		$-400 < E_{corr} \leq -335$		$-500 < E_{corr} \leq -400$		$-610 < E_{corr} \leq -500$		$E_{corr} \leq -610$		Total
	Données totales	93		114		174		98		189	
Absence de corrosion	84	90 %	82	72 %	57	33 %	15	15 %	19	10 %	257
Corrosion active	9	10 %	32	28 %	117	67 %	83	85 %	170	90 %	411
Lignes directrices	10 % de probabilité de corrosion active		30 % de probabilité de corrosion active		70 % de probabilité de corrosion active		85 % de probabilité de corrosion active		90 % de probabilité de corrosion active		

4.3 Vers une modélisation avancée de la probabilité de corrosion

Trois concepts ont été définis dans les sections précédentes, lesquelles définitions sont des étapes nécessaires en vue de la modélisation de la probabilité de corrosion de l'acier galvanisé, sur laquelle porte la présente section. Ces définitions sont présentées ci-dessous :

1. $\hat{f}(x)$ dans l'éq. 3 est la densité de probabilité du potentiel de corrosion sur un intervalle de 100 mV centré en x ;
2. $\hat{f}(x|N - C)$ dans l'éq. 7 et $\hat{f}(x|A - C)$ dans l'éq. 8 sont les densités de probabilité du potentiel de corrosion pour l'absence de corrosion et la corrosion active, respectivement, sur un intervalle de 100 mV centré en x ;
3. $P(N - C|a < E_{corr} \leq b)$ dans l'éq. 13 ou $P(A - C|a < E_{corr} \leq b)$ dans l'éq. 14 sont les probabilités de corrosion pour les potentiels de corrosion entre a et b .

Sur la base des trois définitions ci-dessus, la probabilité de corrosion pour une valeur unique de potentiel de corrosion, $E_{corr}=x$, peut donc être définie comme étant la probabilité de corrosion à l'intérieur d'un intervalle de 100 mV centré autour de x . Si nous substituons l'intervalle ($x-50$ mV, $x+50$ mV] dans les équations 13 et 14, nous obtenons les équations suivantes :

$$P(N - C|x) = P(N - C|x - 50 \text{ mV} < E_{corr} \leq x + 50 \text{ mV})$$

$$(15(A - C|x) = P(A - C|x - 50 \text{ mV} < E_{corr} \leq x + 50 \text{ mV})$$

$$(16)$$

La probabilité de corrosion est donc définie comme étant une fonction continue de toute valeur de potentiel de corrosion x , soit, essentiellement, la probabilité de corrosion pour des potentiels de corrosion de ($x-50$ mV, $x+50$ mV]. On peut également poser les équations 15 et 16 en fonction des définitions $\hat{f}(x|N - C)$, $\hat{f}(x|A - C)$ et $\hat{f}(x)$ établies du potentiel de corrosion en utilisant la règle de la probabilité conditionnelle tirée de la statistique de base (Ang et Tang, 2007), $P(E1|E2)=P(E2|E1) \times P(E1)/P(E2)$, comme suit :

$$P(N - C|x) = \frac{\hat{f}(x|N - C)}{\hat{f}(x)} * P(N - C)$$

$$(17)$$

$$P(A - C|x) = \frac{\hat{f}(x|A - C)}{\hat{f}(x)} * P(A - C)$$

$$(18)$$

où $P(N - C)$ et $P(A - C)$ ont été définis dans les équations 9 et 10, avec $P(N - C|x) + P(A - C|x) = 1$.

La Figure 65 montre la probabilité de corrosion active (en rouge) et la probabilité d'absence de corrosion (en vert) (axe des Y) de l'acier galvanisé en fonction du potentiel de corrosion (axe des X), ainsi que le nombre de données utilisées pour le calcul de chaque valeur de probabilité (en bleu, axe des Y de droite). Par exemple, lorsque le potentiel de corrosion (E_{corr}) de l'acier galvanisé est de -282 mV, la probabilité d'absence de corrosion de l'acier galvanisé est de 90 %. Il en découle qu'un potentiel de corrosion se situant entre (-332 mV, -232 mV] est assorti d'une

probabilité d'absence de corrosion de 90 %. Comparativement au modèle/lignes directrices n° 1 et au modèle/lignes directrices n° 2, basés sur des probabilités cumulatives, le modèle statistique basé sur la fonction de distribution de probabilités (PDF) présente les trois avantages suivants :

1. Il offre une résolution plus fine de la probabilité de corrosion pour l'évaluation de l'état. En utilisant la probabilité de corrosion cumulative $P(N - C | E_{corr} > x)$, il indique que pour tout potentiel de corrosion plus positif que -335 mV, la probabilité d'absence de corrosion est de 90 %. Ce modèle de probabilité en fonction d'un potentiel de corrosion continu procure une résolution plus fine, car il montre que pour un potentiel de corrosion entre (-332 mV, -232 mV], la probabilité d'absence de corrosion est de 90 %. Pour la même raison, ce modèle est en mesure d'identifier un potentiel de corrosion de -403 mV correspondant à une probabilité de corrosion active et une probabilité d'absence de corrosion de 50 %, ce qui signifie qu'entre (-453 mV, -353 mV], la moitié des 191 données recueillies (valeurs de la courbe bleue sur l'axe des Y de droite, à la Figure 65) dénotaient une corrosion active et l'autre moitié, une absence de corrosion, ce qui correspond à l'intervalle des potentiels de corrosion qui représente un état de corrosion « incertain ».
2. Le modèle élimine la limitation aux valeurs limites des modèles basés sur des probabilités cumulatives. On se rappellera l'exemple des trois potentiels de corrosion -334 mV, -336 mV et -399 mV. Parce que -334 mV et -336 mV sont proches, mais de part et d'autre de la limite de potentiel de -335 mV pour une probabilité de corrosion active de 10 %, la valeur -334 mV finit par correspondre à une probabilité de corrosion différente de -336 mV et -399 mV. Si l'on calcule la probabilité de corrosion comme une fonction continue du potentiel de corrosion, d'autre part, les trois potentiels de corrosion donnent respectivement comme probabilité de corrosion active les valeurs 24,6 %, 25,2 % et 47,2 %. La paire -334 mV et -336 mV a alors des probabilités de corrosion plus similaires que la paire -336 mV et -399 mV.
3. Surtout, ce modèle montre, à la Figure 65 pour l'acier galvanisé et à la Figure 66 pour l'acier au carbone, que la probabilité d'absence de corrosion (corrosion active) augmente (diminue) généralement lorsque le potentiel de corrosion devient plus positif, mais pas toujours d'une façon régulière, ce qui est conforme à l'action des mécanismes de corrosion, selon lesquels les paramètres de corrosion clés influent sur le taux de corrosion et les potentiels de corrosion de manière contraire, comme nous l'avons mentionné au chapitre 3. Par exemple, entre les potentiels de corrosion allant d'environ -700 à -600 mV pour les deux aciers, on remarque une légère diminution de la probabilité de corrosion active par rapport aux potentiels de corrosion voisins plus positifs. Il capture les moments de résistance à la corrosion lorsque des potentiels plus négatifs ne signifient pas un taux de corrosion plus élevé, principalement en raison du manque d'oxygène dans le béton saturé. Dans des communications avec le MTO et une étude sur le terrain (Olson et Nagi, 2002), il y a en fait eu des cas où l'enlèvement de l'enrobage du béton pour exposer l'armature en acier, à l'endroit où les potentiels de corrosion mesurés étaient autour de -700 mV, a révélé un armature en acier intact. Les modèles de probabilité de corrosion catégoriques ne peuvent pas capturer cette résistance à la corrosion parce qu'ils sont essentiellement basés sur les probabilités de corrosion cumulatives sur un intervalle fixe des potentiels de corrosion.

Comparons l'acier galvanisé à l'acier au carbone à la Figure 65 et la Figure 66, respectivement. Nous constatons que $E_{corr} = -185$ mV pour l'acier au carbone (-282 mV pour l'acier galvanisé) correspond à une probabilité d'absence de corrosion de 90 %, et que $E_{corr} = -295$ mV pour l'acier au carbone (-403 mV pour l'acier galvanisé) correspond à une probabilité de corrosion active et une probabilité d'absence de corrosion de 50 %. Ce modèle capture également la différence fondamentale entre les deux aciers du point de vue des lignes directrices d'évaluation de l'état.

Comme nous l'avons mentionné à la section 4.1.2 sur la fonction de distribution de probabilités approximative du potentiel de corrosion $\hat{f}(x)$, plus l'intervalle autour de x est étroit, mieux il représente la « densité ». Dans la présente étude, nous avons choisi la valeur 100 mV afin d'inclure suffisamment de données à l'intérieur de l'intervalle. À l'avenir, si plus de données sur la corrosion crédibles peuvent être obtenues de différentes sources, l'intervalle pourra être réduit et la précision pourra être améliorée.

Les courbes de probabilité de corrosion pour l'acier galvanisé, qui constituent le modèle P, sont également présentées sur la carte de la Figure 67 comme outils d'évaluation de l'état de la corrosion pour l'acier galvanisé dans les ouvrages en béton. Les données pour le modèle P peuvent être régressées par un polynôme du second degré entre -286 mV et -500 mV, comme on peut le voir à la Figure 68, avec une valeur R^2 de 0,99. Dans les autres intervalles de potentiel de corrosion, la probabilité de corrosion en fonction du potentiel de corrosion peut être simulée comme suit à partir de la figure : i) pour les potentiels de corrosion plus positifs que -286 mV, la probabilité d'absence de corrosion est supérieure à 90 % ou la probabilité de corrosion active est inférieure à 10 %; ii) pour les potentiels de corrosion entre -725 mV et -500 mV, la probabilité de corrosion active peut être simulée prudemment à une valeur constante de 85 %; et iii) pour les potentiels de corrosion plus négatifs que -725 mV, la probabilité de corrosion active est supérieure à 90 %.

En résumé, le modèle P peut être représenté par la fonction de probabilité de corrosion active de l'acier galvanisé, $f(E_{corr})$ suivante :

$$\begin{aligned}
 & \text{Probabilité de corrosion active de l'acier galvanisé} = f(E_{corr}) \\
 & = \begin{cases} < 10 \%, E_{corr} > -286 \\ \mathbf{0.0005E_{corr}^2 + 0.0183E_{corr} - 25.083}, -500 < E_{corr} \leq -286 \\ 85 \%, -725 < E_{corr} \leq -500 \\ \geq 90 \%, E_{corr} \leq -725 \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

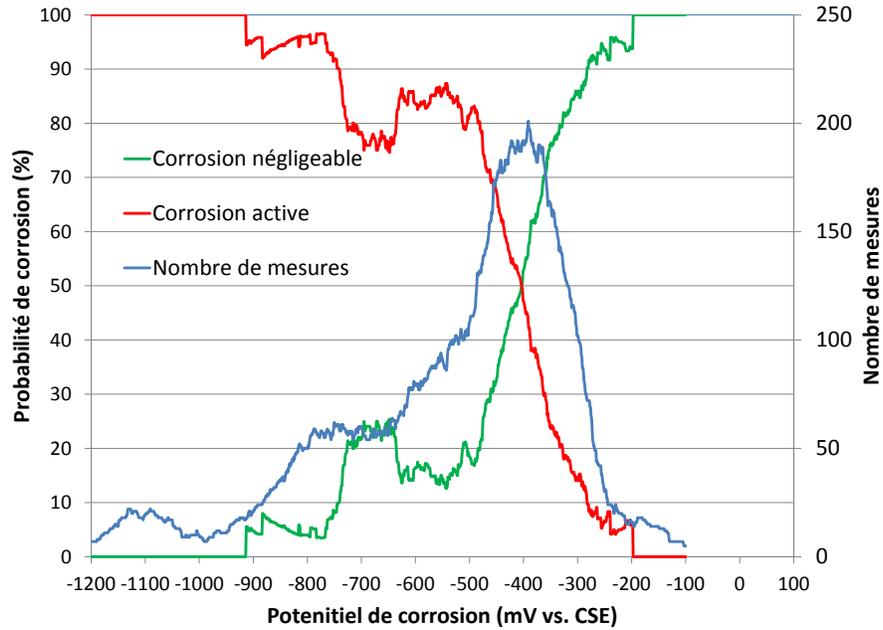


Figure 65 Probabilité de corrosion de l'acier galvanisé comme fonction continue du potentiel de corrosion

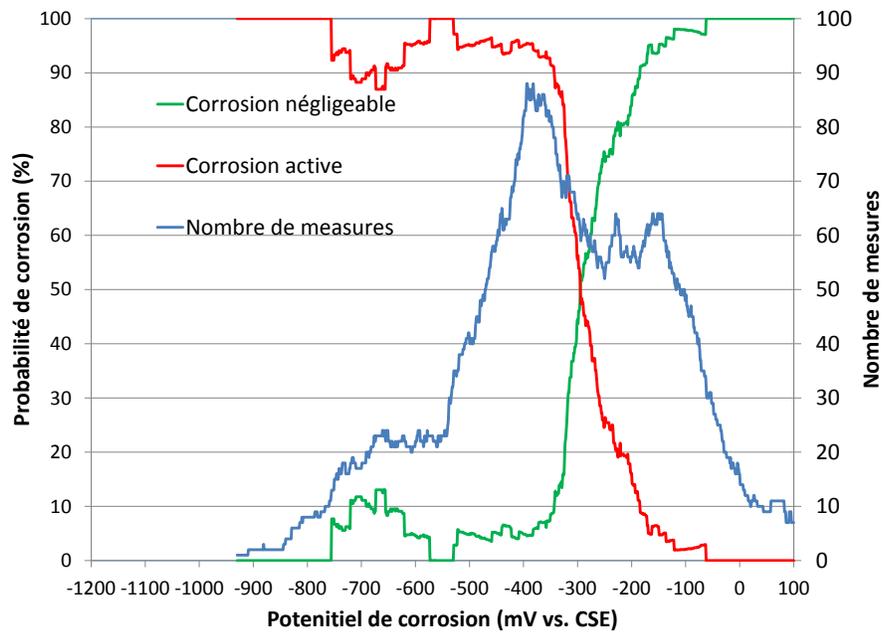


Figure 66 Probabilité de corrosion de l'acier au carbone comme fonction continue du potentiel de corrosion

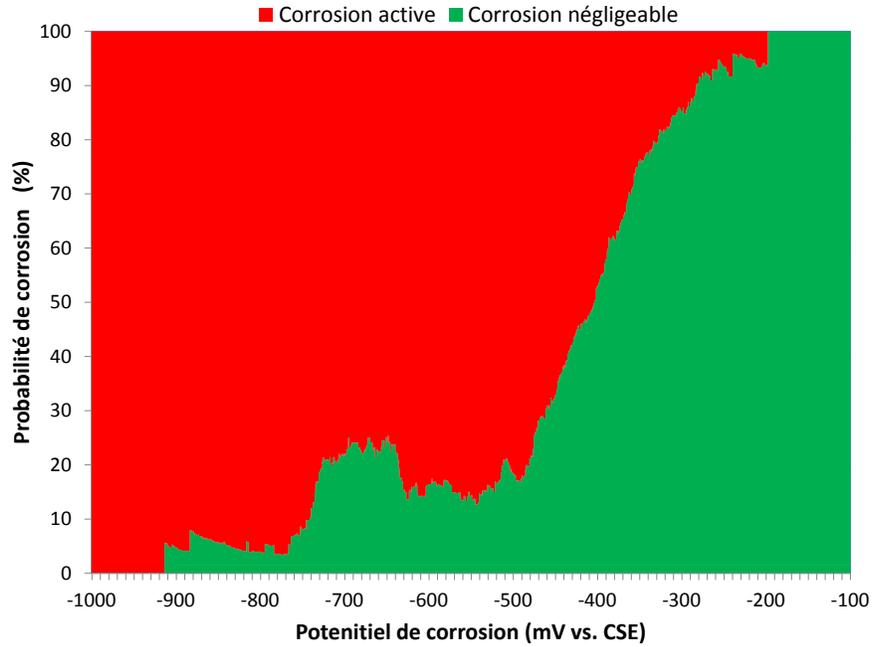


Figure 67 Probabilité de corrosion de l'acier galvanisé en fonction du potentiel de corrosion

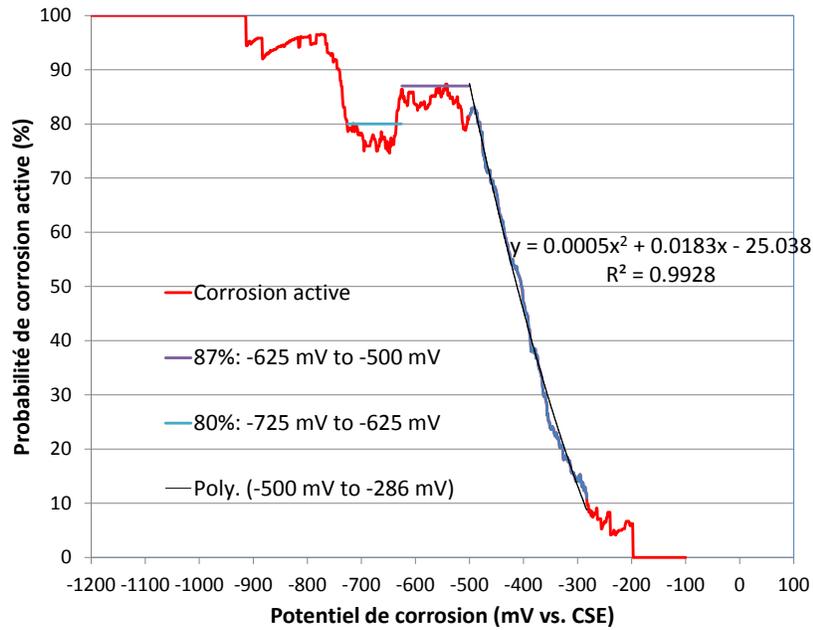


Figure 68 Probabilité de corrosion de l'acier galvanisé en fonction du potentiel de corrosion, modèle P

4.4. Résumé

Le présent chapitre incluait deux parties desservant l'objectif principal de l'étude : i) une analyse statistique des données sur la corrosion recueillies qui a fait progresser la compréhension de la résistance à la corrosion; et ii) l'élaboration d'un modèle/lignes directrices, sur l'utilisation du potentiel de corrosion pour l'évaluation de l'état de la corrosion de l'acier galvanisé, équivalant aux lignes directrices de la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone. De plus, un modèle plus avancé qui calcule la probabilité de corrosion comme fonction continue du potentiel de corrosion a également été élaboré.

Détermination de la résistance à la corrosion au moyen de l'analyse statistique

L'analyse statistique a généré de l'information comparative précieuse sur la résistance à la corrosion des deux aciers, en complément à l'analyse de la résistance à la corrosion. Elle a confirmé que l'acier galvanisé avait une densité de courant de corrosion passif plus élevée, mais une fois la corrosion active initiée, présentait un taux de corrosion plus faible que l'acier au carbone.

La distribution des potentiels de corrosion confirme que l'acier galvanisé avait des potentiels de corrosion beaucoup plus négatifs que l'acier au carbone. Leur différence a également été quantifiée statistiquement : i) à l'état passif d'absence de corrosion, la fréquence de pointe du potentiel de corrosion se produit entre -200 et -100 mV pour l'acier au carbone, et entre -400 et -300 mV pour l'acier galvanisé; ii) à l'état de corrosion active, les fréquences de pointe se situent entre -500 et -300 mV pour l'acier au carbone, et entre -600 et -400 mV pour l'acier galvanisé. Cela montre la nécessité d'établir des lignes directrices d'évaluation de l'état pour l'acier galvanisé qui sont différentes des lignes directrices de la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone.

Modélisation statistique du potentiel de corrosion

La fonction de distribution de probabilités (PDF) du potentiel de corrosion a été établie pour la première fois tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone. Contrairement à l'histogramme des intervalles discrets, elle permet le calcul des probabilités sur un intervalle qui est continu à partir de toute valeur de potentiel de corrosion. La PDF est un outil très utile pour comprendre la distribution continue des potentiels de corrosion au-delà des intervalles discrets d'un histogramme. Elle a également permis de faire avancer la compréhension du fait que pour tout potentiel de corrosion mesuré au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile, il existe une probabilité de corrosion active et une probabilité d'absence de corrosion de l'armature en acier dans les ouvrages en béton. La PDF confirme les constatations de l'analyse de la résistance à la corrosion selon lesquelles une fonction déterministe qui utilise le potentiel de corrosion pour prédire le taux de corrosion ne conviendrait pas pour les deux aciers dans les ouvrages en béton, et sert d'étape importante en vue de l'élaboration d'un modèle avancé qui calcule la probabilité de corrosion en tant que fonction continue d'un potentiel de corrosion mesuré au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile.

Modèle/lignes directrices élaboré pour l'acier galvanisé

Trois niveaux de modèle/lignes directrices tenant compte des progrès réalisés en matière de compréhension, allant de l'analyse de la corrosion à l'analyse statistique, ont été élaborés pour l'acier galvanisé dans les ouvrages en béton. Le modèle/lignes directrices basé sur la résistance à la corrosion était fondé sur l'observation de la corrélation entre les potentiels de corrosion et les

taux de corrosion obtenue à partir d'un large éventail d'états de corrosion. Les lignes directrices élaborées pour l'acier au carbone au moyen des données sur la corrosion obtenues dans le cadre de l'étude sont conformes aux lignes directrices de la norme ASTM C876 et servent à un objectif important de validation des données sur la corrosion du point de vue du protocole et des mesures.

Le modèle/lignes directrices de niveau 2 a été élaboré à partir de l'analyse des probabilités cumulatives qui détermine les limites de potentiel de corrosion pour différentes probabilités de corrosion active ou d'absence de corrosion recherchées. Les caractéristiques tant du modèle/lignes directrices no 1 que du modèle/lignes directrices no 2 sont résumées au Tableau 23. Ces modèles/lignes directrices peuvent être utilisés pour l'acier galvanisé comme équivalents des lignes directrices de la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone. Le modèle/lignes directrices n° 1 fournit quatre probabilités de corrosion dans quatre intervalles de potentiels de corrosion, et le modèle/lignes directrices n° 2 fournit plus de découpages des probabilités de corrosion dans cinq intervalles de potentiels de corrosion. Ils vont dans le sens des progrès de l'analyse et, de ce fait, deviennent d'une utilisation plus appropriée lorsque les ressources pour effectuer des mesures de taux de corrosion sur le terrain sont plus limitées parce que l'intervalle des potentiels de corrosion pour l'aire des états de corrosion incertains a été réduit davantage grâce aux progrès de la modélisation.

Tableau 23 Modèles/lignes directrices basés sur les probabilités cumulatives pour l'établissement de la probabilité de corrosion de l'acier galvanisé

Modèle/lignes directrices n° 1	
Relevés de potentiel par demi-pile E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)	État de corrosion
$E_{corr} > -335$	10 % de probabilité de corrosion active
$-500 < E_{corr} \leq -335$	Incertain
$-610 < E_{corr} \leq -500$	85 % de probabilité de corrosion active
$E_{corr} \leq -610$	90 % de probabilité de corrosion active
Modèle/lignes directrices n° 2	
Relevés de potentiel par demi-pile E_{corr} (mV par rapport à l'ESC)	État de corrosion
$E_{corr} > -335$	10 % de probabilité de corrosion active
$-400 < E_{corr} \leq -335$	30 % de probabilité de corrosion active
$-500 < E_{corr} \leq -400$	70 % de probabilité de corrosion active
$-610 < E_{corr} \leq -500$	85 % de probabilité de corrosion active
$E_{corr} \leq -610$	90 % de probabilité de corrosion active

La limitation fondamentale des modèles/lignes directrices ci-dessus découle de la nature cumulative des probabilités de corrosion. Elle se manifeste principalement lorsque deux potentiels de corrosion sont très proches d'une limite de potentiel qui les sépare dans deux catégories de probabilité de corrosion adjacentes. Un modèle P avancé de troisième niveau a été élaboré pour la première fois, et calcule la probabilité de corrosion à partir d'une fonction continue de potentiel de corrosion en appliquant le concept et la méthodologie des fonctions de distribution de probabilités. Ce modèle ne procure pas seulement une résolution plus fine que les modèles/lignes directrices ci-dessus basés sur les probabilités cumulatives. Il évite la limitation aux limites de potentiel de corrosion et tient également compte du fait que le potentiel de

corrosion n'est pas toujours relié inversement au taux de corrosion à la suite de l'effet combiné des paramètres de corrosion clés.

Il est à noter que si le modèle/lignes directrices était basé sur une grande quantité de données constituées de 668 taux de corrosion et 668 potentiels correspondants obtenus à partir d'un large éventail d'états de corrosion, la collecte de plus de données crédibles et représentatives à l'avenir améliorerait l'exactitude de tous ces modèles/lignes directrices, en particulier les modèles/lignes directrices avancés que sont le modèle/lignes directrices n° 1, le modèle/lignes directrices n° 2 et le modèle P.

CHAPITRE 5 : VALIDATION DES MODÈLES ET DES LIGNES DIRECTRICES POUR L'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DE CORROSION

Le chapitre présente l'évaluation de l'état de corrosion au moyen des modèles/lignes directrices élaborés et la validation de ces derniers au moyen des données sur la corrosion recueillies sur deux ponts routiers en béton avec armature d'acier galvanisé.

5.1 Étude sur le terrain

Cette section présente les résultats de l'étude de la corrosion effectuée sur des piliers de deux ponts routiers en septembre 2014. Les données incluent les potentiels de corrosion mesurés au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile, les taux de corrosion, la teneur en chlorures des échantillons de béton, ainsi que des examens visuels.

5.1.1 Information sur les ponts et l'étude sur le terrain

L'étude de la corrosion a été effectuée sur le pont 13540 et le pont 13577 du ministère des Transports du Québec (MTQ), qui enjambent l'autoroute 30 dans la grande région de Montréal. Ces ponts ont été construits en 1966 et 1965, respectivement. En 1997, le CNRC a mené une étude de la corrosion sur des piliers des deux ponts, étude dont les résultats ont été présentés dans un rapport (Chagnon et coll., 1997). En 2014, nous avons effectué dans le cadre du présent projet des mesures de potentiel par demi-pile et de taux de corrosion aux mêmes emplacements que l'étude de 1997, ce qui nous a permis d'observer le changement sur une période de 17 ans, en plus de l'objectif principal de validation des lignes directrices élaborées relativement à l'évaluation de l'état de corrosion.

Les Figure 69 à Figure 72 montrent des photos des quatre piliers de chaque pont prises pendant l'étude sur le terrain. Pour chaque pilier, les données sur la corrosion ont été obtenues du côté qui fait face à la circulation et une carotte de béton a été prélevée pour l'analyse de la teneur en chlorures. La carotte de béton a été prélevée près du raccordement électrique où une carotte avait été prélevée en 1997 en vue de l'analyse de la teneur en chlorures. Nous avons utilisé un Elcometer pour mesurer l'épaisseur du revêtement de zinc sur les barres d'armature galvanisées exposées après chaque carottage. Sur les huit piliers étudiés, aucun ne présentait des réparations visibles, sauf le pilier 1A du pont 13577. Un coin de la semelle présentait une réparation par rapiéçage effectuée entre 1997 et 2014 peut-être à la suite d'un affouillement, comme on peut le voir à la Figure 73.

Les taux de corrosion rapportés ont été obtenus au moyen d'un Galvapulse. Cet instrument induit une petite impulsion de courant anodique dans l'armature à partir d'une contre-électrode placée sur la surface du béton et d'une électrode de référence Ag/AgCl, ce qui a pour effet de polariser l'armature dans le sens anodique par rapport à son potentiel de corrosion libre. Le potentiel électrochimique induit est une fonction du temps en raison de la capacité électrique de double couche à l'interface barre d'armature et béton (Jones, 1992). Son ordre de grandeur est déterminé par la résistance à la polarisation et la résistance ohmique du béton. On peut donc utiliser ce potentiel transitoire pour estimer le taux de corrosion au moyen de la résistance à la polarisation calculée.

On sait toutefois que le taux de corrosion calculé au moyen du Galvapulse peut être de trois à quatre fois supérieur au taux de corrosion réel qui serait obtenu au moyen de la technique de la résistance à la polarisation linéaire (LPR ou *Linear Polarization Resistance*) (Petersen, 2003). Le Tableau 24 montre les interprétations correspondantes de l'état de corrosion par la lecture de

taux de corrosion mesurée au moyen du Galvapulse, par rapport au taux de corrosion réel mesuré au moyen de la LPR (Tableau 2). Un taux de corrosion réel inférieur à $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ est considéré comme un taux de corrosion négligeable (absence de corrosion); p. ex. toutes les données de taux de corrosion en laboratoire de notre étude ont été obtenues au moyen de la LPR. Une lecture de taux de corrosion, mesuré au moyen du Galvapulse, inférieur à $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ est considéré comme un taux de corrosion négligeable correspondant à une absence de corrosion.

Dans le cadre de notre projet, nous avons également étudié la corrélation entre les deux taux de corrosion mesurés pour les mêmes états de corrosion, mais au moyen des deux techniques, comme le montre la Figure 74. Les taux de corrosion mesurés au moyen de la LPR se situaient entre $0,1$ et $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (axe des X), et étaient considérés comme des taux de corrosion bas. Les lectures de taux de corrosion correspondantes effectuées au moyen du Galvapulse se situaient entre $0,5$ et $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (axe des Y), et étaient également considérées comme des taux de corrosion bas. En outre, les lectures du Galvapulse se sont révélées environ 3,78 fois plus élevées que les taux de corrosion réels, comme on peut le voir sur la figure, ce qui a également confirmé les indications du fabricant, c'est-à-dire des lectures de trois à quatre fois plus élevées (Petersen, 2003). Tous les potentiels par demi-pile cités dans le présent chapitre ont été mesurés de façon indépendante par rapport à l'électrode Cu/CuSO_4 (CSE) et non par rapport à l'électrode Ag/AgCl utilisée par le Galvapulse.

Tableau 24 Taux de corrosion type de l'acier dans le béton au moyen de différentes techniques

Taux de corrosion et niveau	Valeur de densité de courant déterminée au moyen de la LPR i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)*	Valeur de densité de courant déterminée au moyen du GalvaPulse + i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Élevé	$i_{corr} > 1,0$	$i_{corr} > 15$
Modéré	$0,5 < i_{corr} < 1,0$	$5 < i_{corr} < 15$
Bas	$0,1 < i_{corr} < 0,5$	$0,5 < i_{corr} < 5$
Négligeable (passive)	$i_{corr} \leq 0,1$	$i_{corr} \leq 0,5$

* Andrade et Alonso (1996), CT-154 de la RILEM (2004), Petersen (2003), Germann Instruments.

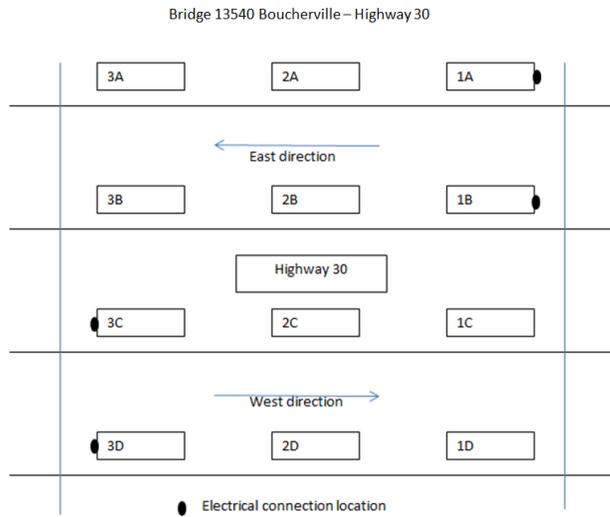


Figure 69 Illustration schématique des piliers du pont 13540



Figure 70 Photo du pont 13540 à l'intersection du boul. Montarville et de l'autoroute 30

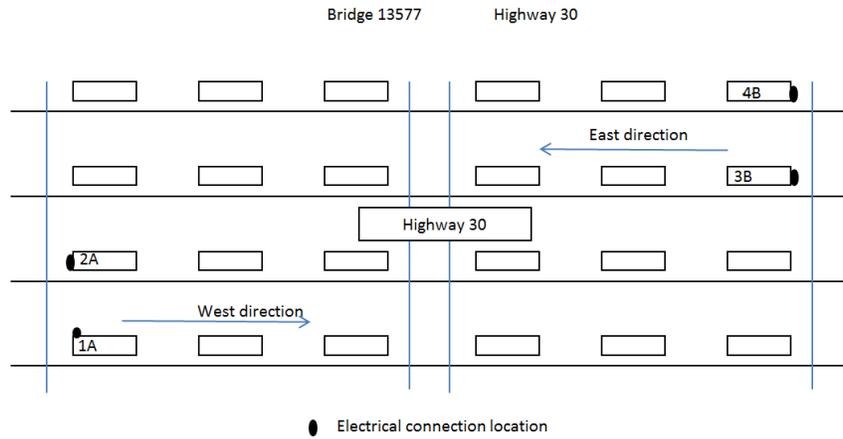


Figure 71 Illustration schématique des piliers du pont 13577



Figure 72 Photo du pont 13577 à l'intersection de la route 116 et de l'autoroute 30



Figure 73 Réparation par rapiçage observée sur le pilier 1A du pont 13577

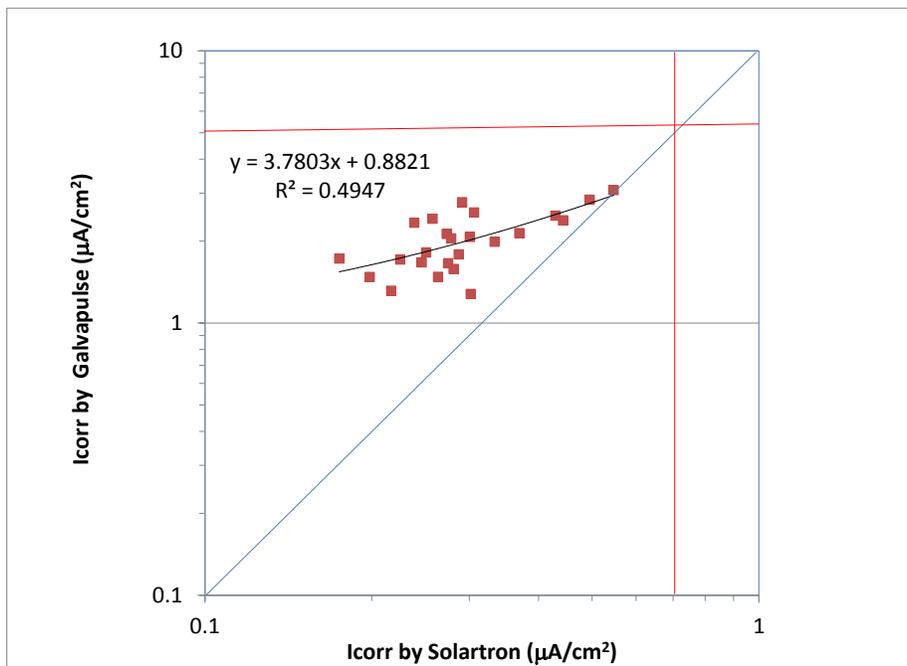


Figure 74 Corrélation entre le taux de corrosion réel et la lecture de taux de corrosion au moyen du Galvapulse

5.1.2 Données d'étude et discussion

Les Tableaux 25 à 48 présentent les potentiels de corrosion mesurés au moyen de la technique des relevés de potentiel par demi-pile, les taux de corrosion et le changement de potentiel de corrosion au cours des 17 dernières années pour chacun des huit piliers. Les potentiels de corrosion obtenus dans le cadre de l'étude sur le terrain sont appelés potentiels par demi-pile dans le présent chapitre pour les distinguer des données des chapitres précédents obtenues en laboratoire. Le Tableau 49 et le Tableau 50 montrent la teneur en chlorures de chacun des piliers des deux ponts.

Pour le pont 13540, les potentiels par demi-pile du pilier 1A (Tableau 25) mesurés en 2014 se sont révélés plus négatifs qu'en 1997, plus négatifs de plus de 100 mV en certains points. Les trois autres piliers, 1B, 3C et 3D, ont montré beaucoup moins de changement de leurs potentiels par demi-pile que le pilier 1A. Sur les piliers 3C et 3D, environ un tiers des points sont même devenus plus positifs qu'en 1997. Les taux de corrosion ont été mesurés en trois points de chaque pilier le long de hauteurs d'environ 0-1,0 m, 1,0-2,0 m et 2,0-2,7 m, respectivement. Les douze points présentaient des taux de corrosion de 0,5 à 3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ mesurés au moyen d'un GalvaPulse, soit des taux de corrosion bas (Tableau 24). Les taux de corrosion mesurés en 1997 au moyen d'un Gecor 6 étaient eux aussi principalement des taux de corrosion bas. Il semble que ces points aient été stables à des taux de corrosion bas au cours des 17 saisons estivales allant d'août 1997 à septembre 2014.

Pour le pont 13577, les potentiels par demi-pile du pilier 1A sont devenus plus négatifs qu'en 1997 pour la plupart des points, sauf dans le coin inférieur est, où ils sont devenus plus positifs de jusqu'à 110 mV, ce qui pourrait être causé par la réparation par rapiéçage à la semelle (Figure 73). Dans le cas du pilier 2A et du pilier 4B, environ le tiers des points montraient des potentiels par demi-pile plus positifs qu'en 1997. Tous les potentiels par demi-pile du pilier 3B étaient plus négatifs qu'en 1997, de jusqu'à 120 mV. Les taux de corrosion des piliers du pont 13577 se sont situés entre 0,2 et 1,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Tous les points présentaient un taux de corrosion bas, sauf deux points sur le pilier 1A pour lesquels le taux de corrosion était négligeable (absence de corrosion). Les taux de corrosion mesurés en 1997 étaient également surtout des taux de corrosion bas. Pour ces quatre piliers du pont 13577, la majeure partie des taux de corrosion semblaient également s'être stabilisés à des taux bas pendant les saisons estivales des 17 dernières années.

Un carottage du béton a été effectué sur chaque pilier et l'épaisseur de l'enrobage de béton s'est révélé être de 50 mm à 65 mm. La teneur en chlorures a été analysée à des profondeurs de 10 mm, 30 mm et 50 mm de la surface conformément aux normes ASTM C 1152/C1152M-04. Les valeurs correspondantes sont présentées au Tableau 49 et au Tableau 50 pour les ponts 13540 et 13577, respectivement. On peut constater que, pour les deux ponts, la teneur en chlorures n'a pas nécessairement diminué avec la profondeur dans le béton. Une partie des chlorures pourrait avoir été mélangée au béton dès le début. La pénétration des chlorures peut ne pas être dominée par le processus de diffusion, mais s'être faite par adsorption de cycles humides/secs ainsi que par des fissures dans le béton. La teneur en chlorures allait de 0,2 % à 0,35 % par poids de béton pour le pont 13540, et de 0,18 % à 0,56 % pour le pont 13577. La teneur en chlorures de 0,2 % par poids de béton équivaut approximativement à 1,4 % de la masse de ciment, en supposant que la masse de la teneur en ciment est égale à 1/7 du béton ou est équivalente à 4,2 kg/m^3 par volume de béton, en supposant une densité du béton de 2100 kg/m^3 .

Les teneurs en chlorures à ces deux ponts se sont donc révélées supérieures à la valeur seuil de l'acier galvanisé, qui était d'environ 1,5 kg/m³ (Darwin et coll., 2006).

Le chapitre 3 a montré que le pire état menant à une corrosion rapide serait dans des environnements à une HR d'environ 80 % comme E-4. Le taux de corrosion de l'acier galvanisé dans l'environnement E-4 s'est stabilisé à un taux de corrosion bas pour 1 % de chlorures par masse de ciment (3,6 kg/m³), ce qui pourrait expliquer le fait que les barres d'armature en acier galvanisé dans les ponts 13540 et 13577 aient présenté surtout des taux de corrosion bas au cours des 17 dernières saisons estivales.

Le Tableau 51 résume les résultats des examens visuels des barres d'armature après chaque carottage du béton, examens au cours desquels un Elcometer portatif a été utilisé pour mesurer l'épaisseur du revêtement restant. Des produits de corrosion du zinc blanchâtres ont été trouvés sur les quatre barres en acier galvanisé exposées du pont 13540, indiquant une corrosion active des barres confirmant les taux de corrosion bas mesurés. Aucun produit de corrosion brun/rougeâtre typique de l'acier au carbone n'a été trouvé sur les piliers 1B, 3C et 3D, ce qui indique que le substrat d'acier au carbone a été protégé de la corrosion pendant 48 ans. Seul le site de carottage sur le pilier 1A du pont 13540 a présenté un peu de produits de corrosion bruns/rougeâtres indiquant que le substrat d'acier au carbone avait commencé à se corroder à cet endroit. Parmi les quatre sites de carottage, le pilier 1A est celui qui a démontré le pire état de corrosion et sa teneur en chlorures à 50 mm de profondeur (Tableau 49) était également la plus élevée à 0,34 % par poids de béton. La surface des barres d'armature du pilier 1B a montré la plus petite quantité de produits de corrosion du zinc, ce qui donne à penser que le pilier 1B peut avoir le meilleur état de corrosion des quatre piliers. Sa teneur en chlorures s'est révélée être la plus basse, à 0,20 % par poids de béton, malgré qu'elle ait été similaire à celle du pilier 3C, qui avait 0,21 % de chlorures à la surface des barres d'armature.

Sur le pilier 1A du pont 13577, seuls des produits de corrosion blanchâtres (Tableau 25) ont été trouvés à la surface des barres d'armature et aucun produit de corrosion brun/rougeâtre n'a été trouvé, ce qui indique que le substrat d'acier au carbone a été protégé. Sur les piliers 2A et 4B, des points de corrosion bruns/rougeâtres étaient clairement visibles, ce qui indique que l'acier au carbone avait commencé à se corroder à ces endroits; cependant, aucune fissuration dans le béton n'a été trouvée, ce qui indique que la corrosion du substrat d'acier au carbone était localisée ou n'avait pas commencé depuis longtemps. Il n'a pas été possible d'effectuer un bon examen visuel du site de carottage du pilier 3B. L'examen visuel effectué dans le cas du pilier 1A donne à penser que le pilier 1A avait le pire état de corrosion, mais le pilier 4B s'est révélé avoir le pire état de corrosion des piliers 1A, 2A et 4B. Le pilier 4B est celui qui avait la plus haute teneur en chlorures (Tableau 50), soit 0,56 %, et les piliers 1A et 2A avaient la plus basse teneur en chlorures, à 0,20 % et 0,18 %, respectivement.

L'examen visuel des sept sites de carottage a confirmé les mesures de taux de corrosion et les constatations de l'analyse de la teneur en chlorures selon lesquelles la majeure partie des barres d'armature en acier galvanisé avaient fait l'objet de taux de corrosion bas. Les sites de carottage sur les piliers 1C, 3C et 3D du pont 13540, et sur le pilier 1A du pont 13577 étaient à un stade de protection : seul le revêtement de zinc se corrodait, mais il protégeait encore le substrat d'acier au carbone de la corrosion. Les sites de carottage sur le pilier 1A du pont 13540, et sur les piliers 2A et 4B du pont 13577 ont montré que le substrat d'acier au carbone avait commencé à

se corroder. De la fissuration a été trouvée sur ces piliers, mais aucune fissuration induite par la corrosion n'a été trouvée après presque 50 années de service.

Tableau 25 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 1A du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC) en 2014

13540 Pilier 1A	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	0,07	0,67	1,33	1,99	2,65	3,32
3,90	-372	-400	-396	-414	-407	-445
3,30	-378	-400	-394	-413	-412	-479
2,70	-388	-427	-423	-454	-416	-473
2,10	-421	-451	-431	-444	-466	-513
1,50	-430	-437	-414	-424	-446	-559
0,90	-443	-453	-447	-427	-470	-558
0,30	-466	-416	-432	-421	-444	-506

Tableau 26 Mesures de taux de corrosion du pilier 1A du pont 13540 en 2014

Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mV par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
2,470	0,370	-363	0,548	Taux de corrosion bas
2,090	1,250	-374	1,339	Taux de corrosion bas
0,635	2,500	-399	1,284	Taux de corrosion bas

Tableau 27 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 1A du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC)

13540 Pilier 1A	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	0,07	0,67	1,33	1,99	2,65	3,32
3,90	-74	-102	-71	-63	-53	-97
3,30	-68	-81	-63	-65	-64	-117
2,70	-52	-85	-72	-87	-60	-103
2,10	-83	-85	-73	-77	-70	-135
1,50	-84	-72	-14	-9	-23	-135
0,90	-105	-79	-55	-9	-46	-88
0,30	-135	-65	-52	-31	-43	11

Tableau 28 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 1B du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC) en 2014

13540 Pilier 1B	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	0,07	0,63	1,24	1,85	2,46	3,07
3,90	-302	-331	-347	-314	-280	-319
3,30	-390	-378	-358	-331	-323	-335
2,70	-327	-405	-391	-381	-352	-363
2,10	-443	-439	-401	-391	-372	-360
1,50	-436	-436	-422	-401	-382	-384
0,90	-404	-496	-460	-443	-416	-404
0,30	-371	-506	-494	-408	-500	-461

Tableau 29 Mesures de taux de corrosion du pilier 1B du pont 13540 en 2014

Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mV par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
2,340	2,820	-398	1,619	Taux de corrosion bas
2,060	1,910	-343	0,569	Taux de corrosion bas
0,400	0,410	-420	1,785	Taux de corrosion bas

Tableau 30 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 1B du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC)

13540 Pilier 1B	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	0,07	0,63	1,24	1,85	2,46	3,07
3,90	-6	-22	-57	-33	1	-20
3,30	-93	-37	-26	-18	-2	-15
2,70	-55	-46	-47	-29	11	-1
2,10	-67	-50	-62	-5	0	36
1,50	-47	-66	-63	-39	-10	4
0,90	-78	-70	-63	-44	-13	-8
0,30	-49	-92	-96	0	-81	-16

Tableau 31 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 3C du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC) en 2014

13540 Pilier 3C	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	0,19	0,69	1,30	1,91	2,51	3,12
3,90	-362	-363	-364	-360	-365	-372
3,30	-345	-365	-354	-360	-367	-379
2,70	-380	-381	-379	-382	-369	-392
2,10	-387	-376	-375	-371	-379	-417
1,50	-396	-394	-404	-393	-406	-431
0,90	-357	-398	-429	-405	-412	-427
0,30	-508	-512	-457	-443	-443	-453

Tableau 32 Mesures de taux de corrosion du pilier 3C du pont 13540 en 2014

Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mV par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
2,390	1,320	-409	1,016	Taux de corrosion bas
1,600	1,320	-415	0,876	Taux de corrosion bas
0,880	0,410	-420	3,112	Taux de corrosion bas

Tableau 33 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 3C du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC)

13540 Pilier 3C	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	0,19	0,69	1,30	1,91	2,51	3,12
3,90	17	-3	3	0	-32	-18
3,30	73	20	34	-7	-18	1
2,70	49	16	-7	-2	9	-9
2,10	36	27	15	34	-5	-11
1,50	20	50	-10	-13	-3	-18
0,90	119	44	-10	-18	-5	19
0,30	-87	-48	-28	-31	-15	24

Tableau 34 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 3D du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC) en 2014

13540 Pilier 3D	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	0,07	0,66	1,32	1,98	2,65	3,31
3,90	-358	-382	-454	-462	-385	-352
3,30	-360	-380	-416	-409	-375	-378
2,70	-362	-364	-384	-390	-382	-359
2,10	-361	-380	-384	-397	-381	-368
1,50	-379	-404	-382	-409	-404	-396
0,90	-343	-401	-405	-405	-411	-450
0,30	-363	-422	-437	-389	-429	-500

Tableau 35 Mesures de taux de corrosion du pilier 3D du pont 13540 en 2014

Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mV par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
1,690	2,020	-335	1,913	Taux de corrosion bas
1,340	3,020	-327	0,634	Taux de corrosion bas
0,430	0,390	-365	2,07	Taux de corrosion bas

Tableau 36 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 3D du pont 13540 (mV par rapport à l'ESC)

13540 Pilier 3D	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	0,07	0,66	1,32	1,98	2,65	3,31
3,90	46	0	-85	-95	-11	11
3,30	27	15	-24	-24	-17	-14
2,70	15	24	1	-9	-10	0
2,10	45	10	-6	-26	-5	15
1,50	39	4	21	-3	-36	-39
0,90	81	3	22	1	-12	-96
0,30	41	-28	-50	0	-28	-93

Tableau 37 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 1A du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC) en 2014

13577 Pilier 1A	Position horizontale		
Hauteur (m)	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	-204	-204	-235
3,30	-205	-180	-180
2,70	-210	-246	-218
2,10	-266	-309	-267
1,50	-332	-347	-327
0,90	-424	-436	-432
0,30	-590	-591	-605

Tableau 38 Mesures de taux de corrosion du pilier 1A du pont 13577 en 2014

Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mV par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
1,840	0,850	-190	0,217	Absence de corrosion
1,190	0,780	-277	0,356	Absence de corrosion
0,510	0,750	-428	0,937	Taux de corrosion bas

Tableau 39 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 1A du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC)

13577 Pilier 1A	Position horizontale		
Hauteur (m)	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	-66	-62	-99
3,30	-85	-64	-53
2,70	-27	-62	-17
2,10	-27	-53	-2
1,50	13	-2	-8
0,90	110	64	89
0,30	39	-8	-76

Tableau 40 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 2A du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC) en 2014

13577 Pilier 2A	Position horizontale		
Hauteur (m)	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	-324	-314	-305
3,30	-311	-322	-315
2,70	-384	-289	-284
2,10	-470	-360	-360
1,50	-388	-412	-394
0,90	-467	-470	-431
0,30	-523	-522	-501

Tableau 41 Mesures de taux de corrosion du pilier 2A du pont 13577 en 2014

Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mV par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
2,290	0,710	-344	0,784	Taux de corrosion bas
1,410	0,750	-378	1,046	Taux de corrosion bas
0,540	0,770	-434	1,284	Taux de corrosion bas

Tableau 42 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 2A du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC)

13577 Pilier 2A	Position horizontale		
Hauteur (m)	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	-36	-46	-57
3,30	-34	-65	-41
2,70	-67	-1	-20
2,10	-130	-31	-17
1,50	91	35	0
0,90	126	52	106
0,30	103	45	-129

Tableau 43 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 3B du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC) en 2014

13577 Pilier 3B	Position horizontale (n° 1 côté est, n° 3 côté ouest)		
Hauteur (m)	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	-225	-204	-204
3,30	-296	-251	-239
2,70	-355	-327	-295
2,10	-383	-370	-346
1,50	-420	-405	-379
0,90	-433	-438	-449
0,30	-515	-509	-558

Tableau 44 Mesures de taux de corrosion du pilier 3B du pont 13577 en 2014

Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mV par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
2,250	0,700	-395	1,077	Taux de corrosion bas
1,580	1,040	-407	0,848	Taux de corrosion bas
0,350	1,230	-464	1,01	Taux de corrosion bas

Tableau 45 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 3B du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC)

13577 Pilier 3B	Position horizontale		
Hauteur (m)	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	-20	-27	-33
3,30	-34	-26	-40
2,70	-98	-84	-51
2,10	-72	-99	-67
1,50	-61	-101	-82
0,90	-50	-85	-109
0,30	-80	-70	-123

Tableau 46 Mesures de potentiel par demi-pile du pilier 4B du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC) en 2014

13577 Pilier 4B	Position horizontale (n° 1 côté est, n° 3 côté ouest)		
Hauteur (m)	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	#S.O.	-322	-330
3,30	-342	-355	-374
2,70	-380	-395	-392
2,10	-408	-387	-382
1,50	-364	-364	-373
0,90	-382	-392	-450
0,30	-446	-405	-445

Tableau 47 Mesures de taux de corrosion du pilier 4Bof pont 13577 en 2014

Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mV par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
2,010	0,570	-397	0,912	Taux de corrosion bas
1,130	0,630	-358	1,124	Taux de corrosion bas
0,170	0,680	-371	2,583	Taux de corrosion bas

Tableau 48 Changement de 1997 à 2014 – Potentiel par demi-pile du pilier 4B du pont 13577 (mV par rapport à l'ESC)

13577 Pilier 4B	Position horizontale		
Hauteur (m)	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	S.O.	-28	-28
3,30	-55	-61	-72
2,70	-43	-51	-52
2,10	-44	-20	-19
1,50	40	24	-4
0,90	31	34	5
0,30	26	62	17

Tableau 49 Teneur en chlorures en pourcentage de masse de béton du pont 13540 en 2014

Pilier	Profondeur par rapport à la surface (mm)		
	10 mm	30 mm	50 mm
1A	0,29 %	0,37 %	0,34 %
1B	0,11 %	0,19 %	0,20 %
3C	0,07 %	0,23 %	0,21 %
3D	0,26 %	0,35 %	0,25 %

Tableau 50 Teneur en chlorures en pourcentage de masse de béton du pont 13577 en 2014

Pilier	Profondeur par rapport à la surface (mm)		
	10 mm	30 mm	50 mm
1A	0,15 %	0,32 %	0,20 %
2A	0,22 %	0,32 %	0,18 %
3B	0,15 %	0,33 %	0,25 %
4B	0,51 %	0,25 %	0,56 %

Tableau 51 Examen visuel des barres d'armature en acier galvanisé exposées dans les piliers de deux ponts routiers

<p>13540 Pilier 1A</p>			<p>Des produits de corrosion du zinc blanchâtres étaient visibles à la surface des barres d'armature.</p> <p>Quelques points brun clair ont été trouvés sur le dessus des nervures.</p> <p>Les lectures d'épaisseur du revêtement de zinc à l'Elcometer ont été de 208 μm et 381 μm, ce qui pourrait inclure des dépôts de pâte de ciment.</p>
<p>13540 Pilier 1B</p>			<p>Très peu de produits de corrosion du zinc blanchâtres ont été trouvés.</p> <p>Aucun point brun visible n'a été trouvé.</p> <p>Les lectures à l'Elcometer se sont situées autour de 461 μm, ce qui pourrait être dû à la pâte de ciment déposée sur la surface.</p> <p>La fissure n'était pas à la hauteur de la surface des barres d'armature, mais a été initiée à partir de la surface du béton.</p>

<p>13540 Pilier 3C</p>			<p>Des produits de corrosion du zinc blanchâtres étaient visibles à la surface des barres d'armature. Aucun point brun/rougeâtre visible n'a été trouvé. La fissure n'atteignait pas les barres d'armature, mais avait été initiée à la surface du béton. L'enrobage de béton était d'environ 50 mm</p>
<p>13540 Pilier 3D</p>			<p>Des produits de corrosion du zinc blanchâtres étaient visibles à la surface des barres d'armature. Aucun point brun/rougeâtre visible n'a été trouvé.</p>

<p>13577 Pilier 1A</p>			<p>Des produits de corrosion du zinc blanchâtres étaient visibles à la surface des barres d'armature. Aucun point brun/rougeâtre visible n'a été trouvé. Les lectures à l'Elcometer ont été supérieures à 600 µm en raison des produits de corrosion du zinc et peut-être de la pâte de ciment. Aucune fissuration induite par la corrosion n'a été trouvée dans le béton.</p>
<p>13577 Pilier 2A</p>			<p>Des produits de corrosion bruns/rougeâtres visibles ont été trouvés à la surface des barres d'armature. Aucune fissuration induite par la corrosion n'a été trouvée dans le béton. Les lectures à l'Elcometer ont été de 116 µm à 210 µm aux points sans produits de corrosion bruns/rougeâtres.</p>
<p>13577 Pilier 4B</p>			<p>Des produits de corrosion du zinc blanchâtres étaient visibles à la surface des barres d'armature. Des points rougeâtres ont été trouvés à la surface des barres d'armature. Aucune fissuration induite par la corrosion n'a été trouvée dans le béton. Les lectures à l'Elcometer ont été de 181 µm, 192 µm et 202 µm aux points sans produits de corrosion bruns/rougeâtres.</p>

5.2. Validation des modèles/lignes directrices d'évaluation de l'état

Cette section présente : i) une évaluation de la corrosion de deux ponts routiers étudiés effectuée à l'aide du modèle/lignes directrices élaboré au chapitre 4 et des potentiels par demi-pile mesurés; et ii) une validation de ce modèle/lignes directrices au moyen d'autres données sur la corrosion constituées des résultats d'une analyse de la teneur en chlorures, des résultats d'examen visuels et de mesures de taux de corrosion.

La Figure 75 et la Figure 76 présentent les histogrammes des potentiels par demi-pile (potentiels de corrosion) de l'étude de 2014 pour les piliers des ponts 13540 et 13577, respectivement. Les histogrammes montrent que le pont 13577 avait un plus grand intervalle de potentiels par demi-pile que le pont 13540. La majorité des potentiels par demi-pile obtenus sur les huit piliers se situaient entre -600 mV et -300 mV. Selon les lignes directrices G basées sur la résistance à la corrosion, l'état de corrosion des points les plus mesurés était « incertain » et nécessitait des investigations plus poussées ou l'utilisation d'un modèle/lignes directrices plus avancé en vue de l'évaluation de l'état. Les sous-sections qui suivent présentent l'évaluation de la corrosion, et la validation du modèle/lignes directrices n° 1 et du modèle/lignes directrices n° 2, tous deux basés sur des probabilités cumulatives, ainsi que la fonction de probabilité continue du modèle P.

5.2.1 Évaluation de l'état au moyen du modèle/lignes directrices n° 1 et validation

On se rappellera que le modèle/lignes directrices n° 1 (Tableau 23) reconnaît les quatre probabilités de corrosion suivantes, fondées sur des potentiels par demi-pile mesurés :

1. potentiels plus positifs que -335mV (par rapport à l'ESC) : 90 % de probabilité d'absence de corrosion ou 10 % de probabilité de corrosion active;
2. potentiels plus négatifs que -610 mV (par rapport à l'ESC) : 90 % de probabilité de corrosion active;
3. potentiels entre -610 et -500 mV (par rapport à l'ESC) : 85 % de probabilité de corrosion active;
4. potentiels entre -500 et -335mV (par rapport à l'ESC) : état de corrosion incertain.

La Figure 77 a) présente le nombre de mesures de potentiel par demi-pile du pont 13540 dans chacun de ces quatre intervalles de potentiel, ainsi que les probabilités de corrosion connexes. La Figure 77 b) présente les mêmes données, mais en pourcentage des mesures totales. L'évaluation de l'état au moyen du modèle/lignes directrices n° 1 a produit les résultats suivants.

1. Plus de 90 % des points sur les piliers 1A, 3C et 3D du pont 13540 se sont situés dans la catégorie « incertaine », car leurs potentiels par demi-pile se situaient entre -335 mV et -500 mV. En revanche, 19 % des points du pilier 1B se sont situés dans la catégorie « 90 % de probabilité d'absence de corrosion », montrant considérablement plus de points d'« absence de corrosion » que les trois autres piliers, ce qui donne à penser que l'état de corrosion général du pilier 1B peut être le meilleur des quatre piliers.
2. Parmi les piliers 1A, 3C et 3D, le pilier 1A comptait 10 % de points dans la catégorie « 85 % de probabilité de corrosion active », soit plus que les piliers 2C et 3D, ce qui donne à penser que l'état de corrosion général du pilier 1A peut être le pire des quatre piliers.

Ces résultats d'évaluation de l'état au moyen des potentiels par demi-pile seulement, ainsi que du modèle/lignes directrices n° 1, ont indiqué que le pilier 1B présentait le meilleur état de corrosion et le pilier 1A, le pire. Comme nous l'avons mentionné en 5.1.2, l'examen visuel (Tableau 51) a bien confirmé que : i) le pilier 1A est le seul des quatre piliers à présenter de la corrosion au niveau du substrat d'acier au carbone, sa teneur en chlorures (Tableau 49) à une profondeur de 50 mm étant la plus élevée; et ii) le pilier 1B est celui qui a montré le moins de produits de corrosion du zinc, sa teneur

en chlorures à la surface des barres d'armature étant la plus basse. Tant l'examen visuel que l'analyse de la teneur en chlorures ont validé les résultats de l'évaluation de l'état du pont 13540 au moyen du modèle/lignes directrices n° 1.

Comme la Figure 77, la Figure 78 a) présente les résultats de l'évaluation de l'état du pont 13577 au moyen du modèle/lignes directrices n° 1. Ces résultats sont les suivants.

1. Le pilier 1A comptait 67 % des points dans la catégorie « 90 % de probabilité d'absence de corrosion », soit considérablement plus que les trois autres piliers, qui en comptaient respectivement 38 %, 38 % et 10 %, ce qui laisse à penser que ce pilier présentait le meilleur état de corrosion des quatre piliers.
2. Le pilier 4B est celui qui comptait le moins de points dans la catégorie « 90 % de probabilité d'absence de corrosion », soit 10 % comparativement à 38 %, 38 % et 67 %. C'est celui qui comptait le plus de points, soit 90 %, dans la catégorie « incertaine » comprise entre -335 mV et -500 mV, mais aucun dans la catégorie « 85 % de probabilité de corrosion active ». Il est difficile de classer ce pilier, car s'il comptait le moins de points dans la catégorie du meilleur état de corrosion (« 90 % de probabilité d'absence de corrosion »), il comptait également le moins grand nombre de points dans la catégorie du pire état de corrosion (« 85 % de probabilité de corrosion active »).
3. La distribution des potentiels par demi-pile des piliers 2A et 3B était identique, avec 38 % des points dans la catégorie « 90 % de probabilité d'absence de corrosion », 48 % des points dans la catégorie « incertaine » et 14 % des points dans la catégorie « 85 % de probabilité de corrosion active ».

Selon le modèle/lignes directrices n° 1, le pilier 1A du pont 13577 est celui qui, des quatre, présentait le meilleur état de corrosion général, ce qui a également été validé par un examen visuel et par l'analyse de la teneur en chlorures. Comme nous l'avons mentionné à la section 5.1.2, le pilier 1A est le seul à ne pas avoir présenté de corrosion active du substrat d'acier au carbone et, avec le pilier 2A, est celui qui avait la plus faible teneur en chlorures à la surface des barres d'armature.

On peut utiliser ces résultats d'évaluation de la corrosion pour établir l'ordre de priorité en vue de l'allocation de ressources additionnelles pour, par exemple, des inspections/études futures des piliers en plus mauvais état. La plupart des potentiels par demi-pile mesurés se situaient toutefois entre -500 mV et -335 mV, des valeurs se trouvant dans la catégorie « incertaine » selon le modèle/lignes directrices n° 1. Si des ressources, y compris l'équipement, le temps et l'expertise, sont disponibles en vue de la mesure des taux de corrosion de ces piliers, nous recommanderions des mesures de taux de corrosion additionnelles. Mais si les ressources sont limitées, il est possible d'obtenir de l'information supplémentaire sur l'état de corrosion au moyen du modèle/lignes directrices n° 2, qui reconnaît les cinq catégories de probabilité de corrosion présentées à la sous-section suivante.

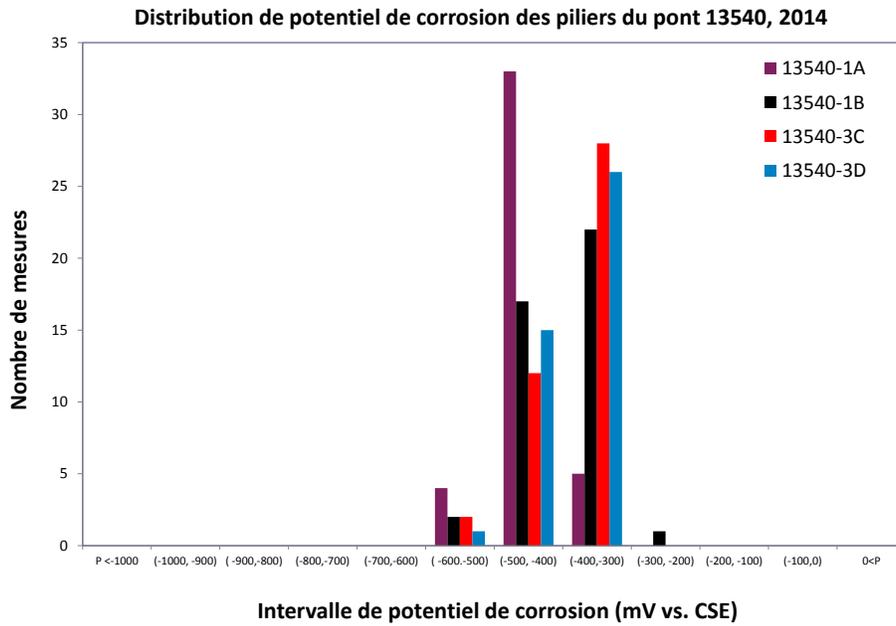


Figure 75 Histogramme des potentiels par demi-pile des piliers du pont 13540

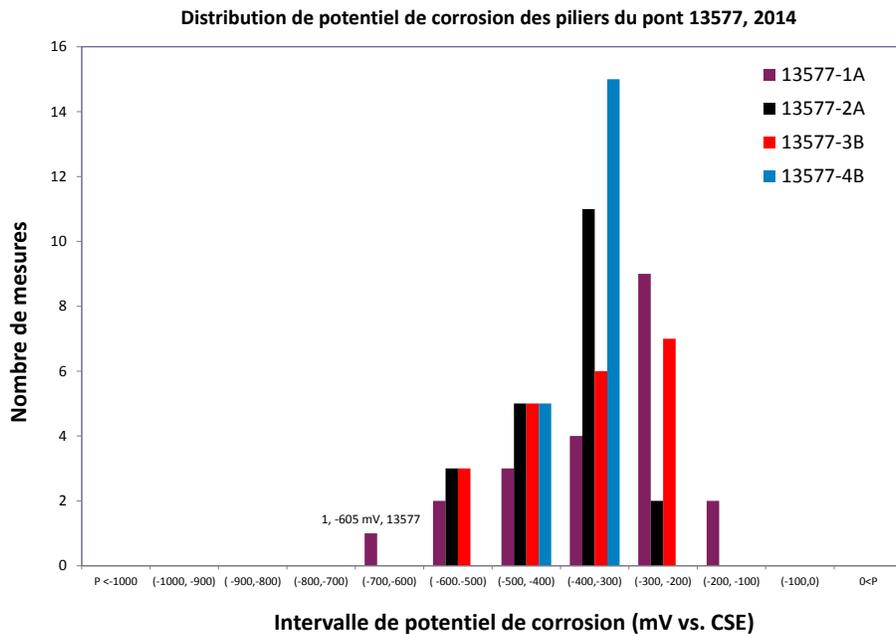
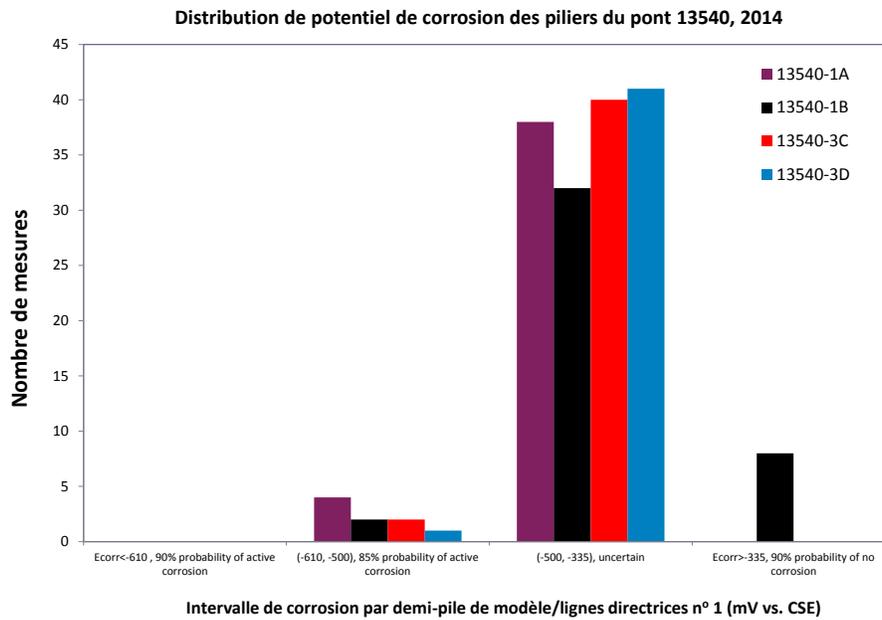
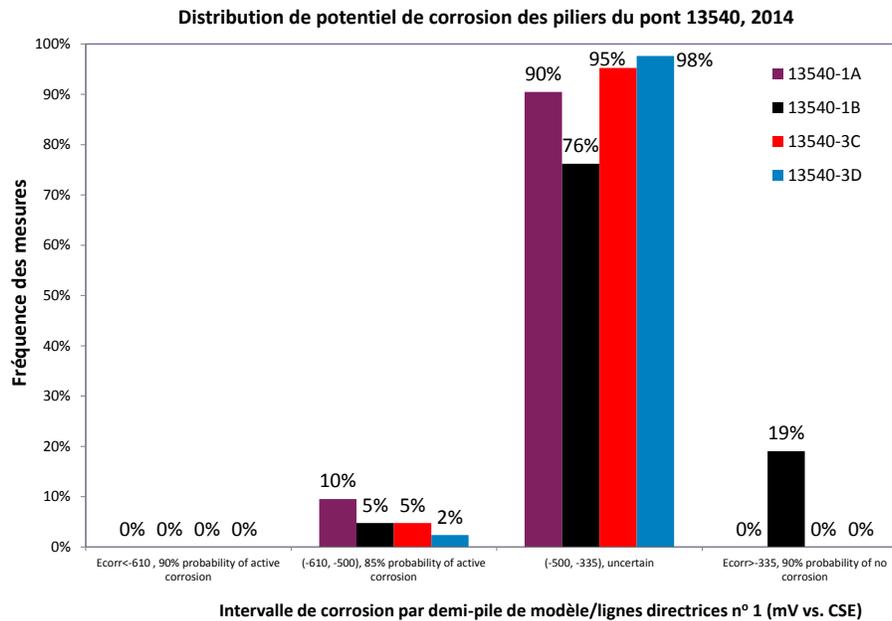


Figure 76 Histogramme des potentiels par demi-pile des piliers du pont 13577

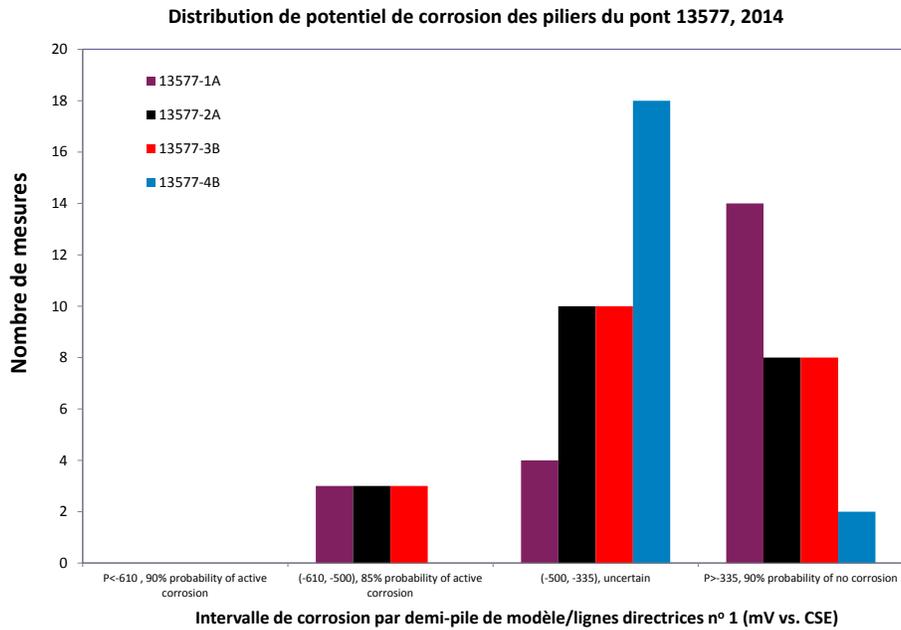


(a) Nombre de mesures

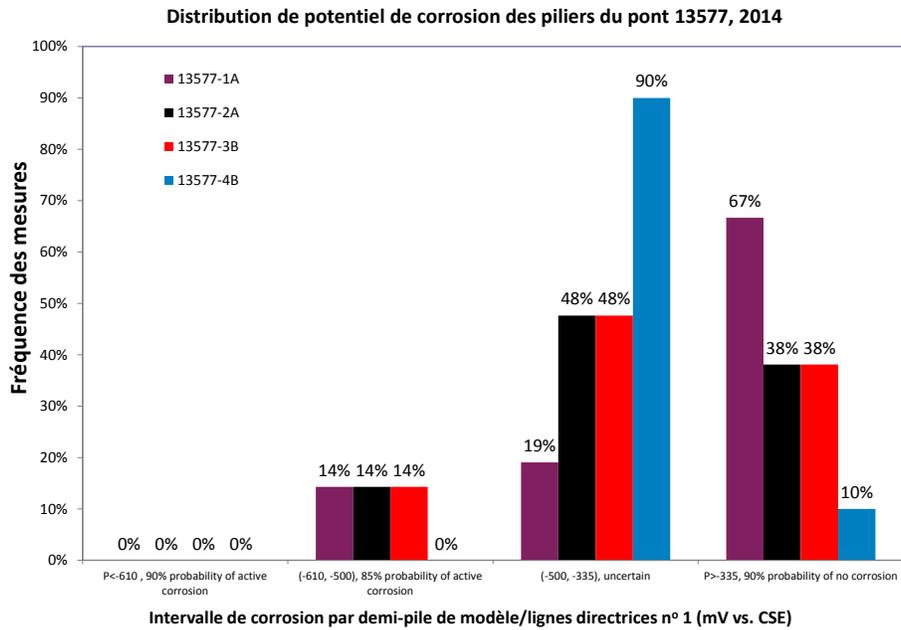


(b) Fréquence des mesures

Figure 77 Distribution des potentiels par demi-pile du pont 13540 au moyen du modèle/lignes directrices n° 1



(a) Nombre de mesures



(b) Fréquence des mesures

Figure 78 Distribution des potentiels par demi-pile du pont 13577 au moyen du modèle/lignes directrices n° 1

5.2.2 Évaluation de l'état au moyen du modèle/lignes directrices n° 2 et validation

On se rappellera que le modèle/lignes directrices n° 2 (Tableau 23) reconnaît les cinq catégories de probabilité de corrosion suivantes, fondées sur des potentiels par demi-pile mesurés :

1. potentiels plus positifs que -335mV (par rapport à l'ESC) : 90 % de probabilité d'absence de corrosion ou 10 % de probabilité de corrosion active;
2. potentiels plus négatifs que -610 mV (par rapport à l'ESC) : 90 % de probabilité de corrosion active;
3. potentiels entre -610 et -500 mV (par rapport à l'ESC) : 85 % de probabilité de corrosion active;
4. potentiels entre -500 et -400 mV (par rapport à l'ESC) : 70 % de probabilité de corrosion active;
5. potentiels entre -400 et -335mV (par rapport à l'ESC) : 30 % de probabilité de corrosion active.

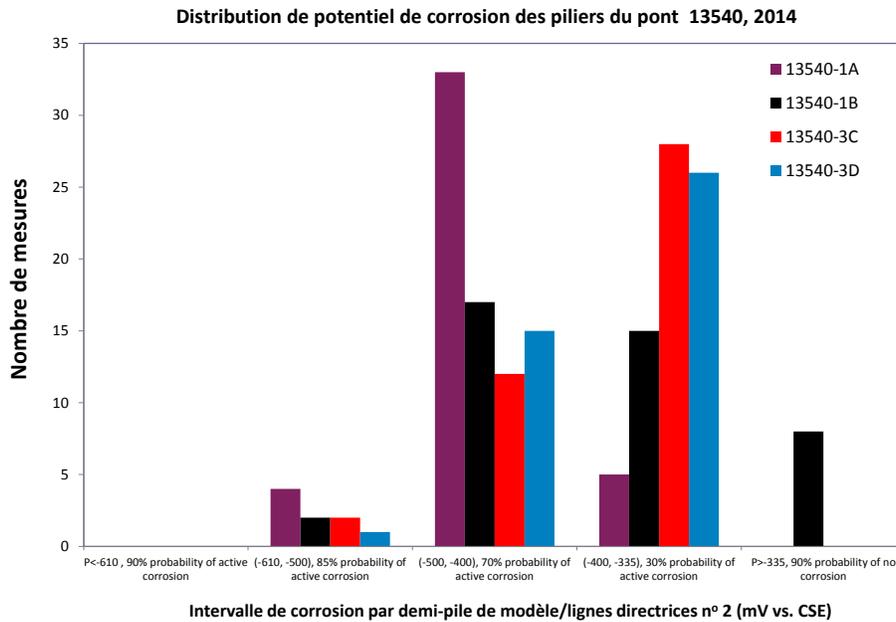
La Figure 79 a) présente le nombre de points du pont 13540 se situant dans ces cinq intervalles de potentiel, ainsi que les probabilités de corrosion connexes. La Figure 79 b) présente les mêmes données, mais en pourcentage des mesures totales. Le pilier 1A comptait beaucoup plus de points dans les catégories « 85 % de probabilité de corrosion active » et « 70 % de probabilité de corrosion active » que les trois autres piliers. Seul le pilier 1B comptait 20 % des points dans la catégorie « 90 % de probabilité d'absence de corrosion ». Le modèle/lignes directrices n° 2 a également clairement déterminé que le pilier présentant le pire état de corrosion était le pilier 1A et que le pilier présentant le meilleur état était le pilier 1B, comme le modèle/lignes directrices n° 1 l'a fait pour le pont 13540.

Le modèle a toutefois également établi la différence entre les piliers 3C et 3D. Le pilier 3D comptait plus de points dans la probabilité plus élevée de corrosion active que le pilier 3C pour les potentiels par demi-pile entre -500 mV et -400 mV, un intervalle qui correspond à 70 % de probabilité de corrosion active. Le modèle/lignes directrices n° 1 n'a pas relevé ce fait parce que ces potentiels par demi-pile appartiennent à l'intervalle « incertain » compris entre -500 et -335 mV. La teneur en chlorures du pilier 3C était de 0,21 % par poids de béton, une teneur légèrement inférieure à celle du pilier 3D, qui était de 0,25 %. Le modèle a établi le classement des piliers du point de vue de l'état de corrosion général, du meilleur au pire, comme suit : 1B, 3C, 3D et 1A. Ce classement a été validé tant par un examen visuel que par l'analyse de la teneur en chlorures.

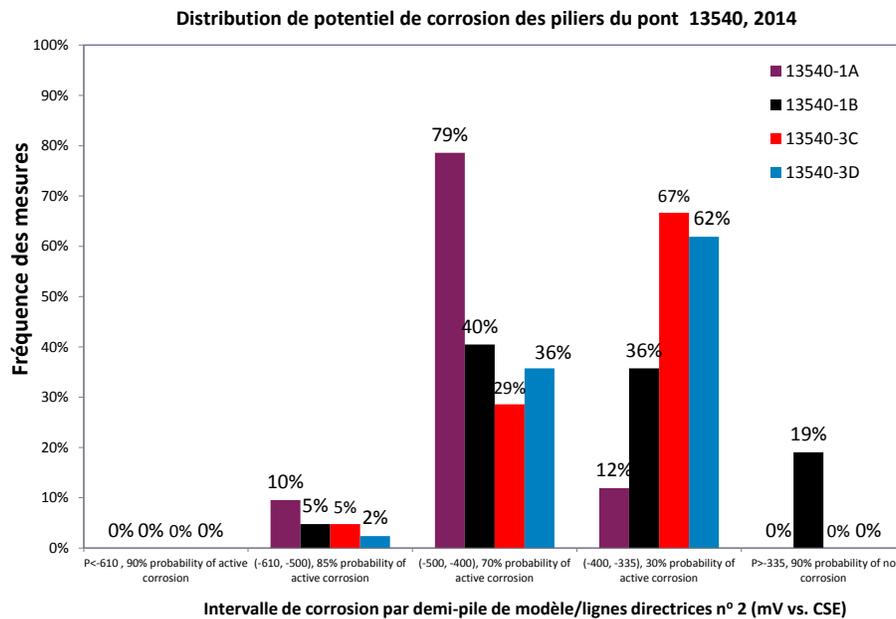
Comme la Figure 79, la Figure 80 présente l'évaluation de l'état de la corrosion du pont 13577 au moyen du modèle/lignes directrices n° 2. Comme le modèle/lignes directrices n° 1, le modèle/lignes directrices n° 2 a également déterminé que le pilier 1A comptait 67 % des points dans la catégorie « 90 % de probabilité d'absence de corrosion », et présentait le meilleur état de corrosion des quatre piliers. Le modèle a confirmé que les états de corrosion généraux du pilier 2A (en noir) et du pilier 3B (en rouge) présentaient les mêmes probabilités de corrosion dans les cinq catégories. Le pilier 4B était celui qui comptait le plus petit nombre de points dans la catégorie « 90 % de probabilité d'absence de corrosion », ce qui pourrait donner à penser qu'il avait le pire état de corrosion général. Mais étant donné qu'il avait le plus grand nombre de points dans la catégorie « 30 % de probabilité de corrosion active », soit entre -400 mV et -335 mV et aucun point dans la catégorie « 85 % de probabilité de corrosion active », contrairement aux trois autres piliers, il était quand même difficile de confirmer son classement comparativement aux piliers 2A et 3B, même si sa teneur en chlorures à 50 mm de profondeur, la plus élevée, donnait effectivement à penser qu'il présentait le pire état de corrosion.

Les deux ensembles de lignes directrices basées sur des probabilités cumulatives ont permis de déterminer le classement de quatre piliers du pont 13540 du point de vue de l'état de corrosion et de déterminer que le pilier 1A du pont 13577 présentait le meilleur état de corrosion, des résultats validés tant par un examen visuel que par une analyse de la teneur en chlorures. On peut utiliser ces résultats

d'évaluation de la corrosion pour établir l'ordre de priorité en vue de l'allocation de ressources additionnelles pour, par exemple, des inspections/études futures des piliers en plus mauvais état. La section qui suit porte sur l'utilisation du modèle P plus avancé, qui calcule la probabilité de corrosion de chaque mesure de potentiel par demi-pile.

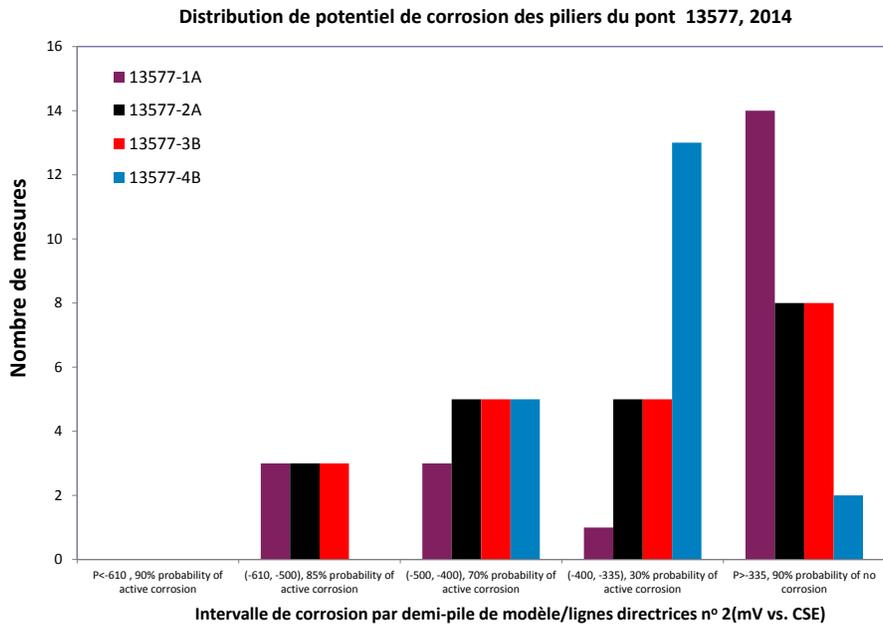


a) Nombre de mesures

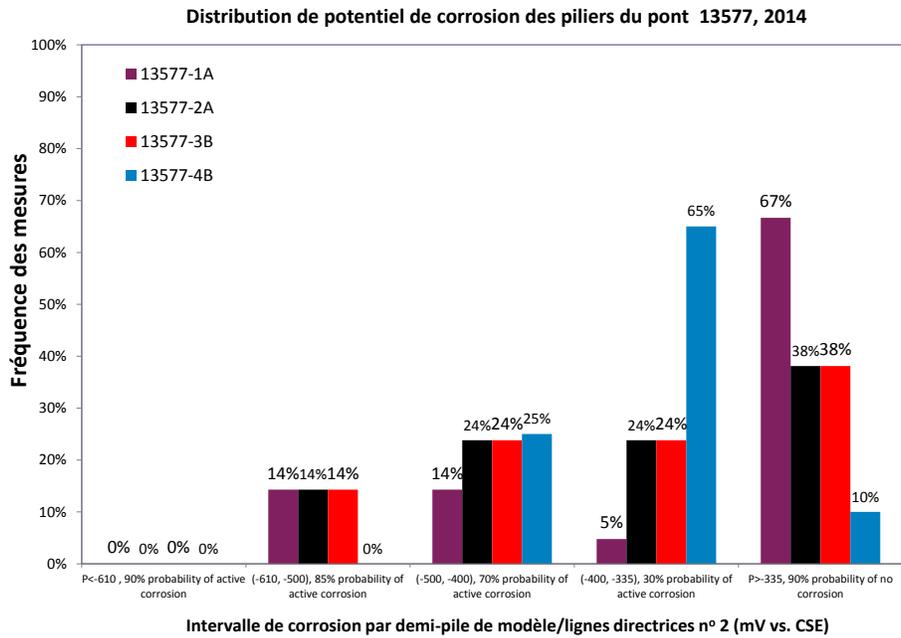


b) Fréquence des mesures

Figure 79 Distribution des potentiels par demi-pile des piliers du pont 13540 à l'aide du modèle/lignes directrices n° 2



a) Nombre de mesures



b) Fréquence des mesures

Figure 80 Distribution des potentiels par demi-pile des piliers du pont 13577 à l'aide du modèle/lignes directrices n° 2

5.2.3 Évaluation de l'état au moyen du modèle P et validation

Le modèle P est une fonction continue du potentiel par demi-pile qui génère une probabilité de corrosion. La présente section illustre sa capacité à effectuer une évaluation de la corrosion au moyen des potentiels par demi-pile des piliers 1A et 1B du pont 13540, et des piliers 1A et 4B du pont 13577. Ces deux piliers de chaque pont sont ceux qui, selon le modèle/lignes directrices n° 1 et le modèle/lignes directrices n° 2, présentaient les états de corrosion les plus différents.

Les potentiels par demi-pile de ces quatre piliers ont été établis à la section 5.1.2. En substituant chacun de ces potentiels par demi-pile dans le modèle P, nous obtenons les probabilités de corrosion active connexes. Pour l'exemple du pilier 1A du pont 13540, on trouvera au Tableau 25 les potentiels par demi-pile établis pour ce pilier. Au point à une hauteur de 0,30 m du sol et à une distance de 0,7 m du côté est, le potentiel par demi-pile était de -466 mV. La probabilité de corrosion active calculée connexe était de 71 % selon le modèle P, comme on peut le voir au Tableau 52. Le Tableau 52 montre que la majeure partie des points sur le pilier 1A, soit 35 sur 42, présentaient une probabilité de corrosion active supérieure à 50 %. De la même façon, le Tableau 53 présente les probabilités de corrosion active du pilier 1B du pont 13540. Contrairement au pilier 1A, plus de moitié des points du pilier 1B présentaient une probabilité de corrosion active inférieure à 50 %. Ces probabilités de corrosion donnent à penser que le pilier 1A avait un état de corrosion pire que celui du pilier 1B, des constatations validées tant par un examen visuel que par une analyse de la teneur en chlorures, comme nous l'avons mentionné précédemment. L'évaluation de l'état au moyen du modèle P a généré la même information comparative qu'au moyen du modèle/lignes directrices n° 1 et du modèle/lignes directrices n° 2, mais le modèle P a en plus fourni les probabilités de corrosion pour chaque point mesuré.

Le Tableau 52 et le Tableau 53 montrent également les trois emplacements de mesures de taux de corrosion, étiquetés 1, 2 et 3, ainsi que les probabilités de corrosion dans le voisinage de ces trois emplacements. Ils montrent les emplacements approximatifs où les taux de corrosion ont été mesurés et les probabilités de corrosion environnantes. Les taux de corrosion mesurés à ces trois emplacements sont présentés au Tableau 54 pour le pilier 1A et au Tableau 55 pour le pilier 1B. Ainsi, le Tableau 52 montre que les trois emplacements étaient surtout entourés de probabilités de corrosion active supérieures à 50 % et que les taux de corrosion mesurés correspondants montrés dans le Tableau 54 étaient tous supérieurs à $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, une valeur qui indique des taux de corrosion bas.

Il est à noter que les probabilités de corrosion active sont tirées d'une large masse de données de potentiel de corrosion obtenues à partir de divers états de corrosion et ne sont pas l'équivalent des taux de corrosion. Les probabilités de corrosion fournissent quand même de l'information précieuse qui facilite la prise de décision. Par exemple, si les ressources sont limitées, les probabilités de corrosion calculées par le modèle P au Tableau 52 et au Tableau 53 montrent que plus de ressources devront être allouées au pilier 1A en vue d'une étude de la corrosion et de mesures d'atténuation futures, si elles sont de la même importance.

Le Tableau 56 et le Tableau 57 présentent les probabilités de corrosion active des piliers 1A et 4B du pont 13577. Le pilier 1A avait des probabilités de corrosion active faibles, c'est-à-dire inférieures à 25 % dans la zone à plus de 1 m du sol. En revanche, le pilier 4B avait des probabilités de corrosion active beaucoup plus élevées. La différence calculée a été validée tant par un examen visuel que par une analyse de la teneur en chlorures, comme nous l'avons mentionné précédemment. En outre, les taux de corrosion aux emplacements 1 et 2 du pilier 1A, qui étaient entourés par des probabilités de corrosion inférieures à 25 %, étaient en fait inférieures à $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ et donc considérés comme des taux de corrosion négligeables (absence de corrosion), comme on peut le voir au Tableau 58. Les taux de corrosion sur le pilier 4B étaient tous supérieurs à $0,9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Tableau 59), après validation de la différence entre les états de corrosion. Ces résultats peuvent également donner à penser qu'une

probabilité de corrosion active, calculée par le modèle P, inférieure à 25 % peut signifier une probabilité de corrosion très faible, mais la façon d'utiliser ces probabilités de corrosion dans des outils de prise de décision en vue de la gestion des actifs, comme la prévision de la durée de vie et la réhabilitation d'ouvrages en béton doit être étudiée davantage.

Le pilier 1A du pont 13577 fournit également un bon exemple de l'exactitude grandement améliorée de l'évaluation de l'état de la corrosion au moyen des lignes directrices élaborées pour l'acier galvanisé, au lieu des lignes directrices de la norme ASTM C876. Comme l'a prédit le modèle P et l'ont validé les mesures de taux de corrosion, la partie de ce pilier se trouvant à 1 m au-dessus du sol a montré une très faible probabilité de corrosion active, mais les lignes directrices de la norme ASTM C876 auraient prédit un état de corrosion incertain puisque la majeure partie des potentiels par demi-pile étaient plus négatifs que -200 mV.

En résumé, la section 5.2 a présenté l'évaluation de l'état de huit piliers de deux ponts routiers au moyen des potentiels par demi-pile mesurés et des modèles/lignes directrices élaborés dans le cadre de la présente étude. Le modèle/lignes directrices n° 1 a déterminé que deux piliers présentaient le meilleur et le pire état de corrosion, et le modèle/lignes directrices n° 2 a déterminé le classement de l'état des piliers étudiés, lequel classement a été validé par un examen visuel et une analyse de la teneur en chlorures. Le modèle P a également déterminé les différents états de corrosion des piliers, lesquels états ont été validés par les mesures de taux de corrosion. Le modèle P a en outre fourni la probabilité de corrosion pour chaque potentiel par demi-pile mesuré, produisant ainsi de l'information quantitative, en particulier pour l'état incertain prévu par le modèle/lignes directrices n° 1 et le modèle/lignes directrices n° 2. La façon d'utiliser ces probabilités de corrosion dans des outils de prise de décision en vue de la gestion des actifs, comme la prévision de la durée de vie et la réhabilitation d'ouvrages en béton à armature d'acier galvanisé, doit être étudiée davantage.

Tableau 52 Probabilité (%) de corrosion active du pilier 1A du pont 13540 en 2014

13540 Pilier 1A	Probabilité (%) de corrosion active prédite par les potentiels de corrosion mesurés					
Hauteur (m)	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
	0,07	0,67	1,33	1,99	2,65	3,32
3,90	35	47	45	53	52	64
3,30	38	47	45	54	53	79
2,70	41	56	54	68	53	74
2,10	55	68	58	63	71	80
1,50	58	61	53	55	65	87
0,90	63	68	65	56	72	86
0,30	71	53	59	55	63	79

* Les carrés colorés dans lesquels un chiffre est inscrit indiquent les emplacements des mesures de taux de corrosion.

Tableau 53 Probabilité (%) de corrosion active du pilier 1B du pont 13540 en 2014

13540 Pilier 1B	Distance par rapport au côté est du pilier (m)					
Hauteur (m)	3,07	2,46	1,85	1,24	0,63	0,07
3,90	14	21	24	18	10	18
3,30	42	38	29	21	19	22
2,70	19	51	43	38	25	30
2,10	63	62	47	43	35	30
1,50	61	61	54	47	38	38
0,90	50	83	69	63	53	50
0,30	35	79	83	52	81	70

* Les carrés colorés dans lesquels un chiffre est inscrit indiquent les emplacements des mesures de taux de corrosion.

Tableau 54 Taux de corrosion au pilier 1A du pont 13540 en 2014

Emplacement	Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mv par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
1	2,470	0,370	-363	0,548	Taux de corrosion bas
2	2,090	1,250	-374	1,339	Taux de corrosion bas
3	0,635	2,500	-399	1,284	Taux de corrosion bas

Tableau 55 Taux de corrosion au pilier 1B du pont 13540 en 2014

Emplacement	Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mv par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
1	2,340	2,820	-398	1,619	Taux de corrosion bas
2	2,060	1,910	-343	0,569	Taux de corrosion bas
3	0,400	0,410	-420	1,785	Taux de corrosion bas

Tableau 56 Probabilité (%) de corrosion active au pilier 1A du pont 13577 en 2014

13577 Pilier 1A Hauteur (m)	Position horizontale		
	1 (0,30 m de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 m de l'ouest)
3,90	6	6	4
3,30	7	0	0
2,70	7	7	5
2,10	8	16	8
1,50	20	24	19
0,90	55	61	59
0,30	84	83	86

* Les carrés colorés indiquent les trois emplacements pour les mesures de taux de corrosion.

Tableau 57 Probabilité (%) de corrosion active au pilier 4B du pont 13577 en 2014

13577 Pilier 1A Hauteur (m)	Position horizontale (n° 1 côté est, n° 3 côté ouest)		
	1 (0,30 cm de l'est)	2 (ligne médiane)	3 (0,30 cm de l'ouest)
3,90	S.O.	19	21
3,30	23	27	37
2,70	38	45	44
2,10	52	40	38
1,50	31	31	36
0,90	38	44	67
0,30	65	51	64

* Les carrés colorés indiquent les trois emplacements pour les mesures de taux de corrosion.

Tableau 58 Taux de corrosion au pilier 1A du pont 13577 en 2014

Emplacement	Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mv par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
1	1,840	0,850	-190	0,217	Absence de corrosion
2	1,190	0,780	-277	0,356	Absence de corrosion
3	0,510	0,750	-428	0,937	Taux de corrosion bas

Tableau 59 Taux de corrosion au pilier 4B du pont 13577 en 2014

Emplacement	Distance verticale par rapport au sol (m)	Distance horizontale par rapport à l'est (m)	Potentiel de corrosion (mv par rapport à l'ESC)	Taux de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	État de corrosion
1	2,010	0,570	-397	0,912	Taux de corrosion bas
2	1,130	0,630	-358	1,124	Taux de corrosion bas
3	0,170	0,680	-371	2,583	Taux de corrosion bas

CHAPITRE 6 : RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Le présent chapitre résume les résultats de l'étude de trois ans qui incluait un programme expérimental complet, une analyse statistique et la modélisation de l'évaluation de l'état, ainsi qu'une étude sur le terrain, en vue de la validation des modèles/lignes directrices élaborés. L'étude a permis l'élaboration de trois niveaux de modèles et de lignes directrices avec différentes capacités de prévision en vue de l'évaluation de l'état de corrosion de l'acier galvanisé dans les ouvrages en béton et a également permis une meilleure compréhension de la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé par rapport à l'acier au carbone.

Programme expérimental

Le programme expérimental a permis d'obtenir de grandes quantités de données, sur le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier galvanisé, qui simulaient un large éventail d'états de corrosion. Des paramètres de corrosion clés ont été reproduits grâce à l'utilisation de mélanges de béton OPC et HPC, dont la composition allait de l'absence de chlorures à une teneur élevée en chlorures et qui ont été exposés à différentes conditions environnementales allant d'une humidité relative ambiante de 50 % à une humidité relative de 100 %. D'autres facteurs pouvant influencer sur la corrosion de l'acier galvanisé ont également été étudiés, dont la pré-fissuration du béton, l'endommagement superficiel du revêtement galvanisé et l'utilisation d'un inhibiteur de corrosion à base de nitrites de calcium améliorant la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé.

Résistance à la corrosion

Dans un béton fortement contaminé par les chlorures, il a été établi que l'acier galvanisé présentait un taux de corrosion de cinq à dix fois inférieur à celle de l'acier au carbone, selon les conditions environnementales. Dans un environnement très corrosif combinant une humidité relative de 80 % et un cycle de températures quotidien de 25 à 40 °C, le taux de corrosion de l'acier au carbone n'était pas capable de maintenir un niveau stable, mais augmentait exponentiellement avec le temps lorsque la teneur en chlorures était supérieure à 2 % de la masse de ciment ou 0,31 % par poids de béton. Dans le même environnement, l'acier galvanisé était en mesure de maintenir un taux de corrosion stable dix fois inférieur à celle de l'acier au carbone. Ces constatations ont été validées par un examen visuel des dommages par fissuration et de la délamination du béton dans lequel des barres en acier au carbone avaient été encastrées. Dans du béton saturé à la température ambiante, l'acier galvanisé a également montré des taux de corrosion cinq fois moindres que l'acier au carbone au stade de la propagation. En raison de son taux de corrosion inférieure et du volume moindre des produits de corrosion du zinc, par rapport aux oxydes de fer, il a fallu beaucoup plus de temps pour que la corrosion de l'acier galvanisé induise la fissuration du béton, par rapport à l'acier au carbone. Un examen visuel a confirmé que le délai de fissuration du béton doublait lorsque l'armature du béton était faite d'acier galvanisé.

Une importante caractéristique de l'acier galvanisé est son taux de corrosion plus basse dans du béton fortement contaminé par les chlorures, par rapport à l'acier au carbone. Les études sur le terrain effectuées en 1997 par le CNRC et en 2014 dans le cadre de la présente étude sur les piliers de deux ponts routiers en béton ont montré que les barres d'armature galvanisées mesurées connaissaient des taux de corrosion bas en été, comme l'a confirmé l'analyse de la teneur en chlorures et un examen visuel. Ces taux de corrosion bas expliquaient le fait qu'aucune fissuration causée par la corrosion n'a été trouvée dans le béton après presque 50 années de service.

L'inhibiteur de corrosion à base de nitrites de calcium peut être une façon efficace d'améliorer la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé. Il a non seulement retardé l'initiation de la corrosion de l'acier galvanisé, mais a également réduit le taux de corrosion environ cinq fois. L'utilisation du mélange HPC a confirmé que ce mélange peut retarder considérablement la pénétration des chlorures et peut donc être une façon efficace d'améliorer la résistance à la corrosion des ouvrages en béton. Une

fois la corrosion initiée, toutefois, on peut s'attendre que le taux de corrosion soit similaire tant dans les mélanges OPC que dans les mélanges HPC pour une teneur en chlorures similaire.

La préfissuration du béton s'est révélée avoir un effet négligeable sur la corrosion de l'acier galvanisé, mais a eu un effet négatif beaucoup plus grand sur l'acier au carbone dans le béton soumis à un cycle de mouillage-séchage. Un endommagement intentionnel grave du revêtement galvanisé s'est révélé avoir un effet négligeable sur la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé parce que le revêtement de zinc demeuré intact a protégé les substrats d'acier au carbone exposés dans la région endommagée, ce qui donne à penser qu'un endommagement mineur du revêtement de l'acier galvanisé causé par le transport et/ou la manutention n'aurait pas d'impact nuisible sur la nature protectrice de l'acier galvanisé contre une attaque par les chlorures.

Facteurs influant sur l'évaluation de l'état

La teneur en chlorures et la teneur en humidité dans le béton sont deux facteurs cruciaux qui peuvent faire passer l'état de corrosion de l'armature en acier de l'état actif à l'état passif, ou de la corrosion active à l'absence de corrosion. La connaissance de ces deux facteurs mènera à une évaluation fiable de l'état de la corrosion si des mesures du taux de corrosion ne sont pas disponibles.

La teneur en humidité du béton s'est révélée avoir un impact opposé sur le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'armature en acier du point de vue de leur représentation respective de l'état de corrosion. Plus la teneur en humidité est élevée, plus le potentiel de corrosion mesuré sera négatif; cependant, le taux de corrosion la plus rapide n'est pas survenu dans du béton saturé, mais dans du béton exposé à une humidité relative d'environ 80 %. Un potentiel très négatif, s'il est causé par une teneur en humidité élevée et donc un manque d'oxygène dans le béton, ne signifie pas nécessairement une plus grande taux de corrosion. La règle générale selon laquelle le taux de corrosion est plus grand pour un potentiel de corrosion plus négatif s'applique seulement au béton dans le même environnement.

Si le ratio e/c n'a pas influé beaucoup sur le taux de corrosion réel dans le mélange OPC et le mélange HPC avec la même teneur en chlorures, il a cependant influé sur les lectures de potentiel de corrosion tant pour l'acier galvanisé que pour l'acier au carbone à l'état passif d'absence de corrosion. Le potentiel de corrosion mesuré pour le mélange OPC peut être plus négatif que pour le mélange HPC de plus de 200 mV. En outre, il a été démontré que le ratio e/c influait sur la résistivité du béton beaucoup plus que la teneur en chlorures. Une valeur de résistivité du béton supérieure à 200 ohms.m ne signifie pas un faible risque de corrosion si le béton a un ratio e/c bas, ce qui implique qu'on ne peut pas se fier à une résistivité mesurée sur le terrain, sans information de référence, pour l'évaluation de l'état de corrosion.

Il a été établi que dans l'état passif d'absence de corrosion, l'acier galvanisé avait un potentiel de corrosion beaucoup plus négatif que l'acier au carbone pouvant atteindre -350 mV. Dans l'état de corrosion active, le potentiel de corrosion de l'acier galvanisé et le potentiel de l'acier au carbone peuvent être similaires. Avec un potentiel de corrosion similaire, toutefois, l'acier galvanisé avait un taux de corrosion beaucoup plus bas que l'acier au carbone. Manifestement, les lignes directrices d'évaluation de l'état de corrosion pour l'acier galvanisé ne peuvent pas être les mêmes que les lignes directrices de la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone.

Analyse statistique

La distribution des potentiels de corrosion a confirmé que l'acier galvanisé avait des potentiels de corrosion beaucoup plus négatifs que l'acier au carbone. Leur différence a été quantifiée statistiquement : i) dans l'état passif d'absence de corrosion, la fréquence de pointe de la distribution des potentiels de corrosion survient entre -200 et -100 mV pour l'acier au carbone, et entre -400 et -300 mV pour l'acier galvanisé; ii) dans l'état de corrosion active, les fréquences de pointe surviennent entre -500 et -300 mV pour l'acier au carbone, et entre -600 et -400 mV pour l'acier galvanisé, ce qui montre la nécessité d'établir des lignes directrices d'évaluation de l'état, pour l'acier galvanisé, qui sont différentes des lignes directrices de la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone.

La fonction de distribution de probabilités (PDF) du potentiel de corrosion a été établie pour la première fois pour l'acier galvanisé et l'acier au carbone. Cette fonction permet de calculer une probabilité pour un intervalle commençant à toute valeur de potentiel de corrosion. Elle fournit donc un outil efficace pour comprendre la distribution continue des potentiels de corrosion au-delà des intervalles limités et discrets d'un histogramme. L'établissement des PDF a également fait progresser la compréhension du fait que pour tout potentiel de corrosion mesuré, il existe une probabilité de corrosion active et une probabilité d'absence de corrosion de l'armature en acier dans les ouvrages en béton. Cette fonction confirme l'analyse de la résistance à la corrosion selon laquelle une fonction déterministe qui utilise le potentiel de corrosion pour calculer le taux de corrosion ne conviendrait pas pour les deux aciers dans les ouvrages en béton, et constitue une importante étape en vue de l'élaboration d'un modèle avancé qui fait de la probabilité de corrosion une fonction continue d'un potentiel par demi-pile mesuré.

Modèle/lignes directrices élaboré pour l'acier galvanisé et validation

Trois niveaux de modèle/lignes directrices avec différentes capacités de prédiction ont été élaborés pour l'évaluation de l'état de la corrosion de l'acier galvanisé dans les ouvrages en béton. Ces niveaux tiennent compte des progrès réalisés en matière de compréhension, de l'analyse de la corrosion à l'analyse statistique.

Les lignes directrices G basées sur la résistance à la corrosion étaient fondées sur l'observation de la corrélation entre les potentiels de corrosion et les taux de corrosion obtenus à partir d'un large éventail d'états de corrosion. Les lignes directrices élaborées pour l'acier au carbone au moyen des données sur la corrosion obtenues dans le cadre de la présente étude sont conformes aux lignes directrices de la norme ASTM C876, ce qui valide les données sur la corrosion tant du point de vue du protocole expérimental que des mesures de corrosion.

Le deuxième niveau de modèle/lignes directrices a été élaboré à l'aide de l'analyse des probabilités cumulatives qui détermine les limites de potentiel de corrosion pour différentes probabilités recherchées de corrosion active ou d'absence de corrosion. Tant le modèle/lignes directrices n° 1 que le modèle/lignes directrices n° 2 peuvent être utilisés pour l'acier galvanisé comme équivalents aux lignes directrices de la norme ASTM C876 pour l'acier au carbone. Le modèle/lignes directrices n° 1 reconnaît quatre catégories de probabilités de corrosion pour quatre intervalles de potentiel de corrosion, et le modèle/lignes directrices n° 2 prévoit un découpage des probabilités de corrosion en fonction de cinq intervalles de potentiel de corrosion. Ils tiennent compte des progrès de l'analyse et, dans cette perspective, leur utilisation devient plus appropriée lorsque les ressources en vue de la réalisation de mesures de taux de corrosion sur le terrain sont limitées.

La limitation fondamentale des modèles/lignes directrices ci-dessus est attribuable à la nature cumulative des probabilités de corrosion, qui se manifeste surtout lorsque deux potentiels de corrosion sont très proches d'une limite de potentiel qui les sépare en deux catégories adjacentes de probabilités de corrosion. Un troisième niveau consistant en un modèle P avancé a été établi pour la première fois et

calcule la probabilité de corrosion à partir d'une fonction continue de potentiel de corrosion. Ce modèle a été mis au point à partir du concept et de la méthodologie des fonctions de distribution de probabilités. Il ne procure pas seulement une résolution plus fine que les modèles/lignes directrices basés sur des probabilités cumulatives, mais tient également compte du fait que le potentiel de corrosion n'est pas toujours relié inversement à le taux de corrosion à la suite de l'effet combiné des paramètres de corrosion clés.

Une évaluation de l'état a été effectuée sur huit piliers de deux ponts routiers au moyen de l'étude des potentiels par demi-pile et des modèles/lignes directrices élaborés dans le cadre de la présente étude. Le modèle/lignes directrices n° 1 a déterminé que deux piliers présentaient le meilleur et le pire état de corrosion, et le modèle/lignes directrices n° 2 a déterminé le classement de l'état des piliers d'un pont, lequel classement a été validé par un examen visuel et une analyse de la teneur en chlorures. Le modèle P a également déterminé les différents états de corrosion des piliers, lesquels états ont été validés par des mesures de taux de corrosion. Le modèle P a en outre fourni la probabilité de corrosion pour chaque potentiel par demi-pile mesuré, produisant ainsi de l'information quantitative, en particulier pour l'état incertain prévu par le modèle/lignes directrices n° 1 et le modèle/lignes directrices n° 2.

Il convient de noter que si le modèle/lignes directrices pour l'acier galvanisé était basé sur une grande quantité de données constituées de 668 taux de corrosion et 668 potentiels correspondants obtenus à partir d'un large éventail d'états de corrosion, davantage de données représentatives améliorera l'exactitude de tous ces modèles/lignes directrices, en particulier les modèles/lignes directrices avancés que sont le modèle/lignes directrices n° 1, le modèle/lignes directrices n° 2 et le modèle P. La façon d'utiliser les probabilités de corrosion prévues par le modèle P dans des outils de prise de décision en vue de la gestion des actifs, comme la prévision de la durée de vie et la réhabilitation d'ouvrages en béton à armature d'acier galvanisé, doit être étudiée davantage.

CHAPITRE 7 : BIBLIOGRAPHIE

1. Andrade, C., et C. Alonso (1996). « Durability design based on models for corrosion rates », *The Modeling of Microstructure and Its Potential for Studying Transport Properties and Durability*, H. Jennings, J. Kropp et K. Scrivener (éd.), Kluwer Academic Publishers, p. 473-492.
2. Ang, A.H.S., et W.H. Tang (2007). *Probability Concepts in Engineering*, 2^e édition, John Wiley & Sons Inc.
3. ASTM C876-91 (1991). « Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete », *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphie, États-Unis.
4. ASTM C1152/C1152M-04 (2012). « Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete », *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphie, États-Unis.
5. ASTM G109-07 (2013), « Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments », *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphie, États-Unis.
6. Berke, N., et A. Rosenberg (1990). *Calcium Nitrite Corrosion Inhibitor in Concrete, in Admixtures for Concrete Improvement and Properties*, E. Vazquez, Chapman et Hill (éd.), p. 251-268.
7. Caltrans-OSMPP (2012). *Practices and Procedures Manual*, California Department of Transportation, Division of Engineering Services.
8. Chagnon, N., B. Baldock et P. Gu (2007). *Étude du rendement de l'armature galvanisée pour les ouvrages d'art en béton*, rapport client provisoire B-5303.1, Conseil national de recherches du Canada.
9. Cunningham, M. (2008). « When is a Concrete Slab Dry Enough? », *Build*, avril/mai.
10. Darwin, D., J. Browning, M. O'Reilly, L. Xing et J. Ji (2011). « Critical Chloride Corrosion Threshold of Galvanized Reinforcing Bars », *ACI Materials Journal*, 106 (2), p. 176-183.
11. Elsener, B. (2001). « Half-Cell Potential Mapping to Assess Repair Work on RC Structures », *Construction and Building Materials*, 15, p. 133-139.
12. Elsener, B., avec contributions de C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder et M. Raupach (2003). « Half-Cell Potential Measurements – Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures », *Materials and Structures*, 36, p. 461-471.
13. Glass, G.K., et N.R. Buenfeld (1997). « Chloride Threshold Levels for Corrosion Induced Deterioration of Steel in Concrete », in *Chloride Penetration into Concrete*, L.O. Nilsson et J.P. Olivier (éd.), RILEM, p. 429-440.
14. Hansen, K.K. (1986). *Sorption Isotherms*, rapport technique 162-86, Technical University of Denmark, Building Material Laboratory.
15. Jones, D.A. (1992). *Principles and Prevention of Corrosion*, 2^e édition, Prentice Hall.
16. López, W., et J.A. González (1993). « Influence of Degree of Pore Solution on the Resistivity of Concrete and the Corrosion Rate of Steel Reinforcement », *Cement and Concrete Research*, 23 (2), p. 368-376.
17. Macias, A., et C. Andrade (1983). « Corrosion Rate of Galvanized Steel Immersed in Saturated Solutions of Ca(OH)₂ in the pH Range 12-13.8. », *British Corrosion Journal*, 18(2), p. 82-87.
18. Macias, A., et C. Andrade (1987). « Corrosion of Galvanized Steel Immersed in Alkaline Solutions Part 1: Electrochemical Results », *British Corrosion Journal*, 22(2), p. 113-118.
19. Macias, A., et C. Andrade (1990). « The Behaviour of Galvanized Steel in Chloride-Containing Alkaline Solution – I. The Influence of the Cation », *Corrosion Science*, 30(4/5), p. 393-407.
20. Mehta, P.K., et P.J.M. Monteiro (1993). *Concrete Microstructure, Properties and Materials*, 2^e édition, McGraw Hill.

21. Moreno, E.I., et A.A. Sagiúes (1996). « Performance of Plain and Galvanized Reinforcing Steel during the Initiation Stage of Corrosion in Concrete with Pozzolanic Additions », communication 326, *Corrosion 96*, NACE International Annual Conference and Exposition.
22. MTO-OSIM (2008). *Ontario Structure Inspection Manual*, Ministère des Transports, Ontario.
23. Nilsson, L.O. (1995). « The Relation between the Composition, Moisture Transport and Durability of Conventional and New Concrete », *Proceedings of the International RILEM Workshop*, E&FN SSPON.
24. Olson, C.A., et M. Nagi (2002). *Evaluation of the Performance of Galvanized Steel Reinforcement in Concrete Bridge Decks*, rapport présenté à International Lead Zinc Research Organizations Inc. et à l'American Hot Dip Galvanizers Association Inc., Construction Technology Laboratories Inc.
25. Petersen, C.G. (2003). *Corrosion Rate Determined by the GalvaPulse*, Germann Instruments.
26. Pianca, F., et H. Schell (2005). *The Long Term Performance of Three Ontario Bridges Constructed with Galvanized Reinforcement*, Ministère des Transports de l'Ontario, Ontario, Canada.
27. Polder, R. B. (2001). « Test Methods for on Site Measurement of Resistivity of Concrete — a RILEM TC-154 Technical Recommendation », *Construction and Building Materials*, 15 (2-3).
28. RILEM TC 154-EMC (2004). « Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion », *Materials and Structures*, 37, p. 623-643.
29. Rosenberg, A.M., et J.M. Gaidis (1979). « The Mechanism of Nitrite Inhibition of Chloride Attack on Reinforcing Steel in Alkaline Aqueous Environments », *Material Performance*, 18 (11), p. 45-51.
30. Song, H, et V. Saraswathy (2007). « Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – a Review », *International Journal of Electrochemical Science*, 2, p. 1- 28.
31. Stratfull, R.F. (1973). « Half-Cell Potential and the Corrosion of Steel in Concrete », *Highway Research Record*, 433, États-Unis.
32. Tremper, B., J.L. Beaton et R.F. Stratfull (1958). « Causes and Repair of Deterioration to a California Bridge Due to Corrosion of Reinforcing Steel in Marine Environment, Part II, Fundamental Factor Causing Corrosion », *H.R.B. Bulletin*, 182, Washington D.C., p. 18-42.
33. Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*, rapport de recherche du Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), Stockholm.
34. Uhlig, H.H. (1963). *Corrosion and Corrosion Control*, John Wiley & Sons Inc.
35. Van Daveer, J.R. (1975). « Techniques for Evaluating Reinforced Concrete Bridge Decks », *Journal of American Concrete Institute*, 72, p. 697-704.
36. Vera, R., R. Venegas, A.M. Carvajal, F. Carvo et T. Perez (2012). « Performance of Carbon Steel and Galvanized Steel in Reinforced Concrete Structures after Accelerated Carbonation », *International Journal of Electrochemical Science*, 7, p. 10722-10734.
37. Weyers, R.E., B.D. Prowell et M.M. Sprinkel (1993). *Concrete Bridge Protection, Repair, and Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion: A Methods Application Manual*, SHRP-S-360.
38. Yeomans, S.R. (1987). « Galvanized Steel Reinforcement in Concrete », *1st National Structural Engineering Conference*, Barton, Australie, p. 662.
39. Yeomans, S.R. (1994a). « Performance of Black, Galvanized, and Epoxy-Coated Reinforcing Steels in Chloride-Contaminated Concrete », *Corrosion (Houston)*, 50(1), p. 72-81.
40. Yeomans, S.R. (éd.) (1994b). *Galvanized Steel Reinforcement in Concrete*, Elsevier, 2004.
41. Zhang, J., et Z. Lounis (2006). « Sensitivity Study of Control Parameters for Onset of Corrosion Induced by Chloride Diffusion », *Cement and Concrete Research*, 36, p. 1312-1323.

42. Zhang, J.Y., S.Y. Qian et B. Baldock (2012). *Evaluation of Corrosion Resistance of Alloys 2101, 2304, UNS S24100 Stainless Steel and Galvanized Steel Reinforcement for Use in Concrete Structures*, rapport client final B5334.2, Conseil national de recherches du Canada.
43. Zhang, J.Y., et B. Baldock (2013). *Condition Assessment and Corrosion Mitigation of Galvanized Steel in Concrete Structures*, rapport client provisoire B5340.1, CNRC-Construction, Conseil national de recherches du Canada.