

VINCENT LAPOINTE

**INITIATION ET PROPAGATION DE LA
CORROSION DANS UN ÉLÉMENT DE BÉTON
ARMÉ**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil
pour l'obtention du grade de maître ès science

FACULTÉ DE SCIENCE ET GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2009

© Vincent Lapointe, 2009

Résumé

La corrosion des aciers d'armatures résultant de la pénétration des ions chlorure est un problème important qui réduit de manière significative la durée de vie des structures en béton armé exposées à un environnement maritime ou à des sels de déglacage. Ce mémoire présente une étude de l'initiation de la corrosion sur des éprouvettes de mortier armé ainsi qu'une étude du comportement de barres d'armature corrodées. L'objectif général des travaux de maîtrise était d'étudier l'influence réelle de la minéralogie du ciment sur les mécanismes d'initiation de la corrosion des armatures. En plus de contribuer à l'élaboration d'un outil de prédiction de la durée de vie des ouvrages en béton armé exposés à la pénétration des ions chlorure, ce projet a permis de générer des informations permettant aux ingénieurs de la pratique et aux gestionnaires d'ouvrages d'optimiser la formulation des bétons et d'améliorer la durabilité des structures.

Le projet était séparé en deux parties. La première partie portait sur l'identification d'une concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion. Les éprouvettes de mortier ont été soumises à des conditions d'expositions contrôlées (cycles de mouillage-séchage). L'évolution de la corrosion a été suivie par des méthodes électrochimiques non-destructives. Les différents facteurs à l'étude ont été le rapport eau sur ciment (e/c), la minéralogie du ciment et le type de préparation des barres d'armature. Les résultats de l'étude de la pénétration des ions chlorure dans les matériaux cimentaires et de sa conséquence sur l'initiation de la corrosion sont présentés. La deuxième partie du projet était d'étudier l'effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures. Les résultats de la mise en traction de barres ayant des degrés de corrosion spécifiques sont également présentés.

Selon les résultats obtenus, une diminution du rapport e/c et une augmentation de la teneur en C_3A ont été deux facteurs favorisant un temps d'initiation de la corrosion plus élevé. De plus, les barres préparées au jet de sable ont offert une meilleure résistance à la corrosion que les barres brossées. En outre, le temps de fissuration des éprouvettes semblaient être indépendant du rapport e/c et de la minéralogie (teneur en C_3A). La concentration critique en ions chlorure totaux requise pour initier la corrosion, trouvée au cours de l'étude, a été d'environ 0,3 % en masse de mortier sec ou 1,2 % en masse de ciment. Cette concentration

seuil a pu être évaluée avec précision à l'aide d'éprouvettes avec et sans barres. De plus, la concentration critique a semblé indépendante de la teneur en C_3A , du type de préparation de barres (brossé ou préparé au jet de sable) et du rapport e/c .

Abstract

Chloride-induced corrosion of steel reinforcement is an important issue that greatly decreases the service life of all concrete structures exposed to marine environments or de-icing salts. This study analysed the phenomenon of corrosion initiation on reinforced mortar specimens and the behavior of several corroded reinforcing bars. The main objective of the study was to observe the actual influence of cement mineralogy on the various mechanisms of corrosion initiation on steel reinforcement. Contributing to the elaboration of a tool that will be able to predict the service life of a reinforced concrete structures exposed to chlorides, this research also allowed to put forward new information for the civil engineering community, helping engineers and owners optimizing concrete formulations, and improving the durability of concrete constructions.

The project was divided in two parts. The first one is aimed at isolating a threshold concentration of chloride-ions that would initiate corrosion. The mortar specimens were exposed to chloride-ions in a controlled environment, by chloride ponding, and the evolution of corrosion was observed with non-destructive electrochemical measurements. Different factors were taken into consideration during these tests: the water/cement ratio, the cement mineralogy, and the various type of reinforcing bars preparation. Going through this paper, you will learn about the consequences that come from the variation of these factors on the corrosion initiation. The second part of the project studied the effects of corrosion on the mechanical properties of steel reinforcement. The data that resulted from the traction tests, on the bars, at different corrosion levels, are also presented in this document.

According to the results of the study, reducing the water/cement ratio and increasing the C_3A content led to a longer corrosion initiation time. As for the cracking time of the different mortar specimens, it appeared to be independent from these two factors. Moreover, sandblasted bars were found to be a lot more resistant to corrosion than the brushed bars. In the end, the critical concentration of chloride-ions was found to be around 0.3% by weight of dry mortar or 1.2% by weight of cement. This threshold value was precisely evaluated studying different specimens with and without bars. Furthermore, this

threshold value seems independent of the concentration of C_3A , the type of bar preparation or the water/cement ratio.

Avant-propos

Je tiens d'abord à remercier mon directeur Marc Jolin et co-directeur Jacques Marchand pour m'avoir donné l'occasion de réaliser ce projet. Ils ont su me donner leur soutien, leurs conseils, leur disponibilité et leur confiance.

Merci à François Paradis, Maxim Morency et Normand Jr Belair pour m'avoir encouragé à faire une maîtrise. Merci encore à François Paradis pour son aide et pour sa disponibilité. Merci aussi à Jérôme Alexandre Lavoie, Mathieu Nolin et Véronique Morin pour avoir accepté de travailler sur mon projet.

Je tiens également à remercier tout le personnel du centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB) de l'Université Laval pour leur aide et leur support indispensables. Ils ont su endurer mon caractère et mes nombreux dérangements tout au long de ce projet. Merci aussi au personnel du Département de génie civil de l'Université Laval.

Je termine en remerciant ma famille, mes ami(e)s et, spécialement, Evelyne, pour leur soutien, leurs encouragements et leur patience.

À Evelyne et ma famille

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Avant-propos.....	v
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	x
Chapitre 1 - Mise en contexte.....	1
1.1 Structure du document.....	2
Chapitre 2 - Revue de la documentation scientifique.....	3
2.1 Corrosion.....	3
2.1.1 Principes généraux.....	4
2.1.2 Particularités de la réaction dans le béton armé.....	4
2.1.2.1 Concentration seuil.....	6
2.1.2.2 Contrôle de la réaction.....	8
2.1.2.3 Produits de la réaction.....	9
2.2 Initiation et propagation de la corrosion.....	12
2.3 Mesures de corrosion.....	14
2.3.1 Densité de courant macropile.....	14
2.3.2 Potentiel de corrosion.....	15
2.3.3 Polarisation linéaire.....	15
2.4 Propriétés de transport du béton.....	17
2.5 Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures.....	19
Chapitre 3 - Programme de recherche.....	22
3.1 Problématique.....	22
3.2 Objectifs de recherche.....	22
Chapitre 4 - Méthodologie.....	24
4.1 Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion.....	24
4.1.1 Caractéristiques des matériaux utilisés.....	24
4.1.1.1 Ciments.....	24
4.1.1.2 Sable.....	25
4.1.1.3 Moule.....	25
4.1.1.4 Barres d'armature.....	26
4.1.2 Caractéristiques des mélanges.....	30
4.1.3 Gâchage des mélanges de mortier.....	31
4.1.4 Fabrication des éprouvettes de mortier.....	31
4.1.4.1 Éprouvette pour essai de résistance à la compression.....	33
4.1.4.2 Éprouvettes pour l'étude de la pénétration des ions chlorure et la détermination du seuil de corrosion.....	33
4.1.4.3 Éprouvettes pour la détermination des propriétés de transport.....	35
4.1.5 Essais sur béton durci.....	35
4.1.5.1 Résistance à la compression.....	35
4.1.5.2 Propriétés de transport.....	35
4.1.5.3 Étude de la pénétration des ions chlorure.....	39
4.1.5.4 Étude de la détermination du seuil de corrosion.....	42

4.2	Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures	45
4.2.1	Caractéristiques des matériaux utilisés	45
4.2.2	Fabrication des éprouvettes de traction	46
4.2.3	Protocole de mise en traction.....	47
Chapitre 5 - Résultats.....		49
5.1	Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion	49
5.1.1	Propriétés à l'état frais	49
5.1.2	Essais sur béton durci	50
5.1.2.1	Résistance à la compression	50
5.1.2.2	Propriétés de transport	51
5.1.2.3	Étude de la pénétration des ions chlorure	60
5.1.2.4	Étude de la détermination du seuil de corrosion.....	67
5.2	Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures	76
Chapitre 6 - Analyse des résultats et discussion.....		83
6.1	Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion	83
6.1.1	Temps d'initiation.....	83
6.1.2	Concentration critique.....	84
6.2	Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures	88
Chapitre 7 - Conclusion		90
7.1	Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion	90
7.1.1	Temps d'initiation.....	90
7.1.2	Concentration critique.....	91
7.2	Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures	91
7.3	Recommandations.....	92
Bibliographie		93
Annexe A - Résultats de l'étude de la pénétration en ions chlorure.....		96
A.1	Éprouvettes sans barres.....	96
A.2	Éprouvettes avec barres	98
Annexe B - Comparaison entre les montages I5B et I5J		100
Annexe C - Temps d'initiation		101
C.1	Temps d'initiation selon le courant macropile.....	101
C.2	Temps d'initiation selon le potentiel de corrosion.....	101
C.3	Temps d'initiation selon la polarisation linéaire.....	102
Annexe D - Démarche pour déterminer la concentration critique en ions chlorure		103

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Concentration critique en fonction de la teneur en C_3A	7
Tableau 2-2 : Concentration critique selon le guide ou code de conception	8
Tableau 4-1 : Compositions chimique et minéralogique des ciments (résultats d'analyse par fluorescence des rayons X).....	25
Tableau 4-2 : Composition des mélanges de mortiers.....	30
Tableau 4-3 : Nombre d'éprouvettes de mortier fabriqués.....	32
Tableau 4-4 : Éprouvettes pour propriétés de transport.....	35
Tableau 5-1 : Nomenclature des éprouvettes avec et sans barres.....	49
Tableau 5-2 : Propriétés à l'état frais des mortiers.....	50
Tableau 5-3 : Résistance à la compression des mortiers	51
Tableau 5-4 : Porosité des mortiers	52
Tableau 5-5 : Solution poreuse des mortiers saturés au NaOH.....	52
Tableau 5-6 : pH de la solution des mortiers.....	53
Tableau 5-7 : Analyse des essais de séchage.....	56
Tableau 5-8 : Coefficients de diffusion des mortiers selon l'analyse basé sur les courants.....	60
Tableau 5-9 : Temps d'initiation moyen.....	73
Tableau 5-10 : Temps de fissuration.....	75
Tableau 5-11 : Diamètre résiduel minimum et contrainte maximale résiduelle.....	81
Tableau 6-1 : Ordre d'initiation selon les mesures de corrosion et temps d'initiation.....	83
Tableau 6-2 : Temps d'initiation selon Henocq et coll. (2007).....	83
Tableau 6-3 : Concentration critique en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec).....	85
Tableau 6-4 : Concentration critique en ions chlorure totaux (% en masse de ciment)	85
Tableau 6-5 : Concentration en ions chlorure totaux à 20 mm en fonction du potentiel de corrosion après 340 jours.....	88
Tableau A-1 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I5B sans barres	96
Tableau A-2 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I5J sans barres	96
Tableau A-3 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I65B sans barres	97
Tableau A-4 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage V5B sans barres.....	97
Tableau A-5 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage V65B sans barres...97	97
Tableau A-6 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I5B avec barres.....	98
Tableau A-7 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I5J avec barres.....	98
Tableau A-8 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I65B avec barres....	98
Tableau A-9 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage V5B avec barres	99
Tableau A-10 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage V65B avec barres 99	99
Tableau C-1 : Temps pour initier la corrosion selon le courant macropile	101
Tableau C-2 : Temps pour initier la corrosion selon le potentiel de corrosion	101
Tableau C-3 : Temps pour initier la corrosion selon la polarisation linéaire	102

Liste des figures

Figure 2-1 : Processus de corrosion.....	4
Figure 2-2 : Représentation de la corrosion par piqûres de l'acier dans le béton (tiré de Bertolini et coll. 2004).....	5
Figure 2-3 : Représentation schématique des formations majeures et chemin de transformation des oxydes de fer communs	10
Figure 2-4 : Période d'initiation et de propagation de la corrosion dans les structures de béton armé (Modèle de Tuutti - tiré de Bertolini et coll. 2004).....	12
Figure 2-5 : Exemple de courbe typique de polarisation linéaire	16
Figure 2-6 : Exemple de calcul de la résistance de polarisation.....	16
Figure 2-7 : Courbe charge-élongation pour une barre de 6 mm avec différents degrés de corrosion (Almusallam 2001)	21
Figure 4-1 : Moule pour essai de corrosion.....	26
Figure 4-2 : Type de préparation des barres	27
Figure 4-3 : Caractéristiques des barres d'armature pour l'essai de corrosion	27
Figure 4-4 : Protection des barres avec du papier d'aluminium.....	28
Figure 4-5 : Traitement des barres au NaOH.....	28
Figure 4-6 : Détail de connexion	29
Figure 4-7 : Époxy aux extrémités des barres.....	29
Figure 4-8 : Installation des barres dans les moules	30
Figure 4-9 : Montage pour la détermination du seuil de corrosion	32
Figure 4-10 : Montage pour l'étude de la pénétration des ions chlorure	32
Figure 4-11 : Coupe des éprouvettes	33
Figure 4-12 : Bassin pour solution saline	34
Figure 4-13 : Recouvrement d'époxy sur les éprouvettes.....	34
Figure 4-14 : Montage de l'essai de migration.....	37
Figure 4-15 : Montage de l'essai d'extraction	38
Figure 4-16 : Montage de l'essai de séchage.....	39
Figure 4-17 : Mèche pour le broyage.....	40
Figure 4-18 : Montage pour le broyage	40
Figure 4-19 : Contenant d'aluminium	41
Figure 4-20 : Étuve à 110°C	41
Figure 4-21 : Connexion pour mesure de courant macropile	43
Figure 4-22 : Connexion pour mesure de potentiel de corrosion	43
Figure 4-23 : Connexion pour mesure de polarisation linéaire	44
Figure 4-24 : Barre type pour essai de traction.....	46
Figure 4-25 : Montage de corrosion pour essai de traction	47
Figure 4-26 : Montage pour essai de traction	48
Figure 5-1 : Résistance à la compression des mortiers.....	51
Figure 5-2 : Séchage du mélange I5	54
Figure 5-3 : Séchage du mélange I65	54
Figure 5-4 : Séchage du mélange V5.....	55
Figure 5-5 : Séchage du mélange V65.....	55
Figure 5-6 : Analyse du séchage pour le mélange I5.....	56
Figure 5-7 : Analyse du séchage pour le mélange I65.....	57

Figure 5-8 : Analyse du séchage pour le mélange V5	57
Figure 5-9 : Analyse du séchage pour le mélange V65	58
Figure 5-10 : Courant lors de l'essai de migration du mélange I5	59
Figure 5-11 : Courant lors de l'essai de migration du mélange V5.....	59
Figure 5-12 : Profils en ions chlorure pour le montage I5B sans barres	62
Figure 5-13 : Profils en ions chlorure pour le montage I5J sans barres.....	62
Figure 5-14 : Profils en ions chlorure pour le montage I65B sans barres	63
Figure 5-15 : Profils en ions chlorure pour le montage V5B sans barres.....	63
Figure 5-16 : Profils en ions chlorure pour le montage V65B sans barres.....	64
Figure 5-17 : Comparaison des profils à 571 jours pour les montages I5B avec et sans barres.....	65
Figure 5-18 : Comparaison des profils à 65 jours pour les montages I65B avec et sans barres.....	65
Figure 5-19 : Comparaison des profils à 473 jours pour les montages V5B avec et sans barres.....	66
Figure 5-20 : Comparaison des profils à 93 jours pour les montages V65B avec et sans barres.....	66
Figure 5-21 : Résultats des mesures de corrosion - I5B	68
Figure 5-22 : Résultats des mesures de corrosion - I5J	69
Figure 5-23 : Résultats des mesures de corrosion - I65B	70
Figure 5-24 : Résultats des mesures de corrosion - V5B.....	71
Figure 5-25 : Résultats des mesures de corrosion - V65B.....	72
Figure 5-26 : Répartition des temps d'initiation selon le potentiel de corrosion	74
Figure 5-27 : Répartition des temps de fissuration (temps écoulé depuis l'initiation de la corrosion).....	75
Figure 5-28 : Barres d'armature à 0 % de perte de masse.....	76
Figure 5-29 : Barre d'armature à 1 % de perte de masse	76
Figure 5-30 : Barres d'armature à 2 % de perte de masse.....	76
Figure 5-31 : Barres d'armature à 4 % de perte de masse.....	76
Figure 5-32 : Barres d'armature à 6 % de perte de masse.....	77
Figure 5-33 : Barres d'armature à 8 % de perte de masse.....	77
Figure 5-34 : Barres d'armature à 10 % de perte de masse.....	77
Figure 5-35 : Barres d'armature à 12 % de perte de masse.....	77
Figure 5-36 : Barres d'armature à 14 % de perte de masse.....	77
Figure 5-37 : Barres d'armature à 25 % de perte de masse.....	77
Figure 5-38 : Résultat de l'essai de traction	79
Figure 5-39 : Ductilité résiduelle en fonction de la perte de masse.....	79
Figure 5-40 : Essai de traction sur éprouvettes normalisées.....	80
Figure 5-41 : Surface de rupture à 0 % de perte de masse.....	82
Figure 5-42 : Surface de rupture à 2 % de perte de masse.....	82
Figure 5-43 : Surface de rupture à 4 % de perte de masse.....	82
Figure 5-44 : Surface de rupture à 25 % de perte de masse.....	82
Figure D-1 : Densité de courant macropile - V65B-3 (AB)	103
Figure D-2 : Potentiel de corrosion - V65B-3 (AB)	103
Figure D-3 : Résistance de polarisation - V65B-3 (AB)	103
Figure D-4 : Profil en ions chlorure - V65B-3 (AB)	104

Chapitre 1 - Mise en contexte

Comme bien des gouvernements en Amérique du Nord, le Québec fait face à un défi de taille au niveau de la gestion de ses infrastructures. Confrontées à une période de restrictions économiques sans précédent, provinces et municipalités doivent entretenir et réhabiliter un réseau routier et un parc de structures fragilisées et à bout de souffle. Par exemple, selon des études antérieures, à peine 57 % des ponts, viaducs et grands ponceaux, sous la juridiction du ministère des Transports du Québec (MTQ), étaient considérés en bon état (Vérificateur général du Québec 2004). Selon cette estimation, plus de 2 000 de ces ouvrages auraient besoin de travaux majeurs pour assurer leur pérennité.

Dans ce contexte, les questions touchant la durabilité du béton ont une importance capitale. En effet, la grande majorité des ponts et viaducs du Québec comportent des éléments majeurs (comme les dalles et les semelles) fabriqués en béton armé. Un peu plus de la moitié des ouvrages d'art gérés par le MTQ sont entièrement construits en béton. Un grand nombre de ces structures sont parvenues à la fin de leur vie utile (évaluée à environ 30 ans). Ainsi, à cause de leur état de dégradation avancée, elles requièrent des interventions afin d'assurer leur maintien en service et la sécurité des usagers. C'est pourquoi il est impératif de développer des outils, à la fois efficaces et rentables, visant à optimiser la gestion des ouvrages dégradés.

La corrosion des armatures induites par la pénétration des ions chlorure constitue une des causes majeures de la dégradation prématurée des structures en béton armé. Les ions chlorure sont, dans la plupart des cas, amenés par les sels utilisés lors des opérations de déglacage en hiver ou par l'eau de mer dans le cas des structures maritimes. Ces ions agissent comme catalyseur dans le processus de corrosion des aciers d'armature lorsqu'ils atteignent un niveau critique de concentration dans le béton.

En raison des problèmes importants que la corrosion des aciers d'armature dans le béton peut engendrer, beaucoup de recherches sont menées, au Québec et ailleurs dans le monde, afin de limiter les problèmes associés à ce type de dégradation. Plusieurs de ces projets ont comme objectifs le développement de bétons plus durables et l'amélioration des

connaissances sur le comportement des ouvrages exposés à des environnements chimiquement agressifs.

Le processus d'endommagement des structures atteintes de corrosion se produit généralement en deux étapes distinctes : soit l'initiation de la réaction et sa propagation. L'initiation de la corrosion survient lorsque la concentration en ions chlorure près des armatures atteint un seuil critique. L'endommagement se traduit généralement par une perte de section de l'acier, qui peut apporter des concentrations de contraintes, une perte d'adhérence à l'interface acier/béton, qui peut apporter une perte de capacité portante, ainsi que la fissuration du béton, qui peut du fait même accélérer la réaction de corrosion. En effet, les fissures dans le béton, créées par les oxydes expansifs, agissent comme un accès privilégié des agents agressifs qui alimentent la réaction de corrosion à la barre (Bentur et coll. 1997).

1.1 Structure du document

Le document présente d'abord une revue de la documentation scientifique (Chapitre 2). Cette revue présente les connaissances de la corrosion induites par la pénétration des ions chlorure dans le béton armé. Par la suite, les objectifs des travaux sont exposés (Chapitre 3). Ces objectifs orientent la méthodologie des travaux qui ont été faits (Chapitre 4). Le chapitre 5 présente les résultats des travaux qui ont été entrepris afin de rencontrer les objectifs. Par la suite, une analyse des résultats et une discussion sont détaillées afin de comparer les résultats obtenus lors de la recherche à ceux identifiés lors de la revue de la documentation scientifique (Chapitre 6). Finalement, une conclusion est présentée afin de résumer les points importants de la recherche.

Chapitre 2 - Revue de la documentation scientifique

Le présent chapitre présente les causes et conséquences du phénomène de la corrosion en s'appuyant sur les différentes recherches déjà effectuées sur le sujet. Cette revue de la documentation scientifique sert à exposer les divers champs de connaissances ainsi qu'à identifier les manques à combler sur le sujet.

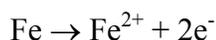
La revue de la documentation scientifique aborde le phénomène de la corrosion en partant du principe général pour ensuite traiter des particularités rencontrées dans le béton armé. Les différents types de mesures de la corrosion couramment utilisés dans le domaine du béton armé sont par la suite décrits. De plus, les différentes étapes de la réaction de corrosion dans le béton armé sont détaillées ainsi que les différents facteurs qui peuvent les influencer. Les principales techniques de mesure des propriétés de transport du béton sont également montrées. L'outil de base servant à prédire l'initiation de la corrosion sera présenté; il sert de point de départ afin de décrire le phénomène de la corrosion de l'acier dans le béton armé et d'en arriver à prédire avec précision la propagation de la corrosion. Finalement, cette revue se termine en décrivant différentes études qui ont été réalisées sur l'effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures.

2.1 Corrosion

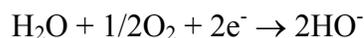
Le domaine de la corrosion est large. Dans le cadre de cette étude, seule la corrosion induite par la pénétration des ions chlorure impliquant le béton armé sera abordée. Dans le domaine du béton armé, la corrosion des armatures d'acier est, entre autres, rendu possible grâce à la pénétration d'agents agressifs tels les ions chlorure dans le recouvrement de béton. Cette pénétration ou transport d'agents agressifs à partir de la surface du béton vers les armatures est rendu possible par la porosité plus ou moins grande du béton en place. Plus de détails sur les paramètres de transport d'agents agressifs seront présentés à la section 2.4.

2.1.1 Principes généraux

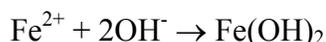
Tel qu'illustré à la Figure 2-1, la réaction de corrosion consiste en la formation d'une (ou de plusieurs) pile(s) électrochimique(s) le long d'une barre d'armature. Du côté de l'anode, le fer se dissout selon la réaction suivante :



Les électrons ainsi relâchés sont consommés à la cathode par la réduction de l'oxygène :



Il est fort intéressant de noter l'importance de l'apport de l'eau et de l'oxygène dans cette réaction qui seront, le plus souvent, les facteurs contrôlant la réaction. Les ions ferreux réagissent ensuite avec les ions OH^{-} pour former des hydroxydes :



En présence d'oxygène, la réaction continue pour former les oxydes suivants : $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Fe_2O_3 et Fe_3O_4 . Ce sont les oxydes typiquement retrouvés dans les structures de béton. Cependant, comme la section suivante le démontre, cette représentation du processus de corrosion est une simplification du phénomène de corrosion réel.

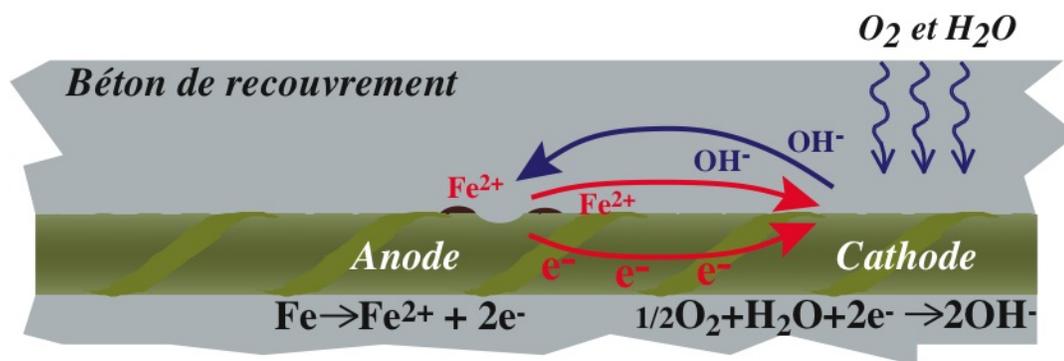


Figure 2-1 : Processus de corrosion

2.1.2 Particularités de la réaction dans le béton armé

Lorsque les aciers sont noyés dans le béton frais, la solution alcaline des pores du béton produit une oxydation rapide en surface de l'acier pour former une couche protectrice

appelée film passif (Rosenberg et coll. 1989, Bentur et coll. 1997, Broomfield 1997). Ce phénomène, appelé passivation, n'arrête pas la réaction de corrosion, mais limite grandement sa progression à un taux de quelques microns par année (Rosenberg et coll. 1989). Cependant, les structures sont souvent soumises à des conditions environnementales qui favorisent la pénétration d'agents agressifs tels que les ions chlorure et sulfate (Rosenberg et coll. 1989, Bentur et coll. 1997, Broomfield 1997, Dehwah et coll. 2002). La présence de ces ions, particulièrement les ions chlorure, à la surface de l'armature compromet localement la stabilité de ce film passif et accélère la réaction de corrosion (Bertolini et coll. 2004). La morphologie de l'attaque est du type piquûre tel que présenté à la Figure 2-2. La corrosion par piquûres est l'un des types de corrosion les plus dommageables puisqu'elle agit de manière ponctuelle. Bien qu'en apparence, la corrosion par piquûres ne semble pas importante, la profondeur des piquûres et la vitesse à laquelle elles se propagent le sont. L'initiation de la piquûre se fait sur les défauts du film passif. Ces sites sont anodiques par rapport au reste de la surface, ce qui conduit à la dissolution du métal. Une fois le processus de dissolution entamé, la dissolution n'a plus besoin d'être stimulée, car le processus est généralement autocatalytique bien que, dans certains cas, la propagation puisse être bloquée, de façon temporaire ou permanente, si des produits imperméables précipitent sur les sites actifs (Ghali 2005).

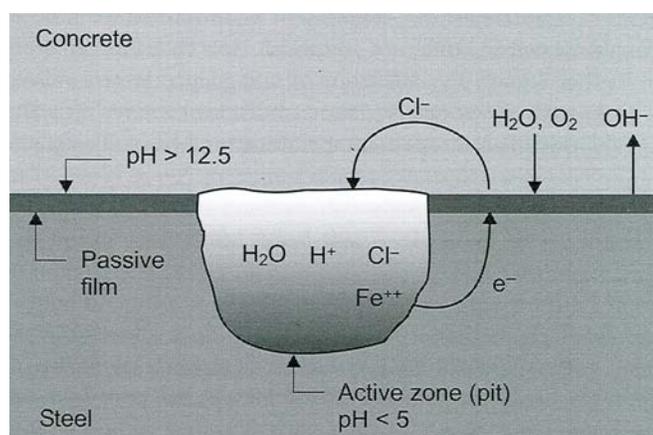


Figure 2-2 : Représentation de la corrosion par piquûres de l'acier dans le béton (tiré de Bertolini et coll. 2004)

Si un niveau élevé d'ions chlorure atteint la barre d'armature, l'attaque peut impliquer une surface plus grande. Ainsi, la morphologie de piqûres devient moins évidente. Le mécanisme demeure toutefois le même (Bertolini et coll. 2004).

La corrosion par piqûres, qui implique une diminution localisée de section, engendre nécessairement une grande concentration de contraintes à l'endroit touché. En plus de profiter des défauts du film passif, la corrosion par piqûre peut être favorisée par la présence de défauts dans le béton (Bentur et coll. 1997). Ils peuvent favoriser la création de chemins préférentiels pour la pénétration des agents agressifs tels que l'eau, l'oxygène et les chlorures (Bertolini et coll. 2004). Ces défauts peuvent être causés par la présence d'une couche riche de mortier à la surface des barres, la ségrégation des granulats et/ou des vides d'air provenant d'un ressuage excessif (Bentur et coll. 1997).

2.1.2.1 Concentration seuil

Dans le cas de la corrosion induite par les ions chlorure, la réaction débute lorsque la concentration en ions près des armatures atteint un seuil critique. La valeur de ce seuil a fait l'objet de nombreuses études au cours des dernières décennies. Dans la documentation technique, la concentration critique d'ions chlorure est habituellement exprimée en pourcentage de masse de ciment ou en pourcentage de la masse totale de béton sec (ACI 222R). Dans les deux cas, la masse d'ions chlorure considérée dans les calculs correspond à la quantité totale d'ions que l'on retrouve dans le matériau. Les ions chlorure totaux sont les chlorures liés aux produits d'hydratation et libres dans la solution (ions chlorure solubles à l'acide). D'autres auteurs préfèrent exprimer la concentration critique comme un ratio entre la concentration en ions chlorure libres (c'est-à-dire que l'on retrouve en solution) et les ions hydroxyde (OH^-) (Hausmann 1967). Cette dernière méthode permet de prendre en considération le fait que la réaction de corrosion est sensible au pH de la solution des pores au voisinage des armatures (Bentur et coll. 1997). Dans le cadre de cette étude, seulement la quantité d'ions chlorure totaux a été déterminée.

Plusieurs études indiquent que la concentration critique est influencée par la qualité de l'acier (acier standard, acier avec époxy, acier inoxydable, etc.) (FHWA 1998). De plus, pour un même type d'acier, la valeur du seuil d'initiation varie significativement selon les

auteurs (Bentur et coll. 1997, FHWA 1998, Alonso et coll. 2000). Par exemple, dans une revue du sujet, Alonso et coll. (2000) trouvent que la valeur critique pour un acier standard (acier noir) variait entre 0,25 % et 6,0 % en ratio Cl^-/OH^- et entre 0,097 % et 3,04 % en masse de ciment (ions chlorure totaux). Il s'agit de plages de valeurs malheureusement très grandes. Tel que décrit par Alonso et coll. (2000), cette grande variabilité peut être attribuable au constituant du mélange, à l'environnement de l'essai ainsi qu'à la méthode de détection de l'initiation de la corrosion. Par ailleurs, certains auteurs affirment que la concentration critique en ions chlorure totaux dépend de la teneur en C_3A du ciment (Hussain et coll. 1995 et Hussain et coll. 1996). Selon ces auteurs, plus la teneur en C_3A augmente, plus le seuil de concentration critique augmente (voir Tableau 2-1). Par contre, Henocq et coll. (2007) montrent que la teneur en C_3A n'a pas d'influence sur la concentration critique en ions chlorure totaux. Tel que montré au Tableau 2-1, la concentration critique est de $0,5 \pm 0,05$ % avec des ciments ayant des teneurs en C_3A de 11 %, 8 % et inférieure à 4 %.

Tableau 2-1 : Concentration critique en fonction de la teneur en C_3A

Auteur	Teneur en C_3A (%)	Concentration critique en ions chlorure totaux (% en masse de ciment)
Hussain et coll. (1995)	2,43	0,35
	7,59	0,62
	14	1,00
Hussain et coll. (1996)	2,43	0,48 à 0,59
	7,59	0,73 à 0,85
	14	1,01 à 1,20
Henocq et coll. (2007)	< 4 %	0,5 ± 0,05
	8	
	11	

Bref, il n'existe aucun consensus du point de vue de la valeur et la manière d'exprimer le seuil de corrosion entre les différents chercheurs. Par contre, certains guides ou codes de conception présentent des seuils de corrosion. Quelques exemples sont montrés au Tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Concentration critique selon le guide ou code de conception

Guide ou code de conception	Concentration critique en ions chlorure totaux (% en masse de ciment)
<i>ACI 222, Tableau 3.1 – Limites pour nouvelle construction</i>	
Béton armé dans des conditions humides	0,10
Béton armé dans des conditions sèches	0,20
<i>ACI 222, p. 11 – Code Norvégien, NS 3420L</i>	
Béton armé avec du ciment normal Portland	0,60
<i>ACI 222, p. 11 – Code Britannique, CP 110</i>	
Béton armé	0,35
<i>ACI 222, p. 10 – FHWA</i>	
Béton durci	0,20
<i>BS 8110*</i>	0,40

* Tiré de l'ACI 222

À la suite de la grande variabilité des seuils de corrosion trouvés lors de différentes recherches, il serait intéressant de se poser la question suivante : Est-ce que le seuil est propre au matériau de béton et/ou au type de barres d'armature utilisé? Dans l'affirmative, il y aurait donc une concentration seuil différente selon les différents matériaux utilisés.

2.1.2.2 Contrôle de la réaction

La corrosion est contrôlée par l'une ou l'autre des électrodes (l'anode ou la cathode). Par exemple, pour un béton peu poreux, la cinétique de réaction est fortement influencée par la concentration en oxygène et la teneur en eau du béton disponible au voisinage des armatures. Ainsi, la propagation de la corrosion est directement liée aux conditions d'exposition et aux propriétés de transport du béton qui déterminent la concentration en O₂ et l'humidité relative au droit de l'acier. Dans ce cas, la réaction est dite sous contrôle cathodique. À l'inverse, lorsque le béton est très poreux, l'oxygène et l'eau peuvent se rendre à volonté au droit de la barre. Ainsi, la réaction est maintenant sous contrôle anodique par le manque d'ion Fe²⁺ disponible pour réagir avec l'oxygène et l'eau.

L'humidité relative du milieu environnant est un paramètre pouvant influencer le type de contrôle. En effet, selon Blankwoll (1997), elle agit directement sur la conductivité, la résistivité électrique et la diffusion de l'oxygène. Lorsque l'humidité relative est inférieure

à 80 %, l'oxygène peut atteindre facilement l'armature, mais la faible conductivité du béton limite cependant la vitesse de corrosion. À l'inverse, plus l'humidité relative augmente, plus la conductivité du béton augmente et plus la diffusion de l'oxygène est difficile. Ainsi, la valeur d'humidité relative optimale pour la corrosion se situerait entre 70 et 80 %.

2.1.2.3 Produits de la réaction

La rouille est composée de plusieurs oxydes et hydroxydes. Les produits de corrosion que l'on retrouve couramment dans le béton sont : la magnétite (Fe_3O_4), la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), la lépidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$), la goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), l'akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$) et l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (Duffo et coll. 2004, Aligizaki et coll. 2000, Cornell et Schwertmann 2003, Marcotte 2001, Chitty et coll. 2005). Ces différents produits ont la particularité de présenter des propriétés fort différentes. Entre autres, le coefficient d'expansion, étant le ratio entre le volume de l'oxyde de fer et le volume de fer initial, passe de 2,1, pour la magnétite et l'hématite, jusqu'à 3,8, pour le $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Ainsi, à cause de la grande diversité de coefficients d'expansion, le type d'oxyde formé influencera énormément le risque de fissuration du béton d'enrobage.

Le type d'oxyde formé dans le béton est fonction des conditions d'exposition. Cornell et Schwertmann (2003) ont schématisé comment l'environnement autour des armatures peut avoir une influence sur le type d'oxyde pouvant être formé (voir Figure 2-3). Par exemple, tel que vu précédemment, le taux d'humidité environnant est un paramètre important puisqu'il influence la vitesse de corrosion. L'oxyde formé sera donc différent selon le taux d'humidité du milieu environnant.

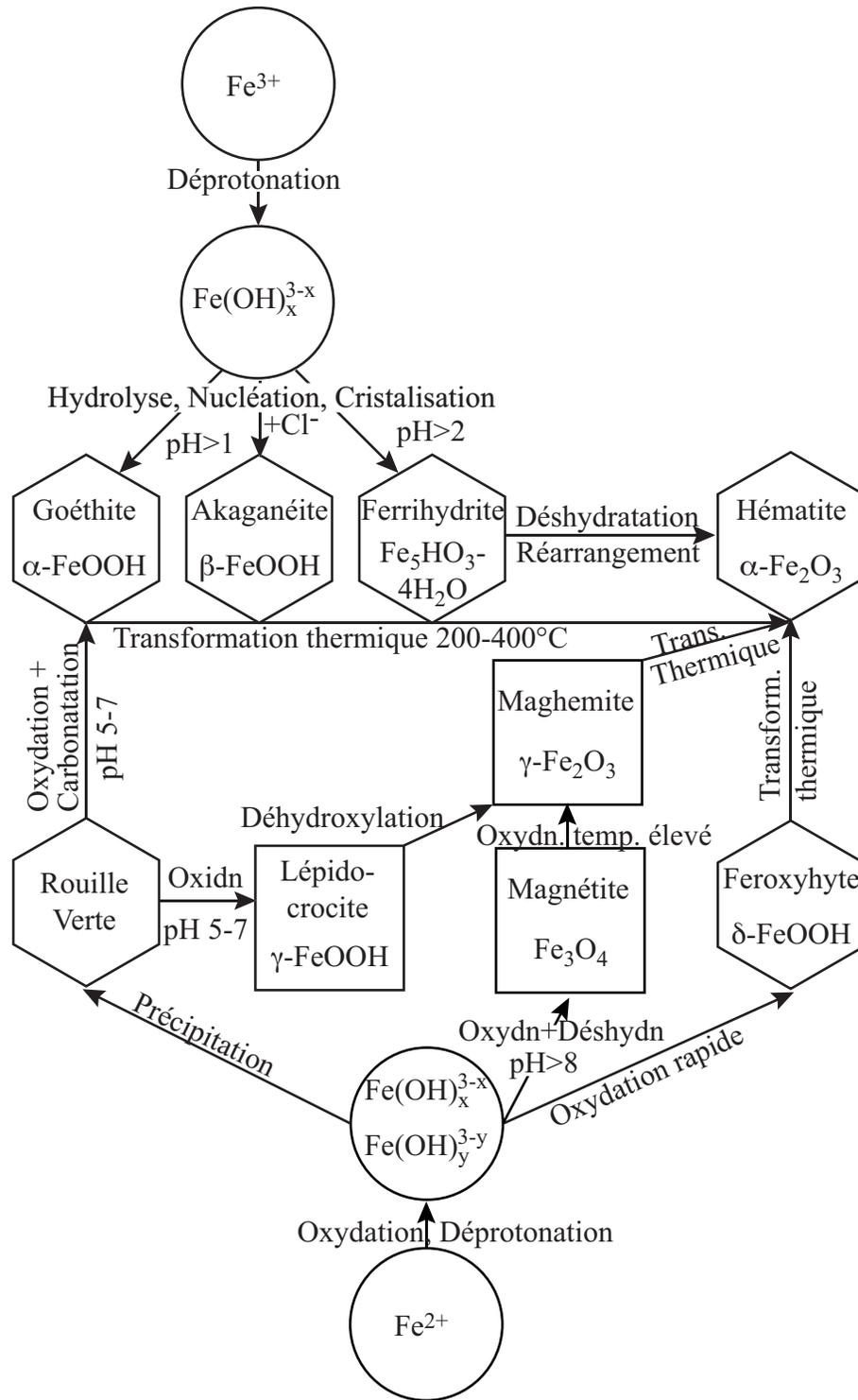


Figure 2-3 : Représentation schématique des formations majeures et chemin de transformation des oxydes de fer communs

Par ailleurs, tel que vu antérieurement, le pH élevé du béton, au début de la mise en service d'une structure, ralenti beaucoup le développement de la corrosion par le film passif. De plus, le pH de la solution autour de la barre, la température ambiante et la solubilité de l'oxygène influencent fortement la vitesse de réaction et le type d'oxyde formé. En effet, selon les conditions d'expositions, la formation ou la transformation d'un des oxydes peut être favorisée (Cornell et Schwertmann 2003). En outre, les constituants du mélange de béton peuvent influencer le pH et le type d'oxyde formé. Selon Bertolini et coll. (2004), le simple fait de mettre des ajouts cimentaires dans le mélange de béton peut faire varier le pH de la solution.

Ensuite, la méthode utilisée en laboratoire pour provoquer la corrosion des armatures influence beaucoup le type d'oxyde formé puisque la vitesse de réaction, lors de l'essai, est plus ou moins rapide selon le cas. Selon Paradis et coll. (2006), les méthodes les plus courantes sont l'application d'un courant dans le système à partir d'une source externe, l'ajout de chlorure de sodium dans l'eau du mélange et l'utilisation de cycles de mouillage et de séchage. Paradis et coll. (2006) affirment que, dans le cas d'une corrosion accélérée par un courant électrique et par l'ajout de chlorure de sodium dans l'eau de gâchage, les produits de corrosion formés sont très peu représentatifs de la réalité comparativement à une corrosion naturelle. Les auteurs expliquent que, pour une corrosion accélérée, la vitesse de développement des produits de corrosion est trop rapide et que les produits formés n'ont pas le temps de diffuser dans la pâte. Ainsi, la distribution spatiale de la corrosion, le coefficient d'expansion des produits de corrosion, la quantité de produit et la déformation du recouvrement de béton sont différents d'une corrosion naturelle. La manière la plus représentative de provoquer une réaction de corrosion est d'avoir recourt à des cycles de mouillage et de séchage sur les éprouvettes.

Finalement, selon le schéma de Cornell et Schwertmann (2003), la présence d'ions chlorure (Cl^-) influence seulement la création d'akaganéite. Cet oxyde a un coefficient d'expansion de 3,5. Ainsi, ayant l'un des coefficients d'expansion les plus élevés, la corrosion induite par la pénétration des ions chlorure favorise grandement la fissuration du béton de recouvrement.

2.2 Initiation et propagation de la corrosion

Selon le modèle de Tuutti, la durée de vie des structures de béton armé peut être séparée en deux phases distinctes telles que démontré à la Figure 2-4. La première phase est l'initiation de la corrosion dans laquelle l'armature est passive, mais le processus de dépassivation, c.-à-d. carbonatation ou pénétration des ions chlorure dans le béton, prend place. La seconde phase est la propagation de la corrosion qui débute lorsque l'acier est dépassivé et qui se termine lorsqu'un état limite est atteint au-delà duquel les conséquences de la corrosion ne peuvent plus être tolérées. (Bertolini et coll. 2004)

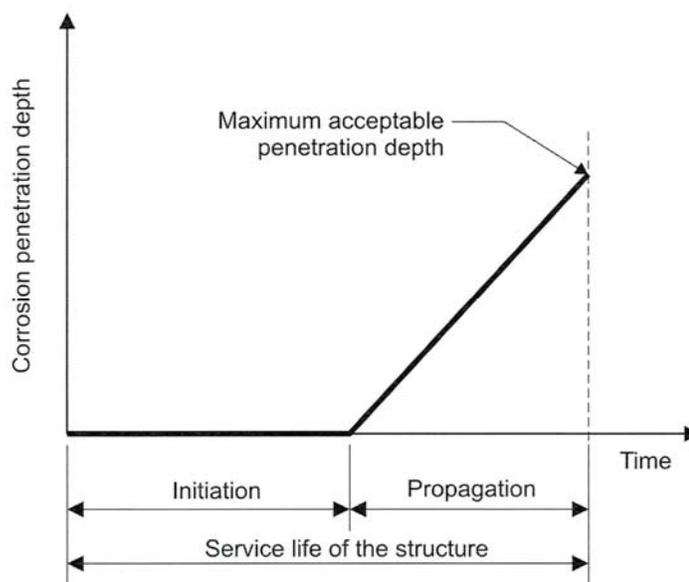


Figure 2-4 : Période d'initiation et de propagation de la corrosion dans les structures de béton armé (Modèle de Tuutti - tiré de Bertolini et coll. 2004)

Le temps d'initiation et la cinétique de propagation de la corrosion dépendent de plusieurs facteurs tels que : les caractéristiques du mélange de béton, les propriétés des barres d'armature ainsi que l'état de surface des barres d'armature (Bertolini et coll. 2004). Selon Bertolini et coll. (2004), la qualité du mélange de béton dépend pour beaucoup du rapport eau/ciment (e/c), de la minéralogie du ciment et de la présence ou non d'ajouts cimentaires.

Tel que démontré par Meyer (1968), Midgley et Illston (1984) et Zhang et coll. (2005), plus le rapport e/c est élevé, plus la perméabilité du mélange de béton est grande. Un mélange ayant une forte perméabilité (faible qualité) est normalement plus poreux et laisse passer

plus facilement les agents agressifs. En outre, pour un même type de barre d'armature, plus la perméabilité du béton est grande, plus l'initiation et la propagation de la corrosion risque d'être rapide (Bertolini et coll. 2004).

Par ailleurs, la sélection du liant peut avoir une influence significative sur la capacité du béton à réduire la pénétration des ions agressifs comme les ions chlorure. Des travaux antérieurs ont clairement démontré que le choix du type de ciment (et notamment de sa minéralogie) pouvait considérablement affecter la durée de vie des ouvrages exposés à des ions chlorure (Hussain et coll. 1996 et Zhang et coll. 2005). Selon ces études, une réduction de la teneur en C_3A aurait comme conséquence d'augmenter de manière considérable la pénétration des ions chlorure et par le fait même de réduire la période requise pour initier la corrosion des armatures.

Depuis plusieurs années, plusieurs producteurs de barres d'armature concentrent leurs efforts afin de produire des barres plus résistantes à la corrosion en comparaison avec les barres conventionnelles en acier noir. Les barres en acier noir sont les barres les plus répandues sur le marché. Elles sont appelées acier noir à cause de la couche d'oxyde noir qui se forme à la surface de l'acier lors du laminage à chaud. Cette mince couche d'oxyde se nomme la calamine. Les produits alternatifs sont les barres enrobées d'époxy, les barres galvanisées, les barres en acier inoxydable et les barres du type MFX. La description détaillée de ces types de barres dépassait les objectifs de ce mémoire, le lecteur peut se référer à l'ACI 222.3R pour plus de détail.

Un autre facteur pouvant à la fois faire varier la résistance à la corrosion et l'adhérence au béton est le type de préparation de surface des barres. La préparation de surface sert à enlever toute trace de saletés, de graisses ou de sels, de produits de corrosion et de calamine. Selon Ghali (2005), la calamine forme un revêtement protecteur à la surface de l'acier et, normalement, ne devrait pas être enlevée afin d'assurer un minimum de protection pour des aciers exposés à la corrosion atmosphérique. La préparation de surface est une pratique courante dans le cas des aciers de charpente. Par contre, pour le béton armé, sur chantier, la préparation de surface est une étape souvent négligée. Une telle préparation permettrait de garantir une surface propre. Néanmoins, pour des aciers de charpente, la préparation de surface est habituellement effectuée en deux étapes. La première étape

consiste à dégraisser l'acier et la deuxième étape a pour but d'éliminer les taches de rouille et, quelques fois, la calamine. Dans le cas où la calamine serait enlevée, il est préférable de protéger la surface par une peinture ou par grenailage (*shot-peening*). Cette dernière technique est présentée plus bas. La deuxième étape peut être faite par brossage métallique ou bien par projection d'abrasifs (jet de sable). Le nettoyage au jet de sable permet d'enlever complètement la couche de calamine. Selon Salah-Rousset et coll. (1996), malgré la perte de la calamine, la projection du sable sur la surface de l'acier agit comme du martèlement. Le jet de sable ressemble beaucoup au grenailage de précontrainte appelé « Shot-peening » qui est une technique moderne d'écrouissage superficiel de pièces métalliques. Cette technique met une mince couche en compression à la surface de l'acier. Cette mince couche très dense offre une protection supérieure à la corrosion et à la fatigue et un meilleur coefficient de frottement.

2.3 Mesures de corrosion

L'intensité de l'activité de corrosion peut être mesurée par des méthodes non destructives. Les méthodes les plus courantes sont la densité de courant macropile, le potentiel de corrosion et la polarisation linéaire. Le principe général est de mesurer l'activité électrique que produit la réaction chimique de corrosion. Les particularités de chaque mesure sont présentées aux sous-sections suivantes.

2.3.1 Densité de courant macropile

Comme son nom l'indique, la densité de courant macropile est définie comme étant le courant électrique exprimé en fonction de la surface étudiée lors d'une réaction caractérisée par des régions anode/cathode séparables. Par exemple, une macropile peut se former entre deux pièces métalliques qui baignent sans se toucher dans une solution conductrice. C'est donc la solution conductrice qui assure le contact électrique entre les deux électrodes. Le courant ne peut pas être mesuré directement à cause de sa trop faible intensité. Ainsi, le principe est de mesurer un potentiel électrique entre une anode et une cathode où la résistance entre les deux est connue. Par la suite, le courant est calculé à l'aide de la loi d'Ohm : $\text{courant} = \text{potentiel} / \text{résistance}$. Habituellement, le courant est exprimé en densité

de courant (i_{corr}), c'est-à-dire qu'il tient compte de la surface d'exposition de l'élément qui corrode (anode). La densité de corrosion est alors exprimée en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

2.3.2 Potentiel de corrosion

Le potentiel de corrosion (E_{corr}) peut être mesuré directement entre la barre à l'étude (anode) et une électrode de référence (cathode). Ainsi, il faut se procurer une électrode de référence ayant un potentiel d'équilibre stable. Les électrodes de référence les plus connues dans ce domaine sont celles de calomel et de cuivre. Les électrodes de référence servent à déterminer avec précision le potentiel d'équilibre de l'anode en comparant le potentiel de l'anode avec celui de la cathode. Le potentiel de corrosion s'exprime généralement en mV et est généralement négatif.

2.3.3 Polarisation linéaire

La polarisation est la variation de la différence de potentiel initial (à l'équilibre) des électrodes d'une cellule galvanique (ou électrochimique). Une pile est un exemple de cellule galvanique.

La technique de polarisation consiste à imposer un potentiel ou un courant à une électrode et de mesurer le courant ou le potentiel correspondant (Ghali 2005). Selon que l'on fait un balayage du potentiel ou du courant, la technique prend le nom de polarisation potentiodynamique ou galvanodynamique respectivement. En pratique, trois électrodes sont nécessaires pour effectuer cette mesure : une électrode de travail, une électrode de référence et une contre-électrode. Pour le béton armé, l'électrode de travail est la barre d'armature; l'électrode de référence peut être la même que pour la mesure du potentiel de corrosion et la contre-électrode peut être, par exemple, en graphite ou en platine.

Le principe de la polarisation est que la contre-électrode conduit le courant vers l'électrode de travail pour la polariser. Le potentiel de l'électrode de travail est mesuré ou fixé (dans le cas du tracé des courbes potentiodynamiques) par rapport à l'électrode de référence dont le potentiel est toujours fixe. Les Figures 2-4 et 2-5 sont deux manières de représenter le résultat d'une lecture de polarisation linéaire. La Figure 2-5 montre une courbe de polarisation typique du potentiel de l'électrode de travail en fonction du logarithme du

courant (Ghali 2005). Pour quantifier le phénomène de corrosion, il faut mettre la courbe typique en potentiel de l'électrode en fonction de la densité de courant (Figure 2-6) et mesurer la pente de la droite. Cette pente représente alors la résistance apparente (R_{app}). Cette dernière est la somme de la résistance du béton (R_{Ω}) et de la résistance de polarisation (R_p). Par ailleurs, c'est la résistance de polarisation qui suscite normalement le plus d'attention. Il suffit donc de l'isoler de l'équation. La résistance de polarisation est généralement exprimée en $k\Omega \times cm^2$ afin de tenir compte de la surface d'exposition à la corrosion.

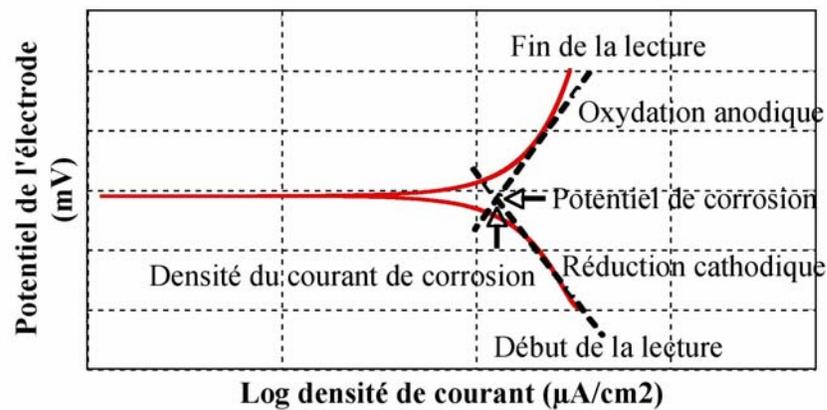


Figure 2-5 : Exemple de courbe typique de polarisation linéaire

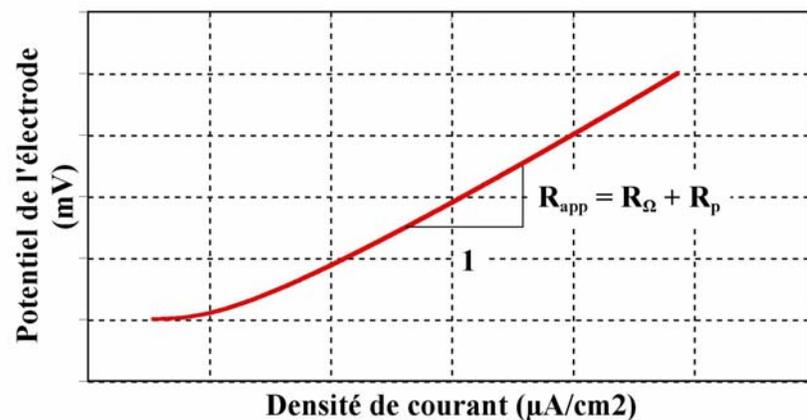


Figure 2-6 : Exemple de calcul de la résistance de polarisation

2.4 Propriétés de transport du béton

Par l'augmentation de l'importance des problèmes de durabilité du béton, le phénomène de transport dans des systèmes de pâte de ciment hydratée a reçu une attention particulière depuis les dernières décennies. Les collaborations entre physiciens, électrochimistes, spécialistes de la science des matériaux et ingénieurs civil ont contribué à graduellement raffiner la compréhension des mécanismes de base qui contrôlent le mouvement des ions et de l'humidité dans ces systèmes (Marchand et Samson 2008). Dans le béton, les phénomènes de transport de masses sont importants puisque le béton est un matériau poreux. Ces phénomènes impliquent la pénétration de solutions liquides et d'ions. Dans le cas du béton, le principal mécanisme de pénétration de particules est la diffusion. Selon Samson (2005), le transport de particules en solution par diffusion est le résultat de leur agitation thermique. Cette dernière produit une suite de collisions aléatoires entre les particules qui a pour effet de les disperser vers des régions de la solution où la concentration est plus faible. La pénétration des ions dans le matériau est donc principalement due à un gradient de concentration entre la solution des pores et le milieu extérieur.

Tel que décrit par Marchand et Samson (2008), l'avancement des connaissances sur les phénomènes de transport dans le béton ont permis de développer des modèles de transport ionique. Certains utilisent une approche simplifiée, et d'autres plus complexe.

Au début, les modèles simplifiés utilisaient une équation (1) de conservation de la masse des ions chlorure simplifiée.

$$\frac{1}{\phi} \frac{\partial c_i^b}{\partial t} + \frac{\partial c_i}{\partial t} - \text{div}(D_i \text{grad}(c_i)) = 0 \quad (1)$$

où c_i est la concentration des espèces i dans la solution des pores [mmol/L], c_i^b est la concentration des espèces i liées à la phase solide [$\text{mol}/\text{m}^3_{\text{matériau}}$] et D_i est le coefficient de diffusion [m^2/s].

Par contre, cette équation tient seulement compte de la diffusion des ions chlorure et des réactions chimiques. D'ailleurs, les réactions chimiques pouvant survenir dans le matériau

doivent être simplifiées pour l'utilisation de ce type de modèle. Afin que l'équation (1) soit valide, certaines limites doivent être respectées. Ainsi, selon les hypothèses prises par les modèles simplifiés, l'équation (1) :

- Néglige l'effet des couplages électriques entre les ions;
- Néglige l'influence des gradients d'activité chimique ;
- Néglige la quantité d'ions chlorure liés par le béton puisqu'elle est exclusivement fonction de la concentration présente dans la solution poreuse;
- Néglige les effets de la température sur le transport. En réalité, les structures sont souvent exposées à des gradients de température;
- Néglige le niveau de saturation du matériau puisqu'il est maintenu complètement saturé et n'est pas sujet au mouvement d'eau. En réalité, un matériau n'est jamais gardé constamment saturé.

Les modèles récents les plus sophistiqués peuvent tenir compte du couplage du transport d'humidité et multi-ioniques pour du béton pouvant être exposé à une grande plage de conditions d'expositions changeantes. En plus de tenir compte de plus de phénomènes, ils comblent également les limites du modèle simplifié. Ces modèles sont basés sur l'équation (2) de Nernst-Planck qui a été étendue au traitement de la diffusion ionique dans des systèmes poreux non saturés impliquant des électrolytes concentrés (Samson et coll. 2005, Samson et Marchand 2007, Marchand et Samson 2008 et Samson et coll. 2008) :

$$\frac{\partial c_i^b}{\partial t} + \frac{\partial(wc_i)}{\partial t} - \text{div} \left(\begin{array}{l} D_i w \text{grad}(c_i) + \frac{D_i z_i F}{RT} w c_i \text{grad}(\psi) + D_i w c_i \text{grad}(\ln \gamma_i) \\ + \frac{D_i c_i \ln(\gamma_i c_i)}{T} w \text{grad}(T) + c_i D_w \text{grad}(w) \end{array} \right) = 0 \quad (2)$$

où c_i est la concentration des espèces i dans la solution des pores [mmol/L], c_i^b est la concentration des espèces i liées à la phase solide [$\text{mol}/\text{m}^3_{\text{matériau}}$], w est la teneur en eau [m^3/m^3], D_i est le coefficient de diffusion [m^2/s], z_i est le nombre de valence des espèces

ionique i , F est la constante de Faraday [96488.46 C/mol], ψ est le potentiel d'électrodiffusion [V], R est la constante des gaz parfaits [8.3143 J/mol/°K], T est la température [°K], γ_i est le coefficient d'activité et D_w est la diffusivité de l'eau [m²/s].

Pour nourrir ces modèles, les paramètres suivants doivent être entrés :

- Le coefficient de diffusion de l'ion hydroxyde (D_{OH})
- La diffusivité de l'eau (D_w)
- La porosité (ϕ)
- La composition initiale de la solution interstitielle (OH⁻, Na⁺, K⁺, SO₄²⁺, Ca²⁺, Cl⁻ et NO₂⁻)
- Les phases solides initiales de la matrice cimentaire (CSH, Portlandite [CH], Monosulfoaluminates [Afm])

Les méthodes pour mesurer ces paramètres sont présentées à la section 4.1.5.2.

Finalement, tous les modèles ont le point commun de vouloir prédire l'avancement des ions chlorure dans la matrice cimentaire. Avec ces modèles, il est donc possible de prédire, avec plus ou moins de fiabilité, le moment où les conditions requises pour initier la corrosion seront rencontrées. Toutefois, à ce jour, aucun d'entre eux ne permettent de prédire la propagation de la réaction de corrosion.

2.5 Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures

Tel que discuté précédemment, la corrosion a une influence directe sur les propriétés mécaniques des armatures. Seulement quelques articles discutent de l'intensité de cette influence sur le module élastique, la limite élastique, l'élongation à la rupture, la résistance à l'impact et la dureté.

D'après les recherches publiées, il semble que le degré de corrosion n'influence pas le module élastique et la limite élastique des barres d'armature (Almusallam 2001,

Maslehuddin et coll. 1990 et Ragab et coll. 1994). Almusallam (2001) note une variation de la résistance selon les données d'entrée du calcul de la contrainte. L'auteur spécifie que la limite élastique demeure inchangée lorsqu'elle est calculée à l'aide du diamètre réel de la section (diamètre résiduel). Par contre, une grande perte de résistance en traction est notée en augmentant le degré de corrosion lorsque la contrainte est calculée par rapport au diamètre nominal (diamètre initial). Ainsi, malgré les différents degrés de corrosion, la résistance du matériau non oxydé demeurerait inchangée.

Par ailleurs, l'élongation à la rupture est une bonne manière de déterminer la présence de corrosion. En effet, lorsque corrodées, les barres ont un comportement de plus en plus fragile par une diminution de l'étendue du domaine de déformation plastique (Almusallam 2001, Bailon et Dorlot 2000, Kocich et coll. 1993 et Ragab et coll. 1994). Almusallam (2001) précise que c'est à partir d'un pourcentage de corrosion de 12 % (perte de masse) que les barres d'armature présentent un comportement fragile (pour un diamètre nominal de 6 mm). Ainsi, selon la Figure 2-7, c'est à de faibles pourcentages de perte de masse qu'il y a le plus de changement pour ce qui est de la perte de ductilité (0 %-12 % en perte de masse). Par contre, l'auteur ne présente aucune donnée entre 1,5 % et 12,6 % de perte de masse. Il est donc impossible de voir si la diminution de la ductilité est graduelle entre ces pourcentages. Notons que la ductilité se définit comme étant la propriété d'un matériau pouvant subir de grandes déformations permanentes. Selon Kocich et coll. (1993), la réduction d'élongation des barres peut atteindre de 61 % à 75 % pour des pertes de section variant de 43 % à 56 %. Ce résultat provient d'un essai de corrosion atmosphérique sur de l'acier à haute résistance sur une durée de 10 ans. En outre, Ragab et coll. (1994) ajoutent que plus le degré de corrosion augmente, plus la résistance à l'impact et la dureté de l'acier diminuent pour le type d'acier à l'essai. Par contre, il est à noter que seule la perte de ductilité sera évaluée lors de ces travaux.

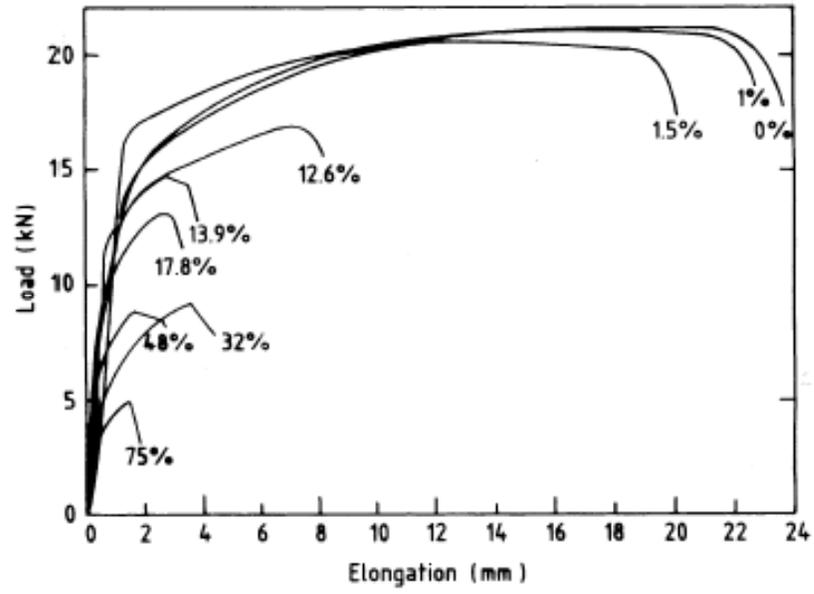


Figure 2-7 : Courbe charge-élongation pour une barre de 6 mm avec différents degrés de corrosion (Almusallam 2001)

Chapitre 3 - Programme de recherche

3.1 Problématique

La revue de la documentation scientifique a permis de cerner quelques lacunes sur les sujets suivants :

- Quelle est exactement la concentration seuil en ions chlorure totaux requise pour initier la réaction de la corrosion?
- Quel est l'effet de la préparation des barres d'armature sur le temps d'initiation et la propagation de la corrosion?
- Quel est l'effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des barres d'armature?

De plus, il est aussi nécessaire de mettre sur pied un protocole d'essai efficace afin de générer des données fiables sur l'initiation et la propagation de la corrosion dans différents matériaux cimentaires. Ces données pourront alimenter un modèle numérique servant à prédire la durée de vie des ouvrages.

3.2 Objectifs de recherche

Ce projet de maîtrise s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche qui a débuté en 2004 à l'Université Laval et qui porte sur la prédiction de la durée de vie des ouvrages en béton armé. L'objectif général de ces travaux de maîtrise était d'étudier l'influence réelle de la minéralogie du ciment sur les mécanismes d'initiation de la corrosion des armatures. En plus de contribuer de manière significative à l'élaboration d'un outil de prédiction de la durée de vie des ouvrages en béton armé exposés à la pénétration des ions chlorure, cette étude visait à générer des informations permettant aux ingénieurs de la pratique et aux gestionnaires d'optimiser la formulation des bétons et d'améliorer la durabilité des structures.

Dans cette optique, les deux points suivants ont été étudiés :

- Concentration seuil en ions chlorure totaux requise pour initier la corrosion;
- Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures.

Le premier point avait comme objectif de déterminer la concentration critique en ions chlorure totaux requise pour initier la corrosion. Les différents facteurs lors de cette étude ont été la minéralogie du ciment, le rapport eau/ciment (e/c) et la préparation des barres. Le deuxième point avait comme objectif de déterminer la courbe force-déplacement selon le degré de corrosion. Il a donc été possible de quantifier l'effet du degré de corrosion sur la ductilité.

Chapitre 4 - Méthodologie

Ce chapitre décrit la méthodologie d'essai retenue pour les diverses parties du projet. Celles-ci sont présentées dans l'ordre suivant :

- Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion;
- Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures.

4.1 Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion

Cette partie concerne la fabrication et les essais qui ont été faits sur différents mélanges de mortier. La méthodologie utilisée est basée sur une norme en cours de développement par le sous-comité G1.14 de l'ASTM, « Corrosion of Metals in Cement, Mortar or Concrete » (Berke et coll. 2002). La norme en développement s'intitule : « Chloride-ion threshold test method ». Elle est grandement inspirée de l'ASTM G 109 (*Test method for determining the effects of chemical admixtures on the corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposed to chloride environments*). Par ailleurs, aucun matériau précis n'est proposé par cette norme qui se limite à stipuler le protocole d'essai. Ainsi, les matériaux choisis sont propres à la présente étude et ont été sélectionnés par l'équipe de recherche.

4.1.1 Caractéristiques des matériaux utilisés

4.1.1.1 Ciments

Dans le cadre de ce travail, deux ciments américains de minéralogie différente ont été utilisés. Ce sont les ciments Portland de type I (GU), ayant une haute teneur en C_3A , et de type V (HS), ayant une faible teneur en C_3A . Ces deux ciments ont été fournis par Holcim. La composition chimique de chacun des ciments est présentée au Tableau 4-1. Par ailleurs, la composition minéralogique de chaque ciment a été calculée à l'aide des équations de Bogue.

Tableau 4-1 : Compositions chimique et minéralogique des ciments
(résultats d'analyse par fluorescence des rayons X)

Oxyde (%)	Type de ciment	
	I (GU)	V (HS)
CaO	64,1	65,3
SiO ₂	19,2	21,6
Al ₂ O ₃	6,01	3,60
Fe ₂ O ₃	2,73	3,07
SO ₃	3,09	2,10
MgO	0,84	1,83
K ₂ O	0,44	0,22
Na ₂ O	0,19	0,14
TiO ₂	0,62	0,19
SrO	0,23	0,08
P ₂ O ₅	0,27	0,05
Mn ₂ O ₃	0,04	0,11
ZnO	0,04	0,05
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01
Total	99,3	99,6
C ₃ S	61,9	67,0
C ₂ S	8,7	11,7
C ₃ A	11,3	4,4
C ₄ AF	8,3	9,3

4.1.1.2 Sable

Dans le cadre de cette étude, un seul sable fut utilisé. Il s'agit d'un sable d'Ottawa Accusand C-109 provenant d'Unimin Corporation. Ce sable a été choisi puisqu'il était normalisé. Ainsi, il n'y a aucune variabilité entre les mélanges du point de vue de la granulométrie.

4.1.1.3 Moule

Les moules utilisés étaient des cylindres de plastique de 150 mm (6 pouces) de diamètre et 178 mm (≈ 7 pouces) de hauteur. La moitié de la quantité préparée fut percée de deux paires de trous afin de permettre d'y passer les barres d'armature. Le diamètre des trous devait être de 18 mm. La position des trous est inscrite sur la Figure 4-1.



Figure 4-1 : Moule pour essai de corrosion

4.1.1.4 Barres d'armature

Les barres d'armature qui ont été utilisées sont des barres 15M (diamètre théorique de 16 mm) et de nuance 400R (acier d'armature régulier) provenant d'une même coulée. Deux types de préparations de barres ont été étudiées : des barres brossées à l'aide d'une brosse au fils d'acier et des barres nettoyées au jet de sable (voir Figure 4-2). La préparation des barres avait pour but d'uniformiser les surfaces à l'étude en enlevant toute trace de corrosion et de saleté.



Figure 4-2 : Type de préparation des barres

Les barres ont été préparées avec beaucoup de soin. Afin de pouvoir réaliser le montage, les barres ont d'abord été coupées en tiges de 200 mm de longueur, percées et filetées à une extrémité afin de permettre une connexion électrique (voir Figure 4-3).

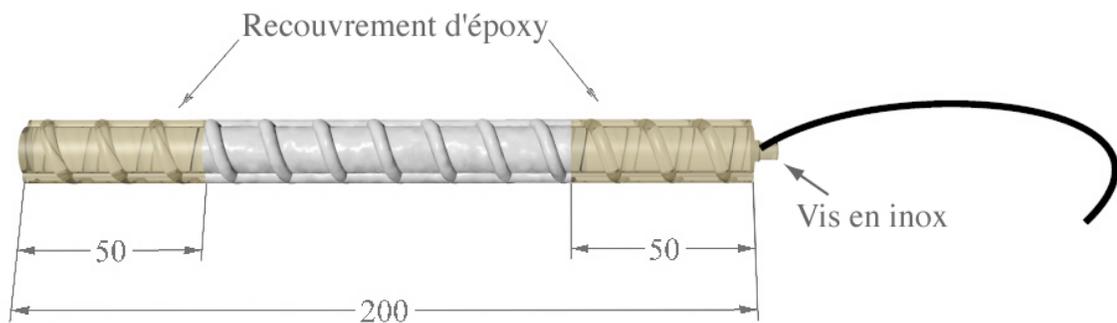


Figure 4-3 : Caractéristiques des barres d'armature pour l'essai de corrosion

Par la suite, elles ont été nettoyées afin d'enlever toute trace de corrosion et de saleté. Voici la procédure suivie :

1. Brosser ou nettoyer au jet de sable (selon le cas) les barres afin d'éliminer toutes traces de rouille et de saleté présentes à la surface. Dans le cas du nettoyage au jet de sable, la couche de calamine fut enlevée.
2. Nettoyer les barres avec du xylène. Ce travail a été fait sous la hotte tout en portant des gants puisque ce produit est un solvant très volatile et dangereux.
3. Immerger une extrémité des barres (environ 50 mm, conserver une partie centrale de 100 mm qui ne sera jamais immergée) dans une solution de 100 mmol/l de NaOH à 50 °C pendant une période de 12 heures. Cette étape a servi à passiver l'extrémité des barres. *Il est important de s'assurer de protéger le centre des barres contre toute éclaboussure de solution sur une longueur de 100 mm avec du papier d'aluminium.* Les Figures 4-4 et 4-5 illustrent cette étape.
4. Reprendre l'étape 3 pour l'autre extrémité de la barre.



Figure 4-4 : Protection des barres avec du papier d'aluminium



Figure 4-5 : Traitement des barres au NaOH

- Attacher les fils (350 mm de longueur), terminaux, rondelles et vis à l'extrémité des barres (voir Figure 4-6).

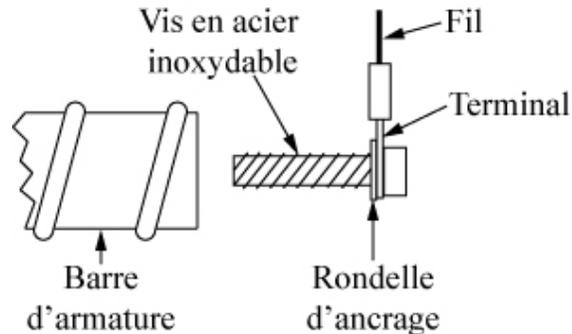


Figure 4-6 : Détail de connexion

- Mettre une couche d'époxy sur environ 50 mm à chacune des extrémités (Figure 4-7).

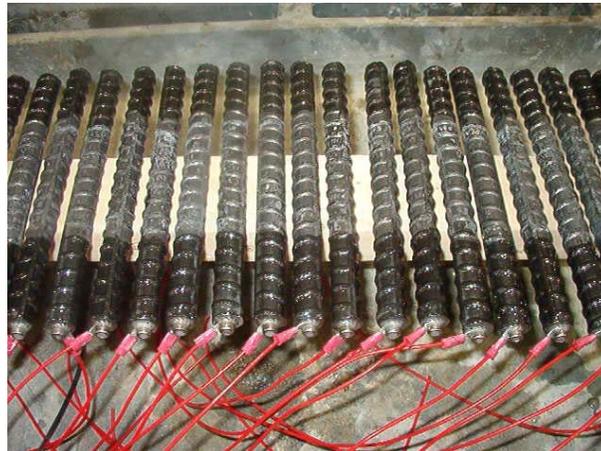


Figure 4-7 : Époxy aux extrémités des barres

- Lorsque l'époxy est durci, nettoyer la partie centrale de la barre avec du xylène afin d'enlever toutes traces de saleté et de corps gras provenant de leur manipulation. Ne pas toucher à l'époxy avec le xylène parce qu'il peut le dissoudre. À ce stade, il est préférable d'éviter de toucher la partie exposée de la barre avec les doigts.

Finalement, les barres ont été insérées dans les moules de plastique et du silicone a été appliquée du côté extérieur du joint des barres et du moule afin d'éviter les fuites de pâte de

mortier (Figure 4-8). Il est préférable que le gâchage du mortier soit prévu la même journée que la dernière étape de préparation de barres. Dans le cas contraire, il est préférable d'entreposer les barres nettoyées dans un endroit sec et exempt de saletés afin de limiter la détérioration de la surface nettoyée.



Figure 4-8 : Installation des barres dans les moules

4.1.2 Caractéristiques des mélanges

Dans le cadre de cette étude, deux types de mélange de mortier ont été analysés : des mélanges ayant un rapport eau/ciment de 0,485 et des mélanges ayant un rapport eau/ciment de 0,65. Chaque type de mélange a été gâché avec le ciment de type I (GU) et de type V (HS). La composition théorique des mélanges de mortier est présentée au Tableau 4-2. Les mélanges tels que réalisés sont présentés au Tableau 5-2. Il est à noter qu'aucun superplastifiant, réducteur d'eau ou entraîneur d'air n'ont été nécessaires lors de la confection de ces mélanges.

Tableau 4-2 : Composition des mélanges de mortiers

Rapport e/c		0,485	0,65
Proportion (kg/m ³)	Ciment	500	393
	Eau	242	255
	Sable	1 375	1 430
Pourcentage volumique de pâte (%)		47	45

4.1.3 Gâchage des mélanges de mortier

Les mélanges de mortier ont été préparés dans un malaxeur planétaire ayant une capacité de 80 L. Voici la séquence de malaxage utilisée :

1. Mettre toute l'eau du mélange dans le malaxeur;
2. Démarrer le malaxeur tout en ajoutant le sable;
3. Ajouter lentement le ciment dans le malaxeur;
4. Continuer de mélanger pendant cinq minutes.

Pour chaque mélange, un essai d'étalement (ASTM C 1437) et un essai de teneur en air (ASTM C 185) sur mortier frais ont été réalisés.

4.1.4 Fabrication des éprouvettes de mortier

Le Tableau 4-3 présente la quantité d'éprouvettes ayant été requise dans cette étude. Un total de huit éprouvettes pour la détermination du seuil de corrosion (avec barres) (voir Figure 4-9) et de huit éprouvettes pour l'étude de la pénétration des ions chlorure (sans barres) (voir Figure 4-10) ont été nécessaires pour chaque mélange.

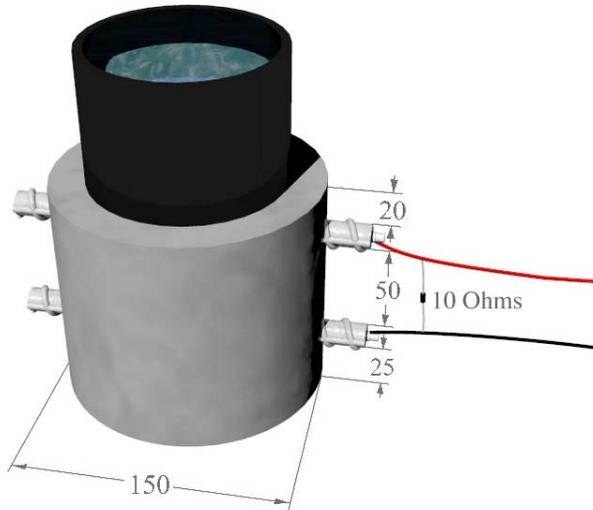


Figure 4-9 : Montage pour la détermination du seuil de corrosion

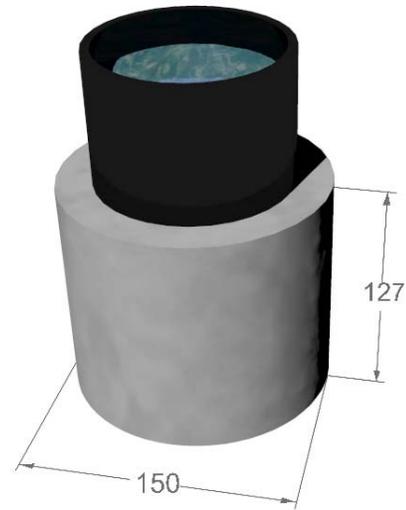


Figure 4-10 : Montage pour l'étude de la pénétration des ions chlorure

Pour la détermination de la résistance à la compression, un total de 12 cubes de 50 mm de côtés ont été nécessaires pour chaque mélange. Enfin, pour la détermination des propriétés de transport de ces mélanges (coefficients de diffusion ionique et d'humidité), un total de trois cylindres de 100 mm de diamètre par 200 mm de longueur a été fabriqué pour chaque mélange.

Tableau 4-3 : Nombre d'éprouvettes de mortier fabriqués

Type de ciment	I		V	
	0,485	0,65	0,485	0,65
Rapport e/c				
Préparation des barres	Brossé	Jet de sable	Brossé	Brossé
Éprouvettes avec barres	8	8	8	8
Éprouvettes sans barres	8	8	8	8
Cubes de 50x50x50mm	12	12	12	12
Cylindres de 100x200mm	3	3	3	3

Les sections suivantes décrivent comment chacune des éprouvettes pour les différents essais a été produite.

4.1.4.1 Éprouvette pour essai de résistance à la compression

Dans le cas des essais de compression, les normes ASTM C 109 et ASTM C 192 ont été suivies.

4.1.4.2 Éprouvettes pour l'étude de la pénétration des ions chlorure et la détermination du seuil de corrosion

La confection de ces éprouvettes a été faite selon l'ASTM C 192. La cure de ces éprouvettes a été de 90 jours (3 mois) à 23 °C et à 100 % d'humidité relative. Cette longue cure a été prévue afin d'assurer une hydratation du béton la plus complète possible.

Après 90 jours de cure, les éprouvettes ont été coupées à une hauteur de 127 mm afin de laisser un recouvrement de 20 mm à la barre d'armature du haut (Figure 4-11). Le fait d'avoir conçu un moule plus haut que nécessaire et d'avoir coupé le mortier en surplus a permis d'enlever le mortier plus poreux de la surface finie. Ce phénomène, appelé effet de peau, est généralement dû au ressuage du mélange de mortier.



Figure 4-11 : Coupe des éprouvettes

Après la coupe, un bassin servant à contenir la solution saline a été placé sur les éprouvettes à l'aide de silicone (Figure 4-12). Ce bassin était fait d'un tuyau de PVC de 100 mm de diamètre coupé à 75 mm de hauteur.



Figure 4-12 : Bassin pour solution saline

Par la suite, les éprouvettes ont été recouvertes d'époxy sur tout le pourtour (Figure 4-13). Seuls le dessous du cylindre et l'intérieur du bassin n'ont pas été recouverts d'époxy. Ce recouvrement a servi à assurer le transport des ions chlorure à la verticale seulement.



Figure 4-13 : Recouvrement d'époxy sur les éprouvettes

Finalement, le montage du circuit électrique a été complété en soudant une résistance de 10 Ohms entre les barres du haut et du bas de chacune des éprouvettes pour les mesures de corrosion (Voir Figure 4-9).

Entre le début des essais et la fin de la cure humide, les éprouvettes ont été conservées dans un environnement de laboratoire (23 °C et 50 % d'humidité relative) pour une durée de 60 jours.

4.1.4.3 Éprouvettes pour la détermination des propriétés de transport

La confection des éprouvettes pour la détermination des propriétés de transport a été réalisée selon les prescriptions de la norme ASTM C 192. Ces éprouvettes étaient des cylindres de 100 mm de diamètre par 200 mm de longueur. La cure de ces éprouvettes a été d'au moins 180 jours à 23 °C et à 100 % d'humidité relative.

Les cylindres de 100 mm par 200 mm ont été coupés tels que présenté au Tableau 4-4 afin de produire tous les essais permettant de déterminer les propriétés de transport de chaque mélange. Les essais sont décrits à la section suivante.

Tableau 4-4 : Éprouvettes pour propriétés de transport

Essai	Type de coupe
Migration (ASTM C 1202 modifié)	2 éprouvettes de 50 mm d'épaisseur
Porosité (ASTM C 642)	2 éprouvettes de 60 mm d'épaisseur
Extraction de la solution interstitielle	2 éprouvettes de 30 mm d'épaisseur
Séchage	4 éprouvettes de 50 mm d'épaisseur

4.1.5 Essais sur béton durci

Afin de comparer les différents paramètres à l'étude (minéralogie du ciment, caractéristiques des mélanges et préparation des barres), des essais sur béton durci ont été réalisés. Le programme d'essais est décrit plus bas.

4.1.5.1 Résistance à la compression

Les essais de détermination de la résistance à la compression des mélanges de mortier ont été faits conformément à l'ASTM C 109. Les échéances choisies étaient : 7, 28 et 120 jours.

4.1.5.2 Propriétés de transport

Les propriétés de transport sont définies par la mesure des coefficients de diffusion ionique et d'humidité. Afin de pouvoir utiliser l'équation (2) présentée à la section 2.4, les paramètres à déterminer sont présentés aux points suivants. Tous ces essais ont débuté après au moins 180 jours de cure humide (100 % HR) à 23 °C.

- Le coefficient de diffusion de l'ion hydroxyde (D_{OH})

Le modèle multi-ionique reproduit les courants obtenus lors de l'essai de migration. Un essai de migration, basé sur la norme ASTM C 1202, a été développé à l'Université Laval (Samson et coll. 2008).

Cet essai fut réalisé selon une version modifiée de la procédure ASTM C 1202. L'essai original consiste à mesurer la quantité de courant électrique passant au travers un échantillon de béton ayant 50 mm d'épaisseur et 100 mm de diamètre sur une période de 6 heures. Un potentiel de 60 V est maintenu de part et d'autre de l'éprouvette. Un côté de l'éprouvette est immergé par une solution de chlorure de sodium (NaCl), et l'autre côté par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). Selon cet essai, la charge totale passée, en coulombs, est reliée à la résistance de l'éprouvette à la pénétration des ions chlorure.

La version modifiée de la procédure standardisée consiste à mesurer la quantité de courant électrique passant au travers un échantillon ayant 50 mm d'épaisseur et 100 mm de diamètre sur une période de plus de 300 heures. Un potentiel de 15 V est maintenu de part et d'autre de l'essai. Préalablement à l'essai, l'éprouvette est saturée sous vide dans une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 300 mmol/l sur une période de 24 heures, pour être certain que l'éprouvette est initialement saturée. Après la saturation, le pourtour de l'éprouvette est recouvert de silicone. Par la suite, l'éprouvette est montée sur les cellules de migration tel que montrée à la Figure 4-14. L'interface cellule/éprouvette est également scellée à l'aide de silicone afin de garantir un joint étanche. Chaque cellule de migration est remplie avec approximativement 3 L de solution. Le bassin amont est rempli d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 300 mmol/l et de chlorure de sodium (NaCl) à 500 mmol/l. Le bassin aval est rempli d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 300 mmol/l. Cette méthode modifiée permet d'éviter l'augmentation de la température des solutions lors de l'essai et ainsi de mieux contrôler les conditions aux limites.

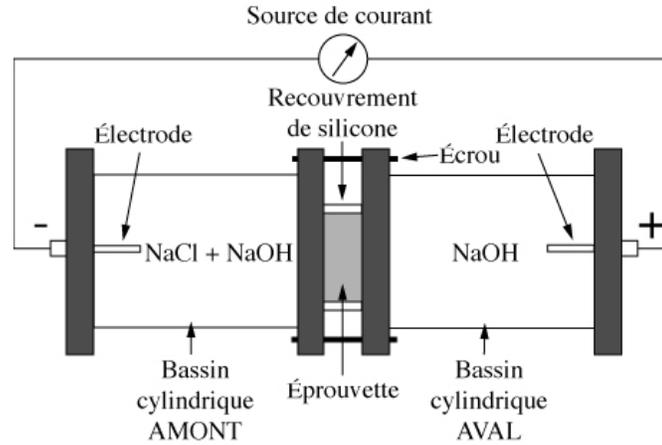


Figure 4-14 : Montage de l'essai de migration

- La porosité (ϕ)

La porosité de chaque mélange est un paramètre déterminant du transport des ions et apparaît comme une donnée d'entrée de l'analyse des courants (Samson et coll. 2003). L'essai est fait conformément à l'ASTM C 642. Cette norme permet de mesurer l'absorption, le volume de pores perméables (porosité) et la masse volumique. Le volume de vides perméables est exprimé en pourcentage du volume initial de l'échantillon, et l'absorption est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'échantillon. Un volume minimum de 350 cm³ de béton est requis pour faire cet essai.

- La composition initiale de la solution interstitielle (OH⁻, Na⁺, K⁺, SO₄²⁺, Ca²⁺, Cl⁻ et NO₂⁻)

L'essai d'extraction de la solution interstitielle est utilisé pour mesurer la concentration des principales espèces ioniques de la solution des pores du matériau. L'essai est pratiqué en plaçant des fragments de mortier, ayant un volume total approximatif de 140 cm³, dans une cellule d'extraction (Figure 4-15). Par la suite, le matériau est comprimé sous une pression d'environ 500 MPa (71,500 psi). Normalement, un volume compris entre 2 ml et 5 ml de solution des pores est extrait. Cette solution est recueillie directement par une seringue en passant par le drain du montage et un petit boyau afin de limiter l'exposition à l'air libre. La solution est conservée au réfrigérateur en attendant que l'analyse chimique soit effectuée.

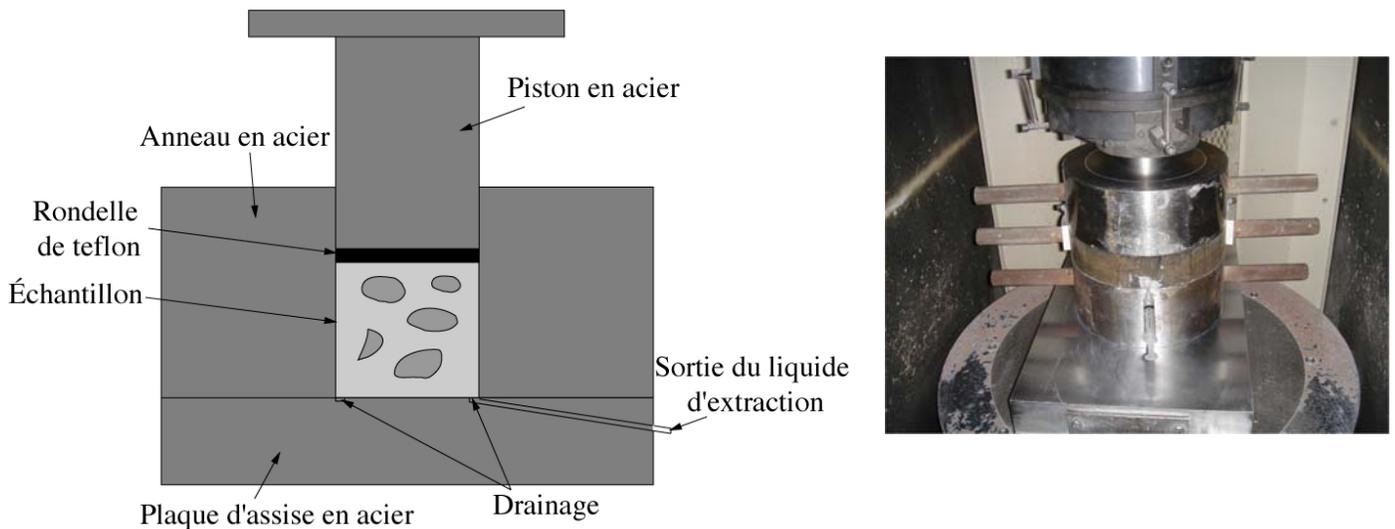


Figure 4-15 : Montage de l'essai d'extraction

Tous les essais d'extraction de cette étude ont été faits sur des éprouvettes saturées sous vide avec du NaOH à 300 mmol/l. La concentration de Na^+ est ajustée après le dosage des espèces ioniques afin de respecter l'électronégativité de la solution. Cet ajustement est fait à cause du débalancement produit par les erreurs de mesures.

- La diffusivité de l'eau (D_w)

Dans le cas des structures de béton en milieu non saturé, le mouvement d'humidité dans le matériau influence le transport ionique. Afin de décrire le transport d'humidité, les propriétés de diffusion d'humidité du matériau doivent être déterminées. Ces propriétés peuvent être mesurées par un essai de séchage (Figure 4-16).



Figure 4-16 : Montage de l'essai de séchage

Les éprouvettes sont d'abord saturées en eau sous vide. Par la suite, deux éprouvettes de chaque mélange sont placées dans des environnements à différentes humidités relatives afin d'étudier la cinétique de séchage. Deux environnements sont créés à l'aide de solutions salines ($\text{NaCl} \approx 75\% \text{ H.R.}$ et $\text{MgNO}_3 \approx 53\% \text{ H.R.}$). Ensuite, le changement de masse de chaque éprouvette est mesuré en fonction du temps. Ce changement de masse est ainsi analysé à l'aide du modèle de transport d'eau de Richard tiré de Samson et coll. (2008) et montré par l'équation suivante :

$$D(\omega)_{\text{eau}} = Ae^{B\omega} (m^2/s) \quad (\text{éq. 4-1})$$

où la variable ω représente la teneur dans le matériau et les paramètres A et B sont le fruit de l'analyse de la courbe expérimentale. Le paramètre A est exprimé en m^2/s et B est une variable sans unité de valeur positive.

4.1.5.3 Étude de la pénétration des ions chlorure

Après 120 jours de cure, la capacité des mélanges à résister à la pénétration des ions chlorure a été étudiée à l'aide d'un essai de mouillage et de séchage. Les cycles consistaient en une période de trois jours de séchage, à $21\text{ }^\circ\text{C}$ et à $45\% \text{ d'humidité relative}$, suivie d'une seconde période de quatre jours durant laquelle une solution de NaCl (3%) a été placée en contact avec la surface supérieure de l'éprouvette. Le type d'éprouvettes utilisé pour cet essai est montré à la Figure 4-10. À différentes échéances, le profil de la teneur en ions chlorure totaux fut mesuré en se basant sur la norme ASTM C 1152. Le matériau a été

broyé en différentes sous-couches à l'aide d'une mèche spéciale de 50 mm de diamètre (Figure 4-17). À quelques reprises, une éprouvette sans barres a été broyée en même temps qu'une éprouvette avec barres afin de comparer les profils en ions chlorure.



Figure 4-17 : Mèche pour le broyage

Typiquement, le broyage des éprouvettes est fait selon la méthode suivante :

1. Fixer solidement l'éprouvette à broyer tel que représenté par la Figure 4-18.



Figure 4-18 : Montage pour le broyage

2. Forer à l'endroit et selon la direction du profil à tracer. La profondeur varie selon le type d'éprouvette foré. Pour les éprouvettes sans barres, la procédure suivie a été de broyer par pas de 2 mm jusqu'à 36 mm de profondeur (correspondant au bas de la

barre supérieure des éprouvettes avec barres). Par la suite, broyer par pas de 4 mm jusqu'à 64 mm de profondeur (centre de l'éprouvette). Pour les éprouvettes avec barres, il a suffi de broyer par pas de 2 mm jusqu'à la face supérieure de la barre (de 0 à 20 mm).

3. Recueillir, à chaque pas, la poudre de béton dans des petits contenants d'aluminium (Figure 4-19).



Figure 4-19 : Contenant d'aluminium

4. Déposer les petits contenants dans une étuve à 110°C pour environ 12 heures (Figure 4-20).

Par la suite, la poudre est analysée en se basant sur la procédure de la norme ASTM C 1152.



Figure 4-20 : Étuve à 110°C

4.1.5.4 Étude de la détermination du seuil de corrosion

Parallèlement à l'étude de la pénétration des ions chlorure, une étude de la concentration minimale en ions chlorure requise pour initier la réaction de corrosion dans le béton armé a aussi été faite. Le type d'éprouvette utilisée pour cette étude est illustré par la Figure 4-9. Les éprouvettes ont subi le même cycle de mouillage et de séchage que pour l'étude précédente. La procédure suivie (Berke et coll. 2002) suggérait trois mesures de corrosion, soit la densité de courant macropile (ASTM G 109), le potentiel de corrosion (ASTM C 876) et la résistance de polarisation (ASTM G 5 et G 59). Ces mesures ont été prises deux fois pendant le cycle de mouillage; à 24 heures du début et à la fin. Les mesures de corrosion ont été prises à l'aide d'un potentiostat Solartron SI 1260. Les paragraphes suivants expliquent le branchement des éprouvettes ainsi que leur paramètre de lecture et de calcul.

Densité de courant macropile

La mesure du courant macropile a été réalisée en mesurant la différence de potentiel entre la barre du haut et la barre du bas (Figure 4-21). Cette méthode suppose que seulement la barre du haut va corroder (*working electrode*, WE) et que l'électrode de référence (*reference electrode*, RE) est la barre du bas. Ainsi, la barre du haut était l'anode et la barre du bas était la cathode. Préalablement, une résistance de 10 Ohms a été placée sur le montage entre les deux barres. Celle-ci a servi à faire la transformation du potentiel mesuré en courant par la loi d'Ohm. La valeur de 10 Ohms a été choisie afin de s'assurer que la valeur de la résistance soit inférieure à la valeur de la résistance du matériau afin de ne pas fausser les mesures. Finalement, les résultats ont été compilés en micro Ampère par centimètre carré ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). La valeur calculée de la surface d'acier exposée au mortier pour toute l'étude était de 51 cm^2 (surface de la barre du haut). Selon la procédure suivie, la corrosion était considérée comme active lorsque le courant de corrosion était supérieur à $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

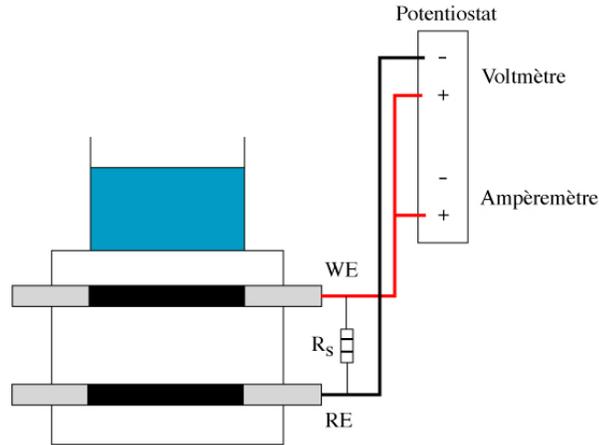


Figure 4-21 : Connexion pour mesure de courant macropile

Potentiel de corrosion

La mesure du potentiel de corrosion a été faite en mesurant la différence de potentiel électrique entre la barre du haut (WE) et une électrode de référence (RE) fabriquée spécifiquement pour ce type d'application (Figure 4-22). L'électrode de référence utilisée dans le cadre de cette étude était une électrode de calomel saturée (ECS). Cette électrode a un potentiel d'équilibre de $-0,242$ V par rapport à celle d'hydrogène. Les résultats obtenus ont été exprimés en millivolt (mV). Selon la procédure suivie, la corrosion était considérée comme active lorsque le potentiel de corrosion était inférieur à -350 mV par rapport à l'électrode de calomel saturée.

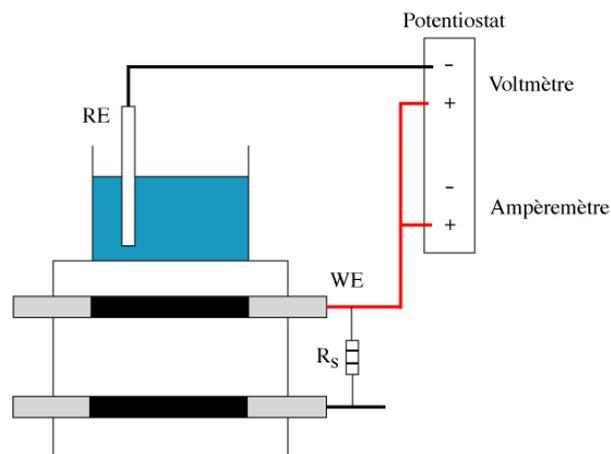


Figure 4-22 : Connexion pour mesure de potentiel de corrosion

Polarisation linéaire

La mesure de polarisation linéaire a été faite à l'aide de la même connexion que pour la mesure de potentiel de corrosion; par contre, il a fallu ajouter une contre électrode (CE), ici en graphite, afin d'assurer le retour du courant (Figure 4-23). La polarisation linéaire a été faite en balayant le potentiel et en mesurant le courant (mesure potentiodynamique). La procédure « Chloride-ion threshold method » tirée de l'article de Berke et coll. (2002) négligeait la résistance du béton (R_{Ω}). Ainsi, la résistance de polarisation a été prise égale à la résistance apparente ($R_{app} = R_p$). La procédure demandait de balayer le potentiel entre -0,02 V et 0,02 V par rapport à l'OCP « Open Circuit Potential ». De plus, le calcul de la résistance de polarisation (R_p) devait être fait à partir des résultats compris entre -0,01 V et 0,01 V par rapport à l'OCP; R_p était donc égale à la pente de la courbe tracée par le graphique du potentiel en fonction du courant (voir Figure 2-6). Les résultats obtenus ont été exprimés en $k\Omega \times cm^2$. La même surface d'exposition au mortier présentée pour la mesure de courant de corrosion a été utilisée pour toute l'étude. Selon la procédure suivie, la corrosion était considérée comme active lorsque la résistance de polarisation était inférieure à $5 k\Omega \times cm^2$.

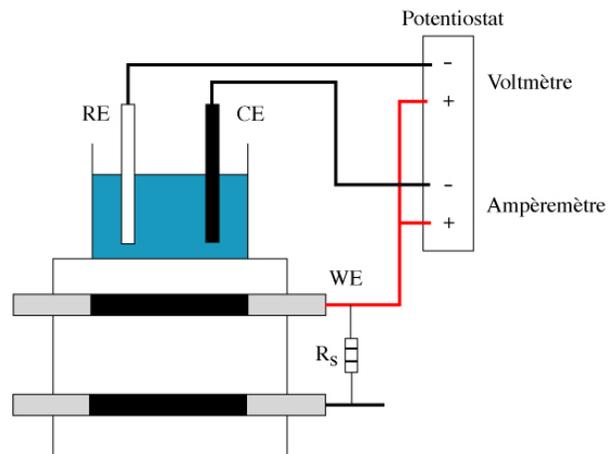


Figure 4-23 : Connexion pour mesure de polarisation linéaire

Il est à noter que les mesures ont été compilées et analysées en suivant l'hypothèse que la corrosion était uniforme tout le long de la barre. Cette hypothèse était nécessaire puisque l'appareil de mesure ne permettait pas de donner la taille réelle de la surface qui corrodatait

sur la barre et la position des taches de corrosion. Il est à souligner que la corrosion apparaît généralement sous forme de piqûres distribuées aléatoirement le long de la barre.

Analyse probabiliste

Une approche probabiliste a été utilisée pour l'analyse des données afin de déterminer un temps d'initiation de la corrosion. La loi normale, ou gaussienne, a permis d'établir une distribution continue des données. Cette distribution est exprimée en fonction de la moyenne (t_{moy}) et de l'écart-type (σ) des valeurs expérimentales. La loi normale est définie par la densité de probabilité $f(t)$ suivante :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_{moy}}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{éq. 4-2})$$

où t est le temps d'initiation de la corrosion. La probabilité $P(t \leq t_0)$ relative à la densité $f(t)$ est égale à l'aire sous la courbe $f(t)$ définie par l'intervalle $0 \leq t \leq t_0$.

Les moyennes et les écart-types ont été déterminés pour chaque série (voir Tableau 4-3) afin d'obtenir pour chacune une loi normale. Il est à noter que les valeurs présentant un trop grand écart par rapport à la moyenne ont été rejetées de l'analyse.

4.2 Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures

L'objectif de cet essai était de déterminer la courbe force-déplacement de barres d'armature pour divers degrés de corrosion. Cette section présente les caractéristiques des matériaux utilisés, la méthode suivie pour préparer les éprouvettes utilisées lors des essais de traction ainsi que le protocole de mise en traction.

4.2.1 Caractéristiques des matériaux utilisés

Des barres d'armature 15M d'acier noir et de nuance 400R ont été retenues. Ces barres provenaient de la même coulée que celles utilisées pour les essais de la détermination du seuil de corrosion.

4.2.2 Fabrication des éprouvettes de traction

Les barres ont d'abord été coupées en section de 406 mm (16 po) de longueur. Une extrémité était ensuite percée puis filetée afin de permettre la connexion électrique. Finalement, une résine époxy a été appliquée sur une longueur de 127 mm (5 po) à chaque extrémité de la barre, laissant une section centrale de 152 mm (6 po) non protégée (voir Figure 4-24). C'est cette zone qui a corrodé lors de l'essai. La section centrale des éprouvettes fut attaquée par une corrosion accélérée. La corrosion a été produite avec un appareil de corrosion (Solartron SI 1260) en mode galvanostatique; ainsi, le courant était mis en graphique en temps réel et il était facile de prévoir quand arrêter l'essai selon l'échéance voulue. Le montage est illustré à la Figure 4-25. Le grillage utilisé était fait d'acier inoxydable. De plus, les barres baignaient dans une solution de 3 % en NaCl pour favoriser la corrosion. Un courant allant jusqu'à 1 A par barre fut maintenu jusqu'à ce que la perte de masse visée soit atteinte. Cette intensité de courant a varié en fonction de la résistance du circuit.

Selon la revue de la documentation scientifique (section 2.5), c'est à de faibles pourcentages de perte de masse qu'il y a le plus de perte de ductilité. Ainsi, les échéances devaient être relativement faibles. Les échéances visées correspondaient alors à 0, 1, 2, 4, 6, 10, 12, 14 et 25 % de perte de masse. Chaque échéance était représentée par trois barres.

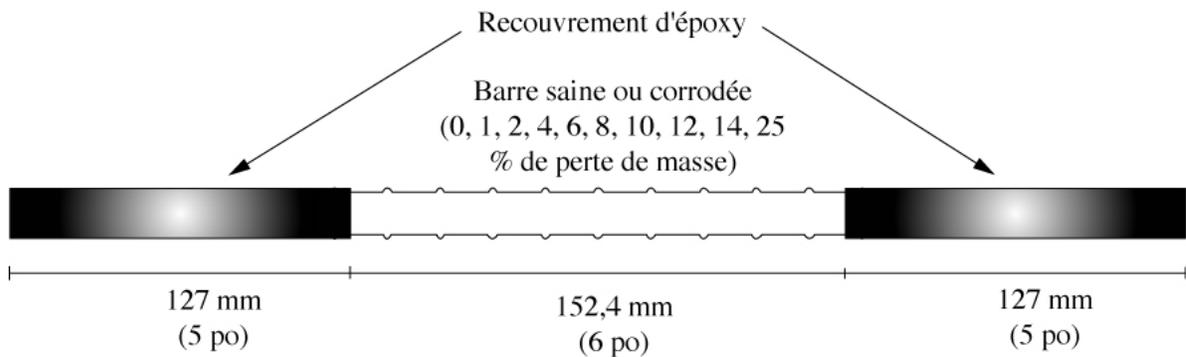


Figure 4-24 : Barre type pour essai de traction

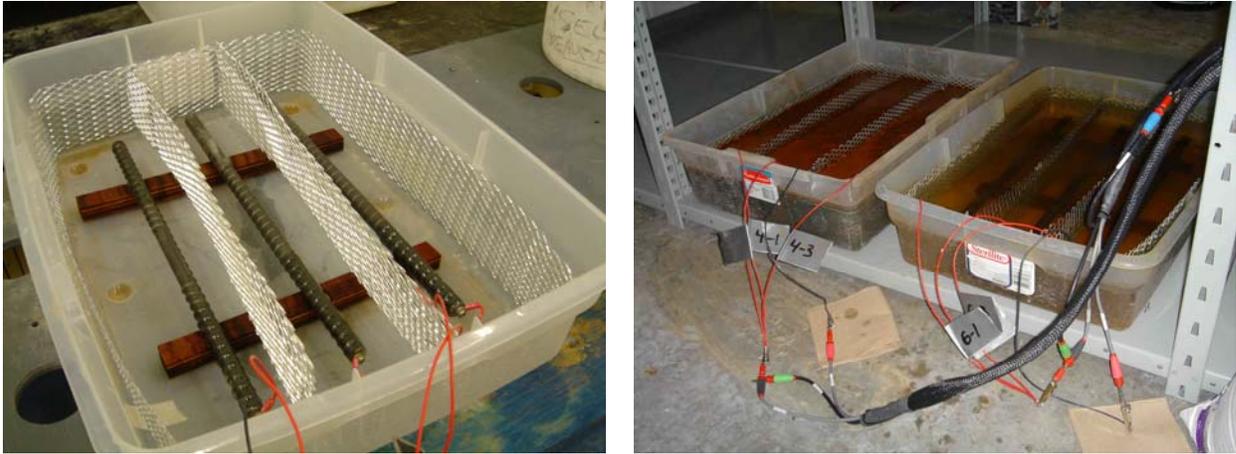


Figure 4-25 : Montage de corrosion pour essai de traction

En parallèle, une mesure initiale et une mesure finale de la masse et du diamètre des barres ont été prises. Les mesures de masse ont été faites à l'aide d'une balance, au 0,1 g près, et les mesures de diamètre ont été faites à l'aide d'un vernier, au 0,01 mm près. De plus, seul le diamètre minimum a été pris en compte puisque c'est le paramètre qui gouverne la résistance mécanique en traction.

4.2.3 Protocole de mise en traction

La presse utilisée était une MTS 322 Test Frame. Le protocole de mise en traction a été inspiré de l'ASTM A 370. Ainsi, seule la préparation de la barre fut propre à cet essai. Selon cette norme, un taux de chargement de 3 mm/min était approprié pour cet essai. De plus, des calles en aluminium ont été utilisées entre les mâchoires de la presse et la barre afin d'éviter tout problème de concentration de contrainte dans les mâchoires (Figure 4-26).



Figure 4-26 : Montage pour essai de traction

Chapitre 5 - Résultats

Ce chapitre présente les résultats obtenus ainsi que leur analyse pour chacune des deux parties du projet : concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion ainsi que l'effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures.

5.1 Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion

Il est d'abord nécessaire de présenter la nomenclature des éprouvettes qui a été utilisée tout le long de ces essais. Dans tous les cas, les éprouvettes ont été nommées de la façon présentée au Tableau 5-1 suivi d'un tiret et du numéro d'éprouvette allant de 1 à 8. Par exemple, la première éprouvette fait avec un ciment de type I et un rapport e/c de 0,485 (arrondi à 0,5) avec une barre broyée était identifiée I5B-1. De plus, chaque éprouvette avec barres était rattachée à une éprouvette témoin sans barres portant exactement le même nom. S'il y avait un risque de confusion dans la présentation des éprouvettes, les lettres AB étaient ajoutées pour indiquer qu'il s'agissait de l'éprouvette avec barres et SB pour celle sans barres.

Tableau 5-1 : Nomenclature des éprouvettes avec et sans barres

Type de ciment Rapport e/c Préparation des barres	I			V	
	0,485 Brossé	0,485 Jet de sable	0,65 Brossé	0,485 Brossé	0,65 Brossé
Nomenclature	I5B-i	I5J-i	I65B-i	V5B-i	V65B-i

5.1.1 Propriétés à l'état frais

Le Tableau 5-2 présente la composition réelle et résume les caractéristiques à l'état frais des mélanges de mortier préparés au laboratoire. La masse volumique théorique des mélanges de mortier était de 2 182,8 kg/m³ pour le I5, 2 112,5 kg/m³ pour le I65, 2 200,8 kg/m³ pour le V5 et 2 133,8 kg/m³ pour le V65. D'après les mesures de la norme ASTM C 185, la densité des mélanges était de 2,28 pour un e/c de 0,485 et de 2,23 pour un e/c de 0,65. Par ailleurs, la teneur en air des mélanges de mortier était de 4 % pour le I5,

6 % pour le I65, 3 % pour le V5 et 5 % pour le V65. Ainsi, peu d'air fut entraîné lors de la confection des mélanges. L'étalement des mélanges de mortier était de 67 % pour le I5, 83 % pour le I65, 86 % pour le V5 et le V65. Ainsi, les mélanges à base de ciment de type V (HS) sont plus fluides que les mélanges à base de ciment de type I (GU). De plus, pour les mélanges à basse de ciment de type I (GU), l'augmentation du rapport e/c a pour effet d'augmenter la fluidité du mélange. Par contre, avec un ciment de type V, cette logique n'a pas été respectée.

Tableau 5-2 : Propriétés à l'état frais des mortiers

Type de ciment		I		V	
Rapport e/c		0,485	0,65	0,485	0,65
Proportion (kg/m ³)	Ciment	521,1	403,5	524,9	407,8
	Eau	252,2	262,2	254,6	264,9
	Sable	1 433,4	1 470,1	1 443,6	1 485,6
Masse volumique (kg/m ³)		2 182,8	2 112,5	2 200,8	2 133,8
Densité – ASTM C 185		2,28	2,23	2,28	2,23
Air (%) – ASTM C 185		4	6	3	5
Étalement (%) – ASTM C 1437		67	83	86	86

5.1.2 Essais sur béton durci

Les essais sur béton durci couvraient la détermination de la résistance à la compression, des propriétés de transport, de la pénétration des ions chlorure, du seuil de corrosion et de la propagation de la corrosion. Les résultats de ces essais sont présentés dans les sous-sections suivantes.

5.1.2.1 Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été faits à 7, 28 et 120 jours de cure. Les résultats pour chaque échéance sont présentés au Tableau 5-3 et à la Figure 5-1. D'après les résultats, le gain de résistance semble plus rapide à 7 jours avec un ciment type I qu'avec un ciment type V. En effet, les mélanges I5 et I65 ont atteint respectivement 70 % et 86 % de leur résistance à 28 jours après seulement 7 jours de cure. Tandis que les mélanges V5 et V65 ont atteint respectivement 44 % et 52 % de leur résistance à 28 jours après 7 jours de cure. À long terme (120 jours), la résistance mécanique du mélange fait avec du type V a

été plus élevée que pour les mélanges avec le ciment type I. Ainsi, le ciment type V utilisé dans le cadre de cette étude était de qualité supérieure du point de vue développement des résistances mécaniques à long terme.

Tableau 5-3 : Résistance à la compression des mortiers

Type de ciment Rapport e/c	I		V	
	0,485	0,65	0,485	0,65
7 jours	27,4	17,6	20,5	14,8
28 jours	39,1	20,4	46,7	28,2
120 jours	45,5	29,1	55,7	35,7

[MPa]

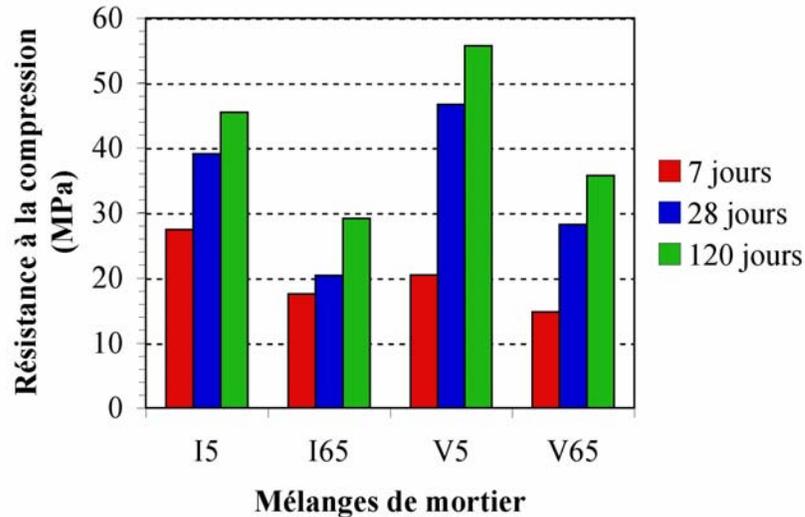


Figure 5-1 : Résistance à la compression des mortiers

5.1.2.2 Propriétés de transport

Les résultats pour les propriétés de transport couvraient les essais de porosité, d'extraction, de séchage et de migration. L'analyse des résultats à l'aide du modèle multi-ionique, dans le but de déterminer les coefficients de transport des mélanges, est présentée à la fin de cette section.

Porosité

L'essai de porosité a été fait conformément à l'ASTM C 642. Les résultats de cet essai sont présentés au Tableau 5-4. Les résultats vont de 15,5 % (I5) à 18,5 % (V65). De plus, les mélanges avec un e/c de 0,485 ont une porosité d'environ 2 % plus faible que leur mélange respectif avec un e/c de 0,65. Ces résultats vont donc dans le bon sens. Le Tableau 5-4 présente aussi l'absorption après ébullition (%) et la densité apparente des mortiers. Les absorptions suivent la même tendance que les résultats de porosité. Par ailleurs, les densités apparentes à l'état solide sont légèrement supérieures aux densités à l'état frais présentées au Tableau 5-2.

Tableau 5-4 : Porosité des mortiers

Type de ciment Rapport e/c	I		V	
	0,485	0,65	0,485	0,65
Porosité (%) – ASTM C 642	15,5	17,4	16,0	18,5
Absorption après ébullition (%)	7,7	8,9	7,9	9,4
Densité apparente	2,40	2,37	2,42	2,41

Extraction

La solution poreuse balancée des éprouvettes des mélanges de mortier saturés au NaOH est présentée au Tableau 5-5. D'après les résultats obtenus, la concentration des trois ions principaux, c'est-à-dire les OH⁻, Na⁺ et K⁺, était plus élevée pour les mélanges faits avec un rapport e/c de 0,485 comparativement à leur mélange respectif fait avec un rapport e/c de 0,65.

Tableau 5-5 : Solution poreuse des mortiers saturés au NaOH

Type de ciment Rapport e/c	I		V	
	0,485	0,65	0,485	0,65
OH ⁻	151,65	96,28	165,87	114,74
Na ⁺	86,99	69,60	95,69	65,25
K ⁺	66,38	20,73	64,22	36,98
SO ₄ ²⁺	0,52	0,52	0,52	0,52
Ca ²⁺	0,09	4,24	3,49	5,74
Cl ⁻	2,94	3,57	2,07	0

[mmol/l]

Cette solution des pores a aussi permis de calculer le pH de la solution. D'après le Tableau 5-6, le pH initial des mélanges faits avec du ciment type I était semblable à celui des mélanges faits avec du ciment type V pour un même rapport e/c. Autrement, le rapport e/c avait tout de même une influence sur le pH de la solution. Par conséquent, les mélanges faits avec un rapport e/c de 0,65 ont un pH plus faible, créant un mince désavantage du point de vue de la protection contre l'initiation de la corrosion sur les mélanges faits avec un rapport e/c de 0,485.

Tableau 5-6 : pH de la solution des mortiers

Type de ciment	I		V	
Rapport e/c	0,485	0,65	0,485	0,65
pH	13,1	12,9	13,1	12,9

Séchage

Le séchage des éprouvettes de mélange de mortier s'est poursuivi pendant 112 jours (16 semaines). Les courbes de perte de masse (g) en fonction du temps (jours) sont présentées aux Figures 5-2 à 5-5. Tel qu'espéré, les mélanges I65 et V65 ont eu des pertes de masse plus élevées que les mélanges I5 et V5. De plus, les mélanges I5 et V5 ont eu des pertes de masse semblables à 75 % d'humidité relative (14,13 g et 15,24 g respectivement) et à 53 % d'humidité relative (18,67 g et 20,07 g respectivement). Par contre, le mélange I65 a perdu plus d'eau que le mélange V65 à 75 % d'humidité relative (31,45 g et 24,5 g respectivement) et à 53 % d'humidité relative (40,91 g et 37,18 g respectivement). Par conséquent, le transport d'humidité a été plus rapide dans le mélange I65 que dans le mélange V65.

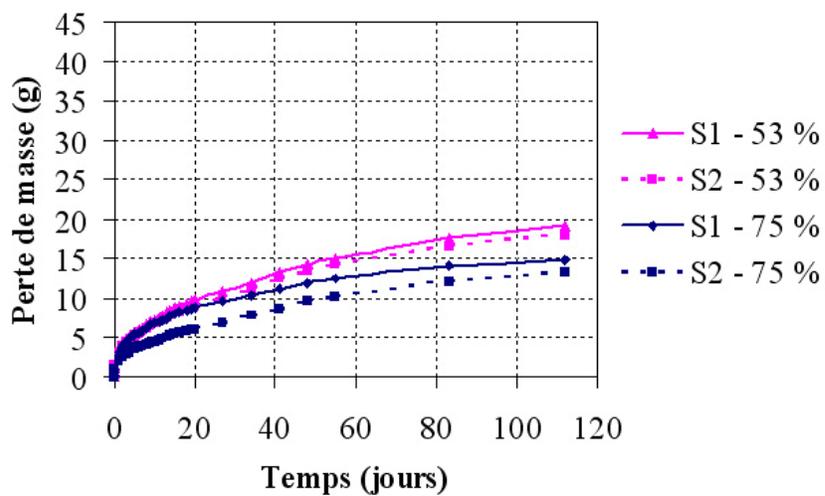


Figure 5-2 : Séchage du mélange I5

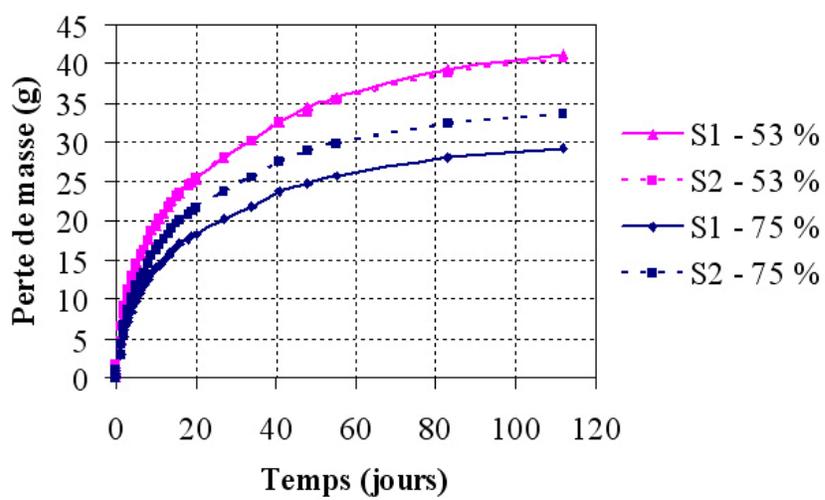


Figure 5-3 : Séchage du mélange I65

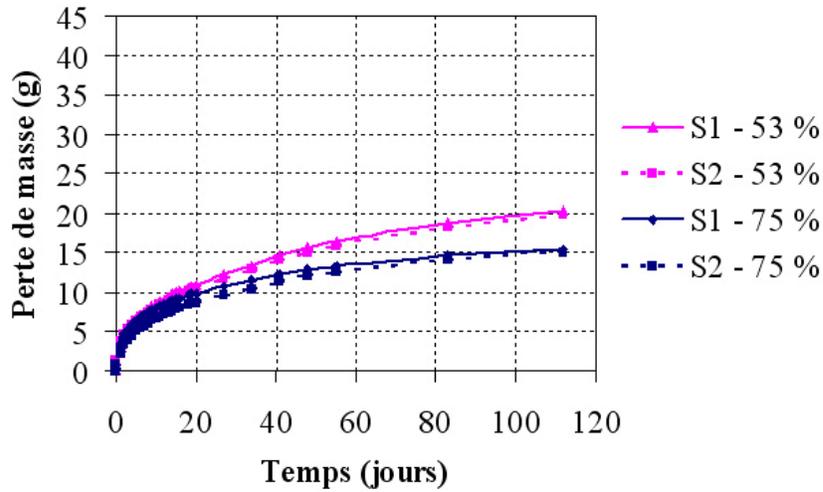


Figure 5-4 : Séchage du mélange V5

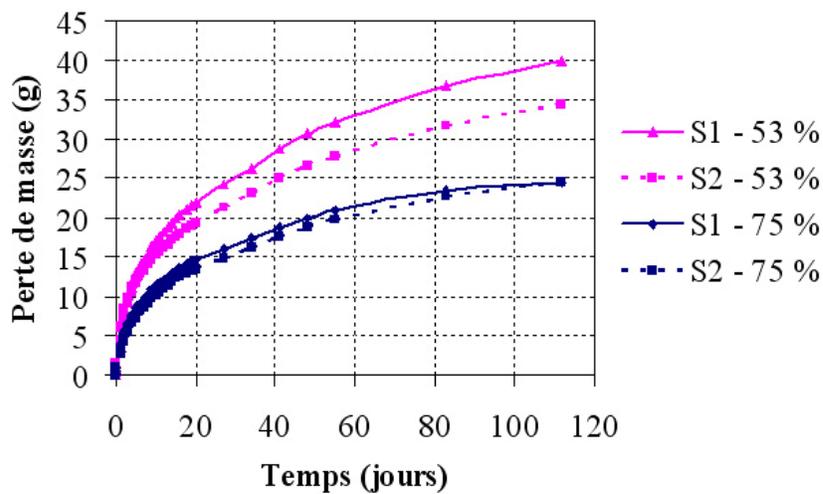


Figure 5-5 : Séchage du mélange V65

Analyse des essais de séchage

Les essais de séchage ont été analysés avec le modèle de transport d'eau de Richard afin d'en ressortir les coefficients A et B qui gouvernent la désorption de chaque mortier (voir section 4.1.5.2). Les résultats sont présentés au Tableau 5-7. Ici, la variable B a été fixée à 50, considérant que les quatre mélanges avaient le même comportement au séchage. De

plus, selon le coefficient A, la facilité à transférer l'humidité en dehors du matériau peut être notée dans l'ordre suivant : I65, V65 et similaire pour I5 et V5. Les Figures 5-6 à 5-9 présentent les courbes de simulation. Ces figures démontrent que les simulations numériques représentent bien le comportement en séchage de chaque mélange de mortier.

Tableau 5-7 : Analyse des essais de séchage

Type de ciment Rapport e/c	I		V	
	0,485	0,65	0,485	0,65
A ($\times 10^{-11}$ m ² /s)	0,04	0,22	0,04	0,06
B	50	50	50	50

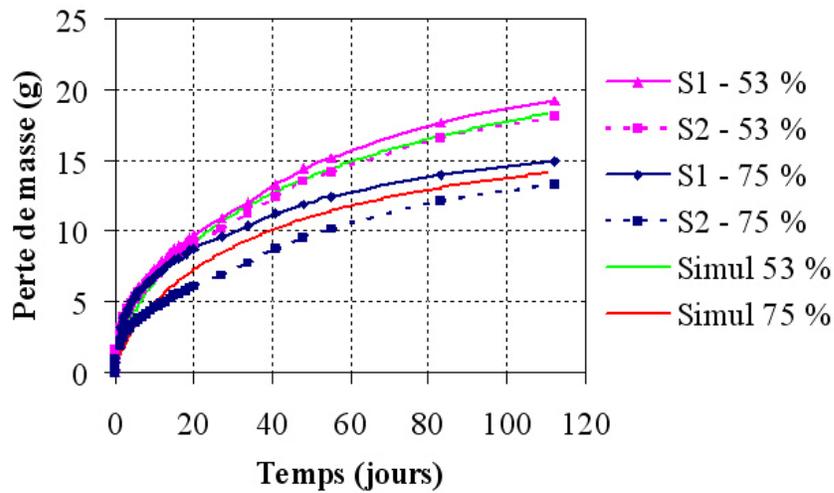


Figure 5-6 : Analyse du séchage pour le mélange I5

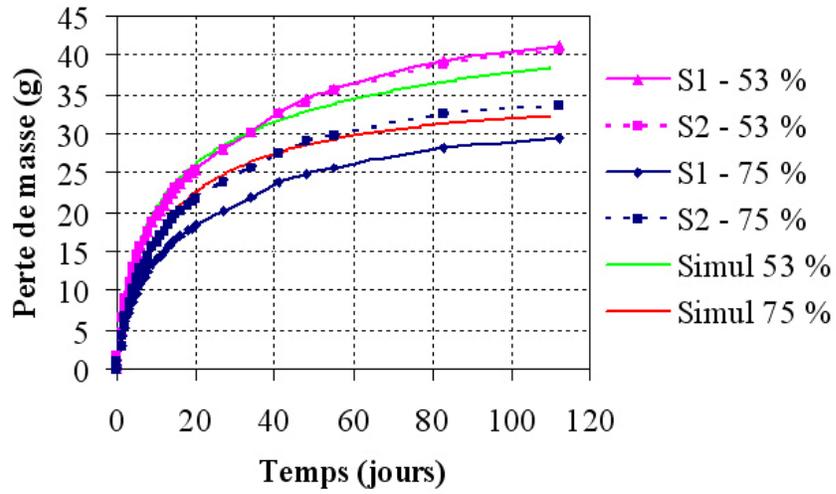


Figure 5-7 : Analyse du séchage pour le mélange I65

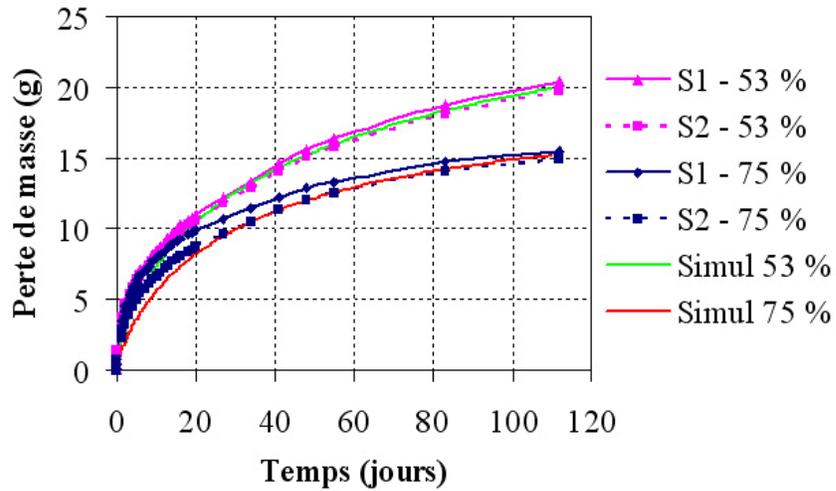


Figure 5-8 : Analyse du séchage pour le mélange V5

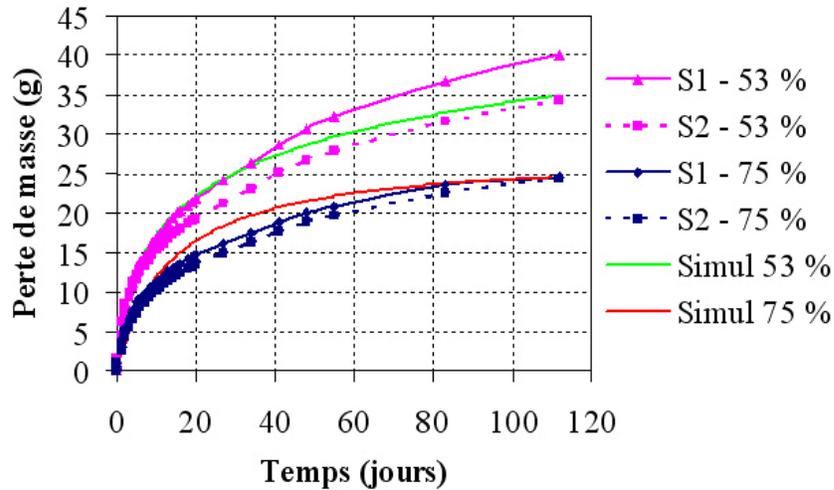


Figure 5-9 : Analyse du séchage pour le mélange V65

Migration

Les résultats de l'essai de migration sont illustrés par des courbes du courant passant à l'intérieur du montage en fonction du temps. Les résultats pour les mélanges I5 et V5 sont présentés aux Figures 5-10 et 5-11. Aucun résultats ne sont présentés pour les montages I65 et V65 puisque des problèmes sont survenus pendant l'essai. Selon les courants mesurés, pour un même rapport e/c, le mélange fait avec un ciment de type V (HS) est initialement plus résistif que celui fait avec un ciment de type I (GU). Un mélange plus résistif présente normalement un coefficient de diffusion plus faible.

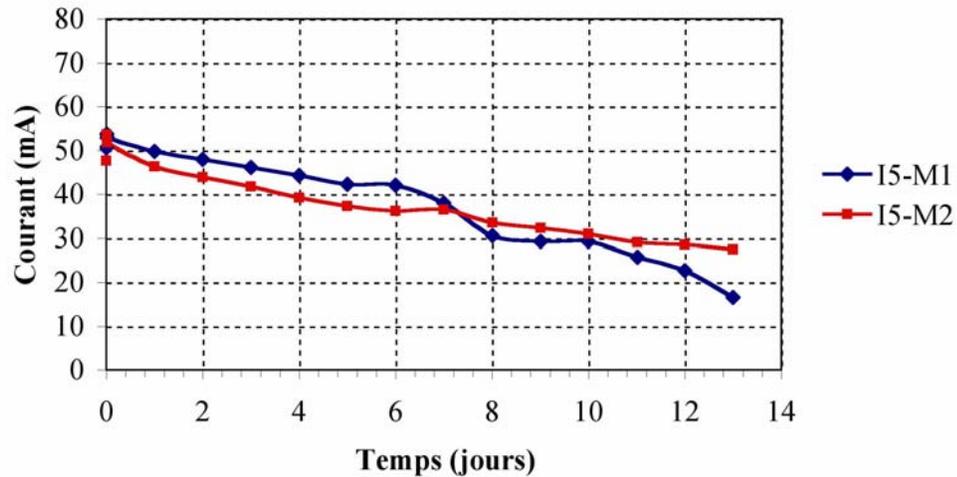


Figure 5-10 : Courant lors de l'essai de migration du mélange I5

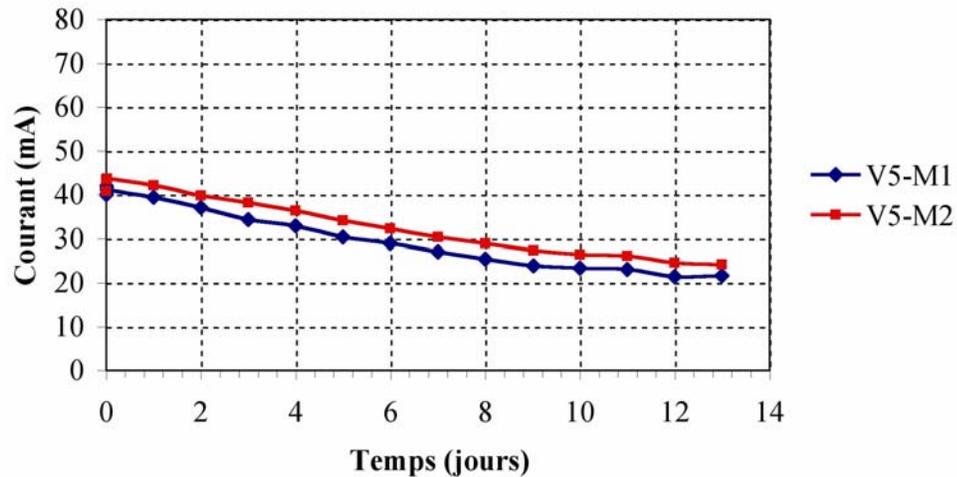


Figure 5-11 : Courant lors de l'essai de migration du mélange V5

Analyse des essais de migration

L'analyse des essais de migration a été réalisée sur les montages I5 et V5 uniquement puisqu'aucune donnée n'a pu être recueillies pour les montages I65 et V65. L'analyse a été réalisée à l'aide du modèle multi-ionique présenté à la section 2.4 afin de ressortir les coefficients de transport ionique. Tel que présenté à la section 2.4, les coefficients de transport ionique sont le fruit d'une analyse de la porosité, de la diffusivité de l'eau, de la composition initiale de la solution interstitielle, des phases solides initiales de la matrice cimentaire et des courants de migration. Le Tableau 5-8 présente les coefficients de chacun

des mélanges de mortier analysés. Du point de vue durabilité, il est préférable que le coefficient de diffusion soit le plus faible possible. Autrement dit, plus le coefficient de diffusion est faible, plus il est difficile pour les ions de diffuser dans la matrice cimentaire. Sachant que tous les coefficients de transport ionique dans le matériau sont proportionnels au coefficient de diffusion des hydroxydes (D_{OH^-}), il est possible de faire une analyse des résultats en regardant seulement ce coefficient. Ainsi, selon les résultats, le mélange V5 est moins diffusif que le mélange I5. Cela ne signifie toutefois pas que le mélange I5 présentera des temps d'initiation plus court, car, dans le cas de ce mélange, les interactions chimiques contribuent fortement à ralentir la pénétration des ions chlorure. Il est ainsi difficile de se baser sur le coefficient de diffusion seul pour déterminer quel montage initiera la corrosion en premier.

Tableau 5-8 : Coefficients de diffusion des mortiers selon l'analyse basé sur les courants

Type de ciment Rapport e/c	I	V
D_{OH^-}	15,0	12,0
D_{Na^+}	3,8	3,0
D_{K^+}	5,6	4,4
$D_{SO_4^{2+}}$	3,0	2,4
$D_{Ca^{2+}}$	2,2	1,8
D_{Cl^-}	5,8	4,6

[x10⁻¹¹ m²/s]

5.1.2.3 Étude de la pénétration des ions chlorure

La teneur initiale en ions chlorure totaux, inspiré de la norme ASTM C 1152 et C 114-99, a été mesurée après 91 jours (3 mois) de cure sur des éprouvettes n'ayant pas été en contact avec une solution saline. Cette mesure a permis de déterminer si les mélanges contenaient des chlorures avant de débiter les essais d'exposition aux chlorures. Dans le cadre de ces travaux, les causes possibles de présence initiale d'ions chlorure pouvaient être : l'eau de gâchage, le ciment, le sable et l'eau provenant de la cure humide. Pour tous les mélanges, la valeur initiale en ions chlorure totaux était inférieure à 0,02 % en masse de mortier sec. La valeur initiale était donc négligeable.

Les résultats de la pénétration des ions chlorure, pour les éprouvettes avec et sans barres à diverses profondeurs, sont présentés en détail à l'Annexe A. Les résultats obtenus pour les

éprouvettes de mortier cyclées sans barres sont illustrés aux Figures 5-12 à 5-16. La légende de ces figures présente l'échéance à laquelle l'éprouvette a été broyée ainsi que le numéro de l'éprouvette (entre parenthèses). À première vue, les profils à faible profondeur sont très variables. Il est difficile d'expliquer cet effet de surface. Par contre, il est certain que ce phénomène n'est pas dû à un effet de peau puisque, tel que présenté à la section 4.1.4.2, la zone plus poreuse, présente à la surface finie, a été enlevée.

De plus, les profils démontrent une évolution dans le temps. C'est-à-dire qu'à une même profondeur, la concentration en ions chlorure augmente en fonction du temps. Toutefois, en analysant les résultats, les montages I5B et I5J présentent des résultats difficiles à comparer entre eux. Il faut se rappeler que les montages I5B et I5J ont la même formulation. Par contre, ils ont été mélangés séparément. Malgré tout, les essais de propriétés de transport ont tous été produits avec le mélange I5B uniquement. Ainsi, des essais ont été faits afin de vérifier si les propriétés de transport de ces deux mélanges sont semblables. Selon les résultats présentés à l'Annexe B, les deux mélanges ont des propriétés de transport identiques. Par conséquent, en comparant les résultats pour une même échéance, il est difficile d'expliquer les différences de concentration (voir les Figures 5-12 et 5-13 et l'Annexe A). Selon les résultats, les concentrations en ions chlorure pour le montage I5J doivent être utilisées avec prudence puisqu'elles ont tendance à être plus élevées qu'elles ne devraient l'être en comparaison avec tous les autres montages.

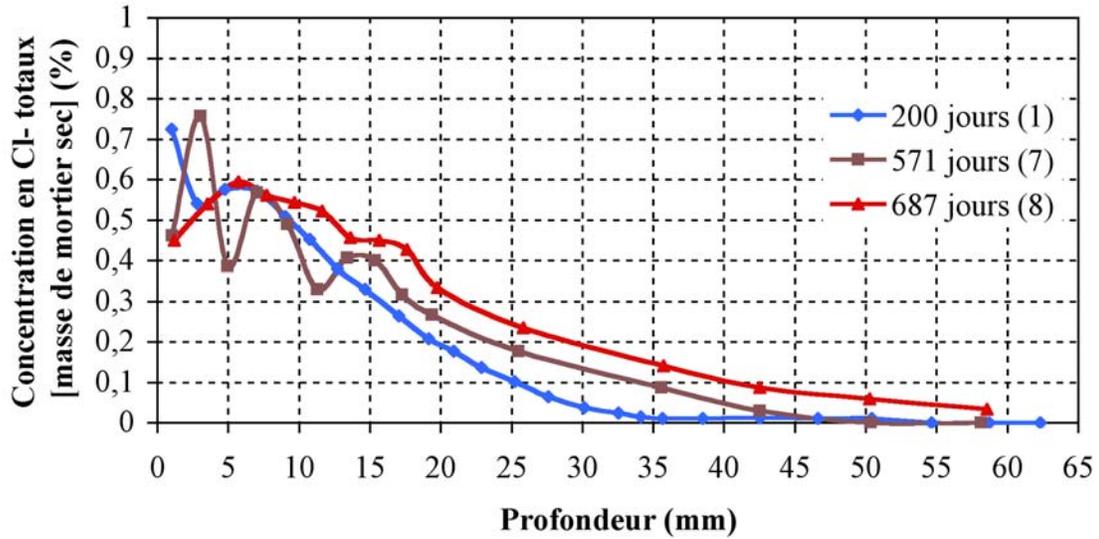


Figure 5-12 : Profils en ions chlorure pour le montage I5B sans barres

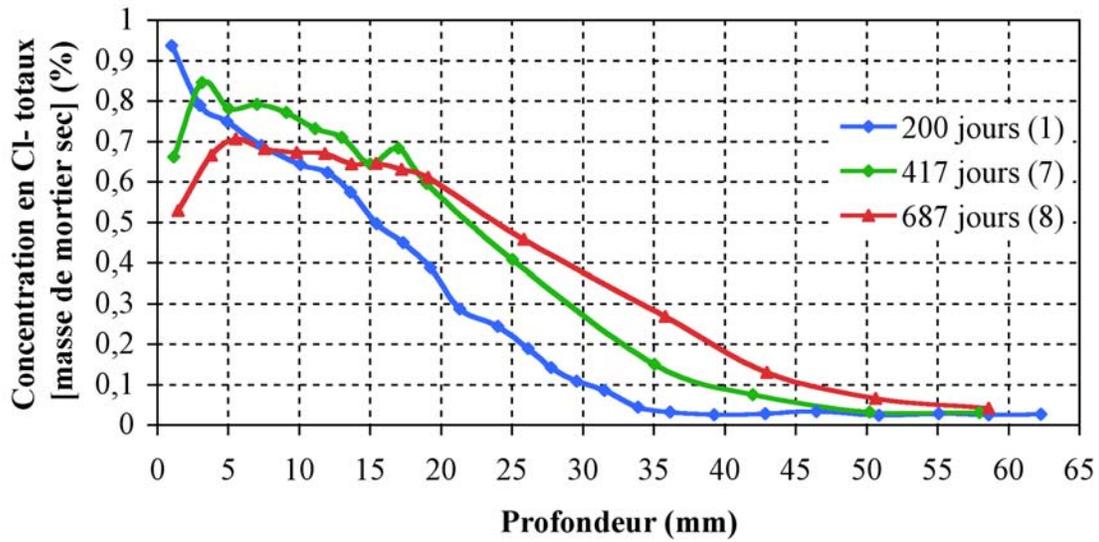


Figure 5-13 : Profils en ions chlorure pour le montage I5J sans barres

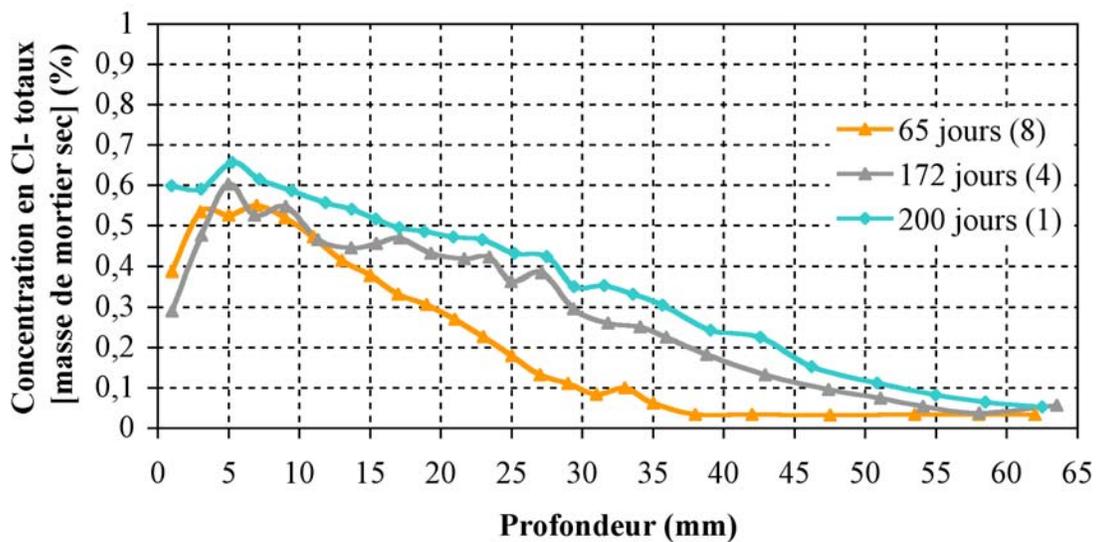


Figure 5-14 : Profils en ions chlorure pour le montage I65B sans barres

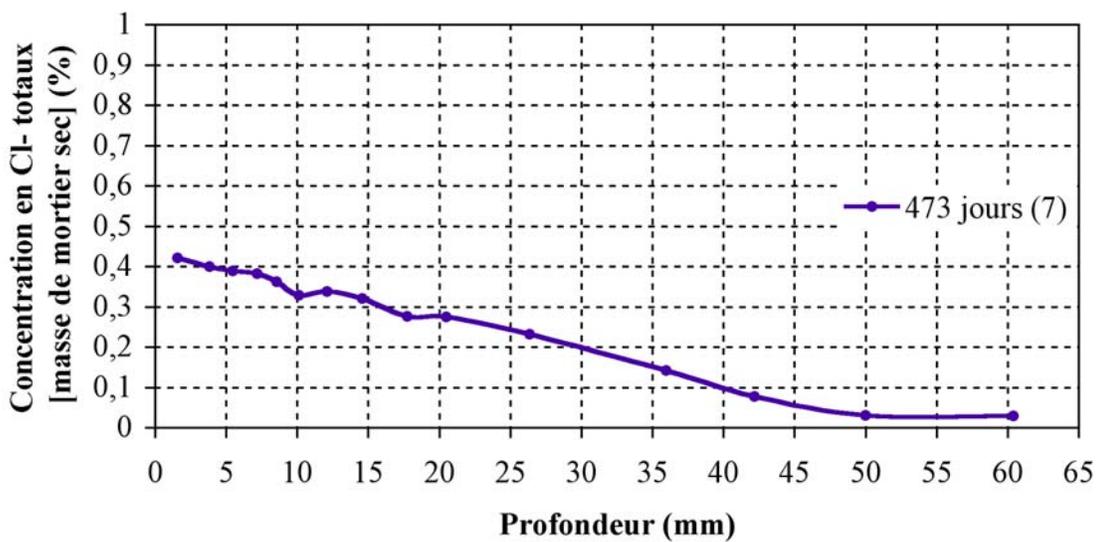


Figure 5-15 : Profils en ions chlorure pour le montage V5B sans barres

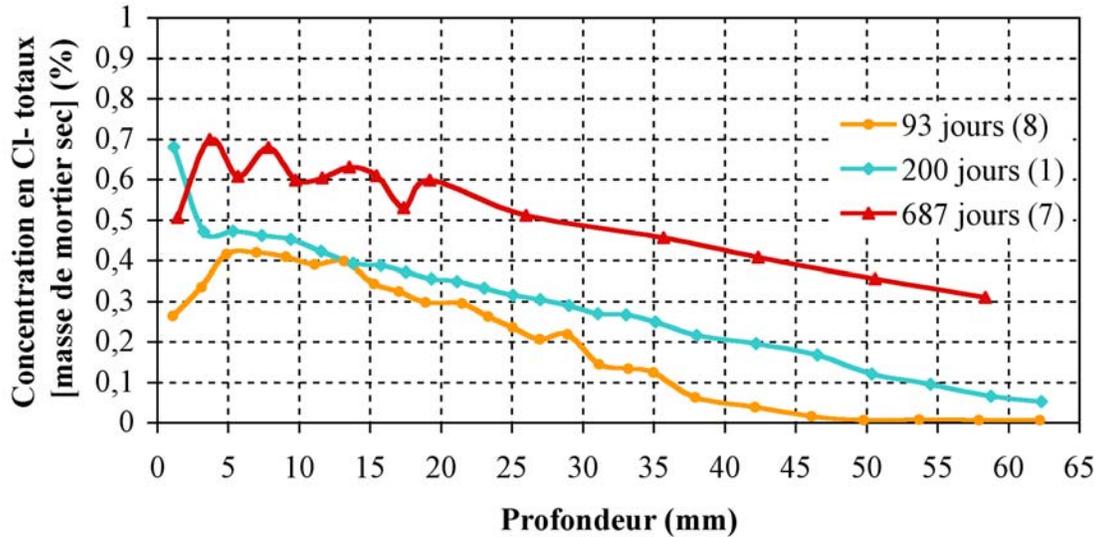


Figure 5-16 : Profils en ions chlorure pour le montage V65B sans barres

À plusieurs reprises, certaines éprouvettes sans barres ont été arrêtées et broyées en même temps que des éprouvettes avec barres. Les Figures 5-17 à 5-20 présentent les résultats obtenus pour les montages I5B, I65B, V5B et V65B. Tous les profils présentés concordent bien. Donc, la présence d'une barre d'armature n'aurait pas d'influence sur la pénétration des ions chlorure.

Par ailleurs, aucuns profils pour le montage I5J ne sont présentés puisque les résultats sont incompatibles entre eux. Selon les résultats, l'hypothèse d'une erreur de manipulation en laboratoire est la plus probable.

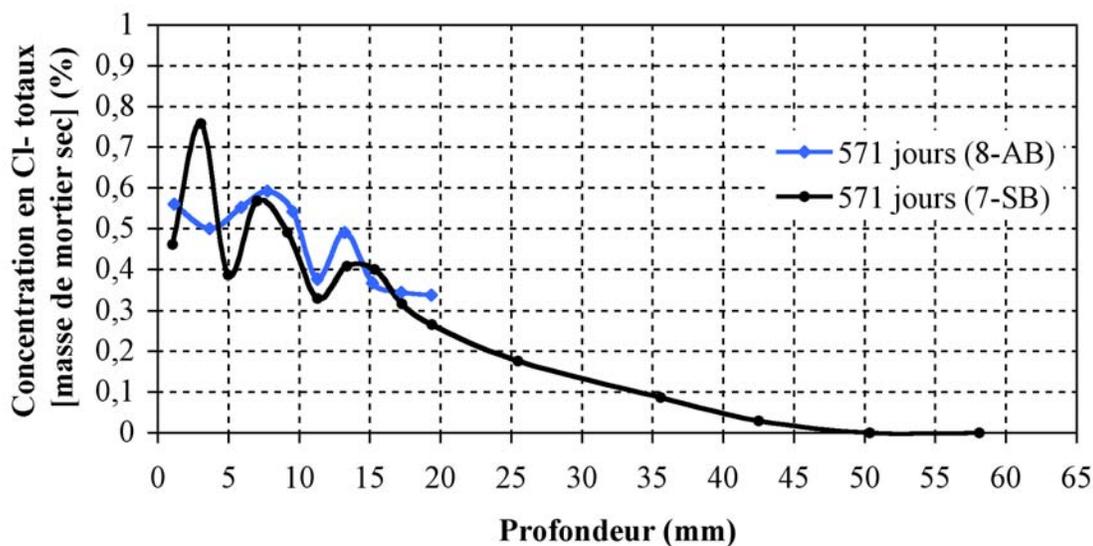


Figure 5-17 : Comparaison des profils à 571 jours pour les montages I5B avec et sans barres

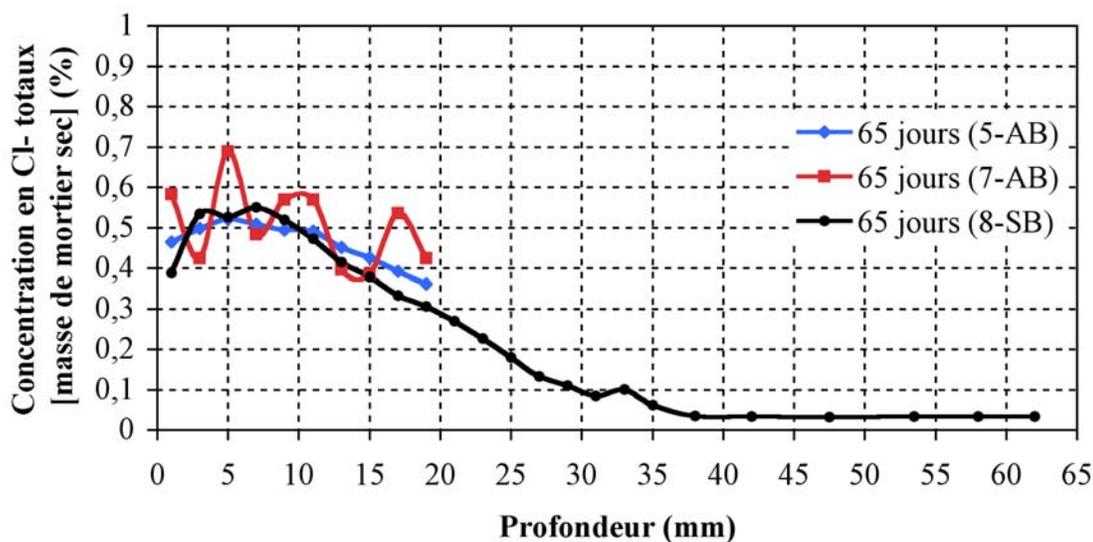


Figure 5-18 : Comparaison des profils à 65 jours pour les montages I65B avec et sans barres

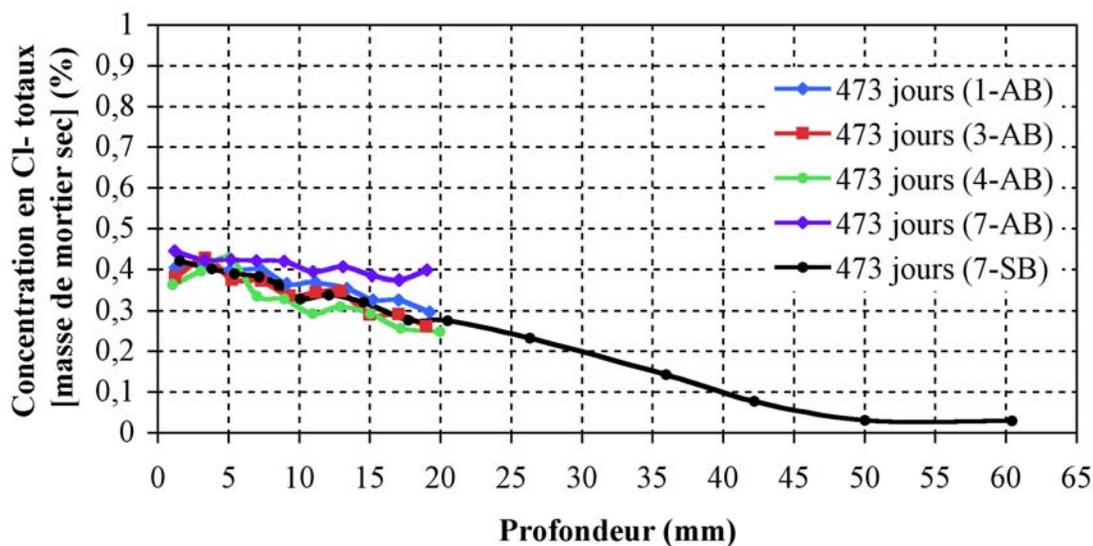


Figure 5-19 : Comparaison des profils à 473 jours pour les montages V5B avec et sans barres

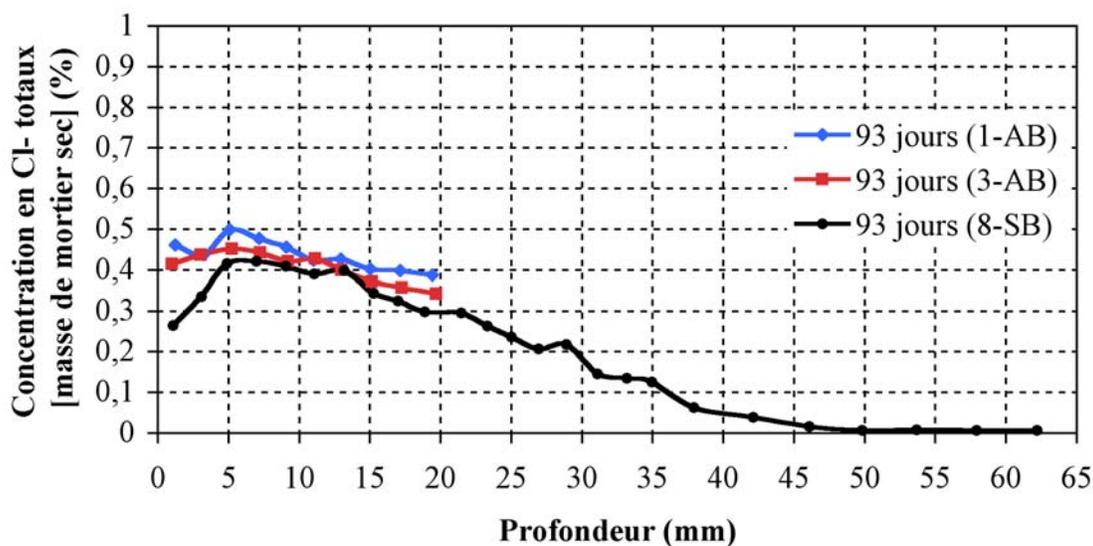


Figure 5-20 : Comparaison des profils à 93 jours pour les montages V65B avec et sans barres

Pour l'instant, l'information qu'il est possible de tirer de tous les profils est limitée à l'analyse précédente. Une analyse plus poussée sera présentée au Chapitre 6 pour faire un lien entre les profils et les mesures de corrosion.

5.1.2.4 Étude de la détermination du seuil de corrosion

Les résultats des mesures de corrosion sont présentés aux Figures 5-21 à 5-25. Il est à noter que les mesures représentent seulement le temps d'initiation et non pas comment la corrosion se propage ou le moment de fissuration de l'éprouvette. De plus, les mesures de densité de courant macropile tiennent seulement compte de la densité de courant pour la surface totale de la barre exposée aux agents agressifs. Puisque la corrosion débute habituellement par piqûre à la surface de la barre, il était impossible de connaître la surface réelle de corrosion. C'est pourquoi aucuns résultats en pourcentage de corrosion ne sont présentés, ce qui aurait imposé de choisir une surface.

Du point de vue de la mesure de corrosion, la méthodologie utilisée suggérait qu'il y ait initiation de la corrosion lorsque la mesure de corrosion eut franchi une certaine « limite ». Cette dernière est présentée sur chacune des figures par une ligne horizontale de couleur bleu ciel. Au fur et à mesure de l'acquisition des données, il fut observé que les premières éprouvettes à initier la corrosion respectaient bien cette notion de « limite » en plus de montrer un saut brusque dans la mesure. Par contre, les mélanges fabriqués avec un rapport e/c de 0,485 ont présenté des résultats différents. En effet, la notion de « limite » n'est pas systématiquement respectée. Par contre, lors de l'initiation, un saut brusque de la valeur mesurée dans le temps survient dans tous les cas. Ainsi, l'initiation de la corrosion a préférentiellement été notée à la venue du saut brusque dans la mesure au lieu de se baser sur la « limite » de la méthodologie suivie. C'est de cette manière et à ce moment que la concentration critique en ions chlorure a pu être mesurée.

Il est à noter qu'il est extrêmement difficile de proposer une explication quant aux comportements irréguliers ou régressifs des éprouvettes après l'initiation de la corrosion. Un bon exemple de ce genre de comportement est l'éprouvette V65B-2 pour les mesures du courant macropile et du potentiel de corrosion (Figure 5-25).

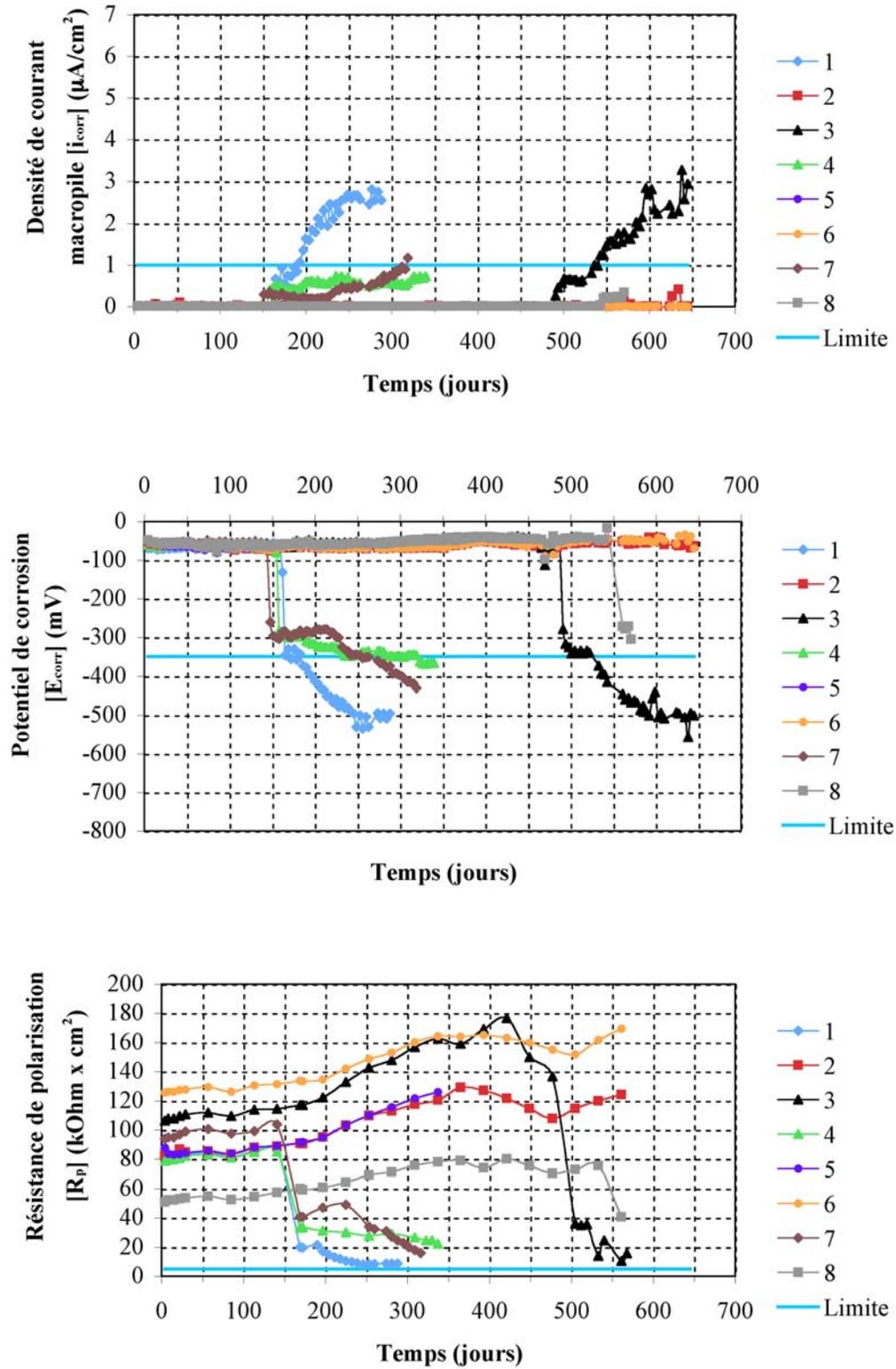


Figure 5-21 : Résultats des mesures de corrosion - I5B

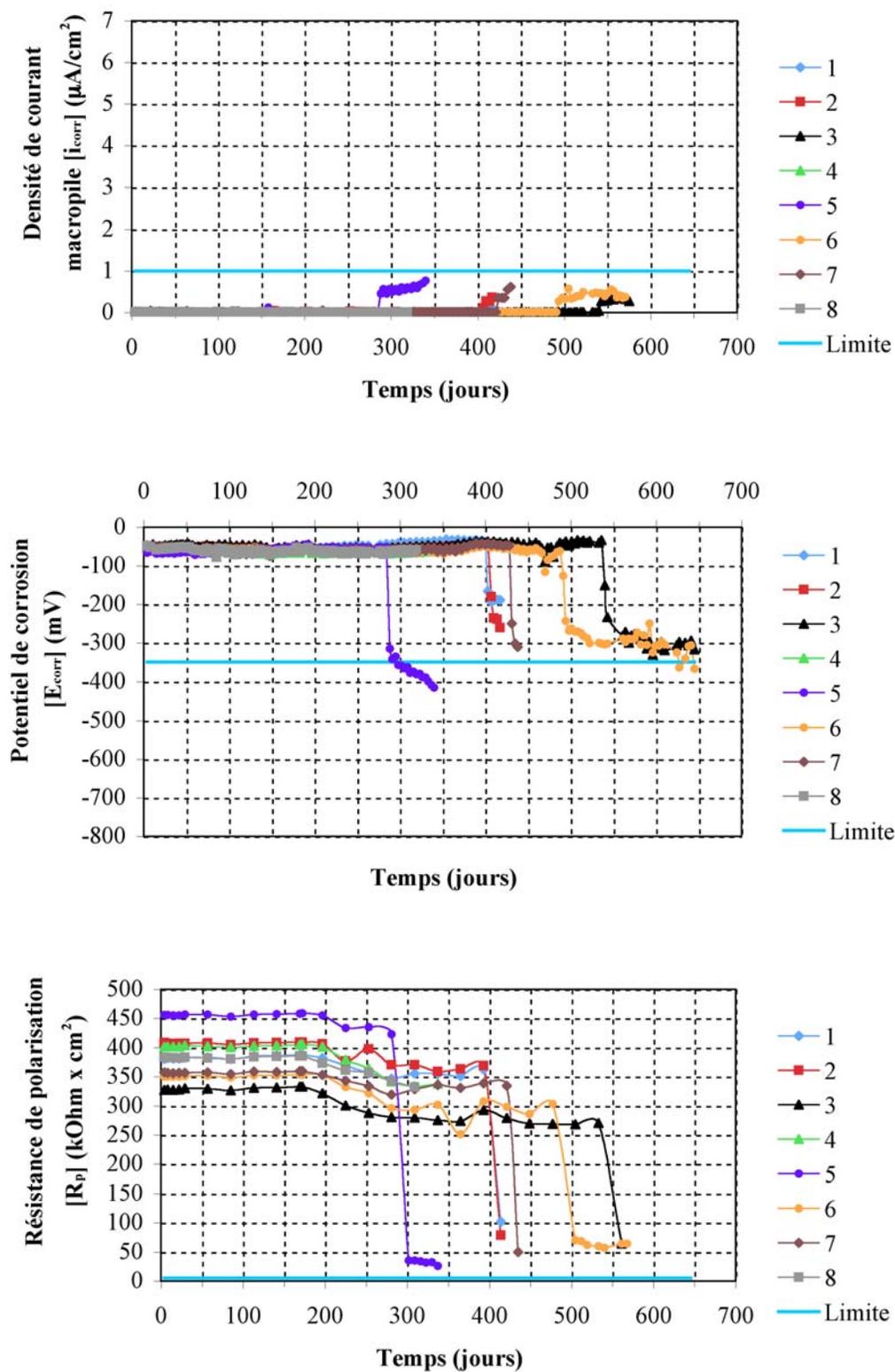


Figure 5-22 : Résultats des mesures de corrosion - I5J

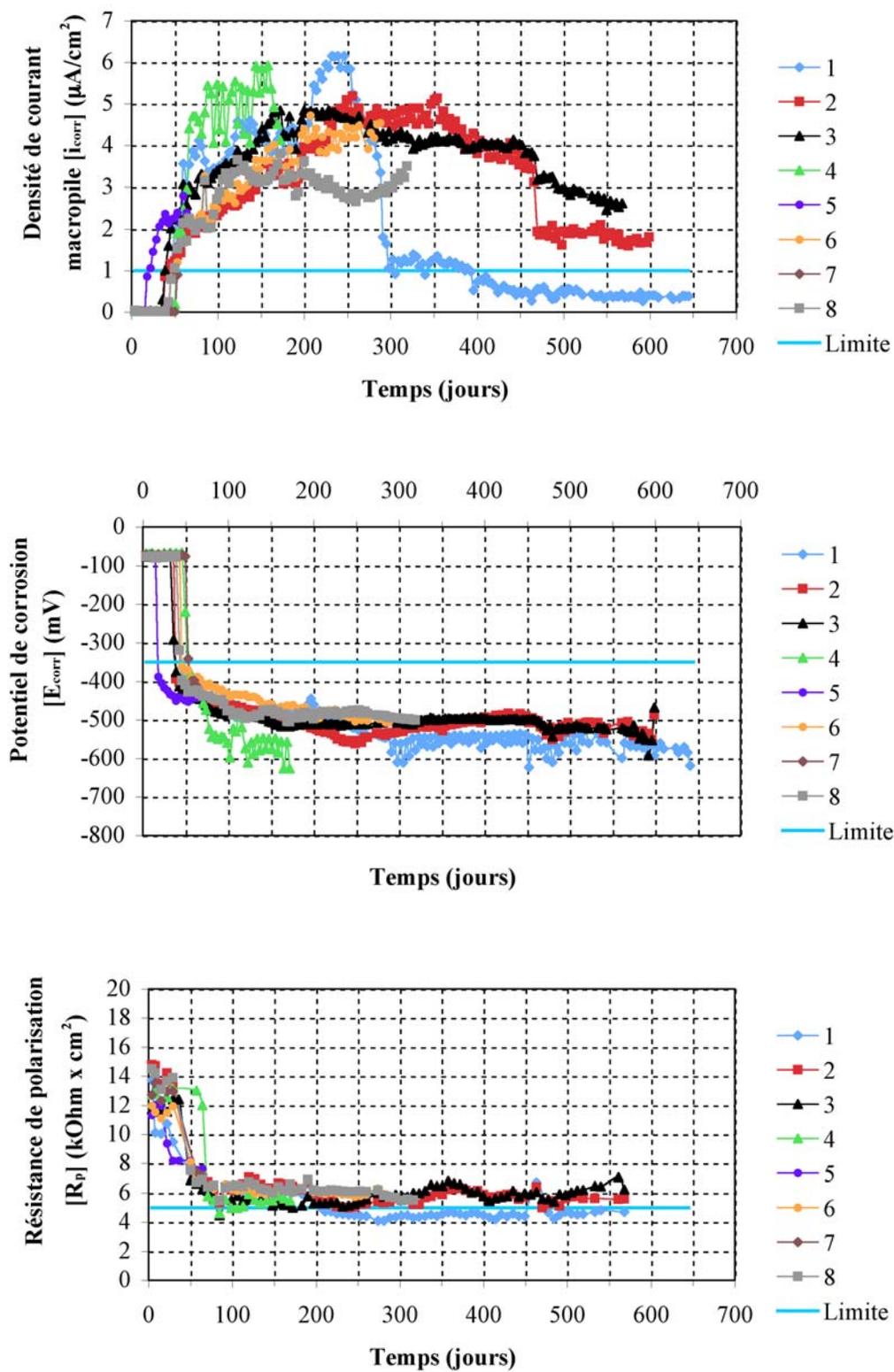


Figure 5-23 : Résultats des mesures de corrosion - I65B

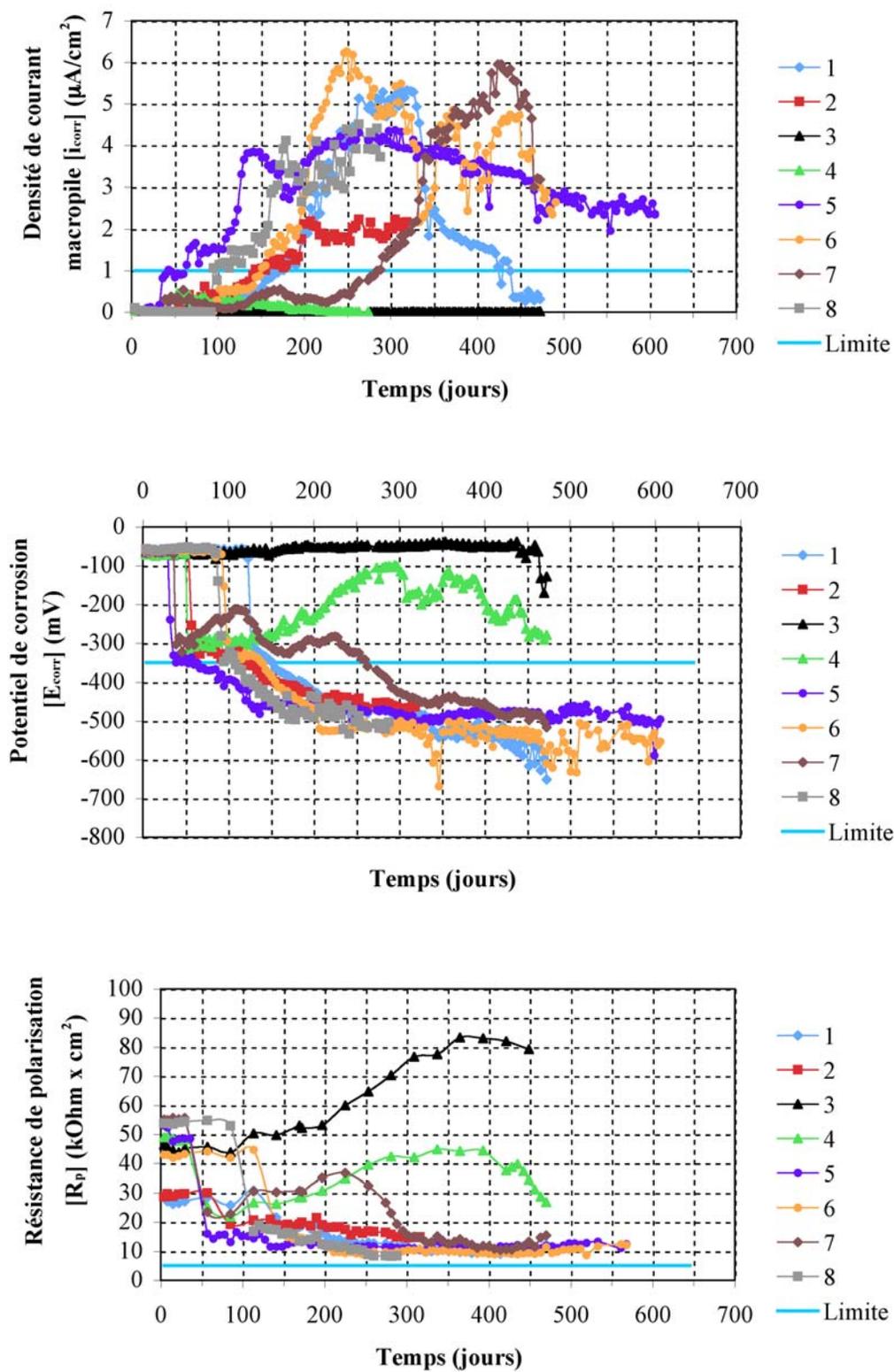


Figure 5-24 : Résultats des mesures de corrosion - V5B

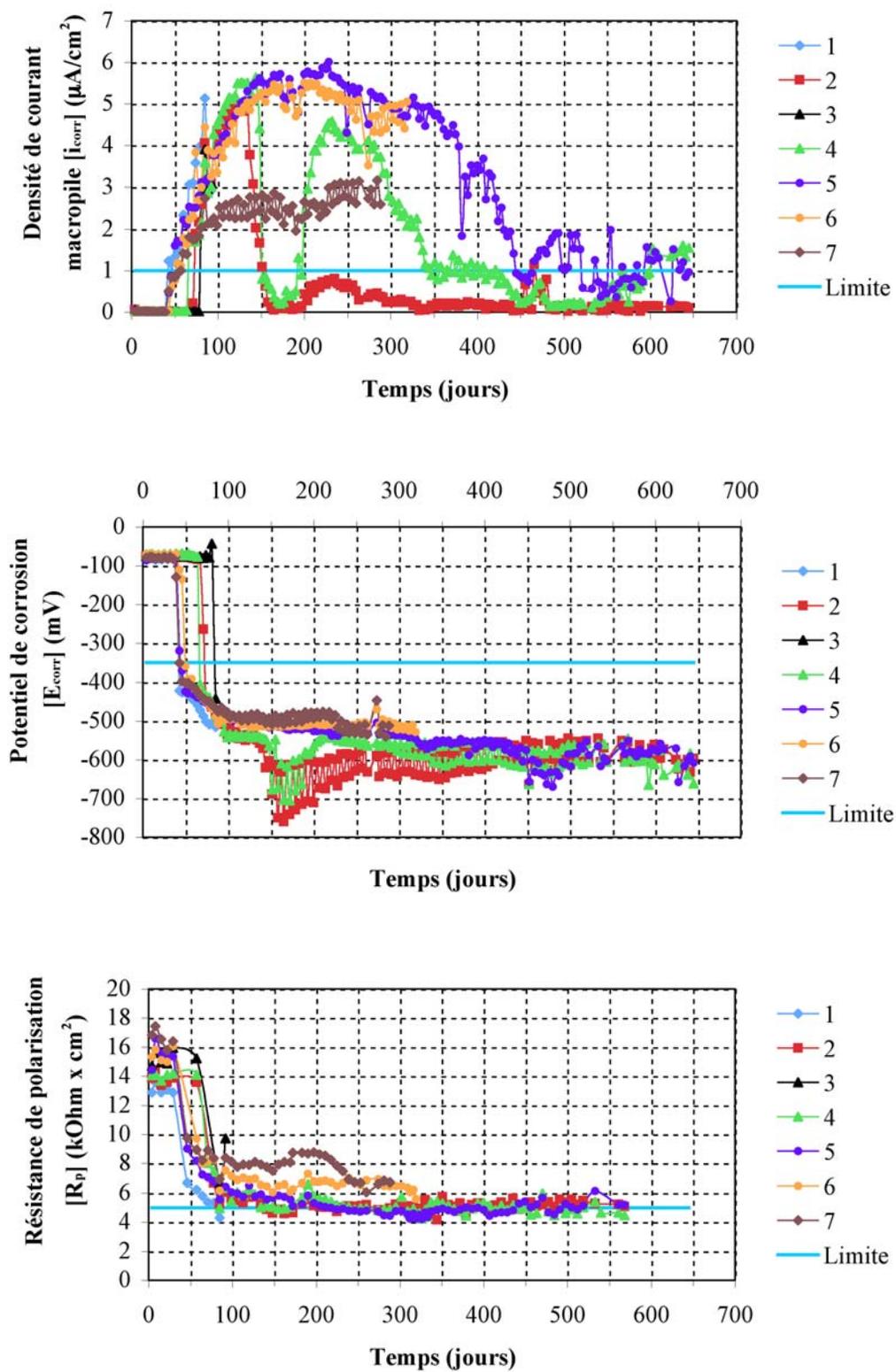


Figure 5-25 : Résultats des mesures de corrosion - V65B

Tous les temps d'initiation pour chaque éprouvette et pour chaque type de mesures sont présentés en détail à l'Annexe C. Les valeurs maximales et minimales ont été rejetées de l'analyse lorsqu'elles étaient représentées par une seule éprouvette. Pour le montage V5B, l'éprouvette 3 a également été rejetée puisque le temps d'initiation n'a pas pu être validé par la mesure de polarisation linéaire. Le résumé des résultats est présenté au Tableau 5-9. Les résultats démontrent que le temps d'initiation pour la densité de courant macropile et le potentiel de corrosion sont similaires. Seule la polarisation linéaire a donné des temps d'initiation différents et toujours plus élevés. Cet écart est explicable parce que les mesures de polarisation linéaire n'ont pas été prises systématiquement deux fois par semaine comme le courant macropile et le potentiel de corrosion, mais plutôt une fois par mois. Ainsi, il peut y avoir eu un écart de plusieurs jours entre les deux autres mesures avant de s'apercevoir de l'initiation de la corrosion. C'est pourquoi les temps d'initiation du courant macropile et du potentiel de corrosion sont considérés plus précis.

De plus, la Figure 5-26 illustre la répartition statistique des temps d'initiation selon le potentiel de corrosion. Le potentiel de corrosion représente bien l'allure générale du temps d'initiation puisqu'il a démontré une plus grande fiabilité tout le long de l'étude. En plus, le potentiel de corrosion est une mesure directe, sans équation mathématique (voir section 4.1.5.4).

Tableau 5-9 : Temps d'initiation moyen

Type de mesure	Temps pour initier la corrosion (jours)				
	I5B	I5J	I65B	V5B	V65B
Courant macropile	158	432	43	69	52
Potentiel de corrosion	156	433	43	66	51
Polarisation linéaire	169	442	54	91	57

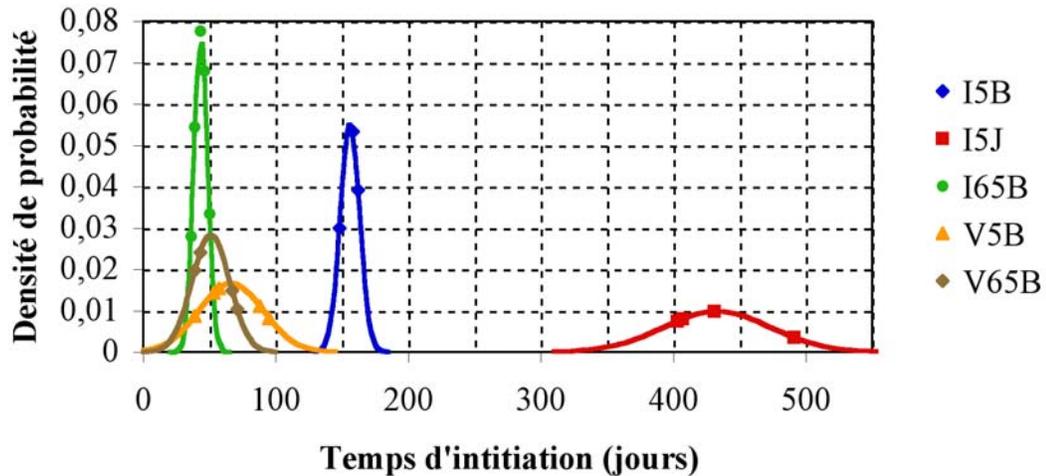


Figure 5-26 : Répartition des temps d'initiation selon le potentiel de corrosion

Les résultats démontrent que l'ordre d'initiation a été le suivant : I65B, V65B, V5B, I5B et I5J. Ainsi, selon les résultats, plus le rapport e/c est élevé, plus le temps d'initiation diminue. De plus, le type de ciment a donné des résultats différents selon le rapport e/c utilisé. Avec un e/c de 0,65, le ciment type I (GU) a été moins performant que le type V (HS). Par contre, dans le cas des mélanges avec un e/c de 0,485, une faible teneur en C_3A a diminué le temps d'initiation. Il faut tout de même souligner que la différence de temps entre les mélanges I65B, V65B et V5B est très légère. En outre, malgré certains profils de concentration en ions chlorure problématiques, le type de préparation de barres a eu son effet sur le temps d'initiation de la corrosion. Selon les résultats, une barre passée au jet de sable est plus résistante à l'initiation de la corrosion qu'une barre nettoyée à la brosse d'acier lorsqu'elle est coulée dans le béton.

Dans plusieurs cas, des éprouvettes ont été conservées jusqu'à ce qu'elles fissurent par accumulation des produits de corrosion. Le Tableau 5-10 présente les temps de fissuration de toutes les éprouvettes. Ces temps de fissuration ont eu comme origine le temps d'initiation de la corrosion de l'éprouvette et non pas le début de l'essai. De plus, la répartition des temps de fissuration pour toutes les éprouvettes est présentée à la Figure 5-27. Dans ce cas, aucun résultat concernant les montages avec des barres passées au jet de sable n'a pu être noté. Aucun de ces montages n'avait fissuré avant la fin du suivi des éprouvettes. En revanche, les résultats présentés sont très variables. D'ailleurs, selon les

résultats, le rapport e/c et le type de ciment ne semblent pas avoir eu d'influence sur le délai de l'apparition de la fissuration du recouvrement de mortier. Puisque l'étude du temps de fissuration sort du cadre de cette étude, aucune autre analyse n'a été produite à ce sujet.

Tableau 5-10 : Temps de fissuration

No. de l'éprouvette	Temps de fissuration après corrosion (jours)				
	I5B	I5J	I65B	V5B	V65B
1	101	∅	182	∅	220
2	∅	∅	119	259	87
3	∅	∅	∅	∅	178
4	∅	∅	108	∅	91
5	∅	∅	∅	196	115
6	∅	∅	217	133	134
7	171	∅	∅	301	138
8	∅	∅	273	175	∅
Moyenne	136	∅	180	213	138
Écart-type	49	∅	69	67	48

∅ = Arrêt Avant Initiation ou Avant Fissuration ou Non Disponible

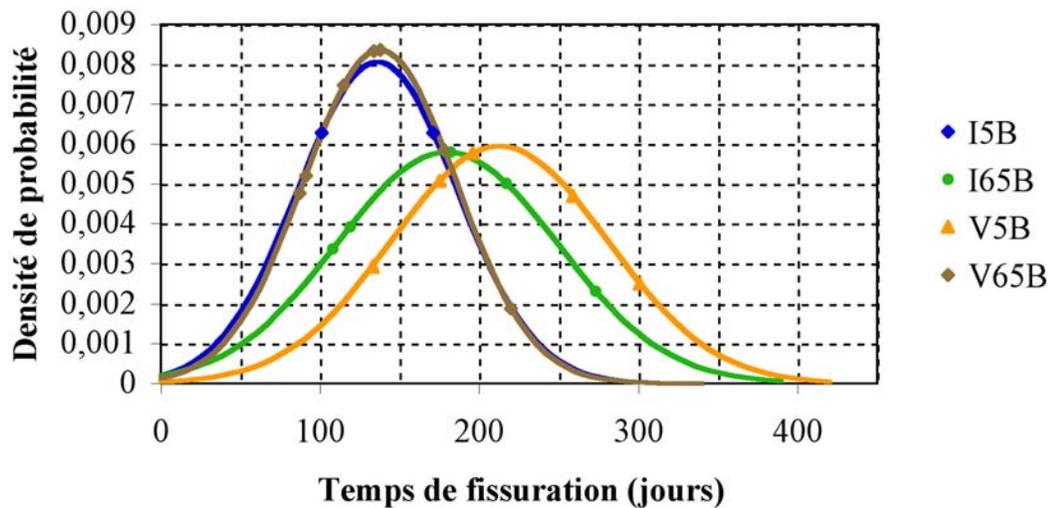


Figure 5-27 : Répartition des temps de fissuration (temps écoulé depuis l'initiation de la corrosion)

5.2 Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures

Les essais de traction ont été effectués sur des barres d'armature ayant les pertes de masse suivantes : 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 et 25 %. Trois éprouvettes pour chaque échéance ont été testées. Des photos des barres d'armature prises à chaque échéance sont présentées aux Figures 5-28 à 5-37.



Figure 5-28 : Barres d'armature à 0 % de perte de masse

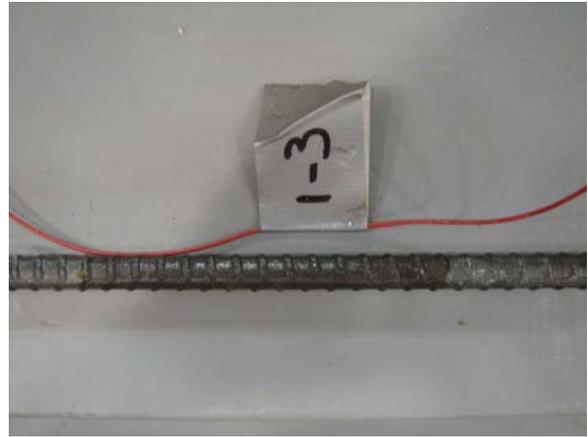


Figure 5-29 : Barre d'armature à 1 % de perte de masse



Figure 5-30 : Barres d'armature à 2 % de perte de masse



Figure 5-31 : Barres d'armature à 4 % de perte de masse

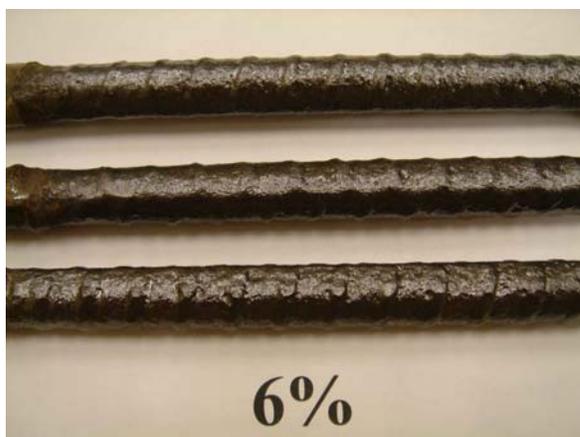


Figure 5-32 : Barres d'armature à 6 % de perte de masse

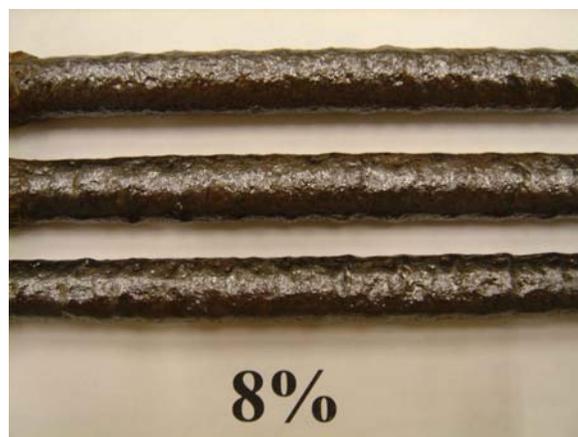


Figure 5-33 : Barres d'armature à 8 % de perte de masse



Figure 5-34 : Barres d'armature à 10 % de perte de masse



Figure 5-35 : Barres d'armature à 12 % de perte de masse



Figure 5-36 : Barres d'armature à 14 % de perte de masse



Figure 5-37 : Barres d'armature à 25 % de perte de masse

Les résultats des essais de traction sont présentés à la Figure 5-38. Chaque courbe présente la moyenne des trois éprouvettes. Tel que présenté, le module élastique et la forme générale du graphique demeurent les mêmes indépendamment du degré de corrosion. Cependant, une perte de ductilité (diminution de l'allongement permanent après rupture) s'est produite lorsque le taux de corrosion augmente. Cette perte de ductilité est explicable par la présence d'une concentration de déplacement au droit de la section réduite par la corrosion; ce qui amène un état de contrainte qui provoque la rupture à une force plus faible et un déplacement moins grand.

La Figure 5-39 présente la ductilité résiduelle moyenne pour chaque échéance rencontrée lors des essais de traction. La ductilité résiduelle est le pourcentage de variation entre le déplacement moyen maximal à 0 % de perte de masse et celui de chaque échéance. Selon les résultats, la ductilité résiduelle des barres suit une pente plus abrupte entre 0 % et 6 % de perte de masse pour suivre un autre régime par la suite. C'est donc à de faibles pourcentages de perte de masse qu'il y a le plus de changement pour ce qui est de la ductilité des barres. Il est toutefois à noter que ces résultats sont valables pour cette configuration seulement et qu'ils ne s'appliquent pas nécessairement au béton armé.

Habituellement, lors d'un essai de traction directe sur des pièces d'acier doux, il y a présence d'une diminution et d'une discontinuité après avoir franchi la limite élastique. Les résultats présentés à la Figure 5-38 ne démontrent aucun de ces phénomènes. Afin de vérifier si la configuration des barres peut camoufler ce plateau, un essai de traction direct sur des barres 15M de nuance 400R machinées, selon les prescriptions de la norme ASTM A 370 a été fait. Ces barres provenaient du même lot que les autres barres. La Figure 5-40 présente les résultats obtenus à l'aide d'un graphique contrainte-déformation. La contrainte maximale moyenne atteinte est de 875 MPa et le module élastique moyen est de 224 294 MPa. Les résultats prouvent que la nuance 400R a la caractéristique de ne pas avoir de discontinuité. Ainsi, l'acier utilisé pour les essais de traction ne fait pas partie du groupe des aciers doux. Il doit avoir une teneur en carbone supérieure à 0,30 %, qui est la limite maximale pour être un acier doux.

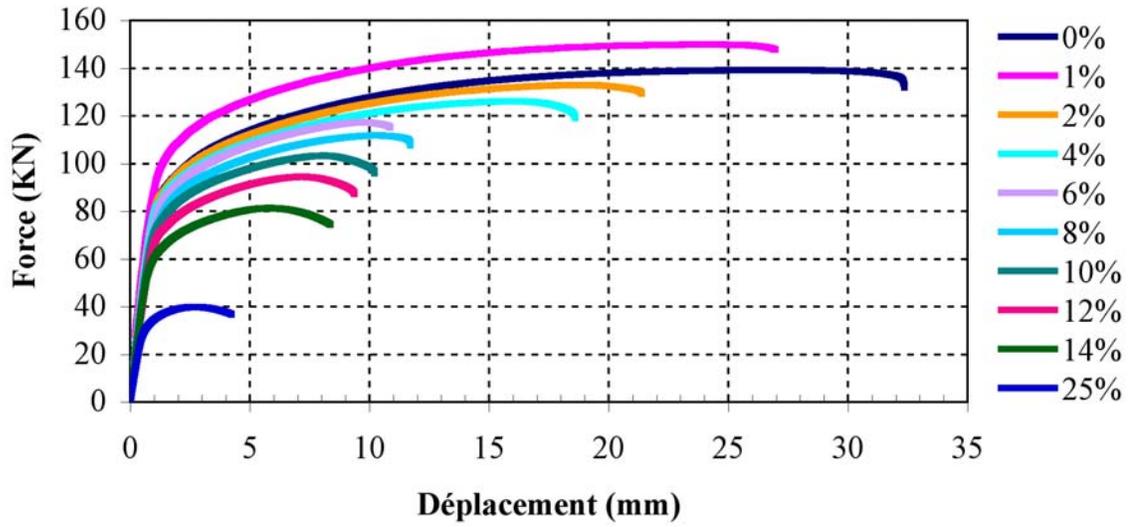


Figure 5-38 : Résultat de l'essai de traction

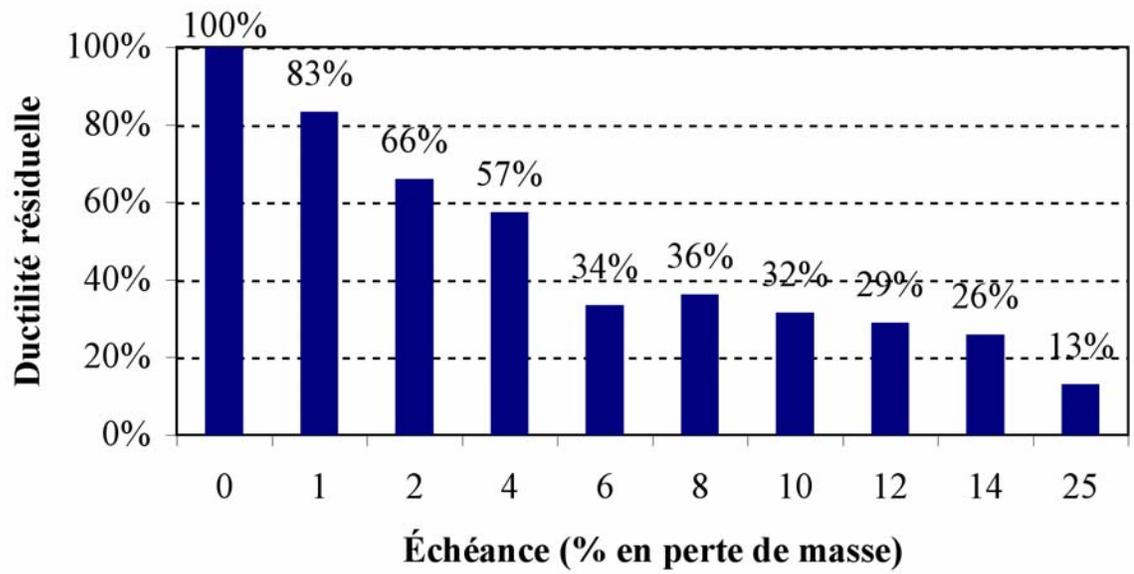


Figure 5-39 : Ductilité résiduelle en fonction de la perte de masse

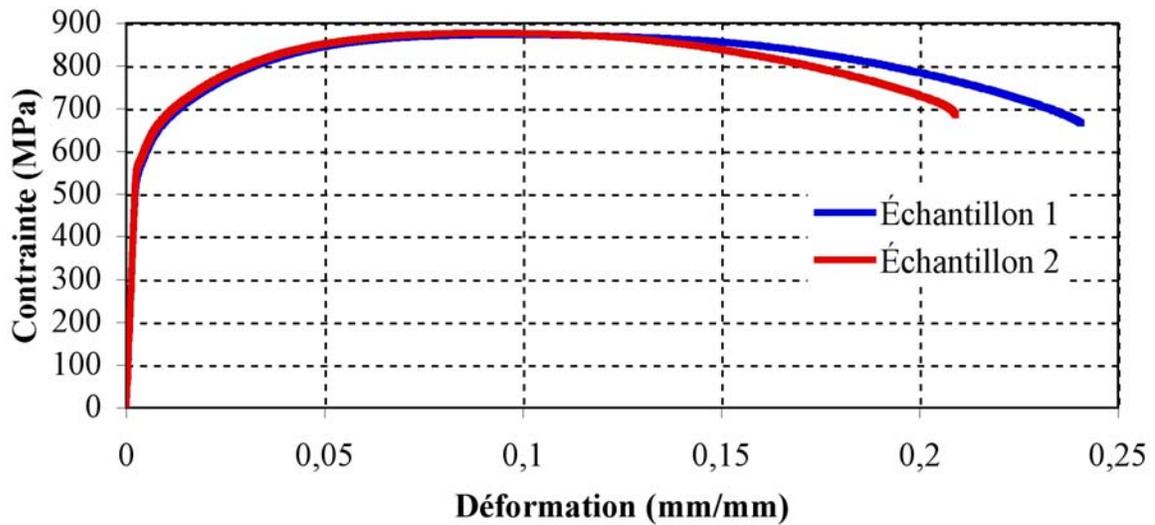


Figure 5-40 : Essai de traction sur éprouvettes normalisées

Le Tableau 5-11 présente le diamètre moyen minimum mesuré sur les barres d'armature ainsi que la contrainte maximale calculée à l'aide du diamètre moyen minimum et de la force maximale moyenne de la Figure 5-38. Le diamètre moyen minimum est la moyenne du plus petit diamètre rencontré sur chacune des trois barres avant la mise en traction. Entre les résultats, il y a une variation maximale de 16 % et un écart-type de 46 MPa. Cet écart est considéré comme étant petit en prenant en compte les variations à l'intérieur d'un même groupe de barres et les erreurs de mesures sur le diamètre. Par ailleurs, il est fort intéressant de constater que la contrainte maximale moyenne présentée au Tableau 5-11 est comparable à celle provenant de l'essai normalisé présenté à la Figure 5-40. Il est donc possible d'affirmer que le degré de corrosion des armatures n'influence pas la résistance en traction des barres d'acier, calculé avec le diamètre réel (résiduel) de la section. De plus, les résultats de perte de ductilité selon la perte de section peuvent être comparés avec les résultats de Kocich et coll. (1993). Selon les résultats de cette étude, 14 % de perte de masse représentent 49 % de perte de section et cette perte de section correspond à 74 % de perte de ductilité. Rappelons que Kocich et coll. (1993) avaient obtenu une perte d'allongement avant la rupture entre 61 % et 75 % pour une perte de section entre 43 % et 56 %. Ainsi, les résultats de la présente étude faite avec de l'acier noir sont comparables à l'étude de Kocich et coll. (1993) faite avec de l'acier haute performance.

Tableau 5-11 : Diamètre résiduel minimum et contrainte maximale résiduelle

Perte de masse (%)	Diamètre résiduel minimum (mm)	Contrainte maximale selon le diamètre résiduel (MPa)
0	15,0	785
1	14,8	890
2	14,6	794
4	13,8	836
6	13,5	849
8	12,9	850
10	12,1	908
12	11,9	844
14	10,7	895
25	7,4	919
	Moyenne	857
	Écart-type	46

D'autre part, les Figures 5-41 à 5-44 présentent quelques faciès de rupture des barres. Les ruptures présentées sont du type fragile peu importe l'échéance. Une légère zone de striction a pu être vue avant la rupture. Cette rupture est caractéristique à la nuance de l'acier des barres choisies (400R). Ainsi, le degré de corrosion n'a pas d'impact sur la fragilisation de l'acier. La perte de ductilité est donc seulement due à la perte de section locale de la barre. Il en revient encore à dire que, en présence d'une réduction localisée de section, il y a une concentration de déplacement qui provoque la rupture à une force plus faible et un déplacement moins grand. Par conséquent, une structure de béton armé présentant une corrosion localisée de ses armatures devrait présenter une moins grande déformation avant sa rupture si les charges de service sont excédées.



Figure 5-41 : Surface de rupture à 0 % de perte de masse



Figure 5-42 : Surface de rupture à 2 % de perte de masse



Figure 5-43 : Surface de rupture à 4 % de perte de masse



Figure 5-44 : Surface de rupture à 25 % de perte de masse

Chapitre 6 - Analyse des résultats et discussion

Ce chapitre présente une analyse plus approfondie de certains résultats. Les points importants y sont résumés et la concentration critique en ions chlorure totaux est présentée en fonction des temps d'initiation de la corrosion.

6.1 Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion

6.1.1 Temps d'initiation

Tout au long de l'étude, des mesures de corrosion ont été prises afin de connaître l'état de corrosion des barres d'armature. Cet essai a permis de déterminer les temps d'initiation de la corrosion sur les montages à l'étude. Le Tableau 6-1 présente l'ordre d'initiation obtenu par les mesures de corrosion ainsi que le temps de corrosion respectif tel que présenté à la section 5.1.2.4.

Tableau 6-1 : Ordre d'initiation selon les mesures de corrosion et temps d'initiation

Ordre d'initiation	I65	V65	V5	I5B	I5J
Temps d'initiation (jours) (Potentiel de corrosion)	43	51	66	156	433

Une étude a été faite par Henocq et coll. (2007) en suivant la même méthodologie que le présent projet, où seulement des mélanges avec un rapport e/c de 0,485 ont été étudiés. Le Tableau 6-2 présente les temps d'initiation pour l'étude de Henocq et coll. (2007). La concentration critique trouvée lors de ces travaux a été présentée au Tableau 2-1 et était de $0,5 \pm 0,05$ % (ions chlorure totaux en masse de mortier sec).

Tableau 6-2 : Temps d'initiation selon Henocq et coll. (2007)

Montage	I5B	V5B
Temps d'initiation (jours)	180	160

Pour le présent projet, les temps d'initiation pour les mélanges I5B et V5B sont respectivement de 156 jours et 66 jours. Il y a un écart de 24 jours pour le mélange I5B et de 94 jours pour le mélange V5B comparativement au projet de Henocq et coll. (2007). Ainsi, seulement l'ordre d'initiation a été conservé.

6.1.2 Concentration critique

Une corrélation doit être faite entre les résultats de profils en ions chlorure et les mesures de corrosion afin de déterminer une concentration critique en ions chlorure requise pour initier la corrosion. La démarche entreprise pour déterminer la concentration critique en ions chlorure était la suivante (voir aussi l'Annexe D). Dès que les mesures de corrosion montraient un saut dans la mesure, la ou les éprouvettes concernées, avec ou sans barres, étaient sorties du cycle afin de vérifier la concentration au droit de la barre (à 20 mm de profondeur). L'Annexe D présente le profil et la concentration critique en ions chlorure pour l'éprouvette V65B-3, avec barres, broyée après 93 jours d'expositions. Tel que démontré, le temps d'initiation pour les trois mesures est semblable.

Les résultats de cette étude sont présentés au Tableau 6-3. Les résultats avec et sans barres ont été séparés afin de vérifier si la présence d'une barre avait un effet. Selon les résultats obtenus, la présence d'une barre d'armature n'a pas d'influence sur la pénétration des ions chlorure dans le mortier et la concentration recueillie à 20 mm de profondeur. Il serait donc possible de reproduire la présente étude en utilisant uniquement des éprouvettes avec barres. Tel que présenté, seuls les résultats des éprouvettes I5J sans barres (0,60 %) et I65B avec barres (0,42 %) montrent des valeurs hors de l'ordinaire. Tel que mentionné à la section 5.1.2.3, les concentrations en ions chlorure pour le montage I5J doivent être utilisées avec une attention particulière.

Selon les résultats présentés au Tableau 6-3, il y a vraisemblablement une concentration critique. De plus, le rapport e/c, la teneur en C₃A et le type de préparation de la barre n'auraient pas d'effet sur sa valeur. Selon la revue de la documentation scientifique, la minéralogie du ciment aurait une influence sur la concentration critique. Ainsi, les résultats obtenus seraient en apparence contradiction avec ceux de nombreux auteurs. Cette divergence pourrait être due aux techniques utilisées pour suivre la réaction de corrosion ou

par la manière dont les résultats sont exprimés. En effet, les méthodes de détection utilisées dans cette étude étaient diversifiées et très précises. Néanmoins, une concentration en ions chlorure exprimée en Cl^-/OH^- aurait pour effet de tenir compte du pH de la solution poreuse du matériau.

Par ailleurs, il est impossible d'affirmer si la concentration seuil est propre au type de barre d'armature puisqu'une seule nuance a été utilisée dans le cadre de cette étude. La moyenne de concentration en ions chlorure totaux pour initier la corrosion serait de 0,29 % en masse de mortier sec. Cette moyenne a été calculée en ignorant les deux valeurs extraordinaires. En conservant les deux valeurs exceptionnelles, la concentration moyenne est de 0,32 % en masse de mortier sec. La différence est faible et il est donc possible de dire que la concentration critique en ions chlorure totaux pour initier la corrosion est d'environ 0,30 % en masse de mortier sec. Par ailleurs, le Tableau 6-4 présente les mêmes résultats de la concentration, mais exprimés en pourcentage de ciment. Les résultats varient un peu plus lorsqu'ils sont exprimés de cette manière. La moyenne, sans les valeurs extrêmes, est de 1,16 % en masse de ciment et 1,32 % en masse de ciment avec les valeurs extrêmes.

Tableau 6-3 : Concentration critique en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)

	I5B	I5J	I65B	V5B	V65B
Sans Barres	0,27	0,60	0,27	0,28	0,30
Avec Barres	0,34	0,26*	0,42	0,26	0,34

*moyenne de 0,25-0,3-0,24

Tableau 6-4 : Concentration critique en ions chlorure totaux (% en masse de ciment)

	I5B	I5J	I65B	V5B	V65B
Sans Barres	0,97	2,16	1,30	1,09	1,43
Avec Barres	1,22	0,95*	2,02	1,01	1,62

*moyenne de 0,90-1,08-0,86

Comparativement aux concentrations critiques retrouvées dans les guides ou codes de conception présentés au Tableau 2-2 et par Henocq et coll. (2007), les valeurs présentées au Tableau 6-4 y diffèrent beaucoup. En effet, selon le Tableau 2-2, la concentration critique varie entre 0,1 % à 0,6 % selon le guide ou code utilisé, et la valeur trouvée par Henocq et

coll. (2007) est de 0,5 %. Toutefois, selon les résultats présentés par Alonso et coll. (2000), les résultats trouvés dans le cadre de cette étude sont vraisemblables.

En approfondissant l'analyse, plusieurs raisons peuvent expliquer l'écart entre les résultats de cette étude, les valeurs des guides ou codes de calcul et les résultats de Henocq et coll. (2007). Par exemple, une première raison pourrait être l'environnement d'essai. Tel que démontré lors de la revue de la documentation scientifique, une simple variation de la température d'exposition et d'humidité relative du local peut apporter des différences. Une seconde raison pourrait être que les valeurs utilisées dans les guides ou codes de calcul se veulent conservatrices. Par conséquent, ce choix aurait pour but une gestion plus sécuritaire des infrastructures de béton armé. Une autre raison peut être du côté de la conception des éprouvettes. Sans pour autant avoir vérifié les méthodes prises par les guides ou codes de conception pour déterminer les concentrations critiques utilisées, la méthode utilisée peut différer grandement de l'étude en cours. Entre autres, dans le cadre de la présente étude, la fabrication des éprouvettes était faite à petite échelle et avec beaucoup d'attention. Ainsi, cette méthode limite grandement la présence de défauts au voisinage des barres. Un meilleur enrobage des barres a tendance à améliorer la résistance des éprouvettes à l'initiation de la corrosion.

Tel que présenté, entre autres, à la Figure 5-12, les mouvements d'humidité ont une influence sur la forme des profils en ions chlorure. Ce genre de résultat peut remettre en question le choix de l'exposition des éprouvettes à des cycles de mouillage et de séchage. Par contre, tel que présenté à la section 2.1.2.3, la manière la plus représentative de provoquer une réaction de corrosion accélérée est d'avoir recourt à des cycles de mouillage et de séchage.

En outre, le comportement des barres nettoyées au jet de sable soulève des interrogations. Il a été montré à l'Annexe B que les propriétés de transport des montages I5B et I5J étaient les mêmes. De plus, la concentration critique pour initier la corrosion de chaque montage était semblable. Par contre, le temps moyen pour initier la corrosion est nettement supérieur pour le montage I5J que pour le montage I5B. Selon les données à l'étude, les raisons pouvant expliquer ce phénomène sont :

1. Une meilleure uniformité de la surface des barres préparées au jet de sable. Il a été décrit dans la revue de la documentation scientifique que la couche de calamine présente des défauts à la surface. Lors de la préparation au jet de sable, cette couche est enlevée. Ainsi, la couche de passivation est probablement plus uniforme et laisse moins de place à des défauts de surface. Ce qui favorise une meilleure distribution de la corrosion et une plus grande difficulté de la mise en place de la corrosion lorsque les ions chlorure atteignent la barre.
2. Une meilleure résistance de la surface de la barre à cause du phénomène de martèlement. Tel que décrit lors de la revue de la documentation scientifique, le martèlement crée une mince couche très dense qui offre une protection supérieure à la corrosion.
3. Une meilleure interface acier-mortier. Encore une fois, selon la revue de la documentation scientifique, le martèlement donne un meilleur coefficient de frottement à la barre.

Un autre exercice a été fait afin de vérifier la concentration en ions chlorure totaux pour des éprouvettes ayant la même durée d'exposition, mais qui n'ont pas la même activité de corrosion. Les résultats sont présentés au Tableau 6-5. L'éprouvette I5B-4 (182 jours de corrosion) a été comparée à l'éprouvette I5B-5 (sans corrosion) et l'éprouvette I5J-4 (sans corrosion) a été comparée à l'éprouvette I5J-5 (52 jours de corrosion). Ainsi, quelques fois, les profils vont dans le sens des mesures électrochimiques. Par contre, cette tendance va à l'encontre de la théorie de pénétration constante des ions chlorure. Par ailleurs, il est difficile d'expliquer cette tendance. Sauf si l'on considère que le recouvrement de mortier était d'épaisseur variable à la suite de la coupe des éprouvettes ou que la qualité du recouvrement de mortier était variable.

Par conséquent, pour un même type de préparation de surface, les variations des temps d'initiation seraient dues à des variations de pénétration des ions chlorure et non pas à la qualité de l'interface acier-mortier.

Tableau 6-5 : Concentration en ions chlorure totaux à 20 mm en fonction du potentiel de corrosion après 340 jours

Éprouvette avec barres	Potentiel de corrosion	Concentration en Cl ⁻ totaux (% en masse de mortier sec)
I5B- 4	-367,2	0,45
I5B-5	-47,7	0,21
I5J-4	-57,9	0,30
I5J-5	-415,6	0,51

La détermination de la concentration critique en ions chlorure présentée précédemment n'aurait pas pu être trouvée sans les mesures de corrosion. Il a été prouvé à l'Annexe C que les trois types de mesures utilisés ont démontré un temps d'initiation semblable. Ainsi, il ne serait pas nécessaire de suivre le développement de l'activité de corrosion à l'aide de plusieurs types de mesures simultanément. Une seule mesure peut être utilisée. Par contre, n'étant pas à l'abri d'erreurs de mesure, il est souvent pratique de suivre l'activité de corrosion par au moins deux types de mesure.

6.2 Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures

En comparant les résultats obtenus au cours de cette étude et ceux présentés dans la revue de la documentation scientifique, les phénomènes suivants concordent :

- le degré de corrosion des armatures n'influence pas la résistance ultime en traction des barres d'acier calculée avec le diamètre réel de la section;
- c'est à de faibles pourcentages de perte de masse qu'il y a le plus de changement pour ce qui est de la perte de ductilité. Pour les barres 400R 15M à l'étude, c'est entre 0 % et 6 % de perte de masse que la perte de ductilité est la plus grande.

La nuance des barres choisies a démontré un comportement fragile à cause de l'absence d'un plateau plastique dans les graphiques et des faciès de rupture caractéristiques. Il est alors impossible de conclure, à l'aide des résultats de cette étude, à partir de quel pourcentage de corrosion les barres d'armature peuvent indiquer une rupture fragile. Les corrélations entre les études ne peuvent pas être poussées plus loin puisque la nuance

d'acier et le diamètre des barres mises à l'essai sont différents. Par exemple, celles d'Almusallam (2001) avaient un diamètre de 6 mm et celles de la présente étude avaient un diamètre de 15 mm. Il est cependant possible d'affirmer que plus le degré de corrosion est élevé, plus la réduction à l'élongation avant la rupture des barres est grande. Cette affirmation est tirée des résultats obtenus lors de cette étude, de l'article d'Almusallam (2001) et de Kocich et coll. (1993).

Les barres soumises à l'essai lors de cette étude ont été corrodées à l'aide d'un courant électrique. Tel que présenté à la section 5.2, la perte de ductilité des barres n'a pas été influencée ou créée par ce courant électrique. En effet, tel que présenté à la revue scientifique, Kocich et coll. (1993) ont obtenu des résultats semblables pour de l'acier haute performance ayant été soumis à la corrosion atmosphérique.

Chapitre 7 - Conclusion

Ces travaux de maîtrise ont eu pour objectif général d'étudier l'influence réelle de la minéralogie du ciment sur les mécanismes d'initiation de la corrosion des armatures.

Dans cette optique, les deux points suivants ont été étudiés :

- Concentration seuil en ions chlorure totaux requise pour initier la corrosion;
- Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures.

Le premier point avait comme objectif de déterminer la concentration critique en ions chlorure totaux requise pour initier la corrosion. Les différents facteurs lors de cette étude ont été la minéralogie ciment, le rapport e/c et la préparation des barres. Le deuxième point avait comme objectif de déterminer la courbe force-déplacement selon le degré de corrosion. Il a donc été possible de quantifier l'effet du degré de corrosion sur la ductilité. Les sous-sections suivantes résument les principaux résultats.

7.1 Concentration seuil en ions chlorure requise pour initier la corrosion

7.1.1 Temps d'initiation

Les éprouvettes ont initié la corrosion dans l'ordre suivant : I65B, V65B, V5B, I5B et I5J. D'ailleurs, les temps d'initiation pour les montages I65B et V65B ont été presque semblables. Par conséquent, le temps d'initiation augmente lorsque :

- Le rapport e/c diminue;
- La teneur en C_3A augmente;
- Les barres sont nettoyées au jet de sable au lieu d'être brossées.

De plus, les trois mesures de corrosion utilisées ont donné des temps d'initiation semblables. La mesure la plus précise a été le potentiel de corrosion. Sur les graphiques des mesures, l'initiation à la corrosion est illustrée par un saut brusque de la valeur. En outre,

contrairement à ce que prévoyait la méthodologie, la notion de « limite » n'a pas été suivie dans tous les cas. Après l'initiation de la corrosion, quelques éprouvettes ont montré un comportement irrégulier ou régressif. Il est extrêmement difficile de proposer une explication à ce comportement.

D'après les temps de fissuration répertoriés, le rapport e/c et la minéralogie du ciment (teneur en C_3A) n'ont pas semblé avoir d'impact sur les valeurs.

7.1.2 Concentration critique

La concentration critique en ions chlorure totaux a été d'environ 0,30 % en masse de mortier sec et 1,2 % en masse de ciment. L'étude a prouvé que les facteurs suivants n'ont pas eu d'effet sur la concentration critique :

- La teneur en C_3A ;
- La préparation de la barre (brossé ou jet de sable);
- Le rapport e/c;
- La présence ou non d'une barre dans le montage.

De plus, quelques fois, les profils ont été dans le sens des mesures électrochimiques. Par contre, cette tendance va à l'encontre de la théorie de pénétration constante des ions chlorure. Il est difficile d'expliquer cette tendance.

7.2 Effet de la corrosion sur les propriétés mécaniques des armatures

La perte de ductilité a été quantifiée. Selon les résultats, les affirmations suivantes ont pu être faites :

- Le degré de corrosion des armatures n'influence pas la résistance ultime en traction des barres d'acier, calculée avec le diamètre réel de la section.

- C'est à de faibles pourcentages de perte de masse qu'il y a le plus de changement pour ce qui est de la perte de ductilité. Pour les barres 400R 15M à l'étude, c'est entre 0 % et 6 % de perte de masse que la perte de ductilité est la plus grande.

7.3 Recommandations

Quelques recommandations peuvent être faites à la suite du présent projet. Les profils en ions chlorure ont quelquefois présenté des petites différences pour une même échéance. Afin de pouvoir déterminer un écart-type entre les broyages faits pour la même échéance, il serait bien de produire un essai avec plusieurs éprouvettes d'un même mélange. Par exemple, 30 éprouvettes sans barres. Par la suite, il faudrait broyer 10 éprouvettes par échéance et en ressortir l'écart-type. Il serait donc possible de connaître la plage de valeurs possibles pour un même broyage.

Dans le cadre de l'étude, seules des barres ayant eu une préparation de surface ont été utilisées. À des fins comparatives, il serait intéressant de produire la même étude à l'aide de barres sans préparation de surface des barres. Il serait donc possible de vérifier si une préparation des barres apporte un effet marqué sur le temps d'initiation.

Les mesures de corrosion ont démontré que la notion de limite n'est pas représentative à tous coups et pour chaque mélange. Ainsi, dans le cadre de la gestion d'ouvrages en béton armé, un suivi constant des structures devient un paramètre important afin de bien identifier le saut que fait la mesure de corrosion et ne pas se fier seulement à une valeur typique comme indicateur de l'initiation de la corrosion.

Du point de vue modélisation, il manque des informations pour passer du comportement d'une section de barres d'armature corrodée vers le comportement d'un élément de béton armé corrodé. La modélisation du comportement structural d'un élément de béton armé corrodé ne peut pas être faite directement à partir d'essais sur des sections de barres corrodées.

Bibliographie

- ACI 222R, *Corrosion of metals in concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 1996.
- ACI 222.3R, *Design and construction practices to mitigate corrosion of reinforcement in concrete structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 1996.
- Aligizaki K. K., Rooij M. R. et Macdonald D. D., *Analysis of iron oxides accumulating at the interface between aggregates and cement paste*, Cement and Concrete Research, vol. 30, 2000. 1941-1945.
- Almusallam A.A., *Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars*, Construction and Buildings Materials, Vol. 15, No. 8, 2001. 361-368.
- Alonso C., Andrade C, Castellote M. et Castro P., *Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000. 1047-1055.
- Bailon J.-P. et Dorlot J.-M., *Des matériaux*, Troisième édition, Presse internationales Polytechnique, 2000. 736 pages.
- Bentur A., Diamond S. et Berke N., *Steel corrosion in concrete - Fundamentals and civil engineering practice*, E & FN Spon, 1997. 201 pages.
- Berke N.S., Hicks M.C., Li L., Miltenberger M., Miller B., Munteanu V. et Carvajal R., *Accelerated mortar test method to determine chloride threshold values for corrosion initiation*, Electrochemical techniques for evaluating corrosion performance and estimating service-life of reinforced concrete, ASTM STP 1457, N.S. Berke, M. Thomas, X. Yunping, and L.L. Veleza, Ed(s), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- Bertolini L, Bernhard E., Pedferri P. et Polder R., *Corrosion of steel in concrete*, WILEY-VCH, Germany, 2004. 392 pages.
- Blankwoll A., *History of the gimsoystaumen bridge repair project*, International conference-repair of concrete structures, From theory to practice in a marine environment, Norway, 1997. 35 pages.
- Broomfield J.P., *Corrosion of Steel in Concrete*, E&FN Spon, 1997. 272 pages.
- Chitty W.-J., Dillmann P., L'Hostis V. et Lombard C., *Long-term corrosion resistance of metallic reinforcements in concrete - A study of corrosion mechanisms based on archaeological artifacts*, Corrosion Science, vol. 47, 2005. 1555-1581.

- Cornell R.M. et Schwertmann U., *The Iron Oxides*, WILEY-VCH, Germany, 2003. 664 pages.
- Dehwah H.A.F., Maslehuddin M. et Austin S.A., *Long-term effect of sulfate ions and associated cations on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concrete*, *Cement & Concrete Composites*, vol. 24, n°1, 2002. 17-25.
- Duffo G.S., Morris W., Raspini I. et Saragovi C., *A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years*, *Corrosion Science*, Vol. 46, No°9, 2004. 2143-2157.
- Federal Highway Administration, *Corrosion evaluation of epoxy-coated, metallic-clad and solid metallic reinforcing bars in concrete*, Report No. FHWA-RD-98-153, 1998.
- Ghali E., *Électrochimie, corrosion et protection*, Département de mines et métallurgie, Cours GML 10443, Université Laval, Hiver 2005.
- Hausmann D.A., *Steel corrosion in concrete*, *Materials protection*, Vol. 4, No. 11, 1967. 19-22.
- Henocq P., Samson E., Marchand J. et Clark B., *Determination of the chloride content threshold to initiate steel corrosion*, Proceedings of the 5th Int. Essen Workshop on Transport in Concrete, Essen, Allemagne, 2007.
- Hussain S.E., Al-Gahtani A. et Resheeduzzafar, *Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete*, *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 6, nov-dec, 1996. 534-538.
- Hussain S.E., Rasheeduzzafar, Al-Musallam A. et Al-Gahtani A.S., *Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, 1995. 1543-1555.
- Kocich J., Sevcikova J. et Tuleja S., *Effect of atmospheric corrosion on the mechanical properties of the weathering steel Atmofix 52A*, *Corrosion Science*, Vol. 35, No. 4, 1993. 719-725.
- Marchand J. et Samson E., *Predicting the service-life of concrete – Limitations of simplified models*, Soumis à CCEDS II, McMaster University, may 2008. 16 pages.
- Marcotte T.D., *Characterization of chloride-Induced Corrosion Products that form in Steel-Reinforced cementitious Materials*, Thesis, University of Waterloo, 2001. 330 pages.
- Maslehuddin M., Allam I.M., Al-Sulaimani G.J., Al-Mana A.I. et Abduljauwad S.N., *Effect of rusting of reinforcing steel on its mechanical properties and bond with concrete*, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 5, Sep-Oct, 1990. 496-502.

- Meyer A., *Investigation on the carbonation on concrete*, Proc. Chem. Cement Tokyo, 1968. 3 :394-401.
- Midgley H.G. et Illston J.M., *The penetration of chlorides into hardened cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol. 14, 1984. 546-558.
- Paradis F., Lapointe V., Jolin M. et Marchand J., Accelerated test methods to investigate chloride-induced steel corrosion damage in reinforced concrete – A brief review, 7th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, June 2006.
- Ragab A., Alawi H. et Sorein K., *Effect of atmospheric and marine corrosive environments on tensile, impact and hardness properties of some steels*, Mechanics of materials, Vol. 18, No. 1, 1994. 69-77.
- Rosenberg A., Hansson C.M. et Andrade C., *Mechanism of corrosion of steel in concrete*, Materials Science of Concrete, Vol. 1, American Ceramic Society, 1989. 285-314.
- Salah-Rousset B.N., Chaouachi M.A. et Chellouf A., *Role of surface finishing on pitting corrosion of duplex stainless steel in seawater*, Journal of materials engineering and performance, Vol. 5, No. 2, 1996. 225-231.
- Samson E., *Modélisation numérique du transport ionique dans les matériaux cimentaires non saturés*, Thèse, Université Laval, 2005. 237 pages.
- Samson E., Maleki K., Marchand J. et Zhang T., *Determination of the water diffusivity of concrete using drying/absorption test results*, Journal of ASTM International, Vol. 5, No. 7, 2008. 12 pages.
- Samson E. et Marchand J., *Modeling the effect of temperature on ionic transport in cementitious materials*, Cement and Concrete Research, Vol. 37, 2007. 455-468.
- Samson E., Marchand J., Henocq P. et Beauséjour P., *Recent advances in the determination of ionic diffusion coefficients using migration test results*, ConMod 2008, Delft, Netherlands, may 2008. 14 pages.
- Samson E., Marchand J., Snyder K.A. et Beaudoin J.J., *Modeling ion and fluid transport in unsaturated cement systems in isothermal conditions*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005. 141-153.
- Vérificateur général du Québec, *Rapport à l'assemblée nationale pour l'année 2002-2003 Tome II*, 2004.
- Zhang T., Samson E. et Marchand J., *Effect of temperature on ionic transport properties of concrete*, Proceedings of the ConMAT Conference, August, Vancouver (Canada), 2005.

Annexe A - Résultats de l'étude de la pénétration en ions chlorure

A.1 Éprouvettes sans barres

Tableau A-1 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I5B sans barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)		
		@ 10 mm	@ 20 mm	@ 36 mm
1	200	0,51	0,21	0,01
2	228	0,44	0,21	0,02
3	256	0,48	0,24	0,03
4	284	0,44	0,28	0,05
5	312	0,57	0,40	0,16
6	340	0,47	0,28	0,10
7	571	0,49	0,27	0,09
8	687	0,54	0,33	0,14

Tableau A-2 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I5J sans barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)		
		@ 10 mm	@ 20 mm	@ 36 mm
1	200	0,64	0,39	0,03
2	228	0,46	0,21	0,02
3	256	0,51	0,28	0,05
4	284	0,50	0,26	0,05
5	312	0,56	0,25	0,02
6	340	0,72	0,38	0,21
7	417	0,77	0,60	0,15
8	687	0,67	0,61	0,27

Tableau A-3 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I65B sans barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)		
		@ 10 mm	@ 20 mm	@ 36 mm
1	200	0,59	0,48	0,31
2	228	0,64	0,44	0,30
3	256	0,58	0,47	0,32
4	172	0,55	0,43	0,22
5	284	0,63	0,48	0,42
6	312	0,65	0,53	0,45
7	340	0,56	0,48	0,40
8	65	0,52	0,27	0,06

Tableau A-4 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage V5B sans barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)		
		@ 10 mm	@ 20 mm	@ 36 mm
1	200	-	-	0,10
2	228	0,50	0,30	0,13
3	256	0,58	0,32	0,17
4	284	0,36	0,25	0,11
5	312	0,56	0,38	0,31
6	340	0,57	0,39	0,20
7	473	0,36	0,28	0,14
8	687	0,36	0,29	0,14

Tableau A-5 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage V65B sans barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)		
		@ 10 mm	@ 20 mm	@ 36 mm
1	200	0,45	0,36	0,25
2	228	0,38	0,28	0,19
3	256	0,66	0,26	0,25
4	284	0,81	0,44	0,31
5	312	0,64	0,42	0,18
6	340	0,42	0,28	0,24
7	687	0,60	0,60	0,46
8	93	0,41	0,30	0,12

A.2 Éprouvettes avec barres

Tableau A-6 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I5B avec barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)	
		@ 10 mm	@ 20 mm
1	288	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	340	0,58	0,45
5	340	0,46	0,21
6	-	-	-
7	319	-	-
8	571	0,54	0,34

Tableau A-7 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I5J avec barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)	
		@ 10 mm	@ 20 mm
1	417	0,55	0,25
2	417	0,53	0,30
3	-	-	-
4	340	0,55	0,30
5	340	0,74	0,51
6	-	-	-
7	438	0,43	0,24
8	319	0,45	0,24

Tableau A-8 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage I65B avec barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)	
		@ 10 mm	@ 20 mm
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	172	-	-
5	65	0,49	0,36
6	288	-	-
7	65	0,57	0,42
8	319	-	-

Tableau A-9 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage V5B avec barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)	
		@ 10 mm	@ 20 mm
1	473	0,36	0,30
2	319	-	-
3	473	0,34	0,26
4	473	0,33	0,25
5	-	-	-
6	-	-	-
7	473	0,42	0,40
8	288	-	-

Tableau A-10 : Concentration en ions chlorure totaux pour le montage V65B avec barres

No. de l'éprouvette	Nbr. de jour d'exposition	Concentration en ions chlorure totaux (% en masse de mortier sec)	
		@ 10 mm	@ 20 mm
1	93	0,46	0,39
2	-	-	-
3	93	0,42	0,34
4	-	-	-
5	-	-	-
6	319	-	-
7	288	-	-
8	-	-	-

Annexe B - Comparaison entre les montages I5B et I5J

Des essais de comparaison des propriétés de transport pour les montages I5B et I5J ont été entrepris à la suite des divergences montrées aux Figures 5-12 et 5-13. Les essais entrepris sont l'essai de migration vierge, l'essai de porosité (ASTM C 642) et l'essai d'extraction vierge. Le mot vierge signifie que les échantillons n'ont subi aucun traitement avant l'essai. Ainsi, les essais ont été faits immédiatement après la sortie des éprouvettes de la chambre de mûrissement. Le Tableau B-1 résume les résultats de l'étude des propriétés de transport sur des échantillons ayant curé pendant 860 jours à 100 % d'humidité relative et à 23 °C.

Tableau B-1 : Comparatif des propriétés de transport des montages I5B et I5J

Propriété de transport	I5B	I5J
Coefficient de diffusion (D_{OH^-}) ($\times 10^{-11}$ m ² /s)	27,5	30,0
Porosité (%) – ASTM C 642	16,6	16,8
Absorption après ébullition (%)	8,3	8,4

Annexe C - Temps d'initiation

C.1 Temps d'initiation selon le courant macropile

Tableau C-1 : Temps pour initier la corrosion selon le courant macropile

No. de l'éprouvette	Temps pour initier la corrosion (jours)				
	I5B	I5J	I65B	V5B	V65B
1	165	403	46	127 ⁺	43
2	>676 ⁺	407	39	57	71
3	491 ⁺	540 ⁺	36	466 ⁺	81 ⁺
4	158	∅	50	53	64
5	∅	288 ⁺	18 ⁺	18 ⁺	43
6	>676 ⁺	494	46	99	46
7	151	424	53 ⁺	39	43
8	543 ⁺	∅	43	95	∅
Moyenne	158	432	43	69	52
Écart-type	7	42	5	27	13

∅ = Arrêt Avant Initiation

⁺ Valeurs rejetées pour l'analyse

C.2 Temps d'initiation selon le potentiel de corrosion

Tableau C-2 : Temps pour initier la corrosion selon le potentiel de corrosion

No. de l'éprouvette	Temps pour initier la corrosion (jours)				
	I5B	I5J	I65B	V5B	V65B
1	162	403	46	127 ⁺	43
2	>676 ⁺	407	39	57	71
3	491 ⁺	540 ⁺	36	466 ⁺	85 ⁺
4	158	∅	50	53	67
5	∅	288 ⁺	18 ⁺	32 ⁺	43
6	>676 ⁺	491	46	95	43
7	148	431	53 ⁺	39	39
8	554 ⁺	∅	43	88	∅
Moyenne	156	433	43	66	51
Écart-type	7	41	5	24	14

∅ = Arrêt Avant Initiation

⁺ Valeurs rejetées pour l'analyse

C.3 Temps d'initiation selon la polarisation linéaire

Tableau C-3 : Temps pour initier la corrosion selon la polarisation linéaire

No. de l'éprouvette	Temps pour initier la corrosion (jours)				
	I5B	I5J	I65B	V5B	V65B
1	169	414	50	141 ⁺	46
2	>676 ⁺	414	50	85	78
3	505 ⁺	561 ⁺	50	∅	85 ⁺
4	169	∅	71	57	71
5	∅	302 ⁺	22 ⁺	57 ⁺	46
6	>676 ⁺	505	50	141	57
7	169	435	57 ⁺	57	46
8	561 ⁺	∅	50	113	∅
Moyenne	169	442	54	91	57
Écart-type	0	43	9	37	14

∅ = Arrêt Avant Initiation

⁺ Valeurs rejetées pour l'analyse

Annexe D - Démarche pour déterminer la concentration critique en ions chlorure

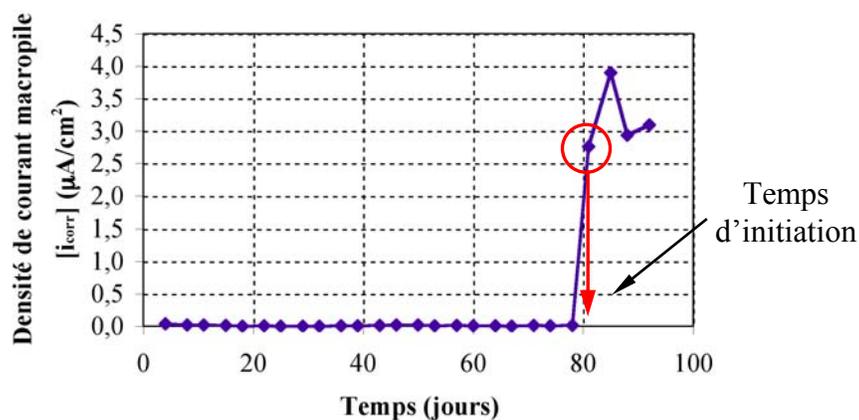


Figure D-1 : Densité de courant macropile - V65B-3 (AB)

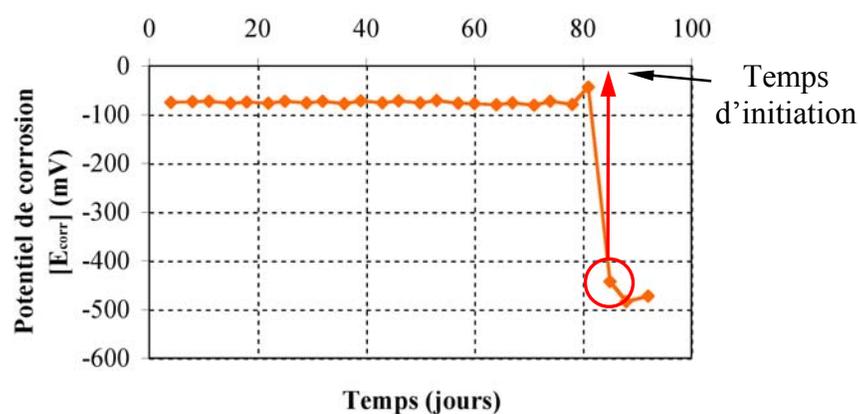


Figure D-2 : Potentiel de corrosion - V65B-3 (AB)

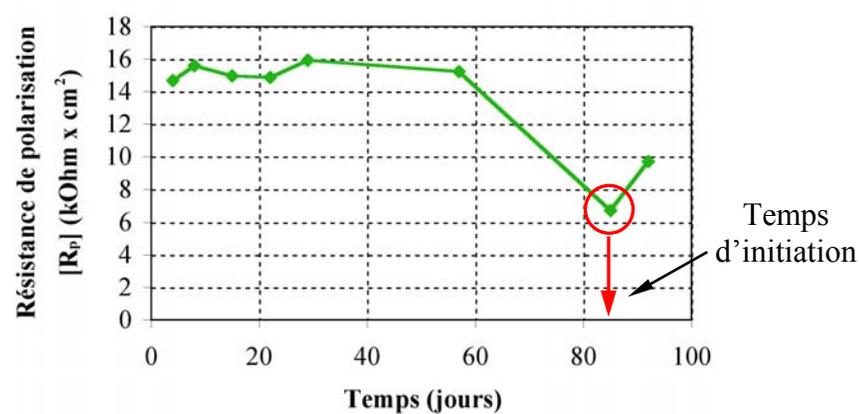


Figure D-3 : Résistance de polarisation - V65B-3 (AB)

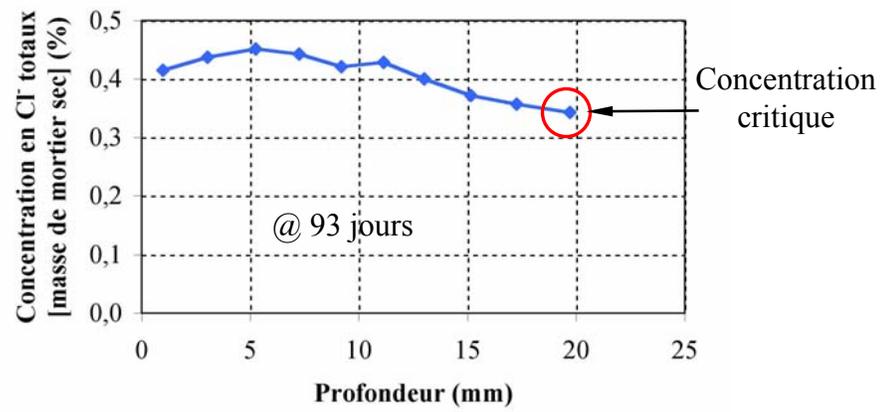


Figure D-4 : Profil en ions chlorure - V65B-3 (AB)