



HAL
open science

Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation.

Yun Yun Tong

► **To cite this version:**

Yun Yun Tong. Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation.. Matériaux. Université Pierre et Marie Curie, 2009. Français. NNT : 2009PAO66309 . tel-01349734

HAL Id: tel-01349734

<https://theses.hal.science/tel-01349734>

Submitted on 28 Jul 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité
Chimie Physique et Chimie Analytique

Présentée par
Mlle. YunYun TONG

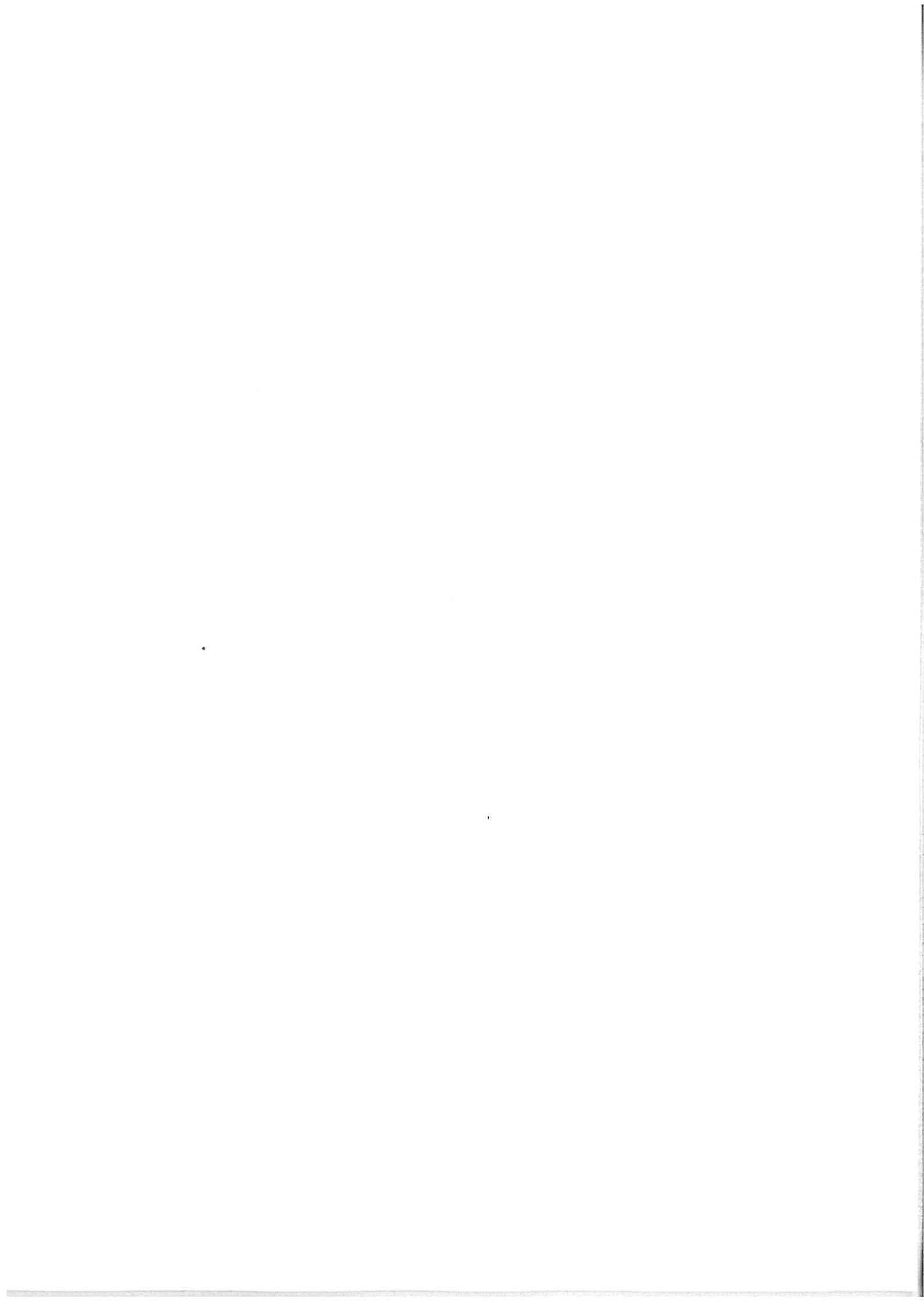
Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

**Traitement électrochimique de réalcalinisation
pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation**

Soutenue le 21 Septembre 2009,
au Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Paris

Devant le jury composé de :

M. Ramon NOVOA Professeur à l'Université de Vigo, Espagne	Rapporteur
M. François WENGER Maître de conférence (HDR), Ecole Centrale Paris	Rapporteur
Mme. Véronique BOUTELLER Chargée de Recherche, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées	Examineur
Mlle. Elisabeth MARIE-VICTOIRE Ingénieur de Recherche, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques	Examineur
Mme. Suzanne JOIRET Chargée de Recherche (HDR), Laboratoire Interfaces et Systèmes Electrochimiques, CNRS	Directrice de thèse
Mme. Isabelle PALLOT-FROSSARD Conservateur général du patrimoine, Directrice du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques	Examineur
M. François HUET Professeur à l'Université Paris VI	Président



REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans trois laboratoires : le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer), le Laboratoire des Interfaces et Systèmes Electrochimiques (Centre National de la Recherche Scientifique, UPR15, Université Paris VI) et le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (Ministère de la Culture). Cette thèse s'étant déroulée dans de très bonnes conditions, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail :

Premièrement, mes remerciements s'adressent à Madame Suzanne JOIRET (LISE), directrice de thèse et à mes conseillers d'étude Madame Véronique BOUTEILLER (LCPC) et Mademoiselle Elisabeth MARIE-VICTOIRE (LRMH). Merci à la première pour m'avoir formée à la Spectromicroscopie Raman et aidée durant les années consacrées à la réalisation de ce travail. Merci aux deux autres, pour leurs domaines de compétence complémentaires (réhabilitation des Ouvrages d'Art et restauration des Monuments Historiques), leur investissement, leurs qualités scientifiques et humaines qui m'ont été fort utiles et ont permis de mener à bien ce travail de thèse.

Deuxièmement, je souhaite remercier les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de s'intéresser à ce travail et de le juger. Merci à Monsieur François HUET, directeur du LISE pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Merci à Monsieur Ramon NOVOA et à Monsieur François WENGER pour avoir accepté la lourde charge de rapporteurs. Merci à Madame Isabelle PALLOT-FROSSARD, directrice du LRMH, pour l'ensemble des remarques pertinentes faites sur ce travail.

Troisièmement, merci à l'ensemble du LCPC, LRMH et LISE qui a contribué à rendre cette thèse des plus agréables dans un environnement chaleureux. Je remercie particulièrement Monsieur Christian CREMONA, ancien chef de la section Durabilité des Ouvrages d'Art du LCPC, qui a éclairé ce travail avec sa compétence des ouvrages et sa patience. Je remercie Monsieur Gérard KITTEL pour la fabrication des corps d'épreuve en béton armé, Madame Florence VALLOT, Monsieur Julien SCHNEIDER et Madame Sandrine MOSCARDELLI pour le vieillissement par carbonatation accélérée et les dosages d'alcalins. Je remercie

Madame Marie-Claude BERNARD pour son aide précieuse en Microspectroscopie Raman, Monsieur Jean DAUTHUILLE et Monsieur Alexandre DEMAN pour leur aide dans le suivi avec échéances des corps d'épreuve et Monsieur Bruno KOUBI pour le développement de la macro excel pour le traitement des résultats électrochimiques.

Quatrièmement, pour la mise en place des traitements de réalcalinisation, ce travail a été réalisé avec l'appui technique des sociétés RENOFORS pour le traitement par courant imposé (y compris le suivi de la réparation par réalcalinisation du Pont Camille de Hogues) et FREYSSINET pour le traitement par anode sacrificielle. Merci !

Et puis en tant que chinoise en France, merci également à Jean-Luc CLEMENT et à Agnès VAILHE pour leur aide dans les différents tracés administratifs que j'ai eu à surmonter.

Enfin, je ne saurais oublier dans mes remerciements tous mes camarades des trois laboratoires, avec qui j'ai eu le plaisir de partager mes impressions tout au long de la thèse.

Plus personnellement, je tiens à remercier ma famille et Rod pour leur soutien déterminant durant ces trois années de thèse.

:

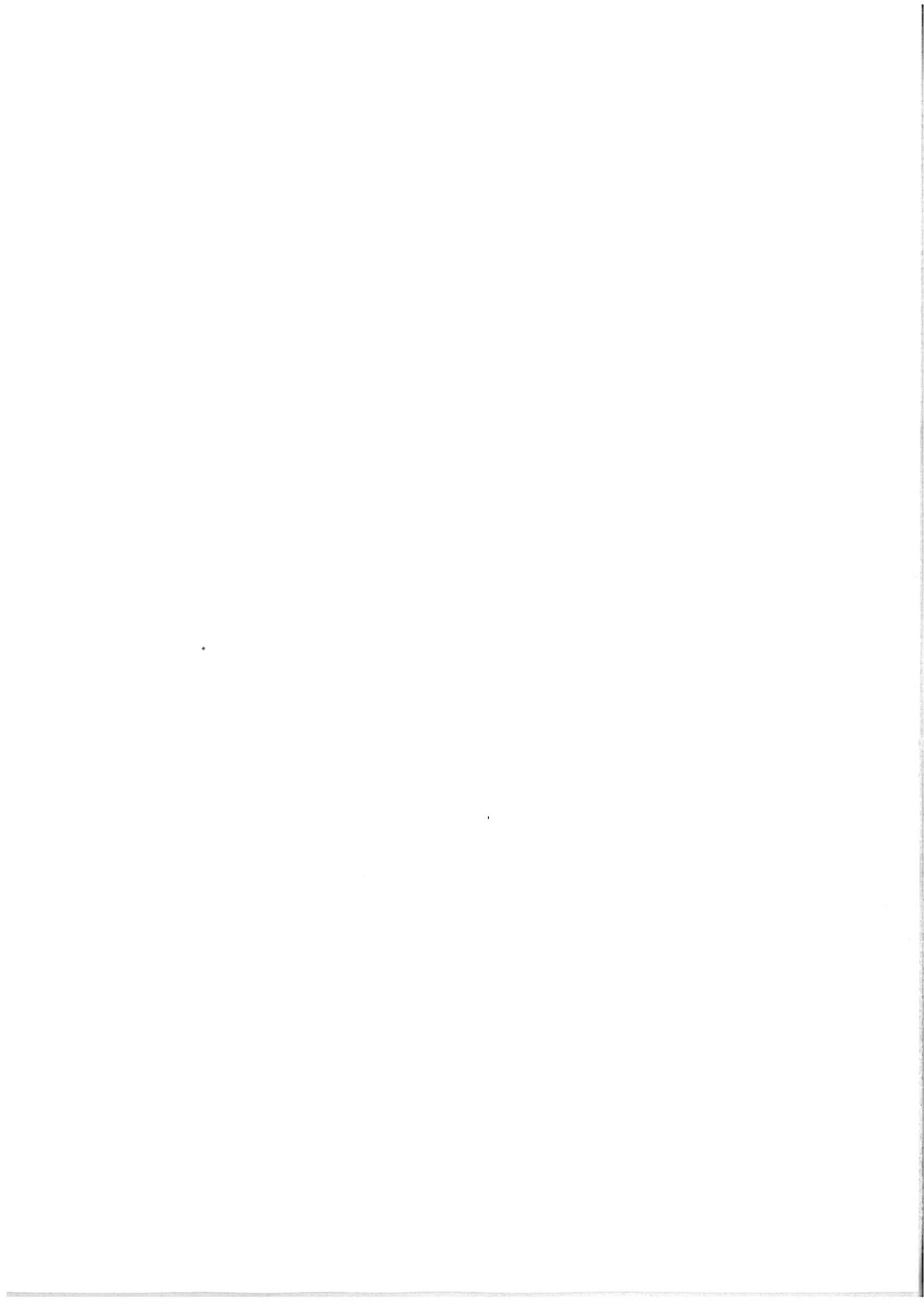
Résumé

L'objectif de cette thèse est **d'évaluer l'efficacité et la durabilité du traitement électrochimique de réalcalinisation** (selon les procédés courant imposé et anode sacrificielle) dans le cadre d'une réparation de **béton armé dégradé par carbonatation**.

La réalcalinisation a été appliquée en tant que réparation "**maintenance**" sur des dalles dont les 3 armatures présentent une corrosion active et en tant que réparation "**réhabilitation**" sur des dalles dont les 6 armatures présentent un niveau de corrosion plus avancé. L'efficacité du traitement a été évaluée, d'une part, à l'aide de **caractérisations analytiques** (détermination de pH à l'aide d'indicateurs colorés, mesures quantitatives de pH à partir de suspensions, dosage d'alcalins, Microscopie Electronique à Balayage couplée à un EDS et Microspectroscopie Raman) et, d'autre part, de **caractérisations électrochimiques non destructives** (potentiel libre, résistance de polarisation linéaire, impédance, densité de courant de corrosion).

Les résultats de l'étude "maintenance" montrent que le traitement de réalcalinisation est efficace car il conduit à une augmentation de la basicité du béton autour des armatures, une augmentation de la concentration en alcalins dans l'enrobage béton et à une diminution de l'activité de corrosion et ce jusqu'à 12 mois. En revanche, 2 ans ½ après le traitement, les résultats montrent que le béton armé bien que toujours réalcalinisé a une activité de corrosion sensiblement égale à celle avant traitement. Les résultats de l'efficacité du traitement de "réhabilitation" sont similaires à ceux obtenus du traitement de "maintenance" avec une diminution plus marquée de l'activité de corrosion après traitement et jusqu'à 12 mois. Les observations réalisées au MEB + EDS ne révèlent aucune évolution délétère de la matrice cimentaire. L'efficacité de la réalcalinisation a également été démontrée par Microspectroscopie Raman avec la mise en évidence de la formation de Magnétite accompagnée d'une réduction de la Rouille Verte en Hydroxyde Ferreux pendant le traitement de réalcalinisation par courant imposé. Toutefois, les armatures ne se repassivent pas. Enfin, le suivi du traitement de réalcalinisation du pont Camille De Hogues a constitué une expérience de terrain intéressante.

Mots clés : béton armé carbonaté, réalcalinisation, caractérisations analytiques, caractérisations électrochimiques, produits de corrosion, diagnostic



Abstract

The aim of this study is to **evaluate the efficiency and the durability of the electrochemical realkalisation treatment** by impressed current or by sacrificial anode for the reparation of **reinforced concrete corrosion degraded by carbonation**.

Realkalisation has been applied, firstly, as a "**maintenance repair**" on one set of carbonated reinforced concrete slabs with three corroded rebars and secondly, as a "**rehabilitation repair**" on a second set of carbonated reinforced concrete slabs with six rebars more heavily corroded. The treatment's efficiency was evaluated based on **analytical characterizations** (qualitative pH determination using acid/base indicators, quantitative pH measurements using powder suspensions, alkaline concentrations, SEM combined to EDS observations and Microspectroscopy Raman), as well as on **non-destructive electrochemical measurements** (rest potential, linear polarization resistance, impedance and corrosion current density).

The "maintenance" treatment efficiency was demonstrated by (i) an increase of the concrete pH around the steels, (ii) an increase of alkaline concentration in the concrete cover and (iii) a decrease of the steel corrosion activity until 12 months. However, two years and a half after treatment, although the rebars are still in a realkalised concrete, the electrochemical results indicate that the corrosion activity has returned to its initial state. The efficiency of the "rehabilitation" treatment was also confirmed and in that case the corrosion activity decrease after treatment and until 12 months was more obvious. The cement matrix did not change significantly according to the SEM observations combined to EDS analysis. Moreover, the efficiency of the realkalisation treatment using impressed current was also confirmed with the Magnetite formation and the reduction of Green Rust into Ferrous Hydroxyde (Microspectroscopy Raman). Nevertheless, the repassivation of the rebars was never recovered. Finally, the realkalisation of the Camille De Hogues's bridge provided an interesting on-site experience.

Key words: carbonated reinforced concrete, realkalisation, analytical characterizations, electrochemical measurements, corrosion products, monitoring

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I. Etude bibliographique	2
I.1 LA CARBONATATION DU BETON	4
I.1.1 <i>La réaction chimique de carbonatation</i>	4
I.1.2 <i>Les paramètres influents de la carbonatation du béton</i>	5
I.1.3 <i>Les essais de carbonatation accélérée</i>	5
I.1.4 <i>Modélisation de la carbonatation</i>	6
I.2 LA CORROSION DE L'ACIER.....	6
I.2.1 <i>Corrosion</i>	6
I.2.2 <i>Acier passif dans un béton sain</i>	7
I.2.3 <i>Acier actif dans un béton carbonaté</i>	8
I.2.3.1 <i>Mécanisme de la corrosion de l'acier dans un béton carbonaté</i>	8
I.2.3.2 <i>Causes aggravantes ou limitantes de la corrosion de l'acier dans un béton carbonaté</i>	9
I.2.3.3 <i>Influence de la corrosion sur les propriétés mécaniques</i>	11
I.2.3.4 <i>Natures des oxydes de fer formés dans un béton carbonaté</i>	11
I.2.4 <i>Accélération artificielle de la corrosion de l'acier dans un béton</i>	12
I.2.4.1 <i>La corrosion accélérée à l'aide de cycles climatiques</i>	13
I.2.4.2 <i>La corrosion accélérée sous courant électrique</i>	13
I.3 PROTECTION, MAINTENANCE ET REPARATION DES ACIERS DANS UN BETON CARBONATE	15
I.3.1 <i>Réparation traditionnelle</i>	17
I.3.2 <i>Inhibiteur de corrosion</i>	17
I.3.3 <i>Protection cathodique</i>	18
I.3.4 <i>Réalcalinisation</i>	18
I.3.4.1 <i>Introduction</i>	18
I.3.4.2 <i>Description du traitement électrochimique de réalcalinisation</i>	19
I.3.4.3 <i>Mécanismes du traitement électrochimique de réalcalinisation</i>	20
I.3.4.4 <i>Textes réglementaires sur le traitement électrochimique de réalcalinisation</i>	23
I.4 ETUDE DE L'EFFICACITE DU TRAITEMENT DE REALCALINISATION	23
I.4.1 <i>Facteurs influençant l'efficacité du traitement électrochimique de réalcalinisation</i>	23
I.4.1.1 <i>Le type de ciment</i>	23
I.4.1.2 <i>Le niveau de corrosion avant traitement</i>	24
I.4.1.3 <i>La charge totale de courant cathodique</i>	24
I.4.2 <i>Méthodes d'évaluation de l'efficacité du traitement de réalcalinisation</i>	25
I.4.2.1 <i>Caractérisations analytiques</i>	25
I.4.2.2 <i>Caractérisations électrochimiques</i>	29
I.4.3 <i>Efficacité du traitement électrochimique de réalcalinisation</i>	37
I.4.4 <i>Influence du traitement de réalcalinisation sur le béton armé</i>	39

1.4.4.1	La porosité du béton	40
1.4.4.2	Les propriétés mécaniques du béton	40
1.4.4.3	L'adhérence acier/béton.....	40
1.4.4.4	Les produits de corrosion.....	41
1.4.4.5	La réaction alcali-granulat (RAG)	41
1.4.4.6	Fragilisation des aciers de précontrainte en pré- et post-tension.....	42
1.4.4.7	Efflorescences et coloration du béton	42
1.4.5	<i>Durabilité du traitement de réalcalinisation</i>	42
 Chapitre II. Programme expérimental.....		44
II.1	CORPS D'EPREUVE	44
II.1.1	<i>Formulation de béton et microbéton</i>	44
II.1.1.1	Ciment	45
II.1.1.2	Granulats	45
II.1.1.3	Armatures	45
II.1.2	<i>Dallettes en béton armé</i>	46
II.1.2.1	Description des dalles en béton armé	46
II.1.2.2	Fabrication.....	47
II.1.2.3	Vieillessement par carbonatation artificielle des corps d'épreuve en béton armé.....	47
II.1.3	<i>Mini-éprouvettes en micro-béton armé</i>	47
II.1.3.1	Description	48
II.1.3.2	Fabrication des mini-éprouvettes en micro-béton armé.....	48
II.1.3.3	Vieillessement par carbonatation artificielle des corps d'épreuve en micro-béton armé	48
II.2	CARACTERISATIONS ANALYTIQUES	49
II.2.1	<i>Détermination du pH du béton</i>	50
II.2.1.1	Détermination qualitative du pH à l'aide d'indicateurs colorés	50
II.2.1.2	Détermination quantitative du pH sur suspensions.....	50
II.2.2	<i>Détermination des alcalins dans le béton</i>	51
II.2.3	<i>Observation au Microscope Electronique à Balayage et spectrométrie de rayons X à dispersion d'énergie</i>	51
II.2.3.1	Préparations des échantillons.....	51
II.2.3.2	Appareillages.....	52
II.2.3.3	L'analyse élémentaire couplée au MEB	53
II.2.4	<i>Microspectroscopie Raman</i>	54
II.2.4.1	Principe [81][82]	55
II.2.4.2	Appareillage et configuration de travail	56
II.3	CARACTERISATIONS ELECTROCHIMIQUES.....	57
II.3.1	<i>Caractérisations électrochimiques en laboratoire</i>	57
II.3.2	<i>Diagnostic de la corrosion sur ouvrage</i>	60

Chapitre III. Méthodologies et caractérisations initiales 45

III.1	METHODOLOGIE DES CARACTERISATIONS ELECTROCHIMIQUES APRES LE VIEILLISSEMENT PAR CARBONATATION ARTIFICIELLE	61
III.1.1	<i>Influence des connexions des armatures (dallettes "A6").....</i>	61
III.1.2	<i>Répétabilité des mesures électrochimiques sur une même journée.....</i>	63
III.1.3	<i>Protocole de conditionnement hydrique des dalles "A6" avant les mesures électrochimiques</i>	65
III.1.3.1	Mesures électrochimiques sur une dalle en béton carbonaté avec le protocole 1	67
III.1.3.2	Mesures électrochimiques sur une dalle en béton sain avec le protocole 1	68
III.1.3.3	Mesures électrochimiques d'une dalle carbonatée avec le protocole 2	69
III.1.3.4	Mesures électrochimiques en immergeant la dalle dans l'eau pendant les mesures suivant le protocole 2	71
III.1.4	<i>Résultats des caractérisations électrochimiques des dalles après carbonatation.....</i>	72
III.1.4.1	Caractérisation électrochimique des dalles "A3" après carbonatation	72
III.1.4.2	Caractérisation électrochimique des dalles "A6" après carbonatation.....	73
III.2	ESSAIS DE CORROSION ACCELEREE ARTIFICIELLE DES DALLES "A6".....	74
III.2.1	<i>Protocoles des méthodes de corrosion accélérée.....</i>	75
III.2.2	<i>Efficacité des deux méthodes de corrosion accélérée</i>	76
III.2.2.1	Comparaison des méthodes de corrosion accélérée à l'aide de caractérisations électrochimiques.....	76
III.2.2.2	Comparaison des méthodes de corrosion accélérée à l'aide de caractérisations visuelles (destructives)	77
III.2.3	<i>Caractérisation électrochimique des dalles "A6" après corrosion intentio-statique.....</i>	78
III.3	TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES DE REALCALINISATION DU BETON ARME CARBONATE.....	79
III.3.1	<i>Principe général des traitements électrochimiques de réalcalinisation.....</i>	79
III.3.2	<i>Traitement de maintenance et de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé courant imposé</i>	80
III.3.2.1	Application du traitement de réalcalinisation par courant imposé.....	81
III.3.2.2	Suivi du traitement de réalcalinisation par courant imposé	82
III.3.2.3	Dépolarisation des armatures après le traitement de réalcalinisation par courant imposé	83
III.3.3	<i>Traitement de maintenance et de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé anode sacrificielle</i>	84
III.3.3.1	Application du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle	84
III.3.3.2	Suivi du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle.....	86
III.3.3.3	Dépolarisation des armatures après le traitement par anode sacrificielle.....	88

Chapitre IV. Traitement de maintenance par réalcalinisation des dalles en béton carbonaté avec 3 armatures 89

IV.1	EFFICACITE ET DURABILITE DU TRAITEMENT DE MAINTENANCE PAR REALCALINISATION DES DALLES "A3".....	89
IV.1.1	<i>Caractérisations physico-chimiques du béton des dalles "A3" après traitement de maintenance.....</i>	89

IV.1.1.1	Suivi de pH à l'aide d'indicateurs colorés.....	89
IV.1.1.2	Evaluation quantitative du pH à partir des suspensions.....	91
IV.1.1.3	Dosages d'alcalins.....	94
<i>IV.1.2</i>	<i>Suivi de l'activité de corrosion des armatures des dalles "A3" après maintenance.....</i>	<i>96</i>
IV.1.2.1	Evolution du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion des dalles "A3".....	96
IV.1.2.2	Evolution de la résistance d'enrobage des dalles "A3".....	99
<i>IV.1.3</i>	<i>Caractérisations de la matrice cimentaire et des produits de corrosion.....</i>	<i>101</i>
IV.1.3.1	Observations au MEB couplé à un EDS.....	101
IV.1.3.2	Identification de la nature des produits de corrosion par Microspectroscopie Raman.....	107
IV.2	DISCUSSIONS SUR L'EFFICACITE DU TRAITEMENT DE MAINTENANCE - REALCALINISATION SUR LES DALLES "A3".....	113
Chapitre V. Traitement de réhabilitation par réalcalinisation des dalles en béton carbonaté avec 6 armatures		117
V.1	EFFICACITE DU TRAITEMENT DE REHABILITATION PAR REALCALINISATION DES DALLES "A6" ...	117
<i>V.1.1</i>	<i>Caractérisations physico-chimiques du béton des dalles "A6" après traitement de réhabilitation</i>	<i>117</i>
V.1.1.1	Suivi de pH à l'aide d'indicateurs colorés.....	117
V.1.1.2	Evolution quantitative du pH à partir des suspensions.....	119
V.1.1.3	Dosages d'alcalins.....	121
<i>V.1.2</i>	<i>Suivi de l'activité de corrosion des armatures des dalles "A6" après réhabilitation.....</i>	<i>123</i>
V.1.2.1	Evolution du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion des dalles "A6".....	123
V.1.2.2	Evolution de la résistance d'enrobage des dalles "A6".....	128
<i>V.1.3</i>	<i>Caractérisations de la matrice cimentaire et des produits de corrosion.....</i>	<i>129</i>
V.1.3.1	Observations au MEB couplé à un EDS.....	129
V.1.3.2	Identification des produits de corrosion des dalles "A6" par spectroscopie Raman.....	131
V.1.3.3	Evolution de la nature des produits de corrosion des mini-éprouvettes par spectroscopie Raman....	134
V.2	DISCUSSIONS SUR L'EFFICACITE DU TRAITEMENT DE REALCALINISATION DE TYPE "REHABILITATION" SUR LES DALLES "A6".....	138
V.3	COMPARAISON DES REALCALINISATIONS DE TYPE MAINTENANCE OU REHABILITATION.....	141
Chapitre VI. Suivi du traitement de réalcalinisation par courant imposé du pont Camille de Hogues.....		118
Conclusions et perspectives		169
Références		172
Annexes		180

Liste de figures

Figure I-1: Diagramme de Pourbaix Fe-H ₂ O à 25°C selon [9]	7
Figure I-2 : Influence du pH et du potentiel sur la corrosion de l'acier [15].....	9
Figure I-3 : Mécanisme de la corrosion de l'acier dans un béton carbonaté [16].....	9
Figure I-4 : Possibilités de protection de l'acier dans un béton carbonaté illustré sur le diagramme de Pourbaix	15
Figure I-5 : Schéma du traitement de réalcalinisation par courant imposé ou par anode sacrificielle	20
Figure I-6 : Cellule d'extraction de solution par pression [52]	26
Figure I-7 : Effet de proportion de poudres dans le mélange a) et de temps de mélange b) sur la détermination de pH à partir de suspensions	28
Figure I-8 : Courbe de polarisation stationnaire par la méthode des droites de Tafel [59]	31
Figure I-9 : Courbe $I = f(E)$ au point de potentiel libre [59]	32
Figure I-10 : Boucle de relaxation [61].....	33
Figure I-11 : Circuit de Randles et le diagramme de Nyquist correspondant (G : -partie imaginaire ; R : partie réelle) [61].....	35
Figure I-12 : Zones distinguées de remontée de pH après le traitement de réalcalinisation	38
Figure II-1 : Corps d'épreuve des dalles "A3" (dimension en mm).....	46
Figure II-2 : Corps d'épreuve des dalles "A6" (dimension en mm).....	47
Figure II-3 : Corps d'épreuve "mini-éprouvettes" (dimension en mm)	48
Figure II-4: Schémas de prélèvement des dalles "A3" et "A6" pour les caractérisations analytiques.....	49
Figure II-5 : Métalliseur au carbone au LRMH	52
Figure II-6 : L'appareille MEB (JEOL JSM-5600) au LRMH	52
Figure II-7 : Schéma d'un détecteur EDS dans son environnement.....	53
Figure II-8 : phénomènes de diffusion et de fluorescence caractérisés à l'aide des niveaux d'énergie de vibration moléculaire.....	55
Figure II-9 : Représentation schématique d'un spectre Raman.....	56
Figure II-10: Montage électrochimique des dalles "A3" a) et des dalles "A6" b).....	58
Figure II-11 : Courbe $E = f(t)$ a), $I = f(E)$ b) et Nyquist c) dans le logiciel Powersuite	59
Figure II-12 : Traitement des données à l'aide d'une macro Excel.....	60
Figure III-1 : Dalles "A6" avec (à gauche) des connexions internes par ligature (points bleus) ou (à droite) des connexions externes par soudure (fils rouges)	61
Figure III-2 : Influence des connexions des armatures des dalles "A6"	63
Figure III-3 : Echéances de mesures électrochimiques sur les cellules 3, 5 et 8	64
Figure III-4 : Mesures électrochimiques des cellules 3, 8 et 5 de la dalle 28-A6 sur une journée	64
Figure III-5 : Protocoles de conditionnement hydrique des dalles "A6"	66
Figure III-6 : Mesures électrochimiques de la dalle 28-A6 suivant le protocole 1	67
Figure III-7 : Mesures électrochimiques de la dalle 38-A6-S suivant le protocole 1	69
Figure III-8 : Mesures électrochimiques de la dalle 27-A6 suivant le protocole 2	70
Figure III-9 : Mesures électrochimiques en immergeant la dalle 31-A6 dans l'eau suivant le protocole 2	71
Figure III-10 : Caractérisations électrochimiques "initiales" des dalles "A3" après carbonatation.....	72
Figure III-11 : Caractérisations électrochimiques des dalles "A6" après carbonatation	74

Figure III-12 : Illustration de la corrosion accélérée intentiostatique à l'aide d'une alimentation électrique	76
Figure III-13 : Evolution d'Ecorr et de Jcorr après carbonatation et après les deux types de corrosion accélérée	76
Figure III-14 : Observation visuelles des oxydes de fer formés a) après carbonatation ; b) après les cycles d'humidification/séchage ; c) après corrosion intentiostatique.....	77
Figure III-15 : Caractérisations électrochimiques "initiales" des dalles "A6" carbonatées, après corrosion accélérée intentiostatique	78
Figure III-16 : Schéma des traitements de réalcalinisation par courant imposé ou par anode sacrificielle.....	80
Figure III-17 : Application du traitement de maintenance par réalcalinisation suivant le procédé courant imposé sur les 4 dalles "A3"	81
Figure III-18 : Application du traitement de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé courant imposé sur les 7 dalles "A6"	82
Figure III-19 : Suivi du traitement de réalcalinisation par courant imposé à l'aide d'un datalogger	82
Figure III-20 : Dépolarisation des armatures n°2 des dalles "A3" après le traitement de maintenance par courant imposé	83
Figure III-21 : Application du traitement de maintenance par réalcalinisation suivant le procédé anode sacrificielle sur les dalles "A3"	85
Figure III-22 : Application du traitement de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé anode sacrificielle sur les dalles "A6"	86
Figure III-23 : Suivi du traitement de réalcalinisation par anode galvanique à l'aide d'un datalogger (dalle 08-A3-A) et le calcul de la charge totale.....	87
Figure III-24 : Dépolarisation de l'armature n°2 des dalles "A3" après le traitement de maintenance par anode sacrificielle.....	88
Figure IV-1 : Suivi de pH des dalles témoins en béton sain et carbonaté à l'aide d'indicateurs colorés	90
Figure IV-2 : Suivi de pH à l'aide d'indicateurs colorés des dalles "A3" réalcalinisées par courant imposé et par anode sacrificielle	90
Figure IV-3 : Profils de pH des bétons témoins sain et carbonatés.....	92
Figure IV-4 : Profils de pH des dalles "A3" après réalcalinisation par courant imposé.....	92
Figure IV-5 : Profils de pH des dalles "A3" après réalcalinisation par anode sacrificielle	92
Figure IV-6 : Profils de concentration en K_2O des dalles "A3" après courant imposé	95
Figure IV-7 : Profils de concentration en Na_2O des dalles "A3" après anode sacrificielle	95
Figure IV-8 : Evolution de Ecorr et de Jcorr des dalles "A3" témoins sains et carbonatés.....	97
Figure IV-9 : Evolution de Ecorr et de Jcorr des dalles "A3" traitées par courant imposé maintenance	98
Figure IV-10 : Evolution de Ecorr et de Jcorr des dalles "A3" traitées par anode sacrificielle maintenance....	99
Figure IV-11 : Evolution de Re des dalles "A3" témoins et traitées après réalcalinisation maintenance.....	100
Figure IV-12 : Observations sous MEB et analyses élémentaires EDS du témoin sain 01-A3-S	102
Figure IV-13 : Observations au MEB des témoins carbonatés	103
Figure IV-14 : Observations MEB des dalles "A3", après réalcalinisation par courant imposé	105
Figure IV-15 : Observations MEB des dalles "A3", après réalcalinisation par anode sacrificielle.....	106
Figure IV-16 : Analyse Raman du témoin sain 01-A3-S	107

Figure IV-17 : Images Raman et optique au MEB des échantillons témoins carbonatés et des dalles traitées par réalcalinisation-maintenance à l'échéance 12 mois après.....	108
Figure IV-18 : Spectres Raman de la partie cordon au contact du métal a) témoin carbonaté et b) traité par anode sacrificielle.....	109
Figure IV-19 : Spectres Raman de la couche majoritaire de produits de corrosion des échantillons témoins carbonatés, traités par réalcalinisation-maintenance.....	110
Figure IV-20 : Mélange en différentes proportions des phases uniques.....	111
Figure IV-21 : Spectres Raman de la lépidocrocite.....	111
Figure V-1 : Suivi du pH à l'aide d'indicateurs colorés des dalles "A6" réalcalinisées par courant imposé et par anode sacrificielle.....	118
Figure V-2 : Profils de pH des bétons témoins sain et carbonaté.....	120
Figure V-3 : Profils de pH des dalles "A6" après réalcalinisation par courant imposé.....	120
Figure V-4 : Profils de pH des dalles "A6" après réalcalinisation par anode sacrificielle.....	120
Figure V-5 : Profils de concentration en K_2O des dalles "A6" après réalcalinisation par courant imposé.....	122
Figure V-6 : Profils de concentration en Na_2O des dalles "A6" après réalcalinisation par anode sacrificielle.....	122
Figure V-7 : Evolution de E_{corr} et de J_{corr} des dalles "A6" témoins sains et carbonatés.....	124
Figure V-8 : Evolution de E_{corr} et de J_{corr} des dalles "A6" traitées par courant imposé réhabilitation.....	126
Figure V-9 : Evolution de E_{corr} et de J_{corr} des dalles "A6" traitées par anode sacrificielle réhabilitation.....	127
Figure V-10 : Evolution de R_e des dalles "A6" témoins et traitées après réalcalinisation réhabilitation.....	128
Figure V-11 : Observations MEB du témoin sain 12-A6-S.....	129
Figure V-12 : Observations au MEB du témoin carbonaté 29-A6-C après 12 mois.....	130
Figure V-13 : Observations au MEB des dalles "A6" traitées par réalcalinisation.....	131
Figure V-14 : a) témoin carbonaté, la forme soulignée un cristal de calcite, b) témoin traité par courant imposé.....	131
Figure V-15 : Spectres Raman enregistrés en partant du métal vers le béton sur le témoin carbonaté de la Figure V-14 (a) ; spectre(a) à 5-20 μm du métal; (b) idem mais autre point (c) dans l'épaisseur, (d) près du béton à 60 μm du métal.....	132
Figure V-16 : Couche de corrosion d'une armature dans un béton carbonaté ; de droite à gauche : métal, couche de corrosion et béton.....	134
Figure V-17 : Spectre Raman de la couche de corrosion des armatures dans un béton carbonaté.....	135
Figure V-18 : Spectres Raman pendant le traitement de réalcalinisation (réduction galvanique à $-100 \mu A/cm^2$).....	136
Figure V-19 : Spectres Raman enregistrés 6 mois après réalcalinisation et abandon à l'atmosphère.....	136
Figure V-20 : Coloration rose de la phénolphthaleïne 6 mois après réalcalinisation.....	137
Figure V-21 : Piqûre sur les témoins sains soumis à un courant anodique de $60 \mu A/cm^2$	138
Figure V-22 : Localisation des prélèvements des carottes 1 et 2 sur la dalle 33-A6-I et valeurs de pH.....	139
Figure V-23 : Comparaison des caractérisations électrochimiques des traitements de maintenance (04-A3-I, 05-A3-I et 06-A3-I) et de réhabilitation (13-A6-I, 15-A6-I et 22-A6-I) par courant imposé.....	141
Figure V-24 : Comparaison des caractérisations électrochimiques des traitements de maintenance (08-A3-A, 09-A3-A et 10-A3-A) et de réhabilitation (21-A6-A, 31-A6-A et 32-A6-A) par anode sacrificielle.....	142

Liste de tableaux

Tableau I-1 : Indicateurs colorés utilisés pour détecter l'évolution du pH du béton [39].....	25
Tableau I-2 : Valeurs de pH en fonction de la densité de courant et de la durée de polarisation [50]	29
Tableau I-3 : Valeurs de potentiel suivant l'ASTM C876-91 (E_0 du Calomel/ENH est de 242 mV).....	30
Tableau I-4 : Intervalles typiques de potentiel E_{corr} (en V_{ECS}) de l'acier dans un béton [58].....	30
Tableau I-5 : Domaine de valeurs de courants de corrosion proposé par Andrade et al. [63].....	34
Tableau I-6 : Risque de corrosion des armatures à partir de la résistivité du béton (20°C et ciment portland) [71]	37
Tableau II-1 : Formulation du béton et du microbéton (kg/m^3)	44
Tableau II-2: Composition chimique du ciment utilisé.....	45
Tableau II-3 : Composition de Bogue du ciment utilisé.....	45
Tableau II-4 : Dénomination des dallettes "A3" et "A6"	60
Tableau III-1 : Répartition des dallettes "A3"	73
Tableau III-2 : Répartition des dallettes "A6".....	79
Tableau IV-1 : Liste de phases après la réalcalinisation-maintenance des dallettes "A3"	112
Tableau V-1 : Liste de phases des produits de corrosion des armatures dans un béton carbonaté et réalcalinisé des dallettes "A6"	133

Introduction générale

La corrosion des armatures est très souvent responsable de la dégradation des structures en béton armé. La corrosion peut survenir, soit lorsque des ions chlorure sont présents en quantité suffisante au niveau des armatures, soit lorsque le béton d'enrobage est carbonaté jusqu'aux armatures. Dans le domaine des monuments historiques, la carbonatation est la source la plus fréquente d'altération. Dans le domaine des ouvrages d'art, la corrosion des armatures dans un béton ayant subi une carbonatation est très répandue.

Lors du processus de carbonatation, le CO_2 atmosphérique réagit notamment avec la portlandite du béton pour donner du carbonate de calcium. La consommation de la portlandite conduit à une diminution de pH de valeurs voisines de 13 (pH du béton sain), jusqu'à environ 9 (pH du béton carbonaté). A ce niveau de pH, les aciers au carbone ne sont plus passivés, une corrosion de type généralisée peut survenir. La formation des produits de corrosion est un phénomène expansif (les oxydes de fer sont de 3 à 8 fois plus volumineux que le fer) qui va induire des fissures depuis l'armature vers le parement en béton et au fur et à mesure que la corrosion se développe, des épaufrures (ou éclats de béton) peuvent se produire. Lorsque la corrosion atteint un stade très avancé, la capacité portante de l'ouvrage peut être remise en cause et la sécurité des usagers peut se trouver mise en défaut.

Traditionnellement, une structure en béton armé dégradée par carbonatation est réparée localement. La réparation consiste en une purge du béton non adhérent, une reconstitution des armatures et/ou une repassivation des armatures et une reconstitution du béton d'enrobage. D'après le retour d'expérience, ce type de réparation conduit à l'éclatement du béton dans les zones non traitées contigues, environ 5 à 10 ans après. Ce phénomène a été attribué à un effet de pile entre les armatures contenues dans les zones traitées et non traitées. En ce qui concerne les zones réparées, la dégradation, lorsqu'elle se produit, survient en général, plus tôt, dans les deux premières années, en raison soit d'une formulation inadaptée du mortier de réparation, soit d'une mise en œuvre inadaptée.

La réalcalinisation est une technique de réparation différente, dite "électrochimique", dont l'objectif est de redonner au béton carbonaté un pH plus basique, afin de le rendre de nouveau protecteur pour les armatures. Bien qu'elle ne permette pas de s'affranchir de l'étape de reconstitution du béton d'enrobage, cette technique offre l'avantage d'éviter le phénomène

d'effet de pile. Elle permet également de traiter le béton dans les zones où la carbonatation a déjà atteint les armatures sans que des fissures ou épaufrures ne soient encore visibles.

Le traitement électrochimique de réalcalinisation est actuellement proposé en France selon les deux procédés suivants :

- un procédé par courant imposé (Novbéton® de la société RENOFORS).
- un procédé par anode sacrificielle (Régébéton® de la société FREYSSINET).

Dans le cadre de cette thèse, l'efficacité et la durabilité du traitement électrochimique de réalcalinisation par courant imposé et par anode sacrificielle ont été étudiées. Les principaux objectifs étaient les suivants :

- Apporter une meilleure connaissance et évaluer l'efficacité du traitement de réalcalinisation.
- Etudier l'éventuelle évolution de la matrice cimentaire et des produits de corrosion et vérifier si des effets secondaires se produisent.
- Vérifier la durabilité des traitements de réalcalinisation.
- Enfin, suivre un traitement de réalcalinisation sur un ouvrage, pour valider les expériences menées au laboratoire par un cas réel.

A partir des résultats de ces travaux, le but final est de proposer une méthodologie des essais à mettre en œuvre afin d'évaluer l'efficacité du traitement électrochimique de réalcalinisation dans la réparation des ouvrages d'art et la restauration des monuments historiques.

Ce mémoire comporte six chapitres :

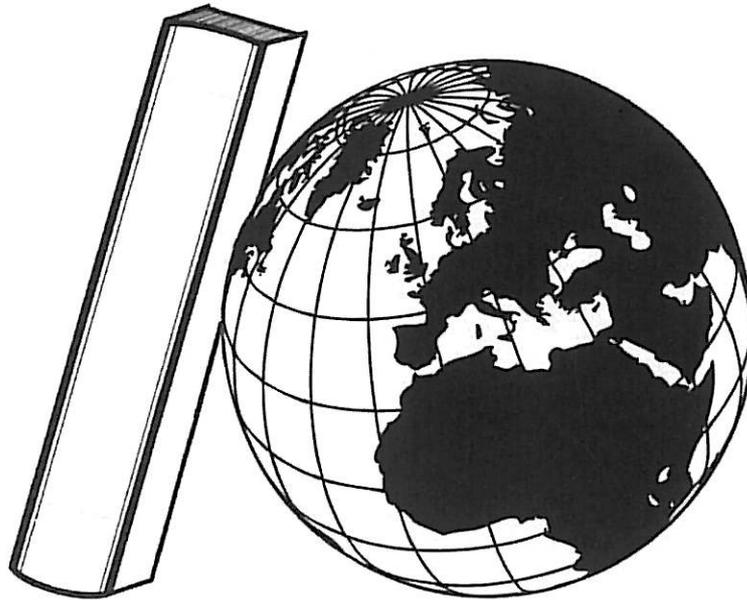
- Le *Chapitre I* consiste en une étude bibliographique qui porte, d'une part, sur l'activité de corrosion des aciers dans les bétons sains et carbonatés et, d'autre part, sur les traitements électrochimiques de réalcalinisation des bétons armés dégradés par carbonatation.
- Le *Chapitre II* rend compte de la fabrication des corps d'épreuve en béton et micro-béton armés ainsi que du vieillissement artificiel de carbonatation. Puis les techniques expérimentales analytiques et électrochimiques utilisées afin de quantifier l'efficacité des traitements de réalcalinisation, sont présentées.
- Le *Chapitre III* présente les protocoles d'essais développés au laboratoire, tels que la corrosion accélérée. La caractérisation électrochimique initiale des corps d'épreuve en

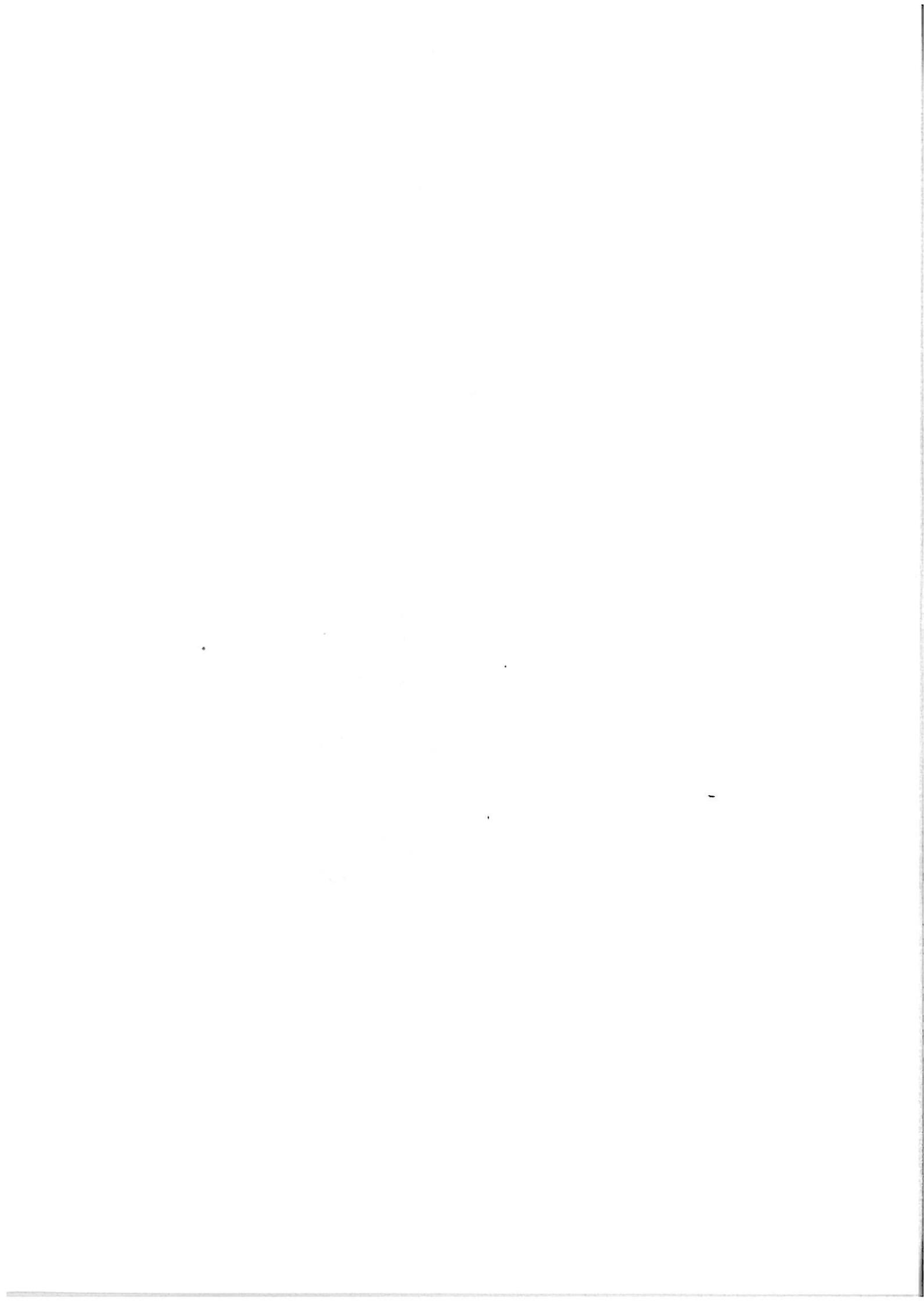
béton armé, ainsi que la mise en œuvre du traitement de réalcalinisation selon les deux procédés par courant imposé et par anode sacrificielle sont ensuite décrits.

- Dans le *Chapitre IV* sont exposés les résultats de l'étude réalisée sur des dalles de béton armées de 3 armatures ("A3") et artificiellement carbonatées. L'objectif était d'étudier l'efficacité de la réalcalinisation utilisée comme traitement de "maintenance" appliqué à un béton dont les armatures sont faiblement corrodées. La durabilité de cette "réalcalinisation-maintenance" a pu être évaluée jusqu'à deux ans et demi après la fin du traitement.
- Le *Chapitre V* présente les résultats de l'étude réalisée sur des dalles de béton artificiellement carbonaté dont les 6 armatures ("A6") ont subi une corrosion accélérée. Le but était d'étudier l'efficacité de la réalcalinisation utilisée comme traitement de "réhabilitation" appliqué à un béton dont les armatures présentent un état de corrosion plus avancée. Les résultats d'une étude complémentaire menée sur l'évolution de la nature des produits de corrosion observés "in-situ" à l'aide de la Microspectroscopie Raman sur des éprouvettes en micro-béton armé, sont également présentés.
- Enfin, le *Chapitre VI* décrit les essais de terrain menés lors de la réalcalinisation par courant imposé du Pont Camille de Hogues. Cet ouvrage, classé Monument Historique, enjambe la Vienne à Châtelleraut, et constitue le premier pont construit en béton armé à la fin du XIX^{ème} siècle par l'entreprise Hennebique.

Pour finir, les conclusions de ce travail sont mises en lumière et les perspectives de recherches complémentaires sont dégagées.

Chapitre I. Etude bibliographique





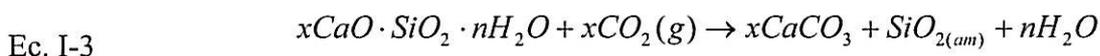
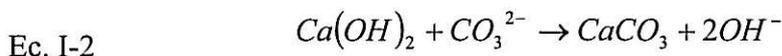
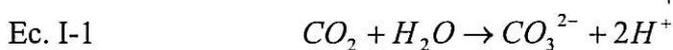
Ce premier chapitre bibliographique présente un descriptif de :

- La carbonatation du béton
- La corrosion de l'acier (état passif dans un béton sain ou actif dans un béton carbonaté) et les méthodes d'accélération de la corrosion d'armatures dans un béton
- La protection et la réparation des armatures dans un béton carbonaté par des techniques dites traditionnelles ou par des techniques plus récentes dites électrochimiques. Le traitement électrochimique de réalcalinisation est décrit de manière plus détaillée.
- Des techniques de caractérisation analytiques mais aussi électrochimiques qui permettent d'étudier l'efficacité et la durabilité du traitement de réalcalinisation.

I.1 La carbonatation du béton

I.1.1 La réaction chimique de carbonatation

La carbonatation est un phénomène chimique présent tout au long de la vie d'une structure en béton armé. Lors du processus de carbonatation, le dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique dissous dans la solution interstitielle du béton (Ec. I-1), réagit avec certains composés calciques tels que la portlandite $Ca(OH)_2$, notée "C-H" (Ec. I-2) et les silicates de calcium hydratés, notés "C-S-H" (Ec. I-3) pour donner du carbonate de calcium ($CaCO_3$).



Thiery et al. [1] ont observé que la carbonatation de la portlandite et des silicates de calcium hydratés est simultanée.

Chimiquement, la consommation de la portlandite conduit à une diminution de pH, de 12.5 jusqu'à environ 9. La carbonatation modifie également la structure poreuse et les propriétés du béton. Les carbonates de calcium sont insolubles et précipitent colmatant partiellement les

pores, et conduisant à une diminution de la porosité. Ainsi la perméabilité aux gaz et aux liquides diminue, les résistances mécaniques et le module d'élasticité augmentent.

I.1.2 Les paramètres influents de la carbonatation du béton

Plusieurs paramètres influencent l'avancement de la carbonatation dans un béton : la porosité du matériau, la quantité de minéraux susceptibles de réagir avec le CO_2 dans le matériau, la concentration en CO_2 dans l'atmosphère, l'humidité relative, la température, l'alternance de cycles d'humidification-séchage. Un béton dont le rapport eau sur ciment (E/C) est important va conduire à une porosité élevée ce qui facilitera le passage du CO_2 . Vénuat et Alexandre [2] ont montré que la progression de la carbonatation dans un béton de type Ciment Portland, noté CEM I, est facilitée lorsque le rapport E/C augmente. Il est reconnu aussi que l'utilisation d'un liant à base de cendres volantes, de laitier ou même de fumée de silice dans un béton accroît significativement la carbonatation par rapport un béton de ciment CEM I [3].

Concernant les paramètres de conditions extérieures, la vitesse de carbonatation à 20°C est maximale lorsque l'humidité relative est comprise entre 50% et 70% [4]. La valeur d'humidité relative de 60% est optimale : elle est assez faible pour permettre la diffusion du CO_2 et assez importante pour permettre la réaction de carbonatation.

I.1.3 Les essais de carbonatation accélérée

Divers auteurs [5] [6] ont mis au point des techniques pour accélérer artificiellement le processus de carbonatation. G. Villain et al. [6] ont proposé une amélioration du protocole AFPC-AFREM [5] en étudiant le prétraitement de séchage des éprouvettes qui conditionne leur teneur en eau. Avec une température de 60°C et une humidité relative de 65% pendant un mois (avec des variations lentes de la température pour éviter les chocs thermiques), la carbonatation se fait mieux et plus vite.

La technique la plus répandue pour identifier l'avancée du front de carbonatation est le test à la phénolphthaléine. La carbonatation peut aussi être étudiée par des techniques de détection plus fines telles que la thermogravimétrie (présence de carbonates) [7] et la gammadensimétrie (teneur en eau et porosité) [8].

I.1.4 Modélisation de la carbonatation

De nombreux modèles empiriques ont été développés en se fondant sur les profondeurs de carbonatation par test à la phénolphthaléine sur des éprouvettes de laboratoire carbonatées sous conditions accélérées ou sur carottes d'ouvrages [3]. Ces modèles se présentent sous la forme suivante:

$$\text{Eq. I-1} \quad X_c = At^\lambda$$

X_c correspond à l'épaisseur carbonatée (mm), t est la durée d'exposition (années) et λ est généralement pris égal à 0.5. A se rapporte à des données de type "matériau" (E/C, dosage en ciment, résistance mécanique, etc.). La valeur du coefficient A dépend d'un ensemble de facteurs liés aux caractéristiques du béton (le rapport E/C, la nature du ciment, etc.) et aux conditions environnementales (la concentration du dioxyde de carbone, l'humidité relative, etc.).

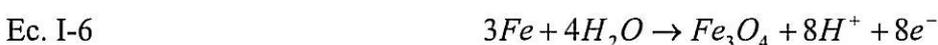
Thiery [3] dans sa synthèse bibliographique fait référence à plusieurs types de modèles : des modèles empiriques, des modèles physico-chimiques analytiques, le modèle analytique de carbonatation à front raide, le modèle semi-analytique de Bakker.

I.2 La corrosion de l'acier

I.2.1 Corrosion

Pourbaix [9] a étudié la corrosion de différents métaux en milieu aqueux à une température de 25°C. Le diagramme potentiel en fonction du pH du fer est illustré sur la Figure I-1. A noter que les deux droites (a) et (b) correspondent respectivement à l'oxydation et à la réduction de l'eau.

Il met en évidence différents domaines de corrosion, d'immunité et de passivation pour l'acier. En effet, l'oxydation du fer en milieu aqueux (à 25°C) fait intervenir 4 réactions principales :



Les Ec. I-4 et Ec. I-7 correspondent au phénomène de la corrosion tandis que les Ec. I-5 et Ec. I-6 traduisent celui de la passivation.

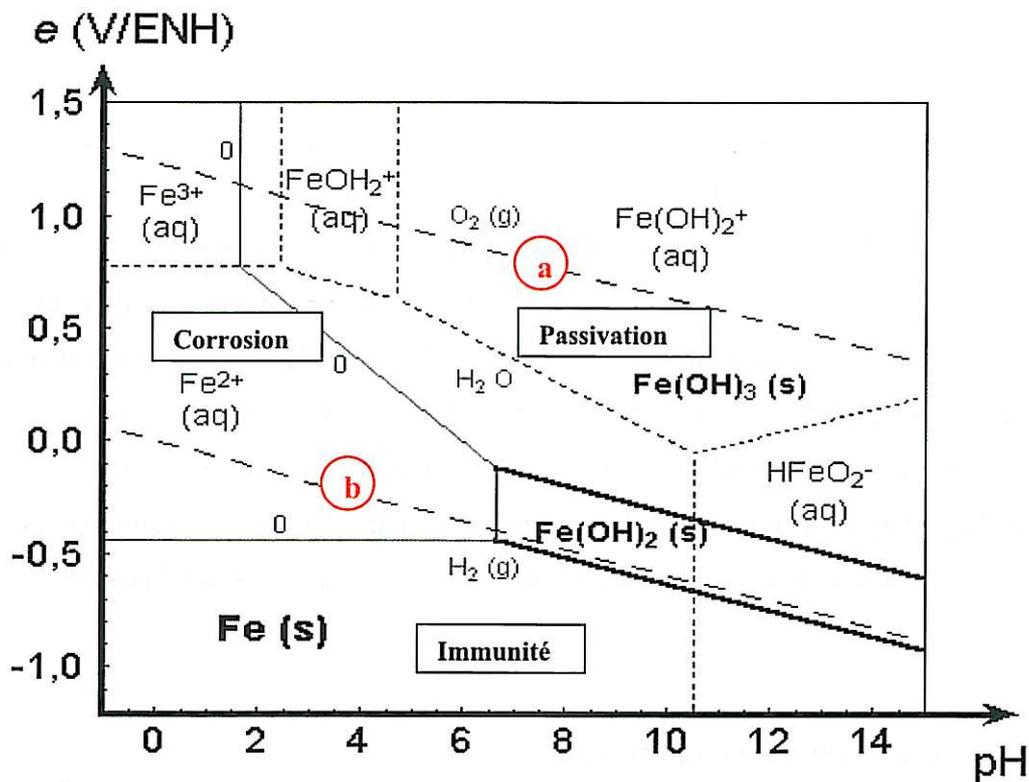
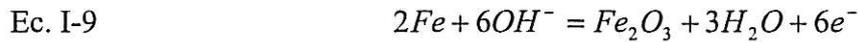
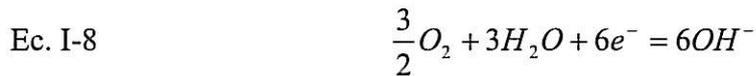


Figure I-1: Diagramme de Pourbaix Fe-H₂O à 25°C selon [9]

I.2.2 Acier passif dans un béton sain

Dans le cas du béton armé, la solution interstitielle contenue dans les pores d'un béton est en équilibre chimique avec les divers constituants du ciment hydraté. En présence d'une quantité importante d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ (typiquement 20% CaO) et d'alcalis tels que le sodium et le potassium (typiquement < 1% Na₂O et K₂O), la valeur du pH dans un béton sain est généralement comprise entre 12 et 13. Expérimentalement, le potentiel libre d'un acier, dans un béton sain de pH voisin de 12 et situé en immersion à faible profondeur où hors de l'eau, se trouve entre -300 mV et + 200 mV/ECS [10]. Ceci s'explique par une quantité importante d'oxygène dans la solution interstitielle. Dans ce domaine de potentiels, d'après le diagramme de Pourbaix (Figure I-1), l'acier est passivé. Sur la surface de l'acier, une fine couche compacte (quelques nanomètres), dite couche de passivation s'est formée. Elle est constituée essentiellement d'un oxyde trivalent isolant, de la forme Fe₂O₃ ou FeOOH [11]. La

formation de ce film passif résulte des réactions cathodique (Ec. I-8) et anodique (Ec. I-9) suivantes :



Un acier dit "passif" présente des vitesses de corrosion négligeables ($<0.1 \mu\text{m/an}$) [12] car la solubilité des oxydes formés est très faible.

La nature de ce film passif n'a pas encore été caractérisée avec une totale certitude. Elle dépend du pH, du potentiel de l'acier et de la teneur en oxygène du milieu. Lorsque les potentiels de corrosion sont inférieurs à -350 mV/ECS , le film passif est constitué d'une couche dense de magnétite (Fe_3O_4). Pour les potentiels très négatifs, la couche de magnétite peut s'hydrater partiellement et le fer à l'état d'oxydation +2 se trouve alors sous forme de $Fe(OH)_2$ [13], [14]. Pour les potentiels supérieurs, la magnétite peut se réoxyder sous forme d'un autre oxyde (maghémite $\gamma\text{-Fe}_2O_3$) ou hydroxyde de valence III ($Fe(OH)_3$) [10].

I.2.3 Acier actif dans un béton carbonaté

La corrosion de l'acier est un processus électrochimique qui peut se produire si les conditions suivantes sont réunies :

- L'électrolyte a une conductivité ionique non négligeable,
- une quantité suffisante d'oxygène accède à la zone cathodique,
- et la présence d'un environnement agressif, ici la carbonatation du béton (soit une solution interstitielle de $\text{pH} = 9$).

I.2.3.1 Mécanisme de la corrosion de l'acier dans un béton carbonaté

La carbonatation du béton entraîne une baisse de pH d'environ 12 à 9. L'acier dans ce milieu tend vers un potentiel représenté par le point B (le point A représente le potentiel d'un acier enrobé dans un béton sain) de la Figure I-2 et se trouve alors dans une zone de corrosion.

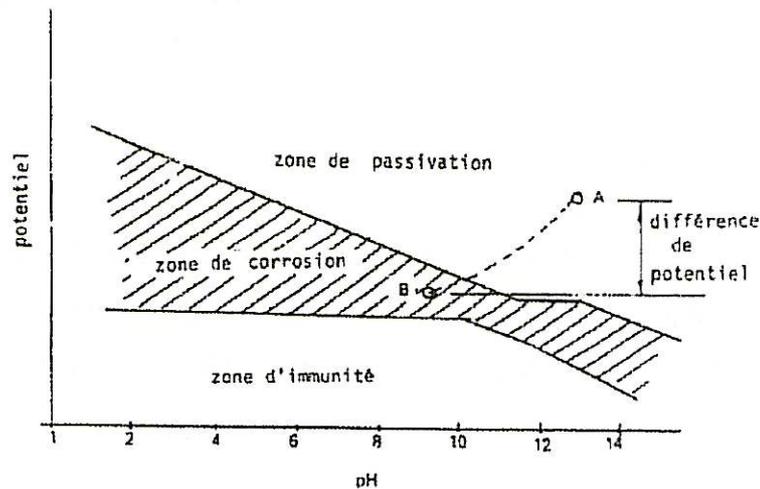


Figure I-2 : Influence du pH et du potentiel sur la corrosion de l'acier [15]

Les réactions anodiques et cathodiques de la corrosion due à la carbonatation sont décrites dans la Figure I-3 :

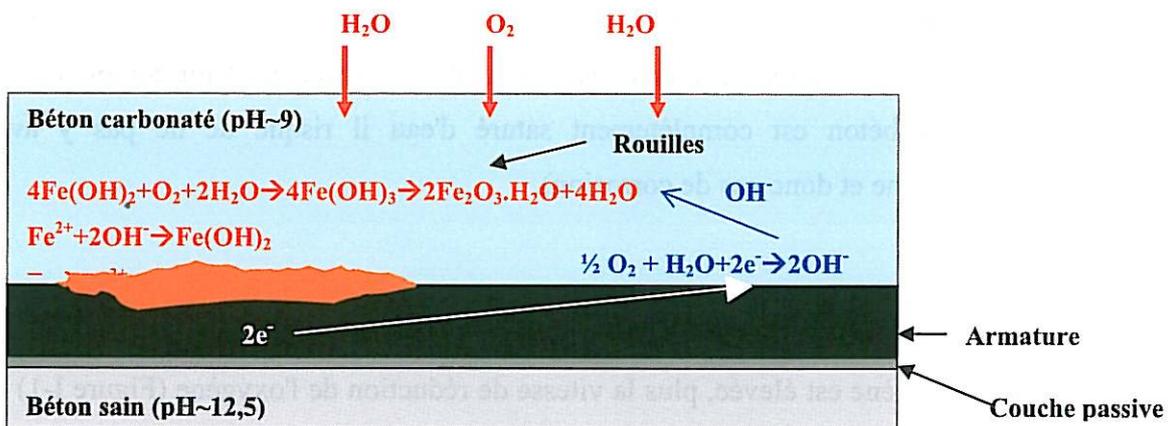


Figure I-3 : Mécanisme de la corrosion de l'acier dans un béton carbonaté [16]

Il s'agit d'une corrosion de type généralisée qui se traduira par une diminution du diamètre de l'acier et par la croissance d'oxydes de fer très expansifs.

Ces mécanismes d'altération sont particulièrement rencontrés sur les structures anciennes pour lesquelles les profondeurs d'enrobage des aciers sont faibles.

1.2.3.2 Causes aggravantes ou limitantes de la corrosion de l'acier dans un béton carbonaté

Le processus de corrosion de l'acier dans un béton carbonaté est contrôlé par les caractéristiques du béton ainsi que par les conditions environnementales (humidité, oxygène

et température) ; dans la majorité des cas plusieurs facteurs sont à prendre en compte simultanément (humidité et oxygène par exemple).

1.2.3.2.1 Matériau béton

Dans un processus de corrosion, assimilé à un circuit électrique, le béton joue le rôle d'une résistance (chute ohmique) [17]. Plus sa porosité est faible et sa compacité est grande, plus le milieu est résistif et il s'ensuit que le passage des gaz (O_2 , CO_2) est freiné.

1.2.3.2.2 Rôle de l'humidité

Les réactions de corrosion ne se produisent qu'en présence d'une solution qui est ici la solution interstitielle du béton. Si l'humidité du béton est faible, l'accessibilité des gaz est facilitée (notamment pour l'oxygène), ce qui conduit à des vitesses de corrosion peu élevées. Par contre, si l'humidité du béton est forte voire même si le béton est saturé en eau, alors le transport ionique s'effectue plus facilement. Toutefois, il faut également tenir compte du rôle de l'oxygène (si le béton est complètement saturé d'eau il risque de ne pas y avoir suffisamment d'oxygène et donc pas de corrosion).

1.2.3.2.3 Effet de l'oxygène

Plus la teneur en oxygène est élevée, plus la vitesse de réduction de l'oxygène (Figure I-1) est grande (réaction cathodique) et par conséquent la vitesse de la réaction de dissolution du métal peut l'être également. Parallèlement, plus la teneur en oxygène est élevée, plus le potentiel mixte du métal se déplace vers des valeurs de potentiel plus positives [18].

1.2.3.2.4 Influence de la température

La température joue un double rôle dans la dégradation par corrosion. Premièrement, plus la température est élevée, plus la mobilité ionique dans le béton et donc la vitesse de dissolution de l'acier sont augmentées. Deuxièmement, une diminution de la température peut occasionner des condensations d'humidité dans certaines zones de la structure en provoquant ainsi des différences d'humidité locales [19]. Par conséquent la vitesse de dissolution de l'acier dans le béton devrait être étudiée en prenant en compte les deux facteurs : l'effet de la température et celui de l'humidité externe [20].

1.2.3.3 Influence de la corrosion sur les propriétés mécaniques

Le béton présente une excellente résistance à la compression. Pour améliorer sa résistance à la traction, des aciers lui ont été intégrés. Ainsi une poutrelle en béton armé aura une flèche très inférieure à celle d'une poutrelle non armée. Toutefois, si les aciers se corrodent, l'interface acier/béton est modifiée et les propriétés mécaniques de la structure le sont également. Lorsque les aciers se corrodent, les produits de corrosion formés sont expansifs et leur volume est de 3 à 8 fois supérieur à celui de l'acier. S'ils ne sont pas solubles dans leur environnement, ils vont provoquer des contraintes qui vont engendrer des fissures depuis l'acier vers le parement béton. D'autre part, la corrosion de l'acier conduit à une diminution de section des aciers et donc à une fragilisation mécanique. Enfin, l'interface acier / béton est modifiée : dans un premier temps, l'expansion des produits de corrosion confère à l'interface un confinement accru qui augmente l'adhérence entre l'acier et le béton mais lorsque le processus de fissuration démarre, l'adhérence diminue voire devient inexistante [21]. Lorsque les fissures sont trop importantes, des épaufrures apparaissent et les aciers peuvent être mis à nu. Lors de la vie d'un ouvrage, les trois phases suivantes sont observables :

- la phase de diffusion qui est la période pendant laquelle le front de carbonatation pénètre l'enrobage de béton jusqu'aux aciers (et au delà). La corrosion peut alors démarrer.
- la phase de corrosion qui correspond à l'oxydation de l'acier, la formation des produits de corrosion expansifs et l'apparition des premières fissures.
- et la phase de détérioration qui correspond à la dégradation par corrosion de l'ouvrage en béton carbonaté. Pour des pertes de section importantes, la capacité portante de l'ouvrage est remise en cause et le risque non seulement pour la fonction de l'ouvrage mais également pour la sécurité des usagers doit être pris en compte dans le cadre d'une réparation (de maintenance ou de réhabilitation).

Par conséquent, le suivi de la corrosion est un paramètre nécessaire à la connaissance du cycle de vie d'un ouvrage et de sa gestion : prévention, maintenance ou réhabilitation.

1.2.3.4 Natures des oxydes de fer formés dans un béton carbonaté

Dans un premier stade de corrosion, lorsque le fer commence à se dissoudre, il se forme de l'hydroxyde ferreux $\text{Fe}(\text{OH})_2$, où le fer est divalent. Ensuite il va se transformer en des produits de corrosion qui ont une couleur verte, que l'on appelle la Rouille Verte, qui

comportent à la fois du fer divalent (Fe^{2+}) et du fer trivalent (Fe^{3+}). La Rouille Verte est très instable et donc très réactive. Elle s'oxyde instantanément en présence d'oxygène. Elle se transforme, par oxydation, en composés dans lesquels le fer est trivalent, qui sont la lépidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) ou la goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) [18].

Il est difficile d'analyser la nature des fines couches de produits de corrosion formés sur l'acier enrobé d'un béton. Les études de Duffo et al. [22] sur les aciers enrobés dans un béton carbonaté, âgé de 65 ans ont montré que les produits de corrosion sont composées de deux couches de différente nature : une première interne (plus âgée) composée essentiellement de magnétite et une seconde externe (plus récente) composée d'oxy-hydroxydes de fer, $\alpha\text{-FeOOH}$ (goethite) et $\gamma\text{-FeOOH}$ (lépidocrocite), probablement issus de la formation de la Rouille Verte ($\text{Fe}_x\text{O}_y(\text{OH})_z\text{Y} \cdot x\text{H}_2\text{O}$, où $\text{Y} = \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , etc.). Concernant la présence de magnétite, Duffo et al. pensent que, soit elle était présente initialement sur l'acier car elle s'était formée à l'atmosphère avant la réalisation de la structure en béton armé, soit cette phase s'était formée par réduction de la matrice d'oxy-hydroxyde de fer lors d'une période humide.

L'Hostis et al. [23] ont caractérisé les produits de corrosion d'échantillons de béton armé carbonaté ou non carbonaté, prélevés sur deux monuments historiques en France, âgés de 50 et 80 ans. Une couche de rouille épaisse, de 100 à 300 μm , est formée après une longue période de dégradation dans le béton. Les produits de corrosion sont essentiellement composés de goethite et de magnétite.

Les travaux de Huet et al. [24] ont identifié un mélange de magnétite (Fe_3O_4) et de lépidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) lors de la corrosion d'un acier dans une solution saturée de carbonate de calcium ($\text{pH} = 8.3$) simulant un béton carbonaté.

1.2.4 Accélération artificielles de la corrosion de l'acier dans un béton

Le processus de corrosion naturelle de l'acier dans un béton nécessite généralement des dizaines d'années et il dépend de nombreux paramètres. Aussi, pour mener à bien des études expérimentales dans des délais raisonnables, certains chercheurs ont proposé des méthodes de corrosion "accélérée" menées au laboratoire de manière tout à fait contrôlée dans le cas où l'agression est constituée par les ions chlorures. Il existe deux méthodes principales : la première repose sur des cycles climatiques et la seconde sur l'imposition d'un courant électrique (corrosion anodique).

1.2.4.1 La corrosion accélérée à l'aide de cycles climatiques

Le processus de corrosion dans un environnement de climat artificiel est supposé le même que celui de corrosion naturelle. Dans la littérature, 3 types d'essais sont proposés pour accélérer la corrosion d'un béton armé en présence d'ions chlorures [25].

- Essais dynamiques de brouillard salin. Les ions chlorures pénètrent dans le béton sous un gradient de concentration. Des cycles d'embruns, de séchage et de lavage sont appliqués aux échantillons de béton armé dans des enceintes fermées et contrôlées en température. Ces conditions d'essais sont représentatives des conditions d'exposition du béton dans les zones de marnage et d'embruns. Cette méthode représente donc la corrosion naturelle due à la présence des ions chlorures. Cependant elle est lente et demande un dispositif relativement compliqué. L'interprétation quantitative des résultats est difficile, étant donnée la complexité des phénomènes de transport impliqués. Un suivi régulier est également nécessaire afin de vérifier l'avancement de la corrosion.
- Essais par cycles immersion-séchage. L'objectif de cet essai est de favoriser le transport de l'eau et des ions chlorures dans le béton vers l'acier par les cycles d'humidification-séchage. On fait subir à l'échantillon des cycles de séchage (à 50°C) et immersion dans l'eau chlorée (à 20°C). Cette méthode est moins onéreuse que la méthode précédente mais le processus de pénétration de Cl⁻ dans le béton est non maîtrisé.
- Essais cycliques de gel-dégel. Ces essais combinés à l'aspersion d'une solution saline représentent la détérioration des tabliers de ponts en présence des sels fondants. La détérioration du béton favorise la pénétration des agents agressifs vers les aciers.

Le principal inconvénient de tous les essais précédents sur le béton armé est leur durée. Même avec un enrobage d'épaisseur 1 cm, la pénétration des ions chlorures est si lente que l'amorçage de la corrosion n'est observé qu'après quelques mois. Ensuite la corrosion se produit sous contrôle de la diffusion des ions.

1.2.4.2 La corrosion accélérée sous courant électrique

Dans les vingt dernières années, la méthode galvanostatique a largement été utilisée pour étudier l'impact du niveau de corrosion des aciers. Cette méthode consiste à accélérer la réaction anodique, d'oxydation du métal. Une densité de courant ou bien une tension

électrique est imposée entre l'acier à corroder (anode) et une contre électrode (cathode). Certains auteurs ajoutent des chlorures (CaCl_2 ou bien NaCl) dans le béton afin de réduire le temps nécessaire à l'amorçage de corrosion [26]. Caré et al. [27] pensent que la corrosion accélérée par courant imposé est similaire à la corrosion naturelle quand les ions chlorures sont présents dans la solution. La corrosion accélérée d'un béton armé dans l'eau pure conduit à un processus de corrosion plus compliqué.

Les avantages de cette méthode sont les suivants :

- elle est rapide et simple à réaliser ;
- elle permet d'estimer le taux de corrosion à l'aide de la loi de Faraday en supposant une efficacité totale de dissolution du fer à la valence 2 ou bien de prévoir ou contrôler l'avancement de corrosion par la variation de densité de courant et de durée du traitement :

$$\text{Eq. I-2} \quad \Delta r = \frac{M * J * t}{\rho * Z * F}$$

ici Δr est l'épaisseur de dissolution du fer en mètres, M est la masse molaire ($M = 55.85 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$), J est la densité du courant appliqué (A/m^2), t est la durée (t), ρ est la masse volumique du fer ($\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$), Z est le nombre de charges de l'ion Fe^{Z+} ($Z = 2$) et F est la constante de Faraday ($F = 96500 \text{ C/mol}$). Cependant Caré et al. [27] pensent que la corrosion des aciers respecte la loi de Faraday seulement quand l'échantillon est immergé dans une solution contenant des ions chlorures ;

- elle permet d'atteindre un taux de corrosion élevé en peu de temps (quelques heures peuvent suffire) ;
- et elle permet de générer une couche de rouille relativement homogène autour de l'acier [28].

Malgré tous ces avantages, d'un point de vue électrochimique, le processus de corrosion accélérée sous champ électrique est différent de celui observé dans un environnement naturel. Il conduit en effet à des produits de corrosion de différentes caractéristiques sur la surface de l'acier [28]. Néanmoins cette méthode est couramment utilisée pour étudier les effets mécaniques de la corrosion sur les comportements entre l'acier et le béton d'enrobage (faciès de fissuration) et le lien entre l'amorçage de la fissure, l'ouverture de la fissure et la réduction du diamètre d'acier.

Yuan et al. [28] ont comparé la corrosion accélérée par vieillissement climatique artificiel et celle générée sous champ électrique (imposition de courant galvanique) sur les mêmes poutres

en béton armé (100x1500x160 mm). Les conditions du vieillissement climatique artificiel dans leurs tests sont de 40°C, 80% HR, avec une solution saline à 5% NaCl et un cycle d'humidification et de séchage respectivement de 1 heure (pulvérisation) et 7 heures (lumière artificielle). Concernant la méthode galvanostatique, la poutre est d'abord immergée pendant 7 jours dans une solution saline (5% NaCl). La densité de courant imposée est de 10 A/m². Ils ont montré qu'il faudrait plus de 3 mois pour fissurer en vieillissement climatique au lieu de 3 jours par la méthode galvanostatique [28].

Sauf omission, la corrosion accélérée des armatures dans un béton simplement carbonaté ne fait l'objet d'aucune référence bibliographique et il va de soi que, dans le cadre de cette étude, il n'était pas envisageable d'utiliser les ions chlorure pour accélérer la corrosion. Il a donc fallu développer un procédé de corrosion accélérée sans ions chlorure pour corroder les armatures.

I.3 Protection, maintenance et réparation des aciers dans un béton carbonaté

Comme décrit précédemment, la corrosion de l'acier dans un béton carbonaté se traduit par le déplacement du potentiel du métal de la zone de passivation (point A) vers le triangle de corrosion (point B) du diagramme de Pourbaix (Figure I-4).

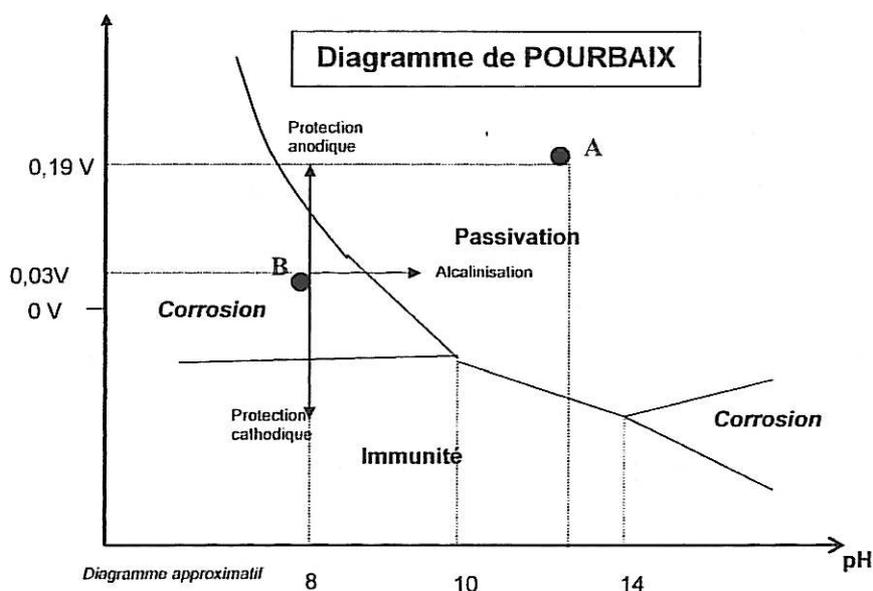


Figure I-4 : Possibilités de protection de l'acier dans un béton carbonaté illustré sur le diagramme de Pourbaix

Pour éviter ou diminuer la corrosion de l'acier, trois solutions sont possibles :

- Déplacer le point B vers le bas jusqu'à la zone d'immunité en abaissant le potentiel (Figure I-4). Il s'agit d'une protection cathodique ;
- Déplacer le point B vers le haut, dans la zone de passivation en augmentant le potentiel (Figure I-4). Cette méthode, dite protection anodique, repose sur le fait que le potentiel de l'acier est élevé par oxydation dans le domaine de passivation. Cela est réalisé par recouvrement d'une substance oxydante. En réalité sa mise en œuvre est quasiment impossible dans le béton car elle nécessite un désenrobage de l'acier par rapport au béton ;
- Déplacer le point B vers la droite, dans la zone de passivation (Figure I-4). Il s'agit de réalcalinisation.

D'un point de vue pratique, le stade de corrosion de l'acier et la qualité de l'enrobage du béton permettent de s'orienter vers des interventions telles que la prévention, la maintenance et la réhabilitation de l'ouvrage. Dans le cadre de cette thèse seuls les deux derniers aspects seront pris en compte.

Pour les structures en béton armé dégradé par carbonatation, la maintenance, la réhabilitation ou la restauration (monuments historiques) peuvent être réalisées soit de manière traditionnelle soit de manière électrochimique. Les traitements électrochimiques, d'utilisation plus récente, ne permettent pas de s'affranchir de la réparation traditionnelle car avant toute polarisation il faut s'être assuré de la continuité électrique des aciers et avoir reconstitué les enrobages de béton notamment dans les zones avec épaufrures. En revanche, le fait de polariser l'ensemble des aciers peut éviter l'effet de pile entre zone réparée et zone non réparée. Sachant que la corrosion de l'acier dans une ambiance humide est un processus électrochimique, une approche logique pour essayer d'arrêter ou de contrôler celle-ci semble être l'utilisation de méthodes fondées sur l'électrochimie telles que les inhibiteurs de corrosion, la protection cathodique et la réalcalinisation.

Les principes de ces diverses méthodes, leurs résultats de recherche et leurs applications aux ouvrages seront présentées dans cette section. Le traitement de réalcalinisation pour le béton carbonaté, faisant l'objet de ce mémoire, sera plus particulièrement développé.

I.3.1 Réparation traditionnelle

Lors d'une réparation traditionnelle¹ des ouvrages dégradés par carbonatation, les étapes suivantes sont réalisées [29] :

- Purge du béton dégradé et/ou non adhérent aux aciers (béton carbonaté, dégarnissage des aciers corrodés).
- Elimination des produits de corrosion des aciers sur toute leur circonférence.
- Remplacement des armatures fortement corrodées.
- Protection des armatures en appliquant sur leur surface un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion.
- Reconstitution du béton d'enrobage.

Bien qu'utilisée depuis plus de 25 ans, le retour d'expérience sur la réparation traditionnelle parfois qualifiée de "ragréages en patches" n'est pas satisfaisant. En effet, dans un délai de 5 à 10 ans, l'éclatement du béton d'enrobage va se produire sur des zones avoisinant les zones réparées, soit sur les zones réparées elles-mêmes. Dans le premier cas de figure l'explication proposée est basée sur l'effet de pile entre les armatures placées en zone réparée ou non. Dans le second cas, c'est souvent une mauvaise compatibilité des bétons d'enrobages appliqués sur l'ancien béton qui en est la cause.

I.3.2 Inhibiteur de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont des produits qui ralentissent ou réduisent la vitesse de corrosion de l'acier dans le béton. Un inhibiteur idéal est un composé chimique, qu'on ajoute au béton frais (lors du malaxage) ou durci (en surface), pour diminuer ou arrêter la corrosion de l'acier sans effets secondaires négatifs. Ils sont classés selon leur mode action, anodiques, cathodiques ou mixtes.

Toutefois, l'efficacité des inhibiteurs de corrosion appliqués à la surface du béton dans la diminution de la corrosion des armatures est encore sujet à discussion ([30] et [31]).

¹ Par traditionnelle, il faut comprendre habituellement utilisée

I.3.3 Protection cathodique

La protection cathodique des armatures dans un béton est un traitement appliqué de façon permanente qui permet de ralentir, voire d'arrêter la corrosion des armatures, grâce à l'application d'une polarisation qui abaisse le potentiel des armatures jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection qui est telle que la vitesse de corrosion de l'armature devient négligeable. La protection cathodique est décrite dans la norme NF EN 12696 et les critères de performance énoncés permettent de suivre l'efficacité du système lorsqu'il s'agit de courant imposé. La protection cathodique est souvent utilisée dans la réparation des ouvrages maritimes qui présentent diverses parties de leur structure dans des zones à teneur en chlorures différentes par exemple (zone atmosphérique, zone de marnage, zone d'immersion).

I.3.4 Réalcalinisation

I.3.4.1 Introduction

La corrosion des armatures dans un béton carbonaté est due à la diminution de pH de la solution interstitielle du béton. L'idée pour résoudre ce problème est d'augmenter le pH afin de restaurer des conditions favorables à la passivation. Quelques méthodes ont été étudiées [32] :

- La diffusion d'ions alcalins contenus dans des mortiers appliqués à la surface de béton vers les armatures a été utilisée en Finlande au début des années 80 [33]. Toutefois, la mise en œuvre de cette technique est très longue et elle est peu efficace.
- L'absorption par capillarité de solutions alcalines dans un béton sec et poreux a également été tentée. Mais la pénétration des alcalins est souvent insuffisante et le pH de la solution alcaline n'est pas assez élevé pour conduire à la repassivation de l'acier [32].
- Le traitement électrochimique de réalcalinisation a été proposé en 1976, aux Etats-Unis, par Slater et al. [34]. L'anode était constituée d'une grille de titane platiné et l'électrolyte utilisé était composé de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La tension et le courant élevés (entre 100 et 120 volts et 28 et 100 ampères) n'étaient alors pas raisonnables pour des applications pratiques. De plus, seules les surfaces horizontales pouvaient être traitées car l'électrolyte était liquide. La première application du traitement de réalcalinisation a été réalisée sur le bâtiment de la Norwegian Bank à Tromsø en Norvège en 1987

[35]. Suite à des développements successifs du traitement de réalcalinisation, ce dernier a été largement utilisé sur des bâtiments et des ouvrages d'art en béton armé depuis 1987 en Norvège [35]. La densité de courant utilisée était alors égale 1 A/m^2 de surface du béton (entre 1 et 5 A/m^2 d'acier) et l'électrolyte contenu dans une pâte cellulosique pouvait être appliqué sur des surfaces verticales. Les surfaces traitées par réalcalinisation sont ainsi passées d'environ 900 m^2 en 1988 à 63000 m^2 en 1993 [36].

1.3.4.2 Description du traitement électrochimique de réalcalinisation

Le traitement électrochimique de réalcalinisation nécessite une cathode, une anode et un électrolyte qui va rendre le béton suffisamment conducteur pour que le courant puisse circuler. Il peut être réalisé selon deux procédés différents ([37] [38]), soit en utilisant une alimentation électrique soit en utilisant une anode sacrificielle. Dans le procédé par courant imposé, un générateur de courant continu (ou alimentation électrique) débite la densité de courant choisie (en général 1 A/m^2 d'acier) entre la cathode (=armature) connectée au pôle négatif et l'anode connectée au pôle positif. Cette intensité de courant est constante pendant toute la durée du traitement qui est de l'ordre de 1 à 2 semaines en respectant la charge totale indiquée dans la spécification technique CEN/TC 14038-1. L'anode placée temporairement à la surface du béton, peut être constituée d'un treillis métallique en acier ou en alliage de titane. Après traitement, l'anode est déposée. Dans le procédé par anode sacrificielle, l'anode est directement connectée à l'armature : il n'y a pas de générateur électrique. C'est l'anode qui va se corroder en fonction de la demande de l'acier lui-même. Lorsque le couplage cathode/anode fonctionne, les intensités en courant galvanique débitées sont de l'ordre du mA et fluctuent avec le temps. Il faut mesurer le courant du couple galvanique pour déterminer la durée du traitement en prenant en compte la charge totale indiquée dans la spécification technique CEN/TC 14038-1. L'anode sacrificielle est en général un alliage d'aluminium ou de zinc. Il faut la changer lorsqu'elle s'est complètement consommée. Les électrolytes utilisés peuvent être de l'eau, du carbonate de lithium, mais plus généralement du carbonate de sodium, du carbonate de potassium... [39].

Lors de la mise en œuvre du traitement sur ouvrage et lors de sa dépose, il faut être vigilant quant aux points suivants [40]:

- Vérifier la continuité des armatures à traiter ;
- Etre vigilant sur les courts circuits qui pourraient se produire quand les réseaux électriques sont grands et compliqués ;

- Limiter la dimension de la zone d'anode à 50 m² de surface béton et le courant débité à 100 A ;
- Faire du monitoring (tension, courant) ;
- Protéger la solution électrolytique contre les variations climatiques (par exemple, soleil, pluie, vent, gel) ;
- Nettoyer le parement béton si l'anode en acier a laissé des traces (par ex).

A la fin du traitement, une application de mortier ou de peinture est parfois proposée en surface du béton afin de limiter la re-carbonatation ou pour soigner l'aspect esthétique.

En principe après le traitement de réalcalinisation, une maintenance n'est pas nécessaire. Cependant il est conseillé de procéder des inspections régulières (par exemple, tous les 5 ans) ou bien d'assurer un suivi en utilisant des capteurs noyés dans le béton [35].

I.3.4.3 Mécanismes du traitement électrochimique de réalcalinisation

L'objectif du traitement électrochimique de réalcalinisation est d'accroître le pH de l'interface acier/béton afin de diminuer et/ou de stopper le courant de corrosion en utilisant le passage d'un courant électrique au travers des aciers et la migration d'une solution alcaline depuis la surface externe du béton vers les armatures. Le but ultime étant de recréer une repassivation des armatures. Le traitement met en œuvre plusieurs phénomènes (Figure I-5) :

- Une réaction cathodique d'électrolyse de l'eau au niveau des armatures, permettant de générer des ions OH⁻ à l'interface acier/béton ;
- Un déplacement des ions (cations depuis l'anode vers la cathode et inversement pour les anions) ;
- Et la pénétration des ions alcalins depuis l'électrolyte vers l'enrobage de béton.

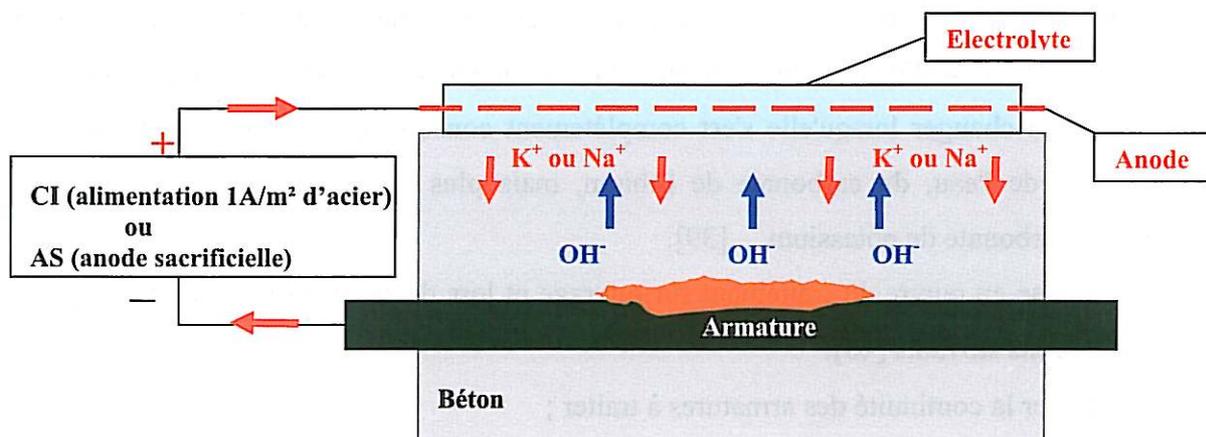


Figure I-5 : Schéma du traitement de réalcalinisation par courant imposé ou par anode sacrificielle

Le traitement électrochimique de réalcalinisation compte plusieurs processus physico-chimiques : l'électrolyse, la migration ionique sous champ électrique (électro-migration), l'électro-osmose, l'absorption capillaire et la diffusion. Les trois premiers mécanismes dépendent du voltage appliqué (courant appliqué), alors que l'absorption capillaire et la diffusion dépendent du gradient de concentration de l'électrolyte alcalin et de l'humidité dans le béton [35].

1.3.4.3.1 Electrolyse de l'eau

Le passage de courant entre la cathode (armature) et l'anode (contre électrode temporaire placée sur le parement béton) conduit à l'électrolyse de l'eau.

Autour de la cathode, les ions hydroxyles sont générés par la réduction de l'eau :



De plus, l'oxygène ayant diffusé dans le béton est réduit :



Dans le même temps, une réaction d'oxydation se produit sur l'anode à l'extérieur de l'ouvrage :



La formation d'ions hydroxyle (OH⁻) va conduire à l'augmentation de la valeur de pH autour de l'armature. Ceci pourrait rétablir la passivation de l'acier.

1.3.4.3.2 Electromigration

Pendant le traitement de réalcalinisation, le sens du courant électrique conduit à la migration des charges positives, les cations (tels que les alcalins Na⁺, K⁺), de l'anode vers la cathode et à l'inverse à la migration des charges négatives, les anions (OH⁻), de la cathode vers l'anode. Ce phénomène de migration ionique sous l'effet du champ électrique est appelé électro-migration ou électrophorèse. Selon plusieurs auteurs, 80% des ions hydroxyles créés se déplaceraient vers l'anode en surface et 20% participeraient à l'augmentation du pH autour des armatures [41]. Par conséquent, la proportion des ions OH⁻ qui migre vers l'anode conduit à l'augmentation du pH de l'enrobage béton. En parallèle la pénétration des ions alcalins pourrait jouer un rôle de stabilisation des ions hydroxyles.

1.3.4.3.3 *Electro-osmose*

L'électro-osmose consiste en un transport de masse (ions alcalins contenus dans l'électrolyte dans le cas du traitement de réalcalinisation), dans un matériau poreux, sous l'effet d'un champ électrique. La vitesse de transport (Eq. I-3) dépend des propriétés de l'électrolyte, du matériau (béton) et également de la tension appliquée [35].

$$\text{Eq. I-3} \quad V_e = -D\xi E / \eta$$

Ici D et η sont la permittivité diélectrique et la viscosité, E est l'intensité du champ électrique et ξ est le potentiel zéta sur l'interface solide/liquide.

Le béton peut donc être réalcalinisé par l'électrolyte contenant des substances alcalines (essentiellement des carbonates de sodium ou de potassium ayant une valeur de pH comprise entre 10.0 et 10.8).

Andrade [41] a observé la migration de la solution alcaline par électro-osmose au travers d'une épaisseur de béton de 50 mm en appliquant une différence de potentiel de 40 V entre les électrodes. Cette différence de potentiel peut être rencontrée dans le cas d'un traitement de réalcalinisation par courant imposé avec des densités de courant de l'ordre de 0.5 à 1 A/m² d'acier. Lors d'un suivi de traitement de réalcalinisation en laboratoire, Castellote et al. [42] ont mis en évidence un flux d'électro-osmose à l'aide de la technique de diffraction des neutrons.

1.3.4.3.4 *Absorption capillaire*

Les ions alcalins contenus dans l'électrolyte peuvent également pénétrer dans le béton qui est un matériau poreux par absorption capillaire. L'électrolyte ayant une valeur de pH supérieure à celui du béton carbonaté, sa pénétration pourrait engendrer une augmentation de la basicité du béton.

1.3.4.3.5 *Diffusion*

Les ions alcalins présents dans l'électrolyte peuvent pénétrer dans le béton par l'effet de diffusion, étant donné qu'il existe un gradient de concentration entre le parement et l'intérieur du béton.

Parmi les 5 processus physico-chimiques cités, Mietz [43] pense que l'efficacité du traitement de réalcalinisation dépend principalement des réactions électrochimiques autour des armatures (au niveau de la cathode). La pénétration des ions alcalins contenus dans l'électrolyte par électro-osmose, absorption capillaire et diffusion aurait une contribution peu importante dans l'augmentation du pH. Par contre, Andrade et al. [44] pensent que la réalcalinisation n'est efficace que si un flux d'électro-osmose se produit et arrive jusqu'aux armatures.

1.3.4.4 Textes réglementaires sur le traitement électrochimique de réalcalinisation

En Europe, le traitement de réalcalinisation a été commercialisé à la fin des années 1980. Il n'existe pas encore de norme dédiée à la réalcalinisation. Toutefois, le travail du Comité Technique CEN/TC 219 a donné lieu à la spécification technique CEN/TS 14038-1 [40] qui a été adoptée le 9 septembre 2004 pour application provisoire.

I.4 Etude de l'efficacité du traitement de réalcalinisation

I.4.1 Facteurs influençant l'efficacité du traitement électrochimique de réalcalinisation

L'efficacité du traitement de réalcalinisation est influencée par différents paramètres :

1.4.1.1 Le type de ciment

La plupart des essais en laboratoire ou des applications sur site citées dans la littérature concerne des bétons à base de ciment Portland. Lorsque les bétons contiennent des laitiers ou des cendres volantes, plusieurs auteurs ont observé que le traitement de réalcalinisation, pour être efficace, nécessitait des durées de traitement plus longues et des densités de courant plus importantes [45]. Pour des bétons à base de CEM III/B, Hondel et al. ont recommandé une charge totale de 350 A.h/m² comparativement aux 200 A.h/m² prévus dans le cas d'un ciment Portland (CEM I) [46].

1.4.1.2 Le niveau de corrosion avant traitement

Gonzalez et al. [47] ont montré que la présence de couches de corrosion en épaisseur importante pouvait limiter l'efficacité du traitement. Ils considèrent donc le traitement de réalcalinisation comme une technique de protection ou de prévention plutôt que de réhabilitation. Cependant, Mattila et al. [48] ont montré que la réalcalinisation ne se produit pas dans un béton non carbonaté et ils considèrent donc que le traitement de réalcalinisation ne doit pas être appliqué trop préventivement.

1.4.1.3 La charge totale de courant cathodique

Lors du traitement, elle est calculée à partir de la densité de courant cathodique et du temps de polarisation. Hondel et al. [49] constatent qu'une densité de courant plus importante augmente la quantité des ions hydroxyles créés. Yeih et al. [50] ont également montré que, dans le cas d'une réalcalinisation par courant imposé, l'augmentation de la densité du courant cathodique conduit à une remontée du pH plus importante. Mietz [43] a démontré, à l'aide d'indicateurs colorés, l'influence du temps de polarisation et de la densité de courant :

- Lorsque la durée de polarisation augmente, l'épaisseur de la zone réalcalinisée proche de la face sur laquelle l'électrolyte est appliqué augmente et la formation d'ions hydroxyles au niveau de l'armature augmente aussi.
- Lorsque la densité de courant augmente, l'épaisseur de la zone réalcalinisée proche de la face sur laquelle l'électrolyte est appliqué n'est pas significativement différente alors qu'au niveau des armatures elle augmente clairement.

Cependant une densité de courant trop élevée pourrait engendrer un effet d'échauffement indésirable voire même conduirait à une fissuration du béton. La spécification technique de la Rilem [40] suggère une densité de courant dans le domaine de 1 à 4 A/m² et une charge totale égale à 200 A.h/m² d'acier.

Nota : Le phénomène de fragilisation des armatures par la production d'hydrogène est évoqué dans le paragraphe 1.4.4.6.

I.4.2 Méthodes d'évaluation de l'efficacité du traitement de réalcalinisation

I.4.2.1 Caractérisations analytiques

I.4.2.1.1 Les indicateurs colorés

Les indicateurs colorés sont des composés (acide/base) qui changent de couleur selon le domaine de pH dans lequel ils se trouvent. L'indicateur coloré le plus utilisé pour la détection de la réalcalinisation est la phénolphthaléine. Celle-ci, pulvérisée sur un béton mouillé révèle une coloration incolore ou rose selon que la valeur de pH est inférieure ou supérieure à 9 (zone de virage 8.2-10.0 d'incolore à rose). La thymolphthaléine (9.4-10.6 d'incolore à bleu), qui présente une zone de virage à un pH supérieur à celui de la phénolphthaléine, est souvent utilisé de manière complémentaire.

D'autres indicateurs colorés ont également été testés, notamment par Sergi [39], afin de déterminer plus précisément l'évolution du pH du béton après le traitement (Tableau I-1).

Tableau I-1: Indicateurs colorés utilisés pour détecter l'évolution du pH du béton [39]

Indicateurs colorés	Changement de couleur	Valeur approximante de pH
Phénolphthaléine	incolore / rose	< 10
Thymolphthaléine	incolore / bleu	11
Jaune Titane	jaune / marron	12.5
Indigo Carmine	bleu / vert / jaune	13

Yeih [50] a utilisé le rainbow indicateur (RI-8000) qui dispose de plusieurs zones de virage : violet pour des pH supérieurs à 11 et rouge pour des pH entre 9 et 11. Toutefois ces couleurs peuvent parfois être difficilement détectables.

Enfin, il faut noter que les informations qualitatives obtenues avec les indicateurs colorés dépendent parfois du mode de prélèvement et de l'état hydrique du béton (scié, mouillé, broyé, etc...).

I.4.2.1.2 Détermination quantitative du pH d'un ciment ou béton

La détermination du pH uniquement à l'aide d'indicateurs colorés n'est pas complètement satisfaisante du fait qu'elle n'est que qualitative. Des mesures quantitatives de pH seraient plus intéressantes. Il existe trois méthodes principales dans la littérature pour mesurer quantitativement le pH d'un matériau cimentaire : l'extraction de la solution interstitielle du béton par compression, la mesure "in situ" et la mesure "ex situ" à partir de suspensions.

I.4.2.1.2.1 Extraction de la solution interstitielle du béton par compression

Longuet et al. [51] ont été les premiers à extraire la solution interstitielle d'un ciment par pression mécanique sans viser une détermination de pH. Ils voulaient étudier la composition de la solution interstitielle d'un ciment. Cette méthode d'extraction a ensuite été utilisée pour étudier le pH de la solution interstitielle dans un ciment ou un béton. Hidalgo et al. [52] considèrent que cette méthode est la façon la plus fiable de mesurer le pH de la phase aqueuse dans un ciment durci. Cependant cette méthode, très lourde, nécessite un équipement particulier (augmentation par palier de 10-20 MPa de pression jusqu'à arriver à 483 MPa (70 Psi), pression maintenue pendant 10 minutes dans le cas de Hidalgo et al. [52]) et une quantité importante de ciment.

Dans certains cas la quantité de liquide extraite n'est pas suffisante pour une mesure de pH et il est nécessaire de saturer en eau déionisée l'échantillon avant l'extraction. Hidalgo et al. [52] ont comparé 4 procédures de saturation :

- eau déionisée ajoutée 24h avant l'essai jusqu'à ce que l'échantillon semble saturé ;
- eau déionisée ajoutée juste avant l'essai jusqu'à ce que l'échantillon semble saturé ;
- quantité fixe d'eau déionisée (15% en masse de l'échantillon) ajoutée juste avant l'essai ;
- pas d'eau.

Après la saturation, l'échantillon est placé dans un cylindre et compressé par un piston dont la pression augmente graduellement. La solution interstitielle extraite s'échappe par des tuyaux placés à la base de ce cylindre (Figure I-6). Elle est collectée et conservée dans un conteneur étanche jusqu'à la mesure du pH par une électrode de pH (Metrohm 6.0235.100).

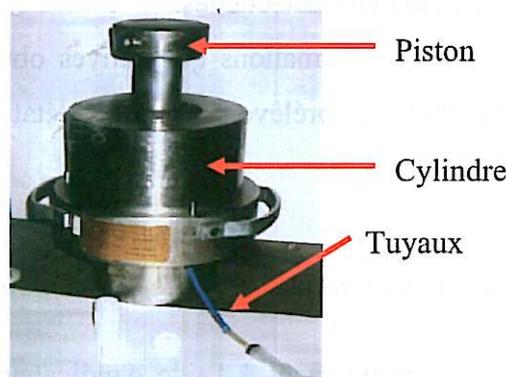


Figure I-6 : Cellule d'extraction de solution par pression [52]

La différence des valeurs de pH obtenues entre les 4 procédures n'excède pas 0.1 unité pour les liants à base de CEM I. En tenant compte du fait que la mesure de pH s'effectue avec une

précision de ± 0.05 unité, les pH obtenus sont fiables quelle que soit la procédure utilisée. La saturation des échantillons avant essai est donc intéressante pour pouvoir extraire une quantité de liquide suffisante pour la mesure de pH.

Dans le cas du béton, dont la résistance à la compression est nettement supérieure à celle d'une pâte cimentaire, cette méthode d'extraction est très difficilement transposable.

Malgré la complexité de mise en œuvre de cette extraction, ce sont bien les valeurs de pH ainsi déterminées qui sont considérées comme les plus proches de la réalité et elles seront souvent prises comme "référence" lors de comparaison avec d'autres méthodes de mesures.

I.4.2.1.2.2 Mesure "in-situ"

La méthode de mesure de pH "in-situ" a été développée par Sagüés et al. [53] et Li et al. [54]. Un échantillon de béton cylindrique ou cubique est au préalable conditionné pendant plus de 2 semaines à une température de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de 100%. Une petite quantité d'eau distillée est ensuite placée dans une petite cavité de forme cylindrique (5 mm de diamètre et 25 mm de profondeur) dans cet échantillon, qui reste exposé à 100% d'humidité relative. Cette cavité est isolée de l'air par un bouchon en caoutchouc. Le pH de l'eau dans la cavité est supposé se stabiliser et approcher celui de la solution dans les pores du béton au bout de 2 à 4 semaines [53]. Enfin, le pH est mesuré à l'aide d'une micro-électrode de pH.

Les valeurs de pH obtenues par cette méthode sont très proches de celles obtenues sur les solutions interstitielles extraites par compression (la différence entre leur valeur moyenne est inférieure à 0.08 unité) [53].

La principale limitation de cette méthode est la durée de l'essai (6 semaines) qui comprend le temps nécessaire au conditionnement de l'échantillon puis le temps d'équilibre.

I.4.2.1.2.3 Mesure "ex-situ" à partir de suspensions

La mesure "ex-situ" consiste à prélever une quantité du matériau cimentaire, le broyer et le mélanger avec de l'eau distillée afin d'obtenir une suspension. Le pH de la suspension est ensuite mesuré à l'aide d'une électrode de pH ou par titration après une procédure d'agitation. Räsänen et Penttala [55] ont essayé différentes proportions de poudre/mélange (de 10% à 80%) et durées de temps de mélange (de 1 minute à 1 semaine) qui montrent que le pH augmente avec la proportion de poudre dans le mélange avec l'eau distillée (Figure I-7a) et également le temps de mise en contact des poudres avec l'eau distillée (Figure I-7b).

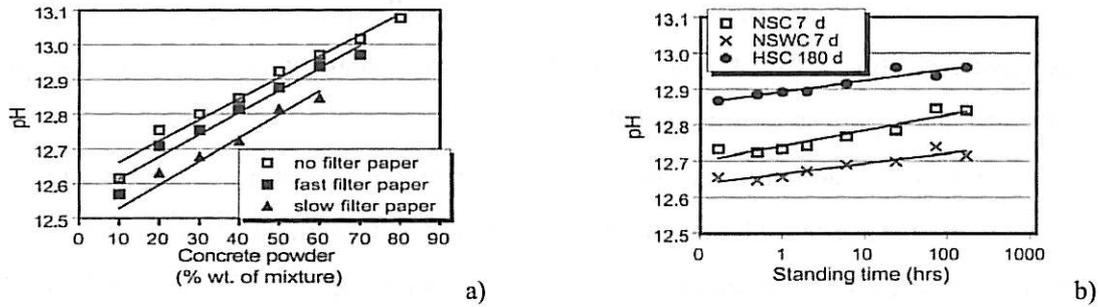


Figure I-7 : Effet de proportion de poudres dans le mélange a) et de temps de mélange b) sur la détermination de pH à partir de suspensions

Räsänen et Penttala [55] ont donc proposé une procédure de préparation très simple et rapide : une petite quantité d'échantillon (plus de 30 g) est d'abord broyée et tamisée le plus finement possible (plus les poudres sont fines plus la valeur de pH est élevée). Une proportion de poudre est mélangée avec de l'eau distillée (40% à 60% poudre/(poudre + eau)). Après 1 minute de temps d'équilibre, ce mélange est agité avec une vitesse de rotation de 35 rpm (rotations par minute) pendant 15 minutes. Dix millilitres de cette suspension sont ensuite versés dans un long tube en verre ou filtrés si nécessaire. Le pH est immédiatement mesuré à l'aide d'une électrode de pH ou par titration. Les résultats de cette méthode comparés à ceux de l'extraction de solution interstitielle par compression sont concordants : la différence entre la valeur moyenne des deux résultats est de 0.07 unité de pH, avec un écart-type de 0.27 unité pH quand la proportion de poudre est de 50%.

La méthode de mesure ex-situ à partir de suspensions permet de déterminer rapidement et simplement le pH d'un béton à condition d'avoir au préalable validé la quantité de poudre et le temps d'agitation. Les travaux de Räsänen et Penttala [55] ont vérifié la répétabilité de mesures de pH quantitatif à partir de suspensions sur un béton non carbonaté (CEM II 42.5R). L'écart-type est de 0.03.

Dans le cas du suivi de l'efficacité du traitement de réalcalinisation et de sa durabilité, les évaluations quantitatives de pH sont à ce jour, très peu utilisées. Dans les travaux de Yeih et al. [50], une méthode quantitative est proposée pour la détermination du pH d'un béton par titration à partir de poudres broyées, prélevées autour de l'acier (environ 2mm) afin d'étudier l'évolution du pH pendant le traitement de réalcalinisation avec différentes densités de courant et durées de polarisation. Les résultats sont indiqués dans le Tableau I-2.

Tableau I-2 : Valeurs de pH en fonction de la densité de courant et de la durée de polarisation [50]

Echantillons	Densité de courant appliquée (A/m ²)		
	0.80	1.20	2.00
Réalcalinisés pendant 7 jours	10.82	10.95	11.35
Réalcalinisés pendant 14 jours	10.96	11.16	11.49
Réalcalinisés pendant 21 jours	11.23	11.44	11.61
Témoin sain (non carbonaté)	12.58		
Témoin carbonaté	9.56		

1.4.2.1.3 Dosage des alcalins

Le dosage des alcalins ne fournit pas une indication directe de l'évolution du pH dans l'enrobage du béton. Toutefois, cette analyse est souvent utilisée comme un critère supplémentaire permettant de vérifier l'efficacité du traitement ([43] et [33]). Les profils obtenus présentent généralement une décroissance régulière de la teneur en alcalin en fonction de la profondeur : plus on s'éloigne de la face traitée, plus la concentration en alcalin est faible [33]. Il a été montré que la solution interstitielle du béton doit contenir une concentration minimale en électrolyte alcalin pour maintenir un pH suffisant et assurer la stabilisation des couches de passivation [56]. Dans le cas du carbonate de sodium, la concentration minimale en alcalin permettant de maintenir un pH de 10.5 à l'équilibre est d'au moins 0.5 mol/l.

1.4.2.2 Caractérisations électrochimiques

Les techniques électrochimiques permettent d'étudier l'état de corrosion des armatures enrobées dans le béton et de suivre en continu la vitesse de corrosion, de manière non destructive.

Dans les études de corrosion, les techniques électrochimiques reposent sur :

- les mesures de potentiel libre ;
- les mesures de résistance de polarisation ;
- et les mesures d'impédance.

1.4.2.2.1 Mesure de potentiel libre

Le potentiel libre de circuit ouvert, ou potentiel spontané, ou potentiel d'abandon ou encore de repos, est une différence de potentiel entre l'électrode de travail (armature) et une électrode

de référence. Dans la pratique, les électrodes de référence suivantes sont souvent utilisées parce qu'elles sont stables et reproductibles par rapport à l'électrode normale à l'hydrogène (ENH) :

- Cuivre-sulfate de cuivre saturé (ESC) +0.318V V_{ENH}
- Calomel (Hg/Hg₂Cl₂) KCl saturé (ECS) +0.242V V_{ENH}

La norme américaine ANSI/ASTM C876-91 [57] indique une probabilité de corrosion des armatures en fonction des potentiels libres mesurés (Tableau I-3). Plus le potentiel libre est négatif plus la probabilité de corrosion est importante.

Tableau I-3 : Valeurs de potentiel suivant l'ASTM C876-91 (E_0 du Calomel/ENH est de 242 mV)

Ecorr (mV) Calomel/KCl	Corrosion
> -126	Peu probable (< 10%)
entre -276 et -126	Incertaine
< -276	Probable (> 90%)

Toutefois, ces valeurs ne doivent en aucun cas être considérées comme des valeurs absolues car elles dépendent principalement de l'état du béton, à savoir mouillé ou non, avec ou sans oxygène, pollué ou non par les chlorures... (Tableau I-4).

Tableau I-4 : Intervalles typiques de potentiel Ecorr (en V_{ECS}) de l'acier dans un béton [58]

Béton	Ecorr / ECS (V)
Saturé d'eau, sans O ₂	-0.9 à -1
Mouillé, contaminé par des chlorures	-0.4 à -0.6
Humide, sans chlorure	+0.1 à -0.2
Humide, carbonaté	+0.1 à -0.4
sec, carbonaté	+0.2 à 0
sec	+0.2 à 0

Il est à noter que les mesures de potentiel libre ne fournissent aucun renseignement sur la vitesse de corrosion des armatures [58].

Dans le cas du suivi du traitement de réalcalinisation, la mesure du potentiel libre de l'armature ([39], [43], [41]) est largement utilisée en laboratoire et sur site.

1.4.2.2.2 Techniques d'évaluation de la vitesse de corrosion

Plusieurs méthodes permettent d'évaluer la vitesse de corrosion.

I.4.2.2.2.1 Courbes de polarisation stationnaires : droites de Tafel

La méthode la plus classique pour obtenir une vitesse de corrosion est d'analyser les courbes de polarisation stationnaires (intensité-potentiel) par la méthode des droites de Tafel (Figure I-8).

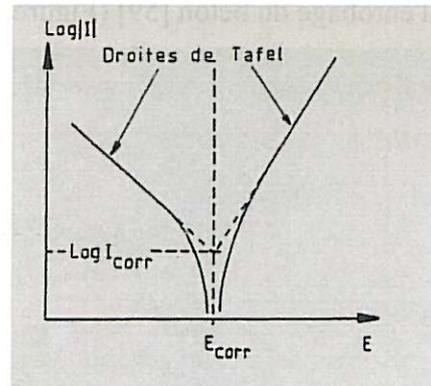


Figure I-8 : Courbe de polarisation stationnaire par la méthode des droites de Tafel [59]

La relation intensité - potentiel $I(E)$ est de la forme [59] :

$$\text{Eq. I-4} \quad I = I_{corr} \left[\exp(b_a (E - E_{corr})) - \exp(-b_c (E - E_{corr})) \right]$$

Cette relation n'est valable que si i) la cinétique de chacune des réactions (anodique et cathodique) est contrôlée par le transfert de charge (réaction la plus lente) dans tout le domaine exploré, que ii) la corrosion est homogène, et que iii) les aires des zones anodique et cathodique sont constantes en fonction du potentiel.

Dans le cas du béton armé, ces hypothèses ne sont pas vérifiées et l'Eq. I-4 ne s'applique donc pas (la réaction cathodique (réduction de l'oxygène) a sa vitesse partiellement ou totalement limitée par le processus de diffusion de l'oxygène dans le béton). De plus, un des inconvénients majeurs de la méthode est qu'au cours d'un tracé de courbe de polarisation sur éprouvettes en béton armé, l'état de la surface de l'armature ainsi que la composition du liquide interstitiel risquent d'être altérés de manière irréversible si les densités de courant et les quantités d'électricité mises en jeu sont trop importantes.

Pour ces raisons, cette méthode qui peut être destructive n'a pas été retenue.

I.4.2.2.2.2 Détermination de la résistance de polarisation linéaire

Les mesures de résistance de polarisation linéaire peuvent être obtenues par les techniques potentiostatique, galvanostatique et potentiodynamique [17]. La technique potentiostatique consiste à imposer une surtension constante au potentiel libre de l'électrode de travail. La

technique galvanostatique impose un courant constant aux armatures. La troisième technique qui est la plus couramment utilisée est expliquée ci-dessous.

La résistance de polarisation R_p est définie comme l'inverse de la pente de la courbe courant – tension stationnaire $I = f(E)$, au point de potentiel libre, corrigée de la chute ohmique due à la résistance de l'électrolyte et de l'enrobage du béton [59] (Figure I-9).

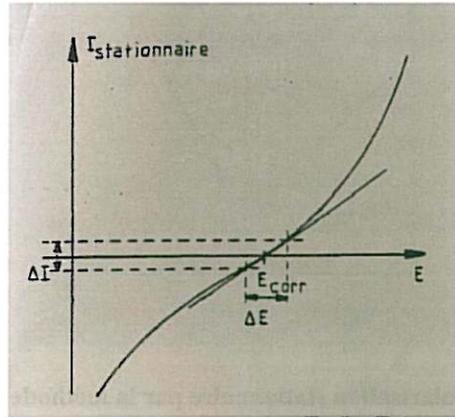


Figure I-9 : Courbe $I = f(E)$ au point de potentiel libre [59]

La relation entre la vitesse de corrosion et la résistance de polarisation linéaire est de la forme :

$$\text{Eq. I-5} \quad i_{corr} = \frac{B}{R_p}, \text{ avec } R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta I} \right)_{\Delta E \rightarrow 0}, \text{ et } B = \frac{\beta_a * \beta_c}{[2,3(\beta_a + \beta_c)]}$$

Ici $\beta_a = \frac{2,3}{b_a}$ et $\beta_c = \frac{2,3}{b_c}$ exprimés en V ou mV/décade (b_a et b_c sont définis dans Eq. I-4); B

est donc une constante qui vaut 26 mV pour l'état de corrosion actif et 52 mV pour l'état de corrosion passif. Ces valeurs de B ont été déterminées à partir des pentes de Tafel.

Expérimentalement, Stern et Geary [60] proposent de balayer une petite gamme de potentiel (5 à 10 mV) autour de la valeur du potentiel de corrosion, ce qui permet de ne pas perturber l'état de surface de l'acier pendant la mesure. La variation triangulaire du potentiel est imposée entre le métal et une électrode de référence et la réponse en courant est enregistrée entre le métal et la contre-électrode. Pour le système acier/béton, la réponse en courant n'est pas stationnaire même si les vitesses de variation du potentiel sont très faibles [61]. Il en résulte que la courbe n'est pas un segment de droite, mais une boucle (Figure I-10). Pour que cette mesure soit correcte, faut également veiller à ce que la vitesse de balayage soit assez faible (de 1 à 5 mV/min) pour ne pas perturber l'état électrochimique des armatures.

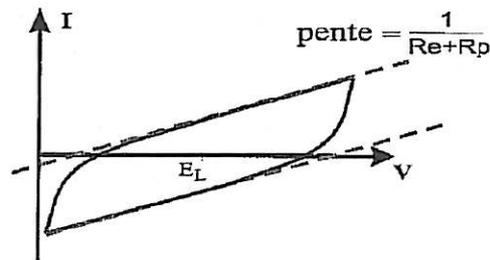


Figure I-10 : Boucle de relaxation [61]

La pente de cette courbe correspond à $1/(R_p+R_e)$ avec R_e qui est la résistance de l'enrobage et de l'électrolyte entre l'acier et la contre électrode. A la différence des bétons chlorurés, la valeur de R_e dans un béton carbonaté n'est pas négligeable et elle doit donc être déterminée à l'aide de la technique d'impédance électrochimique. Certains potentiostats permettent également de travailler en compensation de chute ohmique.

Dans le cas de la réalcalinisation, en laboratoire, plusieurs auteurs ([45], [47]) ont utilisé la méthode de la mesure de la résistance de polarisation linéaire qui a pour avantage de ne pas modifier l'état de corrosion des aciers durant la mesure, afin, d'une part, de quantifier la vitesse de corrosion et, d'autre part, d'évaluer l'état de corrosion (passif ou actif) des armatures. Yeih et al. [50] pensent que la vitesse de corrosion obtenue à partir de la résistance de polarisation est l'indication la plus fiable pour convenir d'une corrosion négligeable après le traitement de réalcalinisation. Cependant Pollet [45] indique que cette méthode n'apparaît pas appropriée pour évaluer l'état de corrosion après réalcalinisation.

Sur ouvrage, les vitesses de corrosion sont mesurées à l'aide de potentiostats de chantier de type GECOR6®, Galvapulse® ou Rapicor® [62]. L'application de la technique de mesure de la résistance de polarisation linéaire utilisée en laboratoire est difficile à exporter sur ouvrage car la longueur de l'électrode de travail (les armatures) est quasi-infinie comparée à celle de la contre-électrode et il y a donc une difficulté de prise en compte de l'aire réellement polarisée. Pour remédier à cette difficulté, diverses solutions ont été proposées [63] :

- Détermination de la longueur critique, L_{crit} , qui est définie comme étant la distance atteinte par environ 90% du courant appliqué à partir d'une petite contre électrode placée à la surface du béton.
- Utilisation d'une paire de contre électrodes de grande taille, qui minimisent l'effet de la longueur critique.

- Utilisation d'un anneau de garde "modulé" pour confiner le courant appliqué sur une aire prédéterminée [64] [65].

Une autre difficulté sur site est la prise en compte de l'influence des paramètres tels que la température et l'humidité relative qui influencent de manière non négligeable les processus de corrosion et donc les résultats des mesures.

Andrade et al. [63] ont proposé différents niveaux de corrosion allant de négligeable à élevé à partir de "valeurs seuils" de vitesse de corrosion corrélées à des pertes de masses (Tableau I-5).

Tableau I-5 : Domaine de valeurs de courants de corrosion proposé par Andrade et al. [63]

$i_{\text{corr}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$V_{\text{corr}} (\mu\text{m}/\text{an})$	Niveau de corrosion
<0.1	1	Négligeable
entre 0.1 et 0.5	1 et 5	Faible
entre 0.5 et 1	5 et 10	Modéré
>1	>10	Elevé

Dans ce tableau, les courants de corrosion (qui sont physiquement des densités de courant de corrosion) sont transformés en vitesse de corrosion, exprimées en μm par an, à l'aide de la relation de Faraday et la densité du métal. Pour l'acier, $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ équivaut à une vitesse de corrosion de $11.6 \mu\text{m}/\text{an}$ en attaque uniforme (Eq. I-6) [63] :

$$\text{Eq. I-6} \quad V_{\text{corr}} (\mu\text{m} / \text{an}) = 11.6i_{\text{corr}} (\mu\text{A} / \text{cm}^2)$$

Ces valeurs permettent de corréler la corrosion d'une armature à une perte de sa section, donnée importante pour établir les models.

I.4.2.2.3 Mesure de l'impédance électrochimique – détermination de Re

La méthode d'impédance électrochimique est basée sur l'application d'une faible variation sinusoïdale ΔV sur un large domaine de fréquence. La réponse à cette perturbation est une variation sinusoïdale ΔI du courant, déphasée par rapport à ΔE . Pour une perturbation $\Delta E \sin(\omega t)$ avec une réponse $\Delta I \sin(\omega t - \varphi)$, l'impédance électrochimique Z du système est définie par la relation :

$$\text{Eq. I-7} \quad Z = |Z|e^{j\varphi} = Z' + jZ'' \quad \text{avec } |Z| = \Delta E / \Delta I \text{ son module et } \varphi \text{ sa phase.}$$

La réponse électrochimique d'un métal en corrosion (Figure I-11a) est généralement modélisée à l'aide d'un circuit de Randles [66] avec C la capacité de double couche, R_T la résistance de transfert de charge (égale à la résistance de polarisation de Stern R_p si Z n'a

qu'une seule boucle capacitive) et R_e , une résistance en série attribuée à la résistance de l'électrolyte.

Dans le circuit de Randles (Figure I-11 a), les parties réelles Z' et imaginaires Z'' de Z sont de la forme:

$$\text{Eq. I-8} \quad Z' = R_e + \frac{R_p}{1 + \omega^2 C^2 R_p^2}$$

$$\text{Eq. I-9} \quad Z'' = \frac{-\omega C R_p^2}{1 + \omega^2 C^2 R_p^2}$$

Avec R_e la résistance de l'électrolyte, R_p la résistance de polarisation, C la capacité de double couche et $\omega = 2\pi f$ la pulsation de fréquence f . Pour les hautes fréquences, Z' tend vers R_e tandis que pour les basses fréquences ($\omega \rightarrow 0$) Z' tend vers la somme de R_e et R_p . Expérimentalement, les courbes d'impédance peuvent être représentées graphiquement sous la forme d'un diagramme de Nyquist (Figure I-11 b).

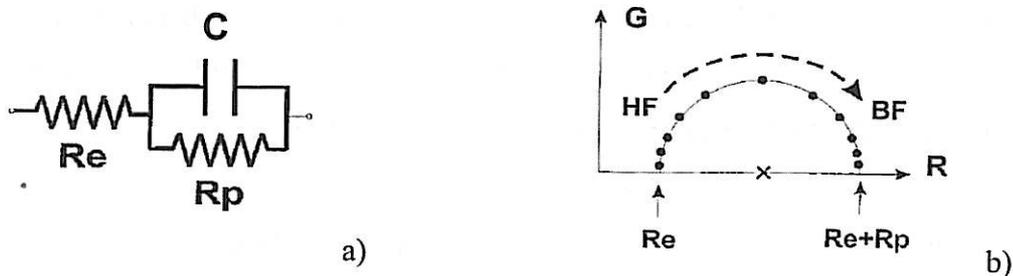


Figure I-11 : Circuit de Randles et le diagramme de Nyquist correspondant (G : -partie imaginaire ; R : partie réelle) [61]

En réalité, dans le matériau béton, les diagrammes d'impédance d'une armature d'acier peuvent avoir, suivant l'état électrochimique de l'armature, une allure proche ou extrêmement différente de celle prévue par le modèle de Randles. En particulier, Wenger [61] a constaté que certains diagrammes d'éprouvette à armatures dépassivées se composent de plusieurs arcs de cercles capacitifs déformés. Même dans les conditions où le diagramme se compose d'un seul arc de cercle, le centre de ce dernier n'est jamais sur l'axe des parties réelles comme le prévoit le modèle.

Depuis les années quatre-vingt dix, il est généralement admis que si le diagramme présente une boucle à très haute fréquence (supérieure au kilohertz), celle-ci caractérise les propriétés diélectriques du matériau béton soit dans son épaisseur soit au niveau de l'interface avec l'armature [67] [68]. La géométrie de la cellule de mesure a d'autre part une influence directe sur cette partie haute fréquence [69].

Les constantes de temps caractéristiques de la corrosion de l'acier se trouvent dans les gammes de fréquences moyennes (autour du hertz) souvent imbriquées avec la réponse du système redox interne aux produits de corrosion [70] ce qui conduit à une sous-estimation de la densité de courant de corrosion par sur-estimation de R_p .

Les études par mesures d'impédance électrochimique du béton et de ses armatures ont encore pour but de modéliser la réponse du système et il faut noter que la plupart sont réalisées au mieux dans des ciments (voire en solution) et non dans le béton lui-même.

Bien que cette technique permette en théorie de remonter aux différentes caractéristiques du système béton armature, nous ne l'utiliserons dans ce mémoire que dans le but de déterminer la résistance du matériau d'enrobage R_e .

I.4.2.2.4 Mesure de la résistivité électrique

La résistivité électrique du béton peut être mesurée de manière non destructive en plaçant les électrodes sur la surface du béton exposée à l'air. La résistance du béton correspond au ratio entre le voltage appliqué et le courant résultant. Avec un appareillage de mesure tel que le Gecor6®, la résistivité associée est obtenue suivant l'Eq. I-10 :

$$\text{Eq. I-10 : } \rho = 2 * R * D$$

où R (Ohm) est la résistance et D est le diamètre de la contre électrode du capteur (cm) de mesure.

Plusieurs appareils permettent la mesure de la résistivité : le Gecor6® et la méthode de Wenner également appelée "à 4 points".

La résistivité est influencée par plusieurs paramètres :

- l'humidité relative,
- la porosité de l'enrobage du béton,
- et la composition chimique de la solution interstitielle.

La résistivité augmente quand le béton est sec ou quand le béton est carbonaté particulièrement pour le ciment Portland. Les résultats obtenus avec le GECOR6 correspondent plutôt à un indicateur de pertinence des essais électrochimiques de terrain qu'à une mesure obtenue de résistivité :

- ainsi quand $\rho > 100 \text{ k}\Omega.\text{cm}$, le béton est trop résistif ;
- et quand $\rho < 5 \text{ k}\Omega.\text{cm}$, le béton est trop saturé en eau.

Il est à noter que la résistivité ne donne aucune indication sur les armatures et permet uniquement de caractériser le béton. Elle fournit cependant des informations complémentaires à celles obtenues par cartographie de potentiel et vitesse de corrosion et constitue un outil essentiel de diagnostic de terrain.

La relation entre la résistivité et la vitesse de corrosion n'est pas claire. La recommandation de la Rilem TC154 [71] donne cependant une correspondance entre résistivité et "risque de corrosion" (Tableau I-6).

Tableau I-6 : Risque de corrosion des armatures à partir de la résistivité du béton (20°C et ciment portland) [71]

Résistivité du béton $\rho_{\text{béton}}$ (Ωm)	Risque de corrosion
< 100	élevé
100 - 500	modéré
500 - 1000	faible
> 1000	négligeable

I.4.3 Efficacité du traitement électrochimique de réalcalinisation

L'efficacité d'un traitement de réalcalinisation repose, d'une part, sur une augmentation du pH et d'autre part, sur une diminution de l'activité de corrosion voire une repassivation des armatures.

En ce qui concerne la réalcalinisation du béton, trois zones peuvent être distinguées (Figure I-12) [72]:

- Zone A : localisée dans l'enrobage du béton entre la face où est appliqué l'électrolyte et la profondeur de migration de l'électrolyte. Dans cette zone, la migration de la solution alcaline dans le béton peut induire une remontée de pH (en fonction de la nature de l'électrolyte et de sa concentration).
- Zone B : localisée au niveau des armatures. Dans cette zone, la formation des ions hydroxyle permettrait de créer un anneau de réalcalinisation qui se développerait autour des aciers. Le pH du béton diminuerait en fonction de son éloignement par rapport aux aciers [49].
- Zone C : localisée entre les armatures et à l'arrière des armatures. Ces zones constitueraient des "zones d'ombres", éloignées des zones sous l'effet des migrations des ions et de l'électrolyse de l'eau, pour lesquelles le traitement de réalcalinisation n'aurait conduit qu'à une faible remontée de pH [45].

Remarque : il se peut que les zones A et B se rejoignent dans le cas où la pénétration de l'électrolyte et l'électromigration des ions hydroxyle sont suffisamment importantes.

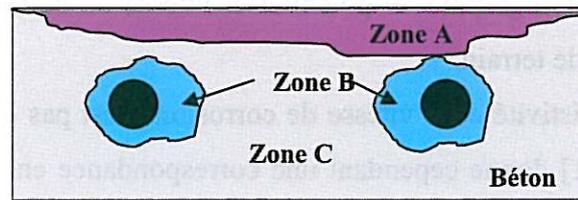


Figure I-12 : Zones distinguées de remontée de pH après le traitement de réalcalinisation

En ce qui concerne l'activité de corrosion des armatures :

- Juste après traitement, les potentiels mesurés sont généralement très négatifs (de l'ordre de -1000 mV/ESC) du fait de la polarisation des aciers pendant le traitement. Par ailleurs, lorsque toutes les armatures ont été polarisées, les valeurs de potentiel sont généralement très homogènes : les gradients identifiés avant la réalcalinisation et correspondant aux zones de corrosion active disparaissent.
- Quelques semaines après traitement, une remontée régulière des potentiels mesurés montre une dépolarisation progressive des armatures. Cette durée varie de quelques jours à quelques mois. Selon les essais d'Andrade [41], l'état actif des armatures après le traitement de réalcalinisation dure au minimum deux mois. Cet état apparent ne correspond pas à la réalité et il est probablement dû à une re-oxydation des produits de corrosion.
- Quelques mois après traitement, les potentiels se stabilisent vers des valeurs moins négatives, généralement autour de -200 mV/ESC [73]. L'essai d'Elsener et al. [73] sur site (une façade de 5×4 m d'un bâtiment construit en 1972) a montré que les valeurs du potentiel (après la dépolarisation) étaient décalées d'environ 250 mV vers les valeurs plus négatives. Ils expliquent que cette diminution du potentiel est due à deux effets : la diminution de résistivité du béton à cause de la solution de bicarbonate de sodium introduite dans les pores et l'augmentation d'alcalinité du béton autour des armatures.

Quant à l'éventuelle repassivation des armatures, différents auteurs ont abordé le problème. Elsener et al. [73] pensent que sur l'ouvrage l'homogénéité des valeurs de potentiel conservée après la dépolarisation des armatures pourrait être généralement considérée comme une indication forte d'une repassivation des aciers. En laboratoire Mietz [43] a montré une

repassivation des armatures dans un mortier carbonaté après un traitement de réalcalinisation de 7 jours en utilisant des polarisations galvanostatique et potentiostatique et en obtenant des courants de corrosion qui diminuent jusqu'à des valeurs négligeables. Gonzalez et al. [47] constatent que le traitement de réalcalinisation conduit à la repassivation des armatures si et seulement si le stade de corrosion des armatures n'est pas trop avancé. Castellote et al. [74] pensent qu'il est possible de restaurer la passivation des armatures si la charge totale passée pendant le traitement est suffisamment élevée après avoir observé une précipitation de portlandite sur l'interface acier/béton et pensent que les ions calcium proviennent de la dissolution de la calcite et de la vaterite ($\mu\text{-CaCO}_3$).

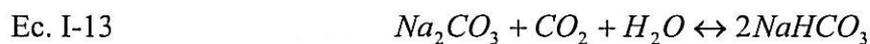
Enfin, certains auteurs ont tenté de corréler les critères de l'augmentation de pH et de la repassivation des armatures suite à un traitement de réalcalinisation. Il semble qu'il n'existe pas de réponse unique mais plusieurs réponses de degrés de fiabilité diverses. Andrade et al. [41] pensent que la repassivation de l'acier pourrait être atteinte même si la valeur de pH est inférieure à 11. Banfill [76] pense également qu'une basicité de 10.5 due à la pénétration de l'électrolyte Na_2CO_3 est assez élevée pour repassiver l'armature et empêcher la corrosion. Cependant il ne pense pas que cette repassivation soit durable sur le long terme. Miller [32] indique que lorsque le pH est supérieur à 9.5, la couche de passivation est stable à condition qu'il y ait très peu d'ions chlorure dans son environnement. Toutefois les expériences en laboratoire montrent qu'un acier immergé dans une solution de carbonate de sodium de 0.5 mol/L, qui a une valeur de pH entre 9 et 11, reste passivé [75]. Yeih et al. [50] suggèrent que si la valeur de pH atteint 11, alors le traitement de réalcalinisation peut être considéré comme efficace.

I.4.4 Influence du traitement de réalcalinisation sur le béton armé

Le traitement de réalcalinisation n'a généralement pas d'effet déterminant sur la qualité du béton et sur l'adhérence acier/béton. Cependant quelques effets secondaires peuvent être observés notamment sur :

1.4.4.1 La porosité du béton

La porosité volumique du béton diminue après le traitement de réalcalinisation car il se forme un dépôt de matière. Al-Kadhimi et al. [77] ont montré une densification du béton due à ce type de dépôt pendant le traitement et un déplacement de la distribution des pores vers des tailles plus petites. Yeih et al. [50] ont utilisé les techniques de mesure de résistivité du béton et d'absorption d'eau sur des échantillons de bétons sains, carbonatés et réalcalinisés afin de vérifier l'évolution de réseaux poreux. Ils ont montré que la résistivité du béton augmentait et que l'absorption d'eau diminuait après le traitement de réalcalinisation et pensent que cela est dû à la réaction chimique suivante [50] :



Banfill [76], à l'aide de porosimétrie au mercure, a mis en évidence un effet de densification des pores plus important sur le béton près de la cathode que de l'anode.

1.4.4.2 Les propriétés mécaniques du béton

Al-Kadhimi et al. [77] ont montré que la contrainte à la compression et à la flexion, le module dynamique d'élasticité et la vitesse d'ultrason dans le béton augmentent tous après la réalcalinisation. Ils pensent que ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse que la réalcalinisation densifie le béton.

1.4.4.3 L'adhérence acier/béton

Lors du traitement de réalcalinisation, l'accumulation des espèces cationiques (ions alcalins) dans le béton autour des armatures peut provoquer une modification chimique de la matrice cimentaire et ensuite affaiblir l'adhérence entre le béton et l'acier.

Yeih et al. [50] ont montré que l'adhérence acier/béton augmente après le processus de carbonatation mais qu'elle diminue au fur et à mesure du processus de réalcalinisation quand la charge totale de courant augmente. Toutefois, cette adhérence après traitement étant toujours plus élevée que celle d'un témoin en béton sain, ils pensent que l'effet de "softening" dû à la réalcalinisation n'est pas important.

Au contraire Al-Kadhimi et al. [77] ont montré que l'adhérence acier/béton double après la carbonatation et double encore après le traitement de réalcalinisation, ce qui peut être

expliqué par le fait que la densification du béton autour des armatures augmente l'adhérence entre l'acier et le béton.

1.4.4.4 Les produits de corrosion

Très peu de recherches ont été menées sur l'évolution de la nature des produits de corrosion après le traitement de réalcalinisation. Selon la documentation technique du procédé NORCURE[®], les couches d'oxydes de fer (hématite) présentes en surface des armatures sont transformées en magnétite après le traitement de réalcalinisation.

1.4.4.5 La réaction alcali-granulat (RAG)

La réaction alcali-granulat (RAG) est une réaction chimique qui peut se produire entre la solution interstitielle du béton et certaines phases présentes dans les granulats dits "réactifs". Une teneur élevée en ions alcalins dans un béton sain peut conduire à l'initiation ou à l'accélération de la RAG qui conduira à la formation d'un gel expansif délétère autour des granulats. Toutefois, la réaction alcali-granulat ne se produit que sous certaines conditions :

- Présence de granulats alcali réactifs
- Présence d'humidité
- Présence d'alcalins.
- Valeur de pH élevée. La RAG ne se produit que dans un environnement très basique.

La valeur minimum de pH est de l'ordre de 12 [76].

Lors du traitement de réalcalinisation, les ions alcalins présents dans l'électrolyte pénètrent dans le béton et le pH de la solution interstitielle augmente. Certains auteurs se sont donc posé la question du risque d'une réaction alcali-granulat dans un béton armé réalcalinisé.

Les essais d'Al-Kadhimi et Banfill [78] ont montré qu'un alcali/silica ratio entre 0.01 et 0.05 pouvait engendrer la réaction alcali-granulat dans un béton non carbonaté.

Al-Kadhimi et Banfill ont montré également que l'expansion due à la réaction alcali-granulat dans un béton artificiellement carbonaté est inférieure à celle enregistrée avec le même béton non carbonaté. Après la réalcalinisation, l'expansion diminue encore [78]. Les auteurs expliquent que la formation de gel alcali-silice n'est possible qu'en présence d'ions calcium et hydroxyle. De plus, la concentration des ions OH⁻ doit dépasser un critère de 250-500 mM/l. La transformation de la portlandite en calcite au cours du processus de carbonatation réduit le développement de la réaction alcali-granulat. Selon leurs essais, le risque d'expansion n'a pas

augmenté après réalcalinisation même si des ions OH^- sont de nouveau créés dans l'enrobage du béton.

Il semble donc que la RAG ne concerne ni les bétons carbonatés ni les bétons réalcalinisés. Dans ce dernier cas, la solution de carbonate de sodium introduite dans le béton a une valeur de pH d'environ 10.5 qui n'est pas assez élevé pour activer la réaction alcali-granulat [32].

Enfin, des électrolytes à base de lithium ont été développés afin de limiter les risques d'apparition de réactions alcali-granulat. Sergi [39] pense que le lithium est un inhibiteur de la réaction alcali-granulat.

1.4.4.6 Fragilisation des aciers de précontrainte en pré- et post-tension

La production d'hydrogène gazeux au niveau de la cathode (= armature) peut fragiliser les aciers particulièrement dans le cas d'acier de précontrainte [76]. Le risque de fragilisation des armatures par l'hydrogène augmente très vite lorsque la densité de courant cathodique est supérieure à 0.5 A/m^2 [73]. Miller conclut que la production d'hydrogène n'est pas un problème pour les structures en post-tension mais qu'il faut faire particulièrement attention aux structures en pré-tension (par exemple, décharger la structure pendant le traitement ou limiter les potentiels sur les armatures précontraintes jusqu'à ce qu'ils ne produisent plus de H_2).

1.4.4.7 Efflorescences et coloration du béton

Une coloration jaune du béton a parfois été observée autour des armatures. Celle-ci serait liée à l'hydratation de grains de laitiers résiduels sous l'action des ions hydroxydes [49]. En parement béton, des efflorescences d'électrolyte alcalin peuvent également apparaître après traitement [49]. Enfin l'anode en acier peut laisser des traces de rouille sur le parement qui peuvent être nettoyées avec un certain succès.

1.4.5 Durabilité du traitement de réalcalinisation

Théoriquement la réalcalinisation du béton armé devrait être durable dans le temps.

D'un point de vue chimique, lors de la réalcalinisation, la portlandite n'est pas recréée. Donc les espèces présentes dans le béton ne se consomment pas en réagissant avec le CO_2 atmosphérique, excepté le carbonate de sodium ou de potassium (provenant de l'électrolyte)

qui peuvent former des bicarbonates de sodium ou de potassium (Ec. I-13). Cette réaction n'induit, toutefois, qu'une faible diminution de pH, sans réelle influence sur la basicité de l'enrobage de béton. Par ailleurs, Mattila et al. [48] pensent que l'acidification du béton réalcalinisé se produira selon la réaction $OH^- + CO_2 \rightarrow HCO_3^-$ et diminue le pH, nuisible à la durabilité de ce traitement. Néanmoins qu'il s'agisse de carbonatation de l'électrolyte ou de carbonatation des ions OH^- (générés par la réalcalinisation), le pH résiduel du béton reste élevé et propice à la protection des armatures [43].

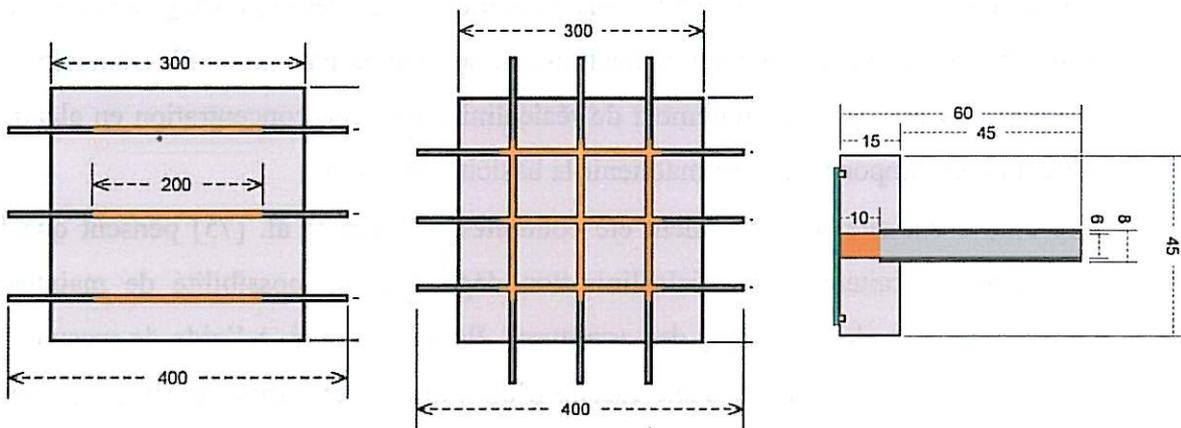
D'un point de vue physique, la diminution de la porosité et de la perméabilité du béton, après réalcalinisation, crée une barrière physique contre la pénétration des agents agressifs tels que le CO_2 atmosphérique [77].

Peu de travaux concernant la durabilité du traitement de réalcalinisation ont été publiés :

- Des études menées en laboratoire ont été réalisées. GHD Materials Technology a effectué une campagne de mesures de vitesse de carbonatation sur un béton réalcalinisé. Les tests (exposition sous condition d'accélération CO_2 pendant 100 semaines) montrent que le béton réalcalinisé ne se re-carbonate pas [79]. Odden [56] a déterminé, 4 ans après le traitement de réalcalinisation, une concentration en alcalins suffisamment importante pour maintenir la basicité du béton.
- Des études sur site ont également été conduites. Elsener et al. [75] pensent que la durabilité du traitement de réalcalinisation dépend de la possibilité de maintenir l'environnement alcalin autour des armatures. Ils ont observé, à l'aide de mesure de potentiel, que les armatures d'une façade d'un bâtiment construit en 1972, restaient dans un état passif deux ans après traitement [73]. A partir de mesures de potentiels électrochimiques, Miller [32] constate une bonne efficacité de la réalcalinisation, sur le bâtiment central de 13 étages du "Norwegian University of Science and Technology", 8 ans après le traitement. A partir d'observations visuelles, cette fois, Miller [32] ne constate pas d'endommagement sur le bâtiment "NEWKO" à Oslo, 13 ans après le traitement de réalcalinisation.

Néanmoins d'autres auteurs se montrent plus réservés quant à la durabilité de l'efficacité du traitement de réalcalinisation : Mietz [43] a observé que la couche passive des armatures, générée par réalcalinisation, est détruite 3 mois après traitement (augmentation du courant de corrosion). Pour des bétons contenant des laitiers ou des cendres volantes, Pollet [45] a également mis en évidence des durabilités faibles de l'efficacité du traitement.

Chapitre II. Programme expérimental



Ce deuxième chapitre présente, tout d'abord, la description, la fabrication et le vieillissement par carbonatation artificielle accélérée des corps d'épreuve en béton armé (dallettes) et en micro-béton (mini-éprouvettes) utilisés dans cette étude. Puis, il décrit les techniques d'études qui ont servi à évaluer l'efficacité et la durabilité du traitement de réalcalinisation à l'aide, d'une part, de caractérisations analytiques et, d'autre part, de caractérisations électrochimiques.

II.1 Corps d'épreuve

Dans le cadre de cette étude, 2 types de corps d'épreuve ont été confectionnés :

- des dalles fabriquées en béton armé ;
- et des mini-éprouvettes réalisées en micro béton armé.

II.1.1 Formulation de béton et microbéton

Les formulations utilisées sont détaillées dans le Tableau II-1.

Tableau II-1 : Formulation du béton et du microbéton (kg/m³)

Composants	Granulats								Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Rapport e/c
	0/0.315	0.315/1	0.5/1	1/4	2/4	4/8	8/12	12.5/16			
Béton	149	277	180	170	57	324	265	473	275	192.50	0.70
	0/0.315	0.315/1	0.5/1	1/4	2/4						
Micro-béton	159	295	192	686	229			387	251.55	0.65	
	0/0.315	0.315/1	0.5/1	1/4	2/4						

La formulation du béton des dalles répond à un rapport eau sur ciment égal à 0.7 et un dosage en ciment de 275 kg/m³, selon la norme NF EN 1766. Il a été choisi de qualité "moyenne" de manière à pouvoir le faire vieillir par carbonatation artificielle dans des délais compatibles avec l'étude (de l'ordre de 3 à 4 mois). La formulation du micro-béton a été choisie de manière à approcher au mieux la distribution granulaire du béton. Il s'ensuit que le rapport eau sur ciment est de 0.65 et que le dosage en ciment est égal à 387 kg/m³.

II.1.1.1 Ciment

Le ciment utilisé pour la confection des corps d'épreuve est un ciment Portland CEM I 42.5R dont les compositions chimiques et de Bogue sont indiquées respectivement dans le Tableau II-2 et le Tableau II-3.

Tableau II-2: Composition chimique du ciment utilisé

CEM I 42.5 R	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
	23.8%	4.0%	1.4%	65.4%	0.8%	2.8%	0.7%	0.2%	<0.1%

Tableau II-3 : Composition de Bogue du ciment utilisé

CEM I 42.5 R	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
	49.1%	31.2%	8.2%	4.4%

Les pourcentages de sulfate et de chlorure sont inférieurs aux seuils de risque de réaction sulfatique (3%) et de corrosion due aux chlorures (entre 0.14% et 3% dans la littérature [19]).

II.1.1.2 Granulats

Des granulats non réactifs vis-à-vis de la RAG, provenant des sablières de Palvadeau ont été sélectionnés. Quatre classes granulaires de sable (0/0.315, 0.315/1, 0.5/1, 1/4) et 4 classes granulaires de gravillons (2/4, 4/8, 8/12 et 12.5/16) ont été utilisées.

II.1.1.3 Armatures

Une multitude d'armatures sont actuellement utilisées sur chantier (lisses, haute adhérence...). Afin de simplifier les paramètres de cette étude, des armatures de type rond lisse FeE235 (0.22% de carbone), de diamètre nominal de 8 mm, ont été sélectionnées et usinées à un diamètre précis de 6 mm. Cette valeur de diamètre constant est importante pour les calculs de surface d'acier et de densité de courant de corrosion. La surface d'acier à étudier est délimitée par l'application sur les deux extrémités des armatures d'une peinture de cataphorèse qui sert de revêtement anticorrosion. La cataphorèse est ensuite recouverte d'une gaine thermorétractable de manière à ce que les granulats ne rayent pas la peinture lors de la vibration du béton.

II.1.2 Dallettes en béton armé

Deux types de dallettes ont été confectionnés :

- des dallettes "A3" comportant 3 armatures dont la corrosion n'est pas encore trop avancée. Sur ces dallettes, l'objectif est de qualifier les traitements de réalkalinisation d'un point de vue de la réparation au stade de la "maintenance", et
- des dallettes "A6" comportant 6 armatures qui ont été corrodées artificiellement après le vieillissement par carbonatation accélérée artificielle de manière à présenter des armatures plus corrodées que celles des dallettes "A3". Sur les dallettes "A6", l'objectif est de qualifier les traitements de réalkalinisation d'un point de vue de la réparation au stade de la "réhabilitation".

II.1.2.1 Description des dallettes en béton armé

II.1.2.1.1 Dallettes "A3"

Les corps d'épreuve dits dallettes "A3" sont en béton armé de dimensions 300x300x50 mm et comportent 3 armatures parallèles, de diamètre 6 mm et de longueur 400 mm, dont les 200 mm au centre ne sont pas isolés (Figure II-1).

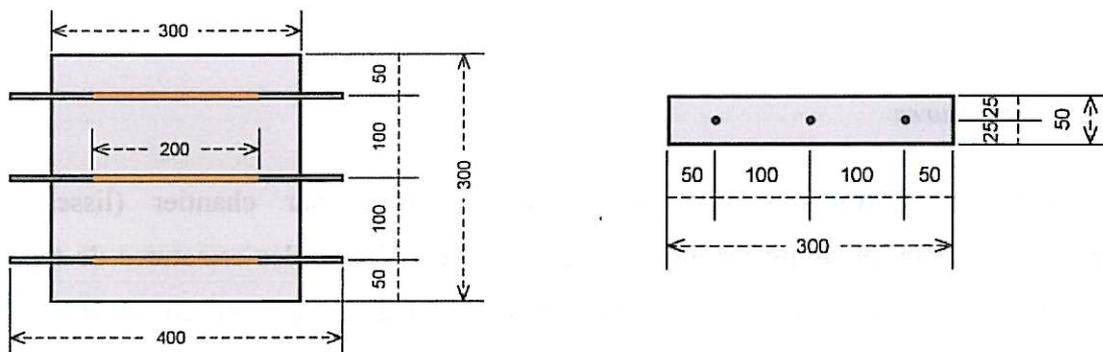


Figure II-1 : Corps d'épreuve des dallettes "A3" (dimension en mm)

II.1.2.1.2 Dallettes "A6"

Les corps d'épreuve dits dallettes "A6" sont identiques aux dallettes "A3" mais leur taux de ferrailage est doublé (Figure II-2). Les dallettes "A6" comportent donc 6 armatures qui ont été ligaturées avant le coulage pour assurer la continuité électrique.

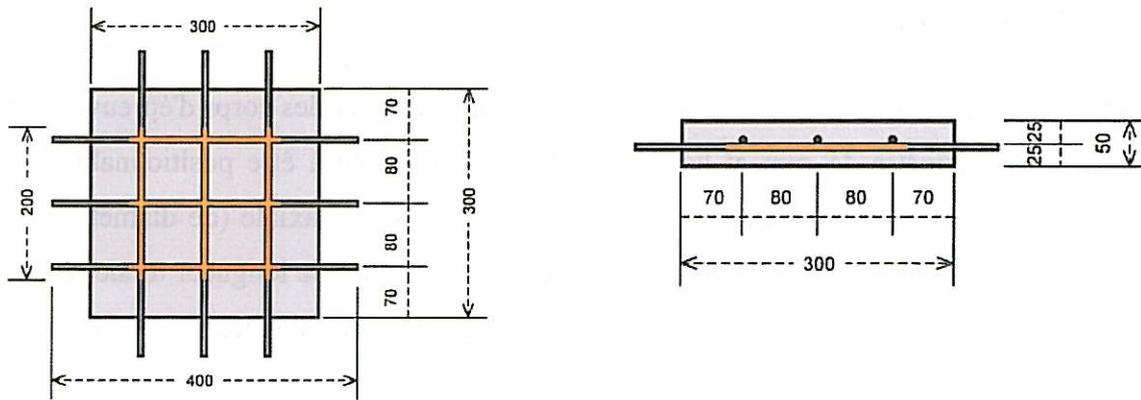


Figure II-2 : Corps d'épreuve des dalles "A6" (dimension en mm)

II.1.2.2 Fabrication

La fabrication des dalles a été réalisée au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille (Annexe 1). Les dalles ont été coulées à l'horizontale. Elles ont été démoulées après 24 heures et ont subi une cure dans l'eau de 28 jours.

II.1.2.3 Vieillessement par carbonatation artificielle des corps d'épreuve en béton armé

Les dalles (excepté le(s) témoin(s) sain(s)) ont été carbonatées au Laboratoire Régional de l'Est Parisien à Melun, suivant un mode opératoire développé au LCPC [6]. Le pré-conditionnement des dalles a été réalisé pendant 1 mois à 45°C et 60% d'humidité relative dans une enceinte climatique. Puis, les dalles ont été vieillessement par un procédé de carbonatation artificielle dans une enceinte à 22°C, 60% HR et 50% de CO₂. L'objectif visé était la carbonatation totale de l'épaisseur des dalles (50 mm), ce qui a nécessité de 2 à 3 mois.

Après la carbonatation, toutes les dalles "A3" ont été conservées dans de l'eau afin d'éviter la carbonatation naturelle des témoins sains (non carbonatés). Les dalles "A6" ont été conservées à l'air.

II.1.3 Mini-éprouvettes en micro-béton armé

En parallèle des dalles en béton armé, des éprouvettes en micro-béton ont été fabriquées pour observer "in situ" le phénomène de corrosion et celui du traitement électrochimique de réalcalinisation à l'aide de la Microspectroscopie Raman.

II.1.3.1 Description

L'utilisation de micro-béton a été nécessaire pour confectionner des corps d'épreuve de petites dimensions (diamètre 45 mm et hauteur 15 mm) de manière à être positionnables dans la cellule d'analyse de la Microspectroscopie Raman. L'armature axiale (de diamètre 6 mm) a une longueur d'étude de 10 mm (délimitée par cataphorèse sur une longueur totale de 60 mm). L'observation en Microspectroscopie Raman se fait via une "fenêtre" en verre collée en affleurement sur la face béton/acier (Figure II-3).

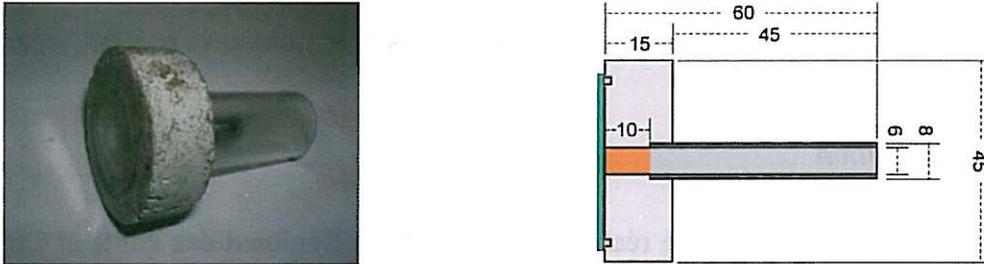


Figure II-3 : Corps d'épreuve "mini-épreuves" (dimension en mm)

II.1.3.2 Fabrication des mini-épreuves en micro-béton armé

La fabrication des mini-épreuves a été réalisée au LCPC. Tout d'abord, des éprouvettes cylindriques de diamètre 45 mm et de hauteur 70 mm ont été coulées à l'horizontale. Elles ont été démoulées après 24 heures et ont subi une cure dans l'eau de 28 jours. Elles ont ensuite été découpées afin d'obtenir des mini-épreuves cylindriques de 15 mm de hauteur (Figure II-3). Finalement, ont été carottées, une première gorge de 30 mm de diamètre sur la face plane (acier/béton) pour y coller en affleurement une fenêtre en verre qui rend possible les observations en Microspectroscopie Raman et une seconde gorge de 22 mm de diamètre sur la face où dépasse l'armature pour coller un tube en verre qui sert d'adaptation d'étanchéité au système électrochimique d'observation dans la cellule Raman.

II.1.3.3 Vieillessement par carbonatation artificielle des corps d'épreuve en micro-béton armé

Après la cure de 28 jours dans l'eau, les mini-épreuves (excepté les témoins sains) ont été carbonatées selon le même procédé que les dalles en béton armé. Le préconditionnement de 1 mois des mini-épreuves a été suivi par 2 mois de carbonatation accélérée (CEM I,

eau/ciment = 0.65 et ciment 387 kg/m³) pour obtenir un enrobage de béton complètement carbonaté.

II.2 Caractérisations analytiques

Afin d'évaluer l'efficacité du traitement de réalcalinisation, des caractérisations analytiques telles que la détermination qualitative et quantitative du pH, le dosage des alcalins, la microscopie électronique à balayage et la Microspectroscopie Raman ont été réalisées. Certaines de ces analyses permettent également d'établir si des réactions secondaires telles qu'une évolution de la matrice cimentaire a lieu ou non pendant le traitement.

Les schémas de prélèvement pour les caractérisations analytiques des dallettes "A3" sont illustrés sur la Figure II-4a et b et ceux des dallettes "A6" sur la Figure II-4c.

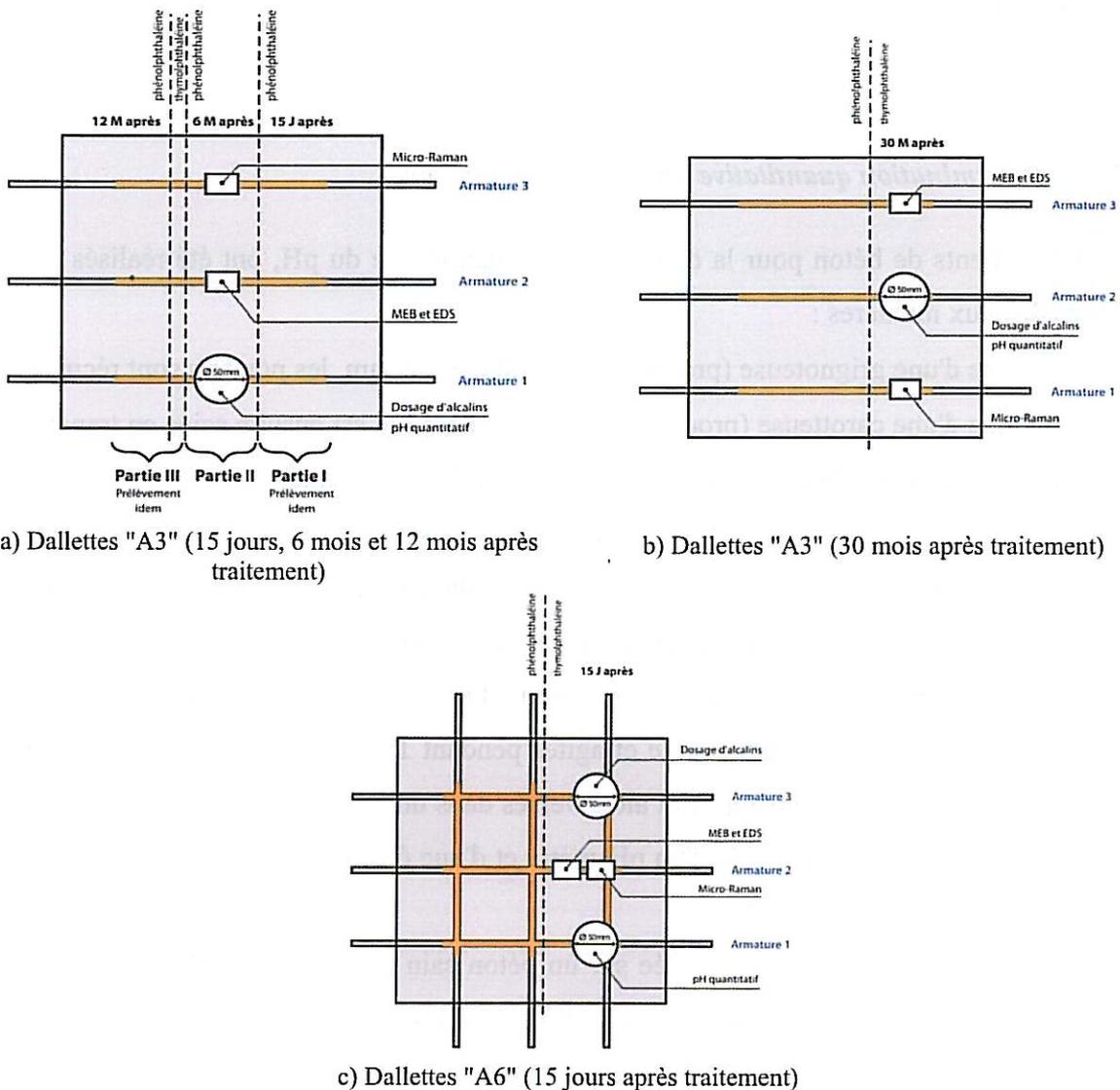


Figure II-4: Schémas de prélèvement des dallettes "A3" et "A6" pour les caractérisations analytiques

II.2.1 Détermination du pH du béton

II.2.1.1 Détermination qualitative du pH à l'aide d'indicateurs colorés

La détermination qualitative du pH du béton avant et après traitement de réalcalinisation a été réalisée à l'aide de phénolphthaléine (0.1g de phénolphthaléine dans 100 ml de la solution 100% éthanol) et de thymolphthaléine (0.04g dans 100 ml de la solution 50% éthanol/eau).

Le protocole d'application est le suivant : les dalles sont sciées, rincées sous eau et l'indicateur coloré est pulvérisé. Immédiatement après une photo est prise.

L'inconvénient majeur de la détermination du pH à l'aide d'indicateurs colorés est qu'elle ne permet pas d'obtenir une valeur précise de pH. C'est pourquoi la technique Räsänen et al. [55] a été utilisée pour déterminer les pH de manière quantitative sur les bétons armés carbonatés puis réalcalinisés.

II.2.1.2 Détermination quantitative du pH sur suspensions

Des prélèvements de béton pour la détermination quantitative du pH, ont été réalisés sur les dalles de deux manières :

- A l'aide d'une grignoteuse (procédé à sec) : tous les 5 mm, les poudres sont récupérées.
- A l'aide d'une carotteuse (procédé sous eau) : la carotte est ensuite sciée en tranches de 10 mm qui sont séchées en étuve à 45°C pendant une semaine.

Ces prélèvements sont ensuite broyés pendant quelques secondes (maximum 10 s) puis tamisés à 315 μm . Les poudres tamisées à 315 μm sont ensuite transférées rapidement (afin d'éviter une carbonatation supplémentaire du béton ou une prise d'humidité de la poudre) dans un flacon propre et sec à fermeture hermétique. Puis 15 g de poudres sont mélangés avec 15 g d'eau distillée pendant une minute et agités pendant 15 minutes (vitesse de rotation 35 rpm). Dix millilitres de suspension sont alors versés dans un tube en verre et la mesure de pH est immédiatement réalisée à l'aide d'un pH-mètre et d'une électrode de pH calibrée entre 7 et 12.45.

La répétabilité de mesures a été vérifiée sur un béton sain (écart-type = 0.03), sur un béton carbonaté (écart-type = 0.01) et sur un béton réalcalinisé (écart-type = 0.06).

II.2.2 Détermination des alcalins dans le béton

Le dosage des ions alcalins dans le béton a été fait au Laboratoire Régional du Bourget.

Les prélèvements de béton ont été réalisés sur les dalles comme précédemment pour les prélèvements de pH. 2.5 g de poudre de béton broyée à 315 μm sont attaqués en solution acide nitrique dilué (pH tampon à 0.85 ± 0.1), mis en solution et dosés à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique équipé d'un brûleur approprié pour une flamme acétylène/air et d'une lampe à cathode creuse pour le dosage du sodium et du potassium (longueur d'onde respective de 589.0 nm et de 766.5 nm). Le dosage doit être réalisé au plus tard 24 heures après la fin de la phase de mise en solution. Les résultats sont exprimés en $\text{Na}_2\text{O}\%$ et $\text{K}_2\text{O}\%$. Par exemple, $0.25\% \text{Na}_2\text{O} = 2.5 \text{ g/l}$ exprimé en Na_2O . En utilisant le rapport analytique, $2\text{Na}/\text{Na}_2\text{O}=0.7419$, 2.5 g/l de Na_2O correspond donc à 1.85 g/l de Na^+ (0.080 mol/l). La procédure est identique pour le dosage du potassium avec le rapport analytique $2\text{K}/\text{K}_2\text{O}=0.8302$. Pour les dosages en sodium et en potassium, l'écart type est de 0.003%.

II.2.3 Observation au Microscope Electronique à Balayage et spectrométrie de rayons X à dispersion d'énergie

Le Microscope Electronique à Balayage (MEB) est un outil d'imagerie qui offre un grandissement élevé et une profondeur de champ supérieure (jusqu'à 300 fois) à celle d'un microscope optique classique ($\times 1000$). Il est également couplé à un spectromètre de rayons X à dispersion d'énergie, afin d'obtenir une analyse élémentaire des surfaces observées, ce qui permet notamment de distinguer des composées de forme cristalline comparable mais de composition différente.

II.2.3.1 Préparations des échantillons

Après prélèvement (de taille inférieure à $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}$) et séchage à 50°C , 2 types d'échantillons ont été préparés pour l'observation au MEB couplé à un EDS :

- des fractures (interface acier/béton, acier, béton) qui ont été métallisées au carbone ;
- et des sections polies préparées par inclusion dans une résine. Le polissage de la face observée a été constituée de différentes étapes : la première d'entre elles a été le prépolissage à l'aide d'un papier abrasif de grade 220 ; les 4 étapes suivantes ont été

réalisées successivement avec des draps de polissage avec des grains de plus en plus fins (de 1200, 9 μm , 3 μm jusqu'à 1 μm). Ces faces polies ont également été métallisées au carbone.

Le métalliseur au carbone du LRMH est présenté dans la Figure II-5.



Figure II-5 : Métalliseur au carbone au LRMH

II.2.3.2 Appareillages

L'observation des échantillons a été effectuée avec un microscope électronique à balayage JEOL JSM-5600 (Figure II-6) au Laboratoire de Recherche des Monuments historiques.

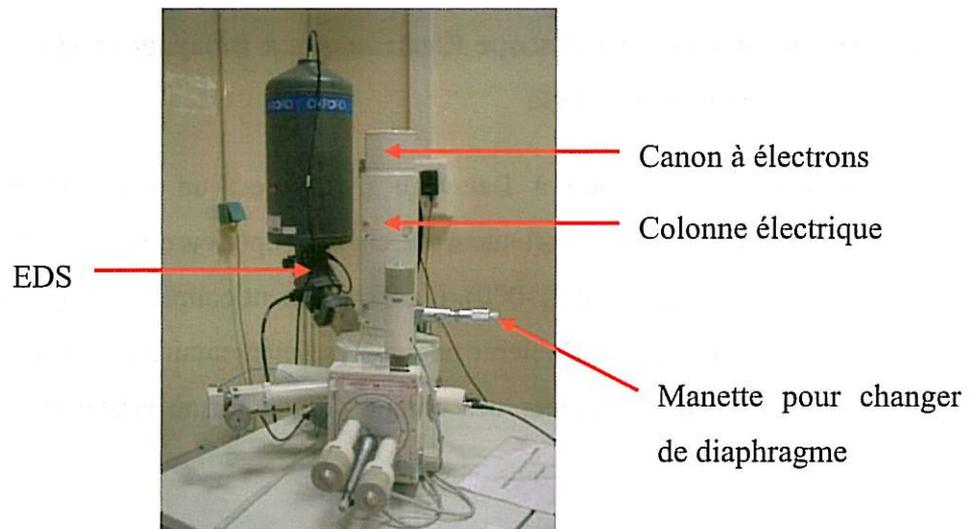


Figure II-6 : L'appareille MEB (JEOL JSM-5600) au LRMH

La première partie du MEB est constituée du canon à électrons. Les électrons y sont émis par effet Joule grâce à un filament de tungstène chauffé à 2500°C et sont extraits du canon au niveau du "Wehnelt". C'est un cylindre situé autour de la pointe et porté à un potentiel légèrement négatif (quelques dizaines de volts) qui exerce une action de focalisation du faisceau. Les électrons sont alors accélérés par la différence de potentiel entre le Wehnelt et

l'anode (positif par rapport à celui du filament) et forment un faisceau monocinétique. La tension d'accélération peut varier de 5 à 50 kV sur l'appareil du LRMH.

Ensuite le faisceau entre dans la colonne électronique. Les électrons y sont focalisés à l'aide de lentilles magnétiques. La première lentille rencontrée est la lentille 'condenseur'. Elle permet de contrôler la densité du faisceau d'électrons en jouant sur sa divergence.

Les bobines de déflexion assurent le contrôle du balayage de la surface de l'échantillon. Elles sont alimentées par une source électrique délivrant un courant en dents de scie (déviations en x) et un courant en escalier (déviations en y) : le faisceau se déplace donc sur la surface de l'échantillon suivant des lignes xx' qui se décalent parallèlement à elles mêmes selon la direction y. C'est grâce à ces bobines que le grossissement peut être modifié très facilement.

L'ensemble est commandé par un ordinateur. Les axes X, Y et Z sont motorisés permettant une inclinaison de l'échantillon jusqu'à 90° et une rotation de 360°. L'observation de la surface des échantillons se fait à l'aide d'un détecteur d'électrons secondaires ou rétro diffusés à quatre secteurs. Les images sont ensuite numérisées.

Concernant l'interface électron-matière, lorsque l'échantillon est conducteur, les charges sont directement évacuées vers la masse, mais dans le cas d'un matériau isolant, comme le béton, leur accumulation déforme le faisceau d'électrons et modifie son énergie effective. Une couche mince de métallisation (or, carbone) doit alors être déposée à la surface, afin d'amener les électrons à la masse et éviter ces phénomènes. En plus la taille des échantillons doit être inférieure à 10x10x10cm. La résolution est de 4.5nm. L'échantillon doit supporter le vide (10^{-5} Torr) et l'irradiation des électrons.

II.2.3.3 L'analyse élémentaire couplée au MEB

Elle est complémentaire et indispensable au MEB car l'imagerie ne suffit pas toujours pour conclure sur la nature d'un composé. La technique qui est utilisée au LRMH est l'EDS (Figure II-7). Elle présente deux avantages majeurs qui sont une bonne efficacité du comptage et une analyse simultanée de toutes les raies du spectre.

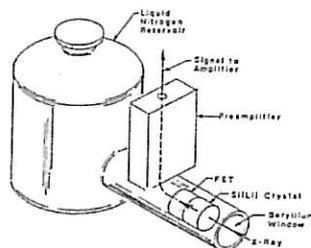


Figure II-7 : Schéma d'un détecteur EDS dans son environnement

Le principe en est le suivant : un faisceau d'électrons vient au contact de la surface de l'échantillon avec une énergie comprise entre 10 et 40 keV et éjecte les électrons. En se relaxant, ils vont émettre des photons X caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon. L'émission se produit dans une "poire" de l'ordre du micron et qui varie selon la masse atomique (plus l'atome est lourd, plus la "poire" est aplatie). La taille de cette poire entraîne deux conséquences :

- l'analyse peut s'effectuer sur une surface de l'ordre du μm ce qui permet de cibler des zones très précises,
- mais comme la profondeur analysée est également de l'ordre du μm , il peut y avoir des difficultés d'analyse en ce qui concerne les petites particules ou des films minces.

La détection des émissions de photons X se fait par un spectromètre d'analyse X qui est composé d'un détecteur et d'un système électronique d'acquisition (préamplificateur, amplificateur, convertisseur et mémoire).

Chaque photon détecté incrémente donc le canal correspondant en énergie et, grâce au système électronique d'acquisition, le spectre d'émission de l'échantillon peut être reconstitué.

II.2.4 Microspectroscopie Raman

La spectroscopie Raman est une méthode permettant l'identification chimique des composés poly-atomiques organiques ou inorganiques, à la surface et dans les couches proches de la surface de solides cristallisés ou amorphes, liquides ou gazeux. Elle fournit des informations directes sur la composition chimique et la structure moléculaire des composés.

Elle est idéale pour la caractérisation in-situ des produits de corrosion de l'acier formés en milieux aqueux et sous atmosphère contrôlée. En effet, les métaux n'ont pas de spectre Raman susceptible d'interférer avec le signal Raman des produits de corrosion [80]. Particulièrement intéressant sur des dépôts de corrosion hétérogènes, le Microspectromètre Raman (couplé à un microscope) permet des analyses localisées avec 5 à 10 μm de résolution spatiale.

II.2.4.1 Principe [81][82]

Quand un échantillon est soumis à une onde électromagnétique monochromatique, une partie du faisceau incident est transmise, une autre est réfléchi, une troisième est diffusée (changement de direction de propagation n'obéissant pas aux lois de l'optique géométrique).

L'analyse en fréquence de cette lumière diffusée met alors en évidence :

- une composante de même longueur d'onde que celle du faisceau incident, diffusion élastique ou diffusion Rayleigh
- des composantes de longueurs d'onde différentes de celle du faisceau incident, diffusion inélastique ou diffusion Raman

Dans le cadre de l'interprétation quantique des phénomènes vibratoires de la matière (mécanique quantique), une fraction des photons incidents aura tendance à porter le système vibrationnel des molécules à un état excité. Cet état, le plus souvent virtuel, est d'énergie plus faible qu'une réelle transition électronique. Le retour à l'état vibrationnel se fait par diffusion de photons. Lorsque les photons diffusés ont la même énergie que les photons incidents, la diffusion correspond à l'effet Rayleigh. Sinon, la diffusion correspond à l'effet Raman Stokes ou Anti-Stokes selon la fréquence des photons diffusés.

La Figure II-8 présente les phénomènes de diffusion Rayleigh et Raman caractérisés par des niveaux d'énergie de vibration moléculaire. Selon la loi de distribution de Maxwell-Boltzmann, sur la répartition en niveaux d'énergie d'un ensemble moléculaire à une température donnée, les molécules à l'état fondamental sont plus nombreuses qu'aux états vibrationnels excités. Les raies Stokes sont donc plus intenses que les raies Anti-Stokes.

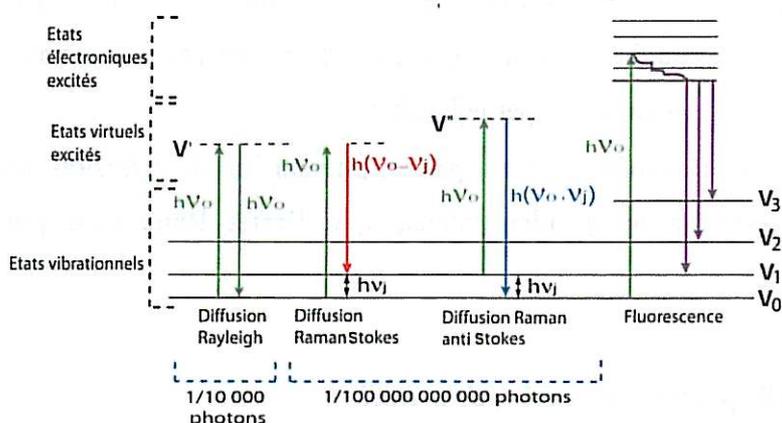


Figure II-8 : phénomènes de diffusion et de fluorescence caractérisés à l'aide des niveaux d'énergie de vibration moléculaire

Les raies Raman ne sont pas repérées par leur nombre d'onde absolu ($\bar{\nu} = \bar{\nu}_0 \pm \bar{\nu}_j$) en cm^{-1} , proportionnel à la fréquence tel que $\bar{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}$, mais par le nombre d'onde relatif $\bar{\nu}_j$ caractéristique de la molécule et indépendant du choix de la source monochromatique. Le tracé de l'évolution de l'intensité de la lumière diffusée, en fonction de la différence du nombre d'onde $\Delta\bar{\nu}$ entre les raies Raman Stokes et la raie Rayleigh, correspond à un spectre Raman conventionnel (Figure II-9). En pratique, on n'utilise que les raies Stokes.

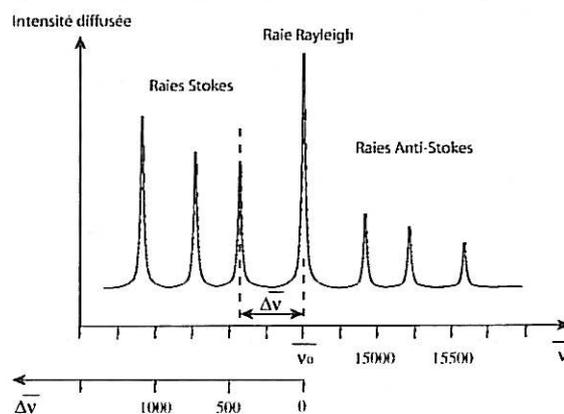


Figure II-9 : Représentation schématique d'un spectre Raman

Intérêt et inconvénients Le grand intérêt de la spectroscopie Raman est la possibilité de mesures in situ sous polarisation en solution aqueuse, la présence d'eau n'est pas gênante car l'eau diffuse très peu en Raman. De plus, en prenant certaines précautions, l'analyse Raman est non destructive.

Cependant la spectrométrie Raman présente deux inconvénients majeurs :

- La faiblesse du signal Raman : on peut l'intensifier en augmentant le temps d'acquisition et/ou la puissance du laser monochromatique, mais il faut éviter la dégradation de l'échantillon par échauffement.
- L'effet de fluorescence qui n'est pas un phénomène de diffusion, mais d'émission et qui peut être beaucoup plus intense que l'effet Raman au point de l'occulter totalement.

II.2.4.2 Appareillage et configuration de travail

Les analyses sont réalisées avec un LABRAM de la société Jobin-Yvon Horiba. L'appareil a été utilisé au Laboratoire des Interfaces et Systèmes Electrochimiques, (UPR 15 du CNRS, Paris, France).

La configuration de travail associée à l'équipement nécessaire est décrite ci-dessous :

- Une lumière monochromatique intense – Laser intégré Hélium Néon rouge (13 mW) permettant de travailler à 632.817 nm (domaine du visible). Le faisceau est focalisé sur l'échantillon par une optique appropriée. Un jeu de filtres neutres permet de limiter la puissance du faisceau incident.
- Un microscope confocal OLYMPUS BX40. Le rayonnement diffusé est collecté à 180° (rétrodiffusion) favorisant le rapport d'intensité pour les échantillons absorbants. Les objectifs utilisés pour visualiser l'échantillon et collecter la lumière diffusée sur la zone à analyser sont de grossissement x50 (mode in-situ, mode ex-situ : produits de corrosion en relief) et x100 (ex-situ en couche mince) donnant une résolution spatiale respective de 5 et 2 μm . Une caméra vidéo couleur permet l'observation de la surface de l'échantillon en lumière blanche par réflexion.
- Un filtre optique coupe bande (filtre notch). Il sert à filtrer le signal diffusé correspondant à la longueur d'onde de la radiation excitatrice (diffusion Rayleigh). Les raies Raman sont détectables à partir de 150 cm^{-1} .
- Un système d'analyse dispersive – Spectromètre à simple étage de distance focale 300 mm et un détecteur CCD (Charge Coupled Devices) Wright Instruments LTD multicanaux refroidi par effet Peltier (1024x256 pixels).
- L'acquisition et l'exploitation des spectres sont effectuées avec le logiciel Labspec. La résolution spectrale est d'environ 3 cm^{-1} .

Des spectres Micro-Raman "référence" de différents composés du système $\text{Fe}/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ sont présentés en l'Annexe 3.

II.3 Caractérisations électrochimiques

II.3.1 Caractérisations électrochimiques en laboratoire

Les mesures électrochimiques sont réalisées dans un laboratoire climatisé (21°C et 60% HR) à l'aide d'un potentiostat PARSTAT PAR2263 sur un système composé de trois électrodes :

- l'électrode de travail est constituée par l'armature,
- l'électrode de référence est une électrode au calomel saturée KCl ($E_0=242\text{mV}$ par rapport à l'électrode normale à Hydrogène) et
- la contre électrode est une grille de titane/platiné.

L'électrolyte est constitué par de l'eau du robinet.

Le schéma de montage électrochimique est illustré sur la Figure II-10 pour les dalles avec trois armatures et six armatures. Les armatures sont numérotées de 1 à 3. Sur chaque armature, sont collées trois cellules électrochimiques numérotées de 1 à 3 pour l'armature 1, de 4 à 6 pour l'armature 2 et de 7 à 9 pour l'armature 3. La surface d'armature supposée polarisée sous chaque cellule électrochimique est égale à $10.2 \text{ cm}^2 (= 3.14 \times 0.6 \times 5.4)$.

Concernant le protocole de conditionnement hydrique, pour les dalles "A3", elles sont immergées dans l'eau du robinet 24h avant les mesures et laissées au laboratoire climatisé. Une heure avant la mesure elles sont sorties de l'eau. Pour les dalles "A6" un nouveau protocole avec un préconditionnement hydrique a été mis en place afin d'avoir une meilleure répétabilité des mesures (Cf. le Chapitre III).

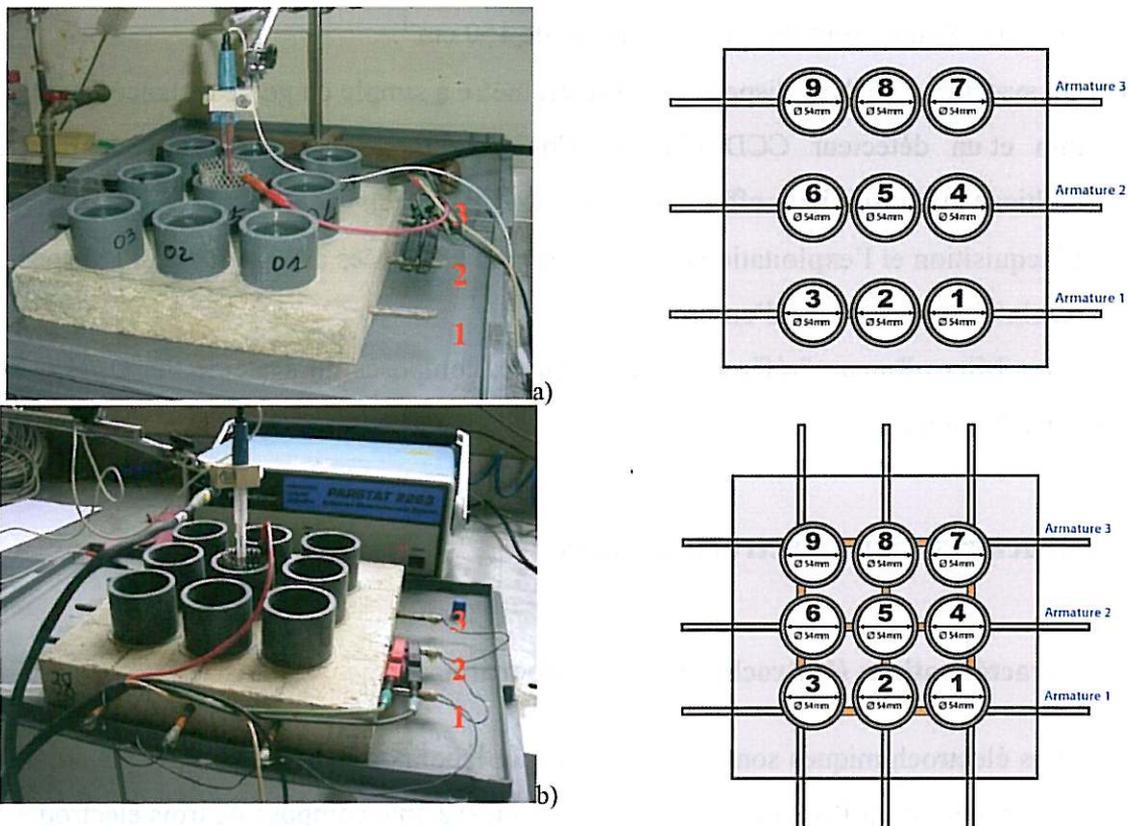


Figure II-10: Montage électrochimique des dalles "A3" a) et des dalles "A6" b)

La caractérisation électrochimique des armatures des dalles en béton permet de déterminer :

- le potentiel libre (**E_{corr}**), à partir de la courbe potentiel = f (temps) pour une durée de 600 secondes, durée sur laquelle le potentiel devient stable (Figure II-11a).
- la pente ($1/(R_e+R_p)$) de la partie entre 0 mV correspondant au point à 481s et 10 mV correspondant au point à 719s de la courbe intensité = f (potentiel), par la technique de la résistance de polarisation linéaire. Les conditions opératoires sont un balayage de ± 10 mV autour du potentiel libre à une vitesse de 2.5 mV/min (Figure II-11b).
- et la résistance de l'électrolyte et de l'enrobage (**R_e**) à l'aide de la technique d'impédance (10 mV pic à pic, balayage en fréquence de 100 kHz à 100 μ Hz en fixant 5 décades et en arrêtant le spectre à 39 mHz environ). Les mesures que nous avons réalisées présentent toutes un arc capacitif à très haute fréquence ne pouvant être attribué qu'aux propriétés diélectriques du béton (où à la configuration de mesure). La valeur de R_e sera donc prise égale à celle de la partie réelle correspondante au minimum de la partie imaginaire dans la gamme de fréquence 100 - 1 Hz en respectant une géométrie uniforme pour chaque mesure (Figure II-11c). Il faut également noter que la partie basse fréquence de l'impédance est en cohérence avec la vitesse de balayage utilisée lors de la mesure de la résistance par polarisation linéaire.

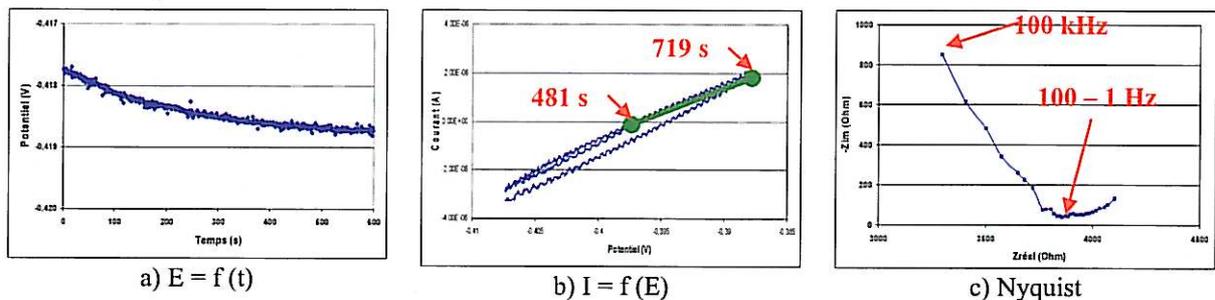


Figure II-11 : Courbe $E = f(t)$ a), $I = f(E)$ b) et Nyquist c) dans le logiciel Powersuite

Le temps nécessaire à l'acquisition des 3 grandeurs E_{corr} , pente et R_e , pour chaque cellule est voisin de 45 minutes, soit une journée par dalle.

Finalement, la densité de courant de corrosion, J_{corr} , peut-être calculée selon l'Eq. II-1.

$$\text{Eq. II-1} \quad J_{corr} = B/(R_p.S) \text{ exprimé en } \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

La constante B a été choisie égale à 26 mV quelque soit le mode passif ou actif de la corrosion des armatures.

La dénomination des dalles est la suivante :

Tableau II-4 : Dénomination des dallettes "A3" et "A6"

N° de dallette	Nombre d'armatures	Type	Echéance	N° armature	N° cellule
de 01 à 38	"A3" 3 armatures ou "A6" 6 armatures	S (béton témoin sain) ; C (béton témoin carbonaté) ; I (traitement par courant imposé) ; A (traitement par anode sacrificielle)	INI (avant traitement) ; 15J, 06M... (15 jours, 6 mois après traitement...)	de 1 à 3	de 1 à 9

Par exemple, "21-A6-I-INI-2-5" indique la dallette N°21 qui comporte 6 armatures, à l'échéance INI soit avant le traitement de réalcalinisation par courant imposé (I), l'armature N°2 et la cellule électrochimique N°5.

L'acquisition des mesures se fait à l'aide du logiciel Powersuite® qui gère les fichiers sous un format de base de données. Les noms des fichiers reprennent l'appellation de la dallette suivie du type de mesure -OC (pour le potentiel libre), -RP (pour la résistance de polarisation linéaire) et -Z pour le diagramme de Nyquist. Les résultats sont ensuite traités à l'aide du logiciel Excel et d'une macro développée au LCPC (Figure II-12).

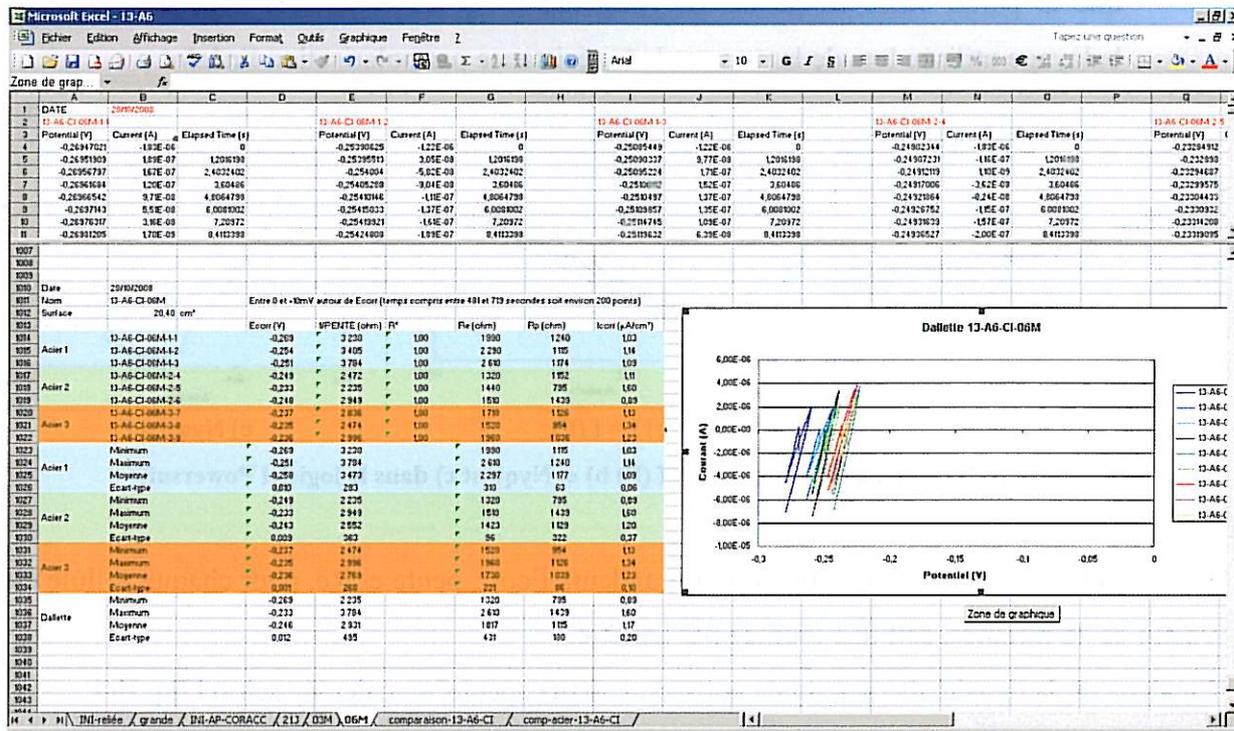
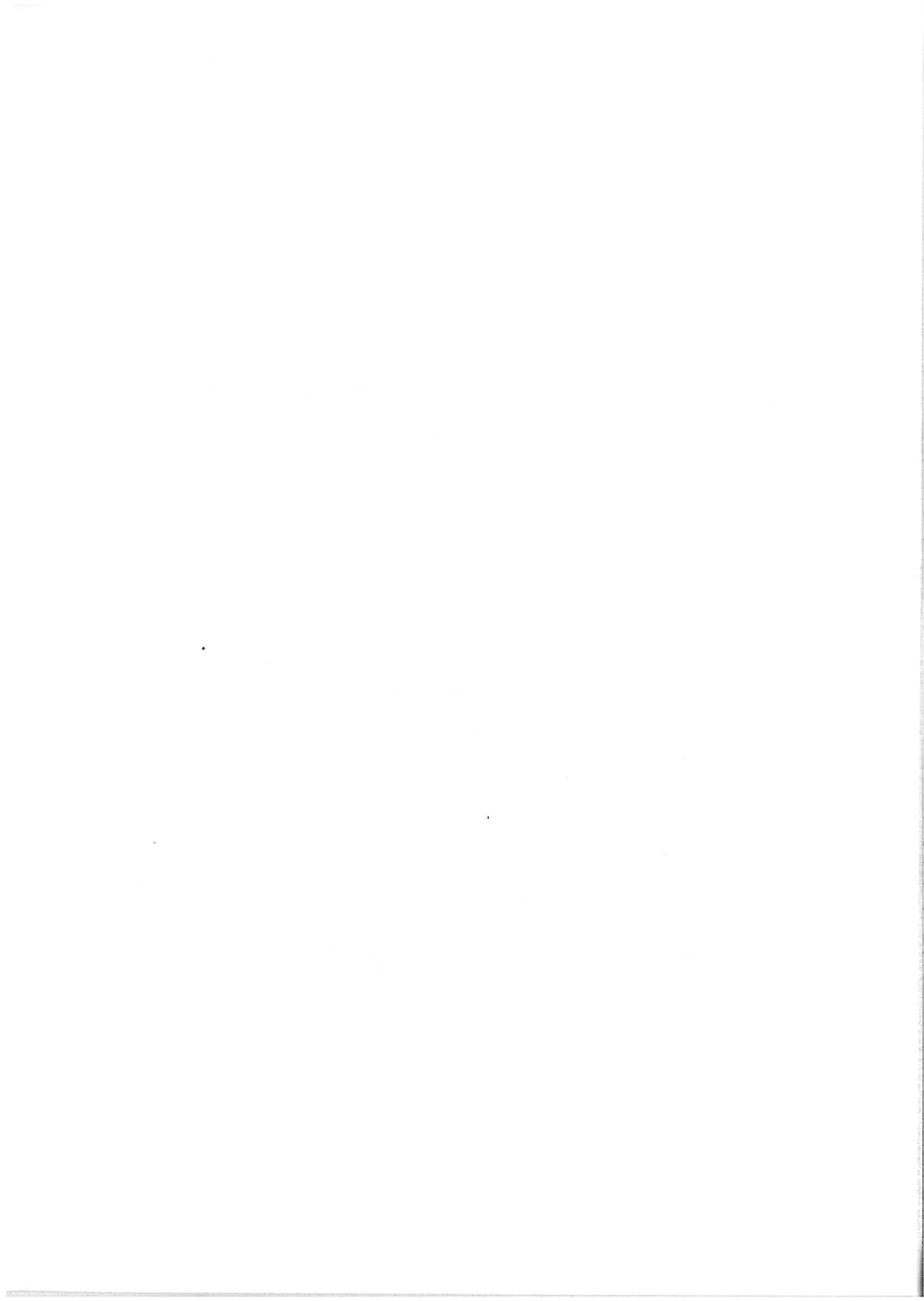


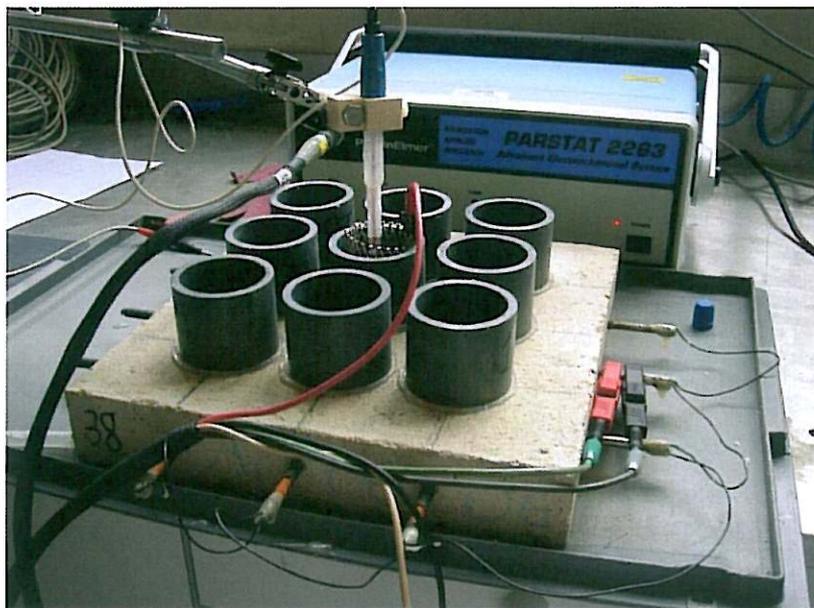
Figure II-12 : Traitement des données à l'aide d'une macro Excel

II.3.2 Diagnostic de la corrosion sur ouvrage

Les procédures utilisées sont décrites dans le Chapitre VI.



Chapitre III. Méthodologies et caractérisations initiales



Ce troisième chapitre présente :

- Les protocoles mis en place pour accéder à des caractérisations électrochimiques fiables et répétables
- Les caractérisations électrochimiques des dallettes "A3" et "A6" après carbonatation accélérée
- Les essais de corrosion accélérés sur les dallettes "A6" (par vieillissement climatique et par corrosion intentiostatique)
- Les caractérisations électrochimiques des dallettes "A6" après corrosion intentiostatique
- Les traitements de réalcalinisation par courant imposé et par anode sacrificielle utilisés lors d'une réparation de type maintenance et de type réhabilitation

III.1 Méthodologie des caractérisations électrochimiques après le vieillissement par carbonatation artificielle

III.1.1 Influence des connexions des armatures (dallettes "A6")

Lors de la fabrication des 25 dallettes "A6" une **connexion interne** des armatures entre elles par ligature a été réalisée avant le coulage du béton. Cependant la vérification de la continuité électrique des armatures de ces dallettes à l'aide d'un ohm-mètre (résistance nulle ou inférieure à 1 ohm) a démontré que ces connexions n'étaient pas fiables. Il est possible que lors de la vibration du béton, les ligatures aient été rompues..

Sur ce constat, des **connexions externes** sur les 6 armatures de chaque dallette ont été réalisées à l'aide de fils électriques soudés (représentés en rouge sur la Figure III-1).

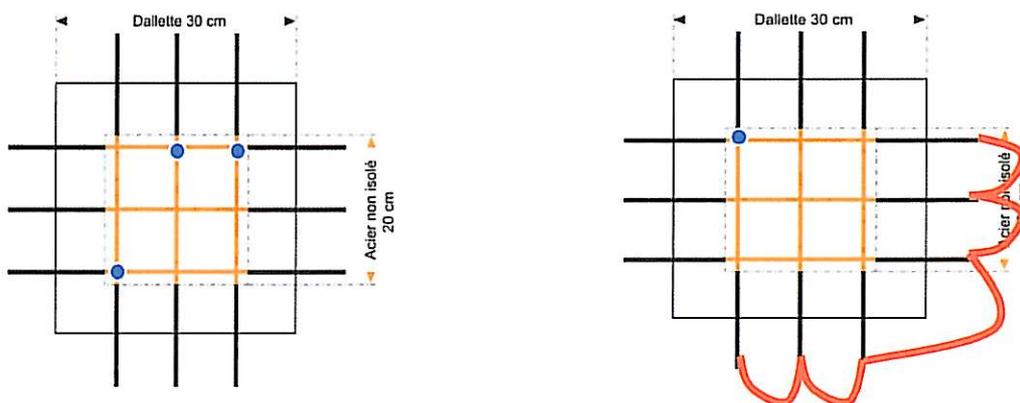


Figure III-1 : Dallettes "A6" avec (à gauche) des connexions internes par ligature (points bleus) ou (à droite) des connexions externes par soudure (fils rouges)

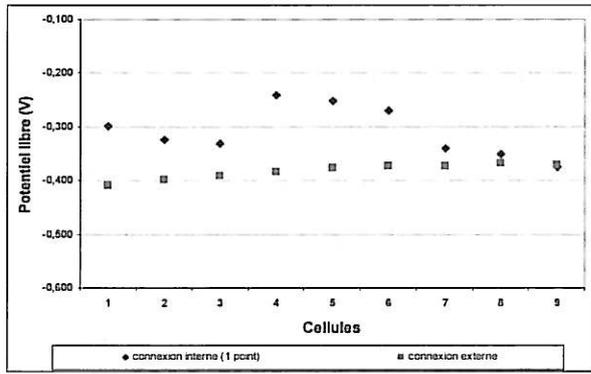
La différence des résultats électrochimiques obtenus sur une dalle avec ses connexions internes puis sur la même dalle avec des connexions externes a été étudiée sur deux exemples (dalles 28-A6 et 29-A6). Les conditions hydriques des deux dalles correspondent à un séchage au laboratoire climatisé (21°C et 60% HR) pendant 9 semaines.

- la dalle 28-A6 comportait 1 seul point de connexion interne (cellule 9). Sur la Figure III-2a, b et c sont représentées, pour les 9 cellules électrochimiques, la valeur du potentiel libre, de la densité de courant de corrosion et de la résistance de l'enrobage du béton, sur la dalle 28-A6 avec uniquement les connexions internes et ensuite sur la même dalle avec des connexions externes.

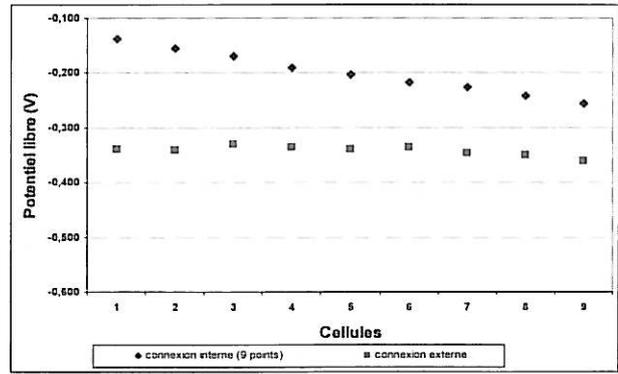
Concernant la dalle 28-A6, les valeurs électrochimiques des 9 cellules sur la dalle avec des connexions externes sont beaucoup plus homogènes (E_{corr} , J_{corr} et R_e respectivement voisins de -400 mV, $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ et 4500 Ohms) que celles obtenues sur cette même dalle avec un seul point de connexion interne.

- Dans le deuxième exemple, la dalle 29-A6 comporte 9 points de connexion interne. Sur la Figure III-2d, e et f sont représentées, pour les 9 cellules électrochimiques, la valeur du potentiel libre, de la densité de courant de corrosion et de la résistance de l'enrobage du béton, sur la dalle avec uniquement les connexions internes (9 points) et ensuite sur la même dalle avec des connexions externes.

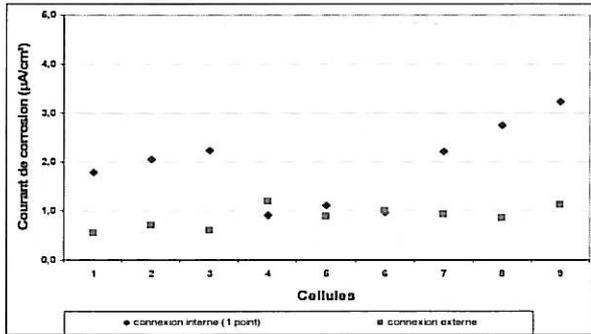
Sur chacun des 3 graphiques de la dalle 29-A6, les tendances obtenues sont tout à fait similaires que la connexion soit interne ou externe ce qui est cohérent puisque dans les 2 cas, les armatures sont toutes connectées entre elles. Toutefois les mesures après les soudures extérieures montrent un décalage d'environ 150 mV vers les valeurs plus négatives pour les mesures de potentiel libre, un décalage compris entre 0.2 et $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ vers des valeurs plus faibles pour J_{corr} et un décalage d'environ 1500 Ohms vers les valeurs plus élevées pour R_e . Ces décalages pourraient provenir d'une différence d'humidité de la dalle. Aussi, dans la suite de l'étude, le paramètre de "séchage" de la dalle à l'échelle de la journée de mesure a été évalué ainsi que le protocole de pré conditionnement hydrique des dalles avant la mesure.



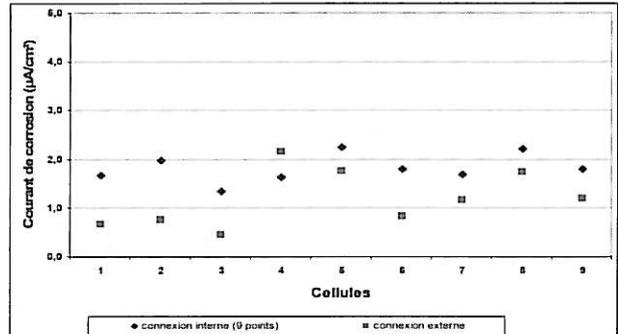
a) Ecorr de la dalle 28-A6 en connexion interne (1 point) et en connexion externe



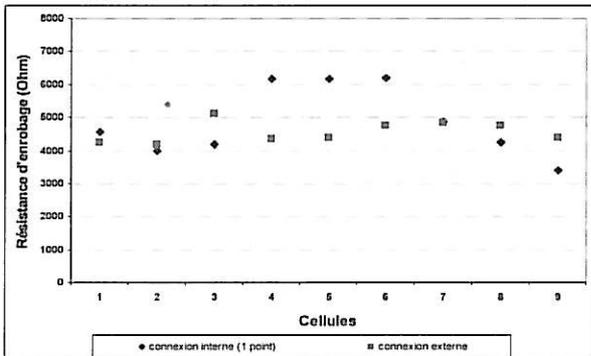
d) Ecorr de la dalle 29-A6 en connexion interne (9 points) et en connexion externe



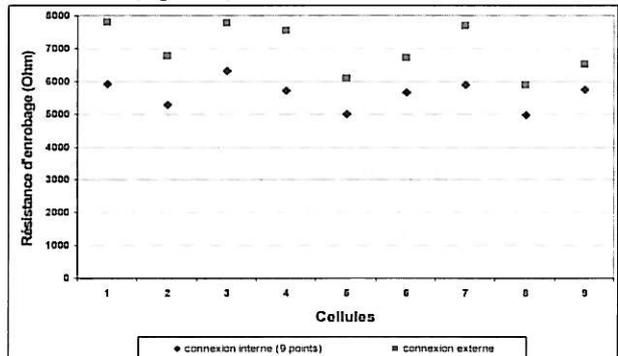
b) Jcorr de la dalle 28-A6 en connexion interne (1 point) et en connexion externe



e) Jcorr de la dalle 29-A6 en connexion interne (9 points) et en connexion externe



c) Re de la dalle 28-A6 en connexion interne (1 point) et en connexion externe



f) Re de la dalle 29-A6 en connexion interne (9 points) et en connexion externe

Figure III-2 : Influence des connexions des armatures des dalles "A6"

III.1.2 Répétabilité des mesures électrochimiques sur une même journée

La caractérisation complète d'une dalle (9 cellules électrochimiques) nécessite une journée d'acquisition. La répétabilité des résultats sur cette durée a été vérifiée sur une dalle en considérant les cellules n° 3, 8 et 5 qui auraient pu montrer un comportement différent si un effet de séchage du béton avait été constaté. En effet, le temps de séchage de la cellule 3 qui est dans un angle de la dalle est supérieur à celui de la cellule 8 qui est sur un côté, qui est

lui même supérieur à celui de la cellule 5 qui est au centre de la dalle. Les mesures sont répétées trois fois par jour, à savoir le matin, le midi et l'après-midi (Figure III-3).

Matin	9h	9h45	10h30
Cellule	3	5	8
Midi	11h45	12h30	13h15
Cellule	3	5	8
Après-midi	14h30	15h15	16h
Cellule	3	5	8

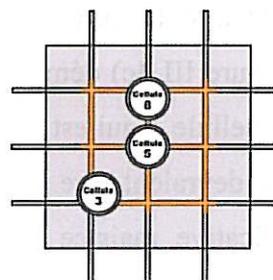


Figure III-3 : Echéances de mesures électrochimiques sur les cellules 3, 5 et 8

Les résultats des mesures réalisées sur la dalle 28-A6 en terme de potentiel libre (Ecorr), d'inverse de la pente en résistance de polarisation linéaire (1/pente), de résistance de l'enrobage (Re) et de densité de courant du corrosion (Jcorr) sont indiqués respectivement dans la Figure III-4a, b, c et d. Les graphiques indiquent pour chacune des cellules, les résultats des trois mesures réalisées dans la journée, ainsi que la valeur moyenne et la barre d'erreur (égale à 2 fois l'écart type) de ces trois mesures.

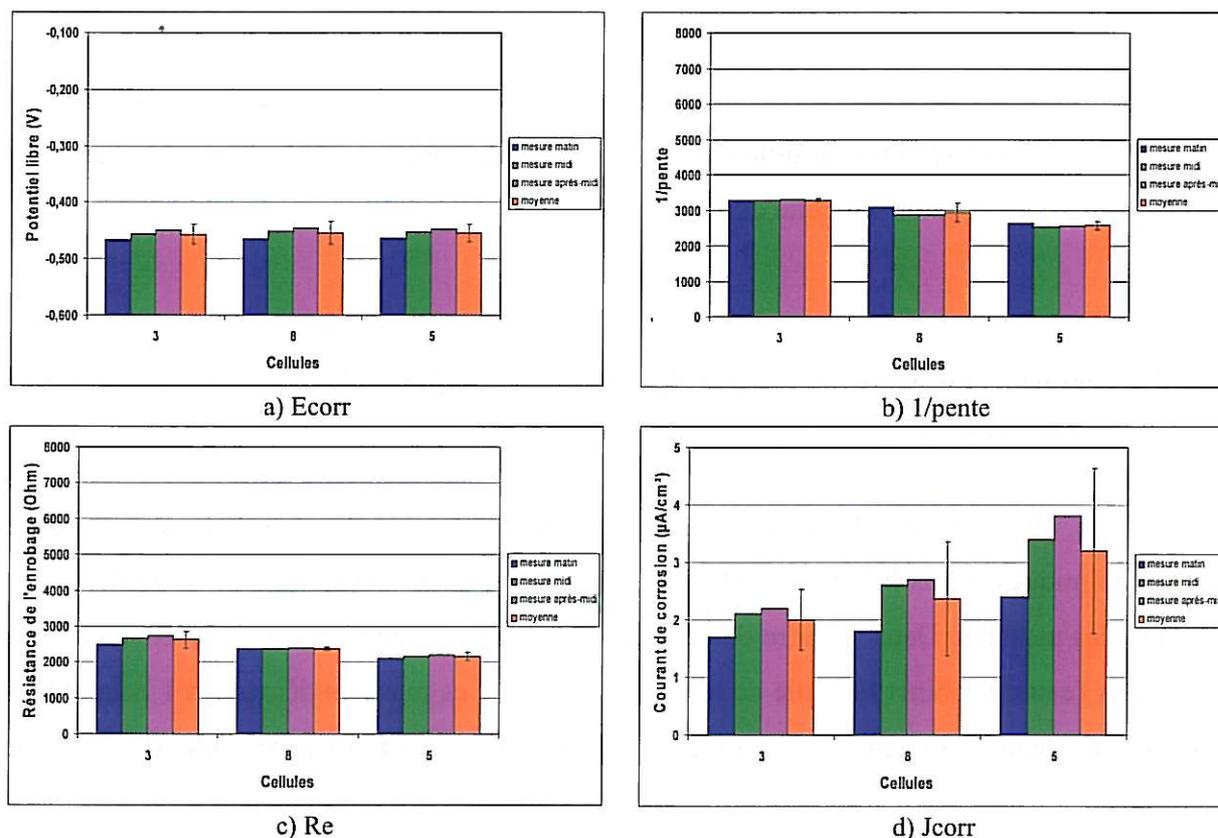


Figure III-4 : Mesures électrochimiques des cellules 3, 8 et 5 de la dalle 28-A6 sur une journée

Les valeurs de potentiel libre (Figure III-4a) de chacune des cellules restent constantes (une dispersion de 10 mV n'est pas significative). Les inverses de pente en résistance de polarisation linéaire (Figure III-4b) sont répétables sur une journée. Les résistances de l'enrobage (Figure III-4c) démontrent qu'il n'y a pas de phénomène de séchage. En effet, en considérant la cellule 3 qui est la plus encline à être soumise à un phénomène de séchage, les valeurs de R_e devraient être croissantes entre le matin, le midi et l'après-midi, et ce de manière significative, mais ce n'est pas le cas : la moyenne est de 2627 Ohms, l'écart type de 117 Ohms, soit 5% de dispersion. La mesure d'impédance est donc répétable à l'échelle de la journée. Même si la répétabilité est satisfaisante, les calculs des densités de courants de corrosion (Figure III-4d) montrent néanmoins une dispersion de 15 à 22% selon les cellules :

- cellule 3 : la dispersion est de $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour une moyenne de $2.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;
- cellule 8 : la dispersion est de $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour une moyenne de $2.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;
- cellule 5 : la dispersion est de $0.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour une moyenne de $3.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Toutefois, cette dispersion n'engendre pas un changement de niveau de corrosion d'après les seuils de la recommandation de la RILEM [83] : pour les neuf cellules de la dalle 28-A6, les densités de courants de corrosion indiquent un niveau de corrosion élevé ($J_{\text{corr}} > 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

En conclusion, les mesures électrochimiques réalisées sur les 9 cellules d'une dalle sont répétables à l'échelle d'une journée. De plus, elles démontrent qu'il n'y a pas d'effet de séchage marqué du béton sur cette durée.

III.1.3 Protocole de conditionnement hydrique des dalles "A6" avant les mesures électrochimiques

L'humidité au sein des dalles influence considérablement les résultats des mesures électrochimiques. Dans la littérature les corps d'épreuve sont "suffisamment" mouillés avant de faire les mesures. Dans le cadre de cette étude, la dalle subit toujours une immersion de 24h dans l'eau du robinet la veille de faire les mesures. Les mesures démarrent 1 heure après la sortie de l'eau de la dalle. Toutefois, cette mise en humidité réalisée seulement la veille des mesures peut présenter des limites lorsque les dalles ont été maintenues en conditions climatiques plutôt "sèches" pendant un temps assez long (entreposage dans le laboratoire en atmosphère contrôlée de 60%RH par exemple). Aussi une pré-étape de mise en humidité soit

une semaine soit deux semaines avant de réaliser les mesures a été étudiée. L'objectif à atteindre est que l'histoire hydrique des dalles avant mesures conduise à une humidité au sein des dalles la plus similaire possible et donc que les résultats soient plus facilement comparables.

Dans cette partie, deux protocoles de conditionnement hydrique différents de par leur durée de séchage entre les mesures (Figure III-5) (1 et 2 semaine(s) respectivement pour les protocoles 1 et 2) ont été étudiés. Dans ces deux protocoles, une série d'essais comporte 4 mesures. La première mesure ("X" semaines) est réalisée sur une dalle entreposée dans un laboratoire climatisé. La deuxième mesure (semaine_1) est réalisée après 1 semaine pour le protocole 1 et 2 semaines pour le protocole 2. La troisième (semaine_2) et la quatrième (semaine_3) mesure sont réalisées de la même manière en respectant le temps de séchage de chaque protocole.

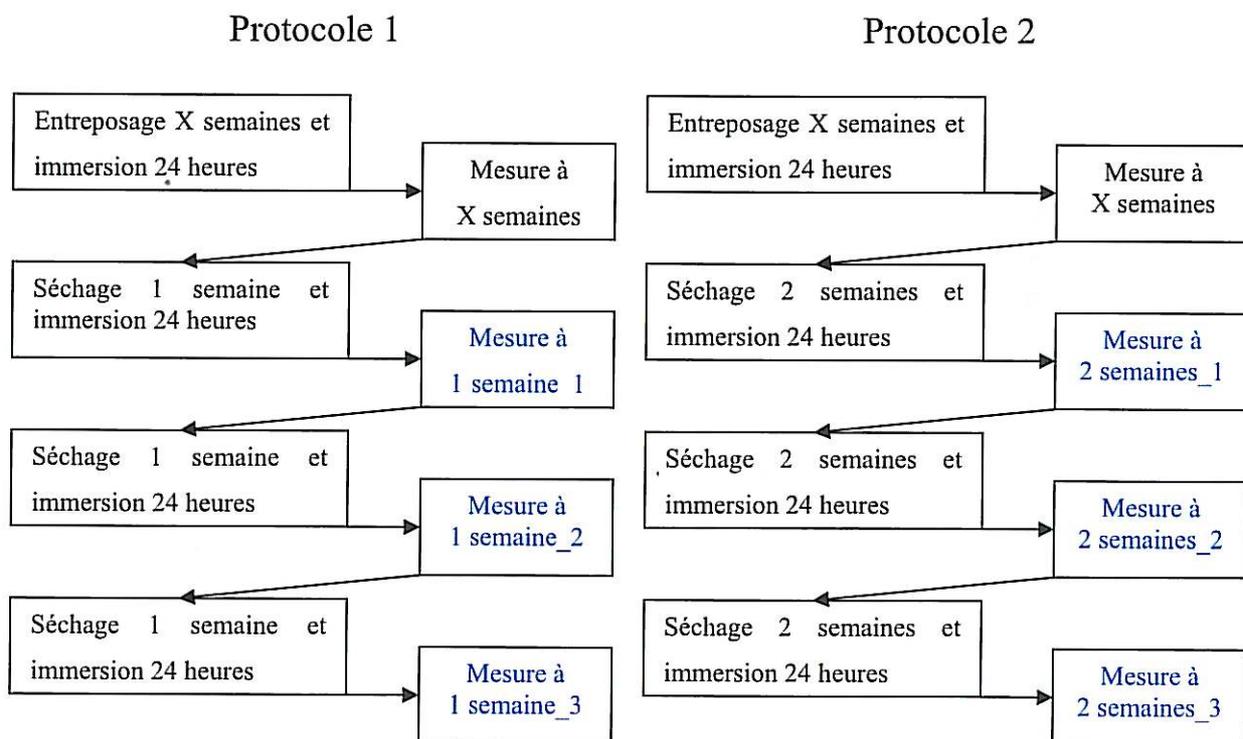
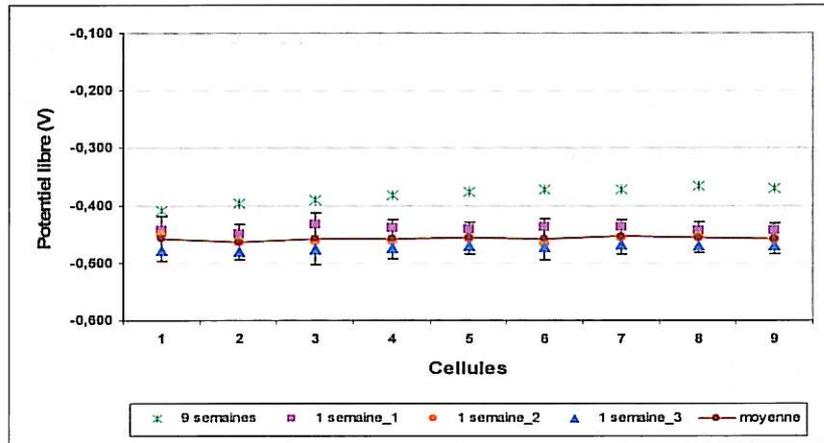


Figure III-5 : Protocoles de conditionnement hydrique des dalles "A6"

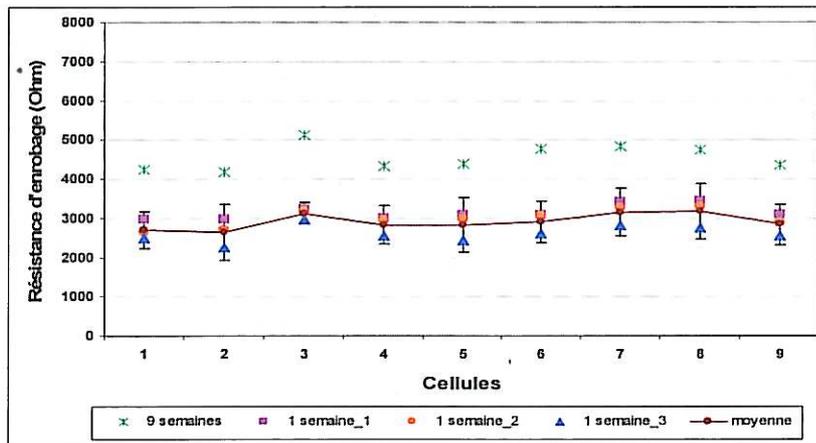
Nota : L'étape dite de "séchage" est constituée par un temps d'entreposage dans un laboratoire climatisé en température ($21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) et en humidité relative ($60\% \pm 10\%$). L'étape dite "immersion 24 heures" correspond à une dalle totalement trempée dans un bain d'eau du robinet.

III.1.3.1 Mesures électrochimiques sur une dalle en béton carbonaté avec le protocole 1

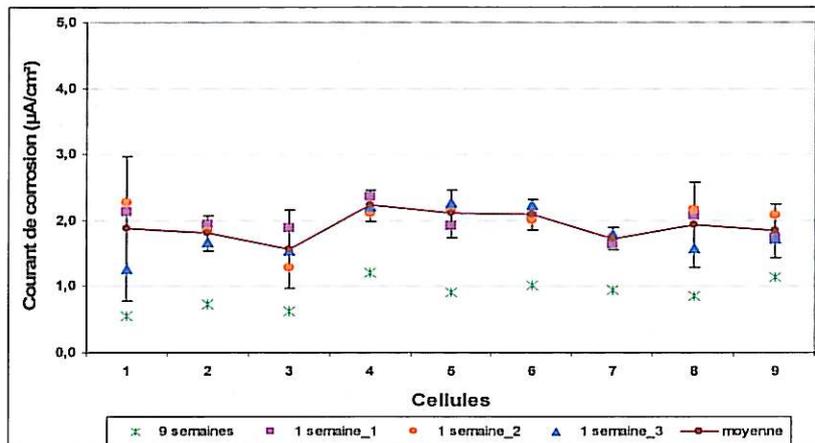
La dalle 28-A6 a été caractérisée en utilisant le protocole 1, avec un séchage d'une semaine entre chaque mesure. Les résultats du potentiel libre, de la résistance de l'enrobage et du courant de corrosion sont indiqués respectivement dans les Figure III-6a, b et c. Dans ces graphiques, les valeurs des moyennes et des barres d'erreur (égales à 2 fois l'écart type) représentées sont celles des 3 dernières mesures.



a) Ecorr



b) Re



c) Jcorr

Figure III-6 : Mesures électrochimiques de la dalle 28-A6 suivant le protocole 1

Les résultats obtenus lors du protocole 1 (avec 1 semaine de séchage) ont permis de mettre en évidence l'influence de l'état hydrique de la dalle : les résultats des 3^{ème} et 4^{ème} mesures sont comparables à celui de la 2^{ème} mesure. Les moyennes et écart-types sur ces 3 mesures sont respectivement de - 458 mV et 14 mV pour E_{corr} , de 2909 Ohms et de 305 Ohms (soit 10%) pour R_e et de 1.9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ et de 0.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (soit 16%) pour J_{corr} . Ces résultats "répétables" diffèrent significativement de ceux obtenus lors de la première mesure ($E_{corr} \approx -400$ mV, $R_e \approx 5000$ Ohms et $J_{corr} \approx 1$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) qui ne sont d'ailleurs pas contenus dans l'écart-type.

En conclusion, pour obtenir des résultats électrochimiques fiables sur une dalle carbonatée, il est nécessaire de la tremper dans l'eau pendant 24h, 1 semaine avant d'en faire la caractérisation.

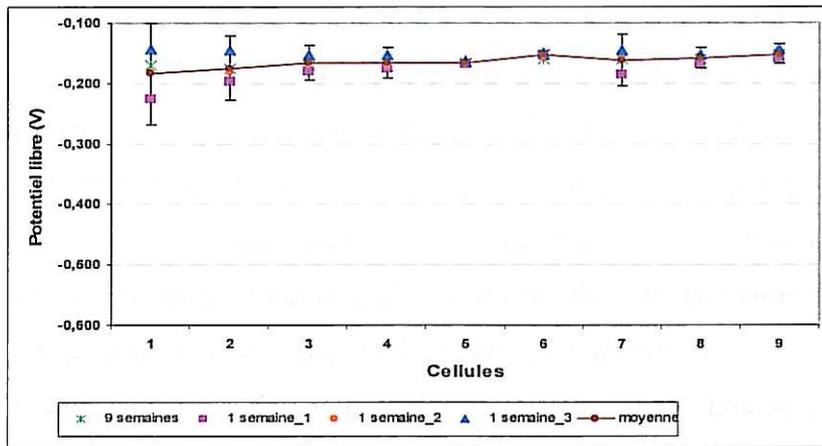
III.1.3.2 Mesures électrochimiques sur une dalle en béton sain avec le protocole 1

Afin de vérifier que le protocole 1 permet également de réaliser des mesures correctes sur des dalles à armatures passives, la dalle 38-A6-S (témoin en béton sain), a été étudiée. Les valeurs de potentiel libre, de résistance de l'enrobage et de densité de courant de corrosion sont présentées en Figure III-7a, b et c. Dans ces graphiques, les valeurs des moyennes et des barres d'erreur (égales à 2 fois l'écart-type) représentées sont celles des 3 dernières mesures.

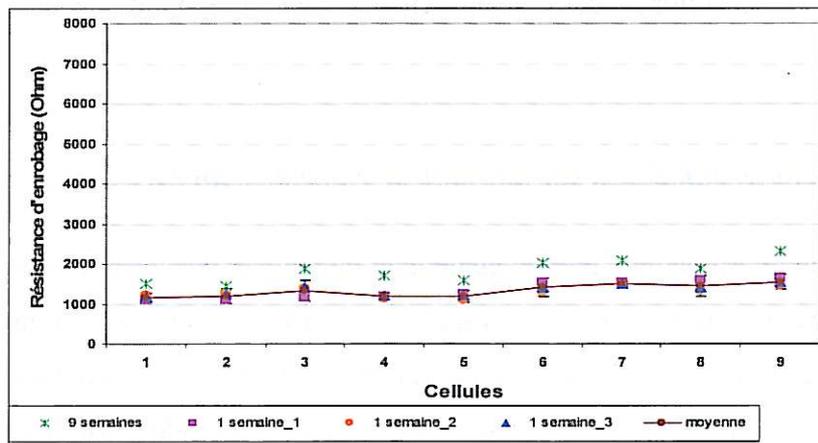
Pour la dalle 38-A6-S en béton armé sain, les résultats de la première mesure après 9 semaines d'entreposage au laboratoire climatisé, ne sont pas très différents de celles obtenues pour les trois mesures réalisées après des intervalles de séchage d'une semaine, excepté celles de la résistance d'enrobage. Pour cette grandeur, l'influence du mouillage est observée entre la 1^{ère} et la 2^{ème} mesure, avec une diminution de l'ordre de 500 Ohms.

En ce qui concerne les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} mesures, les valeurs moyennes et les dispersions sont respectivement, pour E_{corr} de -164 mV et de 19 mV, pour R_e de 1332 Ohms et de 167 Ohms (soit 13%) et pour J_{corr} de 0.03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ de 0.006 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Les valeurs de E_{corr} (-170 mV) et de J_{corr} (0.03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) témoignent, pour les armatures de cette dalle en béton sain, d'un niveau de corrosion négligeable [83].

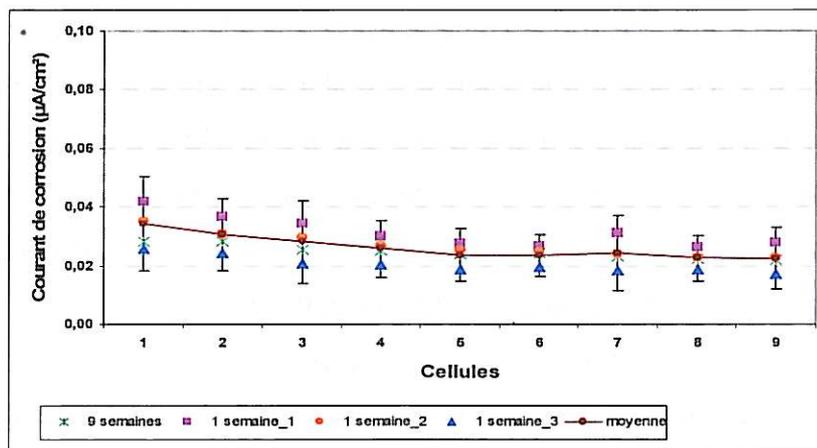
Les dalles en béton armé sain peuvent donc être caractérisées de manière satisfaisante à l'aide du protocole 1 tout comme les dalles carbonatées.



a) Ecorr



b) Re



c) Jcorr

Figure III-7 : Mesures électrochimiques de la dalle 38-A6-S suivant le protocole 1

III.1.3.3 Mesures électrochimiques d'une dalle carbonatée avec le protocole 2

Les résultats obtenus à l'aide du protocole 2 (Figure III-8) sont similaires à ceux obtenus avec le protocole 1 et permettent également d'avoir une bonne répétabilité des mesures.

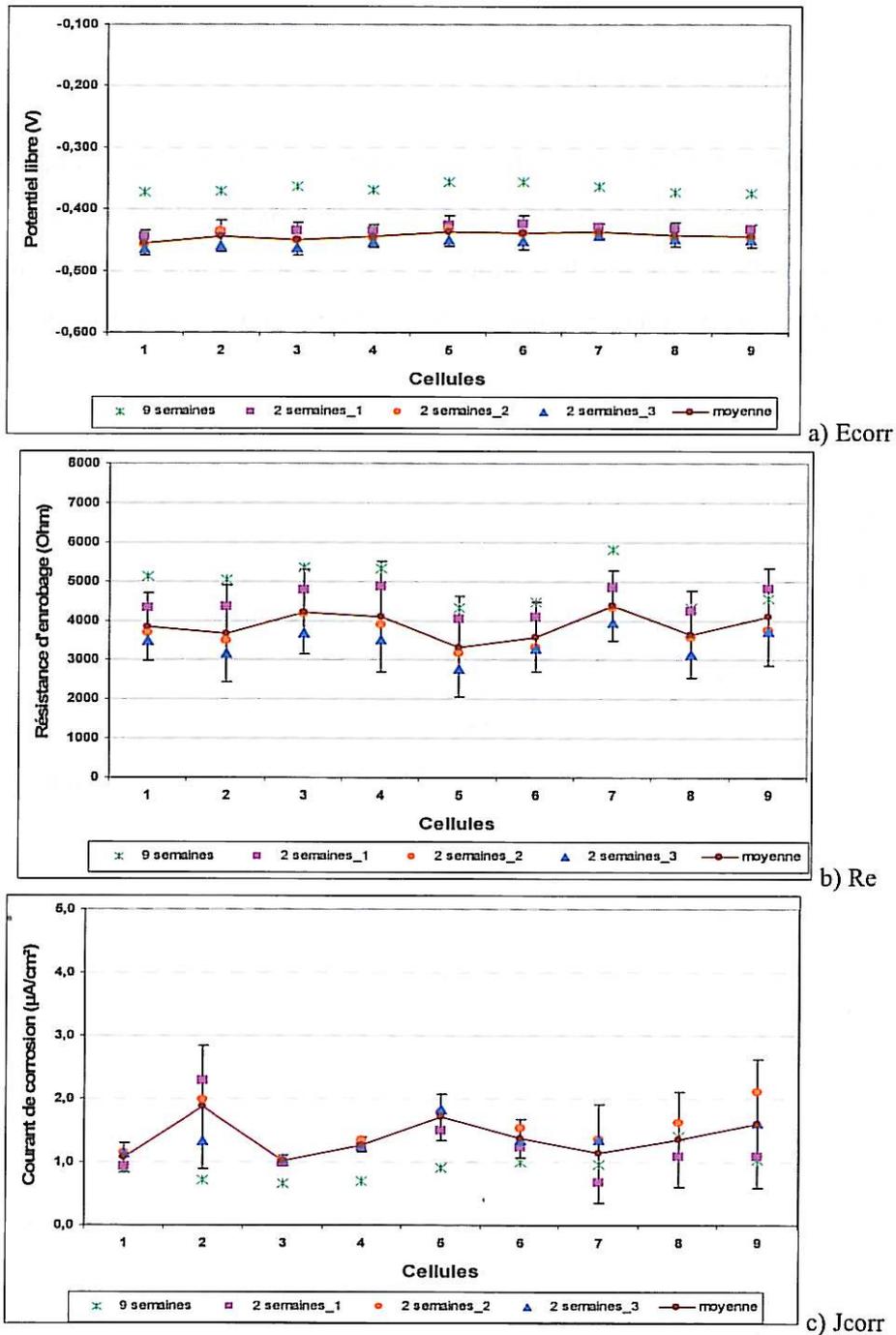
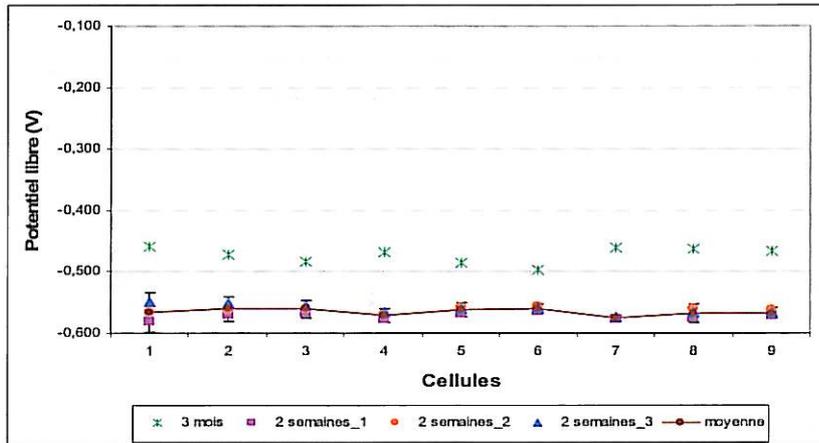


Figure III-8 : Mesures électrochimiques de la dalle 27-A6 suivant le protocole 2

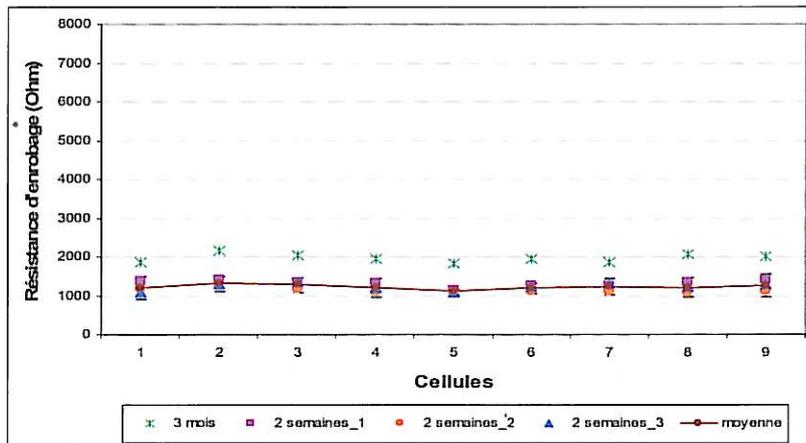
C'est le protocole 1 qui a été retenu comme pré conditionnement hydrique car il nécessite une durée plus courte (d'une semaine).

III.1.3.4 Mesures électrochimiques en immergeant la dalle dans l'eau pendant les mesures suivant le protocole 2

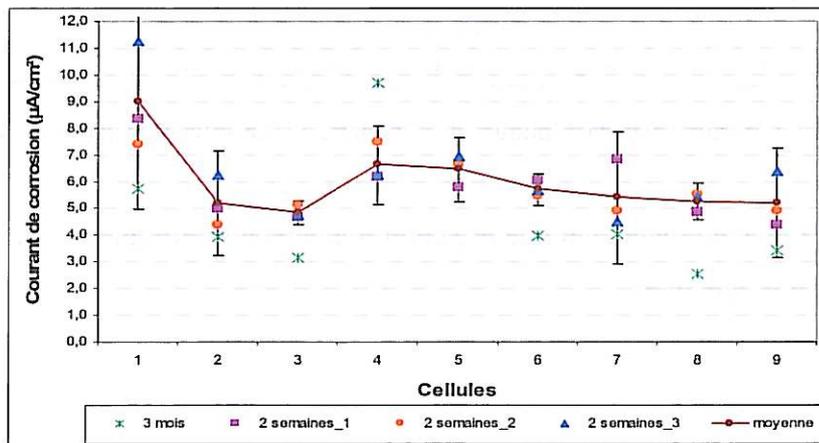
Les résultats des mesures électrochimiques en immergeant les dalles complètement dans l'eau (Figure III-9) sont très répétables en termes de potentiel libre et de résistance de l'enrobage. Cependant au niveau du courant de corrosion, l'immersion de la dalle ne semble pas apporter une meilleure répétabilité par rapport à la mesure réalisée à l'air.



a) Ecorr



b) Re



c) Jcorr

Figure III-9 : Mesures électrochimiques en immergeant la dalle 31-A6 dans l'eau suivant le protocole 2

III.1.4 Résultats des caractérisations électrochimiques des dallettes après carbonatation

La caractérisation électrochimique des dallettes "A3" et "A6", après carbonatation accélérée, a pour but de vérifier l'état de corrosion "initial" des armatures. Elle va également permettre de définir les différents lots : dallettes témoins carbonatés, dallettes qui seront réalcalinisées par courant imposé et dallettes qui seront réalcalinisées par anode sacrificielle.

III.1.4.1 Caractérisation électrochimique des dallettes "A3" après carbonatation

Les résultats électrochimiques de potentiel libre, de résistance d'enrobage et de densité de courant de corrosion des dallettes "A3" (valeurs moyennes des 9 cellules par dallette), après carbonatation accélérée, sont présentés sur la Figure III-10. Les données par cellules sont reportées dans l'Annexe 7.

Nota : les caractérisations électrochimiques des dallettes "A3" ne comprennent pas d'étape de préconditionnement (protocole 1).

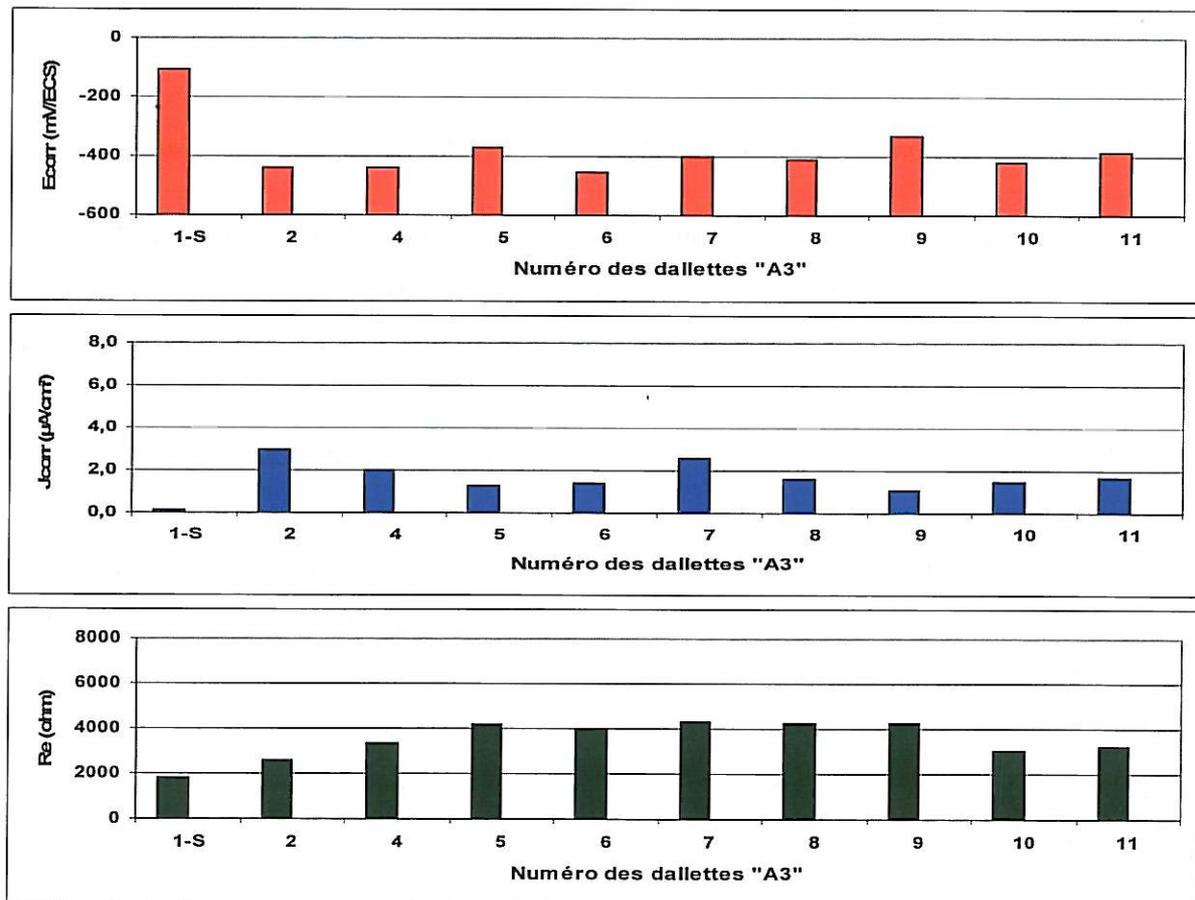


Figure III-10 : Caractérisations électrochimiques "initiales" des dallettes "A3" après carbonatation

Les valeurs de potentiel libre et de la densité de courant de corrosion de la dalle saine 01-A3-S sont respectivement de -100 mV et de 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ et correspondent à un état passif des armatures. Les potentiels libres (valeur moyenne -408 mV avec un écart-type 38 mV) et les densités de courant de corrosion (valeur moyenne 1.8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ avec un écart-type 0.6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) des 9 dalles carbonatées révèlent un état de corrosion actif des armatures. Les résistances de l'enrobage du béton des dalles carbonatées (valeur moyenne 3695 Ohms avec un écart-type 655 Ohms) sont plus grandes que celles du témoin sain (1790 Ohms). Cette augmentation de résistivité s'explique par le fait que la carbonatation d'un béton conduit à une diminution de sa porosité.

Finalement, la répartition des dalles (témoin sain, témoin carbonaté, dalles à réalcaliniser) est indiquée dans le Tableau III-1.

Tableau III-1 : Répartition des dalles "A3"

Dalle témoin sain	01-A3-S
Dalle témoin carbonaté	02-A3-C
Dalles à réalcaliniser par courant imposé	04, 05, 06 et 07-A3-I
Dalles à réalcaliniser par anode sacrificielle	08, 09, 10 et 11-A3-A

III.1.4.2 Caractérisation électrochimique des dalles "A6" après carbonatation

Les résultats électrochimiques de potentiel libre, de résistance d'enrobage et de densité de courant de corrosion des dalles "A6" (valeurs moyennes des 9 cellules par dalle), après carbonatation accélérée, sont présentés sur la Figure III-11. Les données par cellule sont reportées dans l'Annexe 8.

Nota : Les caractérisations des dalles "A6" ont été réalisées à l'aide du protocole 1.

Les valeurs de potentiels libres et de densités de courant de corrosion des deux dalles en béton témoin sain (12-A6-S et 38-A6-S) sont respectivement voisines de -150 mV et 0.03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ et indiquent un état passif des armatures. Les valeurs de potentiels libres (valeur moyenne -440 mV avec un écart-type 73 mV) et de densités de courant de corrosion (valeur moyenne 1.9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ avec un écart-type 1.4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) des 19 dalles carbonatées révèlent un état de corrosion actif des armatures.

La fourchette importante des valeurs des résistances de l'enrobage des dalles carbonatées (valeur moyenne 3426 Ohms avec un écart-type 1404 Ohms) témoigne de l'hétérogénéité du

béton même si la formulation, la fabrication et le vieillissement par carbonatation accéléré de l'ensemble des dalles a été maintenu constant.

Nota : Après carbonatation accélérée, les résultats des caractérisations électrochimiques obtenus sur les dalles "A3" et sur les dalles "A6" sont similaires.

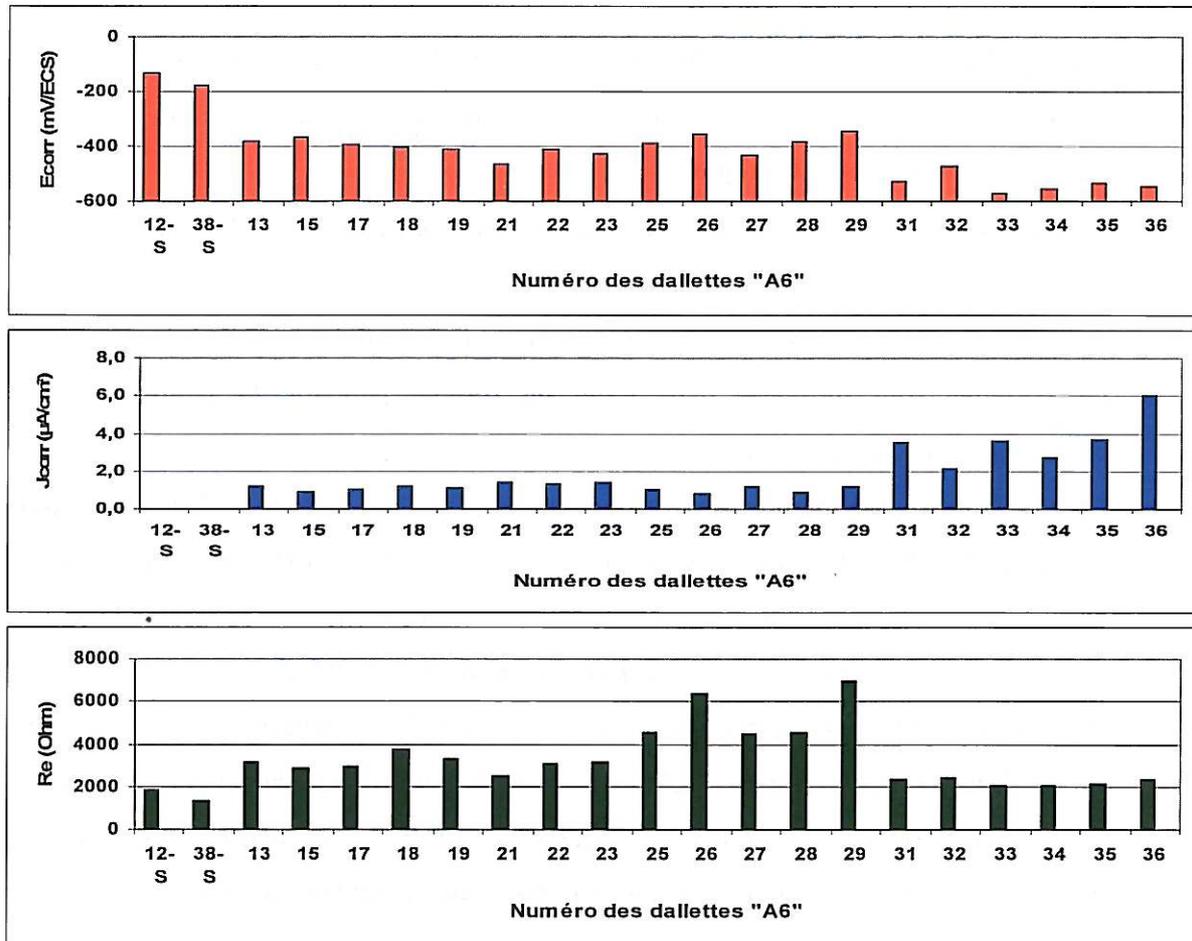


Figure III-11 : Caractérisations électrochimiques des dalles "A6" après carbonatation

III.2 Essais de corrosion accélérée artificielle des dalles "A6"

L'étude sur les dalles "A6" porte sur l'utilisation du traitement de réalcalinisation en tant que réparation "réhabilitation" et il fallait donc que le niveau de corrosion des armatures des dalles "A6" soit plus avancé que celui des dalles "A3". Pour cela, une étape de corrosion accélérée a été menée.

III.2.1 Protocoles des méthodes de corrosion accélérée

Le vieillissement climatique par cycles d'humidification/séchage a d'abord été choisi parce qu'il s'apparente plus au processus de corrosion naturelle. Toutes les dalles carbonatées avec 6 armatures ont été placées dans une enceinte climatique et ont été soumises aux cycles suivants :

- humidification (45°C et 92% HR) dans une enceinte climatique pendant 5 jours,
- séchage dans un laboratoire climatisé (22°C et 60% HR) pendant 2 jours,
- suivi régulier (toutes les 2 semaines) de l'avancement de la corrosion à l'aide de caractérisations électrochimiques,
- et répétition de ces cycles hebdomadaires pendant une durée totale de 3 mois.

La méthode de corrosion potentiostatique a ensuite été utilisée suivant le protocole suivant :

- les dalles sont trempées dans l'eau du robinet pendant 24 heures avant de commencer la corrosion potentiostatique.
- Lors de la corrosion potentiostatique, les 6 armatures de la dalle en béton sont toutes reliées entre elles et connectées au pôle plus de l'alimentation : elles jouent le rôle d'anode. La cathode, connectée au pôle moins de l'alimentation, est formée par deux grilles de forme carrée (20 x 20 cm) en Titane-Platiné, placées dessus et dessous la dalle de manière à corroder toute la circonférence des armatures. l'électrolyte utilisé est de l'eau du robinet. La face inférieure de la dalle trempe dans l'eau (dans un bac) et la face supérieure est humidifiée à l'aide d'une piscine remplie d'eau. Le schéma du montage de corrosion potentiostatique et la photo de l'essai sont présentés sur la Figure III-12.
- La densité de courant choisie est de 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ d'acier (soit 22.6 mA pour les 6 armatures d'une dalle) et la durée de 72 heures. Ces deux paramètres conduisent à des niveaux de corrosion satisfaisants (estimation au mieux 10 μm de dissolution de fer à valence 2 avec 100% de l'efficacité du courant selon la loi de Faraday (Eq. I-2)) et ce, sans fissurer le béton [84]. Un suivi de la corrosion accélérée est réalisé à l'aide d'un potentiostat afin de vérifier que la polarisation des armatures reste dans le domaine anodique.

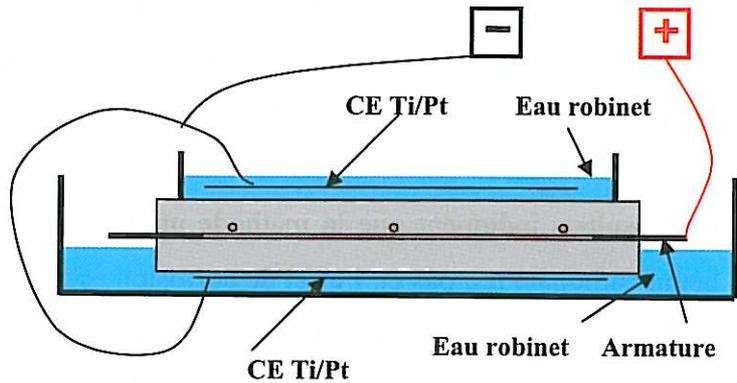


Figure III-12 : Illustration de la corrosion accélérée intensiostatique à l'aide d'une alimentation électrique

III.2.2 Efficacité des deux méthodes de corrosion accélérée

L'efficacité de ces deux méthodes de corrosion accélérée a été comparée à l'aide de caractérisations électrochimiques et d'observations visuelles des armatures (destructives).

III.2.2.1 Comparaison des méthodes de corrosion accélérée à l'aide de caractérisations électrochimiques

Les résultats des caractérisations électrochimiques réalisées sur la dalle 27-A6, après la carbonatation, après 3 mois de cycles d'humidification/séchage et après corrosion intensiostatique sont illustrés respectivement sur la Figure III-13a et b.

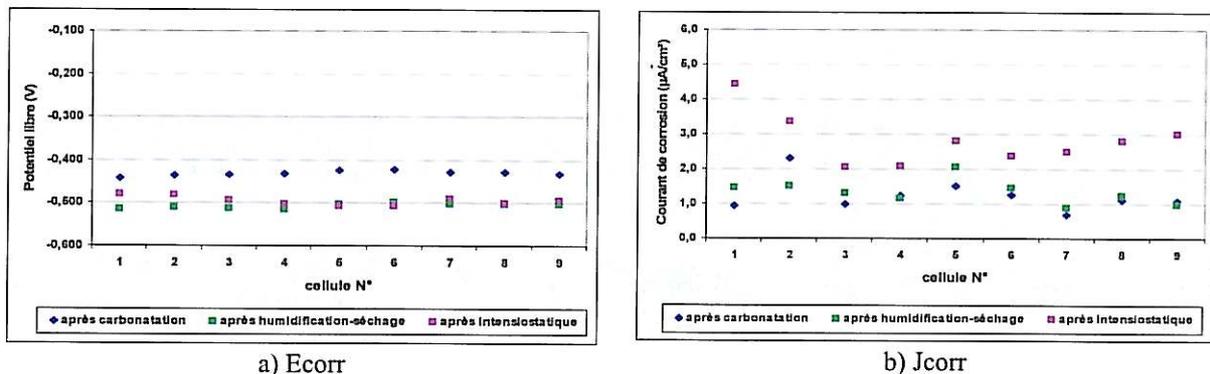


Figure III-13 : Evolution d'E_{corr} et de J_{corr} après carbonatation et après les deux types de corrosion accélérée

Après carbonatation accélérée, les valeurs de potentiel libre et de courant de corrosion des armatures étaient respectivement voisines de -420 mV et 1 µA/cm². Les cycles d'humidification/séchage conduisent à une diminution des valeurs de potentiel vers -500 mV

mais ne modifient pas significativement les courants de corrosion. La corrosion intentiostatique conduit également à une diminution des valeurs de potentiel vers -500 mV et mais une augmentation significative des valeurs de courant de corrosion (doublées voire triplées).

Ces résultats indiquent que la méthode utilisant des cycles humidification/séchage pour un béton carbonaté n'a pas eu l'effet de corrosion accélérée attendu, et ce même après une durée de 3 mois. En effet, les valeurs de potentiels libres plus négatives peuvent également être attribuées à une augmentation de l'humidité dans le béton due aux différents cycles.

En revanche la méthode intentiostatique a permis de corroder significativement les armatures enrobées dans un béton carbonaté.

III.2.2.2 Comparaison des méthodes de corrosion accélérée à l'aide de caractérisations visuelles (destructives)

Les photos (Figure III-14a, b et c) montrent respectivement l'état de corrosion après carbonatation, après les cycles d'humidification/séchage et après corrosion intentiostatique des armatures de la dalle 30-A6-C. Après la carbonatation artificielle, les armatures n'ont pas été oxydées de manière homogène (a). Après les cycles d'humidification/séchage, il n'y a pas eu d'évolution des produits de corrosion sur la surface des armatures (b). Par contre, après la corrosion intentiostatique (c), la surface des armatures est entièrement recouverte d'oxydes de fer qui étaient de couleur verte à l'ouverture du béton et qui noircissent immédiatement au contact de l'air. Ces rouilles vertes sont très actives et très instables et sont caractéristiques d'une corrosion dans un milieu non aéré.

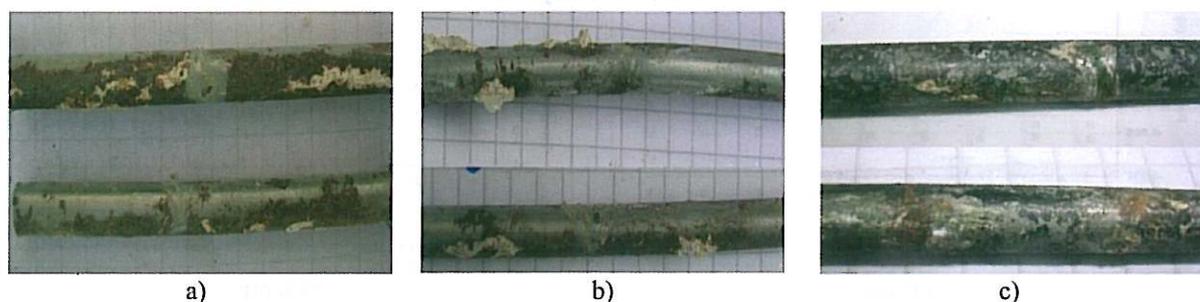


Figure III-14 : Observations visuelles des oxydes de fer formés a) après carbonatation ; b) après les cycles d'humidification/séchage ; c) après corrosion intentiostatique.

Ces observations visuelles des armatures confirment les résultats des caractérisations électrochimiques. La méthode de corrosion intentiostatique est efficace pour accélérer la

corrosion des armatures enrobées dans un béton carbonaté (contrairement aux cycles d'humidification/séchage).

Après 3 mois de cycles d'humidification/séchage, les 19 dalles carbonatées avec 6 armatures ont donc été soumises à une corrosion intentiostatique ($100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pendant 72h).

III.2.3 Caractérisation électrochimique des dalles "A6" après corrosion intentiostatique

Les résultats électrochimiques de potentiel libre, de résistance d'enrobage et de densité de courant de corrosion des dalles "A6" (valeurs moyennes des 9 cellules par dalle), après carbonatation accélérée et après corrosion intentiostatique, sont présentés sur la Figure III-15. Les données par cellules sont reportées dans l'Annexe 8.

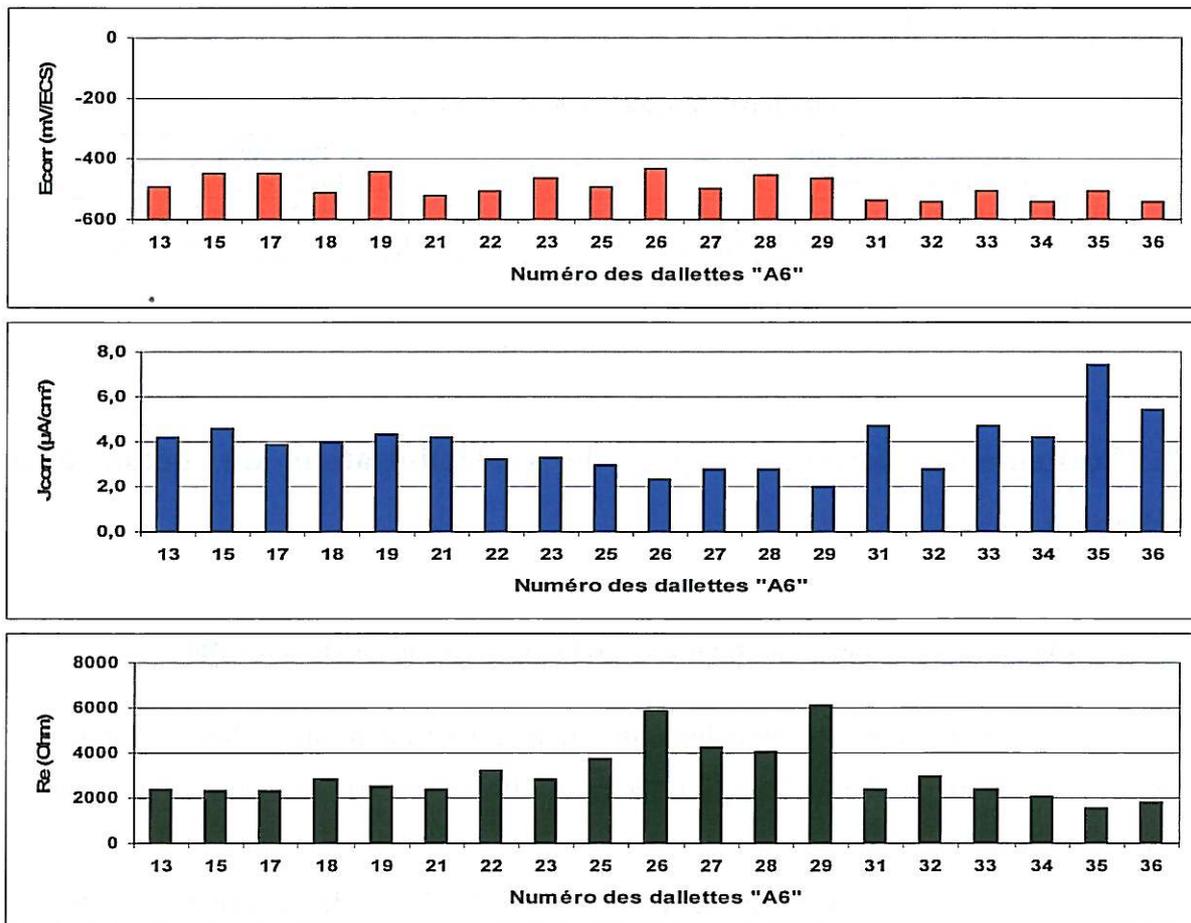


Figure III-15 : Caractérisations électrochimiques "initiales" des dalles "A6" carbonatées, après corrosion accélérée intentiostatique

Après corrosion accélérée intentiostatique, les potentiels libres des 19 dalles carbonatées ont diminué vers des valeurs plus négatives (valeur moyenne -492 mV avec un écart-type 37

mV). Les densités de courant de corrosion ont augmenté d'un facteur 2 voire 3 (entre 2.0 et 7.4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ avec une valeur moyenne 3.9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ et son écart-type 1.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Cependant une grande dispersion des résistances de l'enrobage du béton des dalles carbonatées (de 1568 à 6143 Ohms avec une valeur moyenne 3059 Ohms et son écart-type 1252 Ohms) est toujours observée, même si ces mesures ont été réalisées en utilisant le protocole 1 (III-1.3.). Cette forte dispersion résulte de l'hétérogénéité propre au béton même si toutes les dalles ont été fabriquées de la même manière.

En prenant en compte les dispersions des résultats électrochimiques, les dalles ont été réparties de manière à constituer des lots équivalents par rapport à leur niveau de corrosion avant de subir le traitement de réalcalinisation

Finalement, la répartition des dalles (témoin sain, témoin carbonaté, dalles à réalcaliniser) est indiquée dans le Tableau III-2.

Tableau III-2 : Répartition des dalles "A6"

Dalles témoins sains	12 et 38-A6-S
Dalles témoins carbonatés	17, 18, 19, 26 et 29-A6-C
Dalles à réalcaliniser par courant imposé	13, 15, 22, 25, 27, 33 et 35-A6-I
Dalles à réalcaliniser par anode sacrificielle	21, 23, 28, 31, 32, 34 et 36-A6-A

III.3 Traitements électrochimiques de réalcalinisation du béton armé carbonaté

III.3.1 Principe général des traitements électrochimiques de réalcalinisation

Deux procédés de traitement électrochimiques de réalcalinisation ont été testés : par courant imposé (I) et par anode sacrificielle (A). La Figure III-16 illustre le schéma de montage des deux procédés :

- le procédé par courant imposé (procédé NOVBETON[®] de la société RENOFORS) utilise une alimentation électrique qui débite un courant de 1 Ampère par mètre carré de surface d'armature. L'armature est la cathode et elle est connectée au pôle négatif de l'alimentation. L'anode, une grille en acier ou en alliage de titane, est connectée au pôle positif de l'alimentation. La conductivité est assurée à l'aide d'une pâte de cellulose contenant une solution de carbonate de potassium.

- le procédé par anode sacrificielle (procédé REGEBETON[®] de la société FREYSSINET) utilise une grille en alliage d'aluminium qui sert d'anode sacrificielle et qui est placée sur le parement béton. Cette grille est connectée directement aux armatures et est enrobée dans une pâte cellulose contenant une solution de carbonate de sodium.

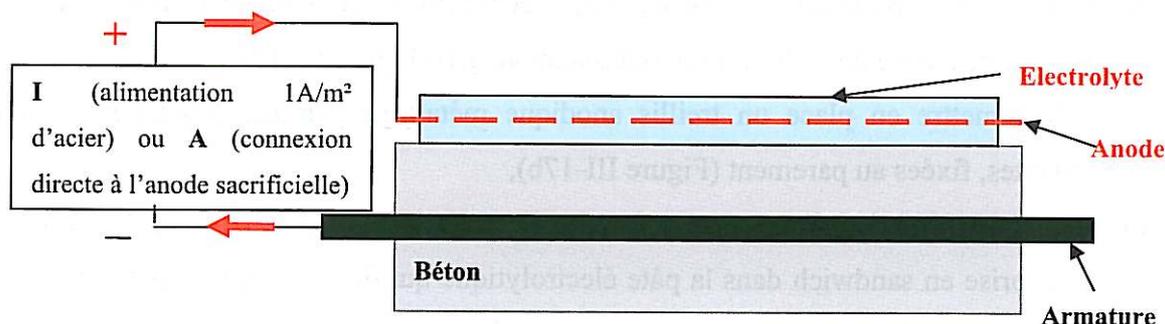


Figure III-16 : Schéma des traitements de réalcalinisation par courant imposé ou par anode sacrificielle

III.3.2 Traitement de maintenance et de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé courant imposé

Au laboratoire, les paramètres du traitement de réalcalinisation par courant imposé dans le cadre d'une maintenance (4 dalles "A3" : 04-A3-I, 05-A3-I, 06-A3-I, 07-A3-I (juin 2005)) et d'une réhabilitation (7 dalles "A6" : 13-A6-I, 15-A6-I, 22-A6-I, 25-A6-I, 27-A6-I, 33-A6-I et 36-A6-I (avril 2008)) étaient :

- Les armatures (cathode) de chaque dalle étaient reliées entre elles et étaient connectées à une anode individuelle.
- Une densité de courant imposé de 1A/m^2 d'acier (soit pour les dalles "A3" un courant de 11 mA pour une surface d'acier de 113 cm^2 et pour les dalles "A6" un courant de 22 mA pour une surface d'acier de 226 cm^2).
- Une durée de traitement de 8.5 jours qui correspond à une charge totale de 200 A.h/m^2 d'acier comme indiqué dans la spécification technique [29].

III.3.2.1 Application du traitement de réalcalinisation par courant imposé

III.3.2.1.1 Mise en œuvre du traitement de maintenance des dalles "A3"

La mise en œuvre du traitement de réalcalinisation par courant imposé réalisée sur les dalles "A3" a consisté à :

- a) appliquer une première couche de pâte électrolytique (à base de cellulose et d'un électrolyte à base de carbonate de potassium 40 g/l) (Figure III-17a),
- b) puis à mettre en place un treillis anodique métallique sur des baguettes en bois isolantes, fixées au parement (Figure III-17b),
- c) à appliquer une deuxième couche de pâte électrolytique (Figure III-17c). L'anode est alors prise en sandwich dans la pâte électrolytique qui doit être maintenue humide en permanence afin d'assurer une bonne conductibilité.
- d) et à procéder aux raccordements électriques au générateur de courant continu :
 - Connexion des trois armatures de chaque dalle ensemble et branchement au pôle négatif du générateur
 - Branchement de l'anode au pôle positif du générateur
 - Mise en série des 4 dalles

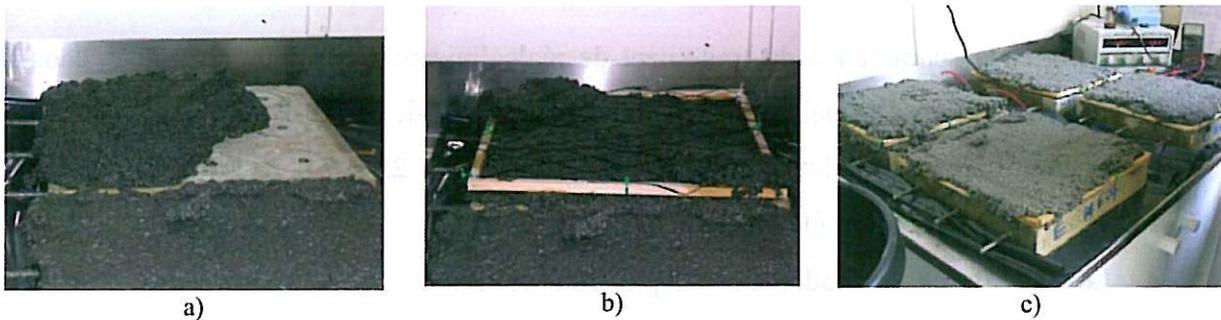


Figure III-17 : Application du traitement de maintenance par réalcalinisation suivant le procédé courant imposé sur les 4 dalles "A3"

III.3.2.1.2 Mise en œuvre du traitement de réhabilitation des dalles "A6"

La mise en œuvre du traitement de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé courant imposé sur les dalles "A6" (Figure III-18) a été réalisée comme pour le traitement de maintenance des dalles "A3", excepté que les dalles "A6" étaient surélevées à l'aide

de cales en plastiques (Figure III-18a) de manière à ce que la face inférieure en béton ne trempe pas dans l'électrolyte (si ce dernier venait à couler le long des bords de la dalle).

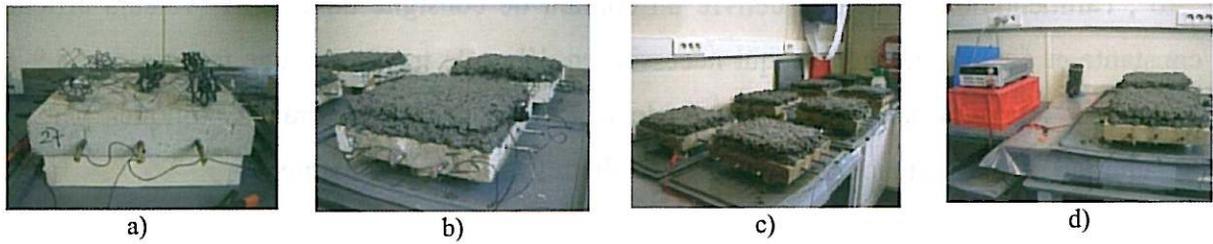


Figure III-18 : Application du traitement de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé courant imposé sur les 7 dalles "A6"

III.3.2.2 Suivi du traitement de réalcalinisation par courant imposé

III.3.2.2.1 Suivi du traitement de maintenance des dalles "A3"

Lors du traitement de maintenance par réalcalinisation par courant imposé des 4 dalles "A3"; l'alimentation électrique délivre un courant de consigne de 11 mA (valeurs affichées entre 11 et 12.8 mA) ce qui nécessite en début de traitement une tension de 18 V. Après 8.5 jours, la tension devient égale à 12.7 V ce qui pourrait s'expliquer par une variation de la résistance d'enrobage des dalles pendant le traitement.

Le suivi, en continu, de la température du laboratoire et de la tension aux bornes d'une résistance de 10 Ohms mise en série dans le circuit des dalles, a été réalisé à l'aide d'un datalogger Sefram. Les enregistrements de la Figure III-19 montrent que la température reste voisine de 26°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) et que les valeurs de tension sont comprises entre 110 et 126 mV (le courant imposé de 1A/m² d'acier est donc bien respecté) tout au long de la durée du traitement.

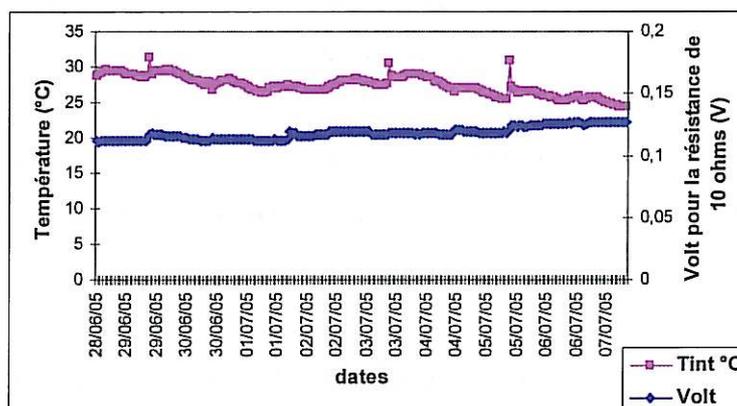


Figure III-19 : Suivi du traitement de réalcalinisation par courant imposé à l'aide d'un datalogger

III.3.2.2.2 Suivi du traitement de réhabilitation des dallettes "A6"

Lors du traitement de réhabilitation par réalcalinisation par courant imposé des 7 dallettes "A6"; l'alimentation électrique délivre un courant de consigne de 22 mA (valeurs affichée constante et égale à 23 mA) ce qui nécessite en début de traitement une tension de 58.9 V. Après 8.5 jours, la tension devient égale à 25.7 V ce qui pourrait s'expliquer par une diminution de la résistance d'enrobage des dallettes pendant le traitement.

III.3.2.3 Dépolarisation des armatures après le traitement de réalcalinisation par courant imposé

III.3.2.3.1 Dépolarisation des dallettes "A3" après le traitement de maintenance

Afin d'estimer le temps de dépolarisation des armatures des dallettes "A3" après le traitement de maintenance, un suivi du potentiel libre de l'armature n°2 (cellule 5) de chaque dallette a été réalisé (Figure III-20).

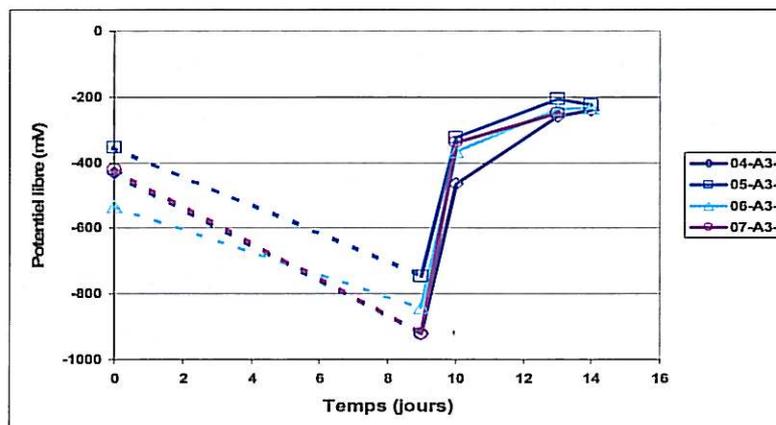


Figure III-20 : Dépolarisation des armatures n°2 des dallettes "A3" après le traitement de maintenance par courant imposé

Nota : Ici '0' signifie caractérisation initiale des dallettes "A3" après carbonatation accélérée artificielle et avant traitement. L'échéance, 9 jours, rend compte de la valeur de potentiel libre tout de suite après la fin du traitement.

Avant le traitement, les valeurs de potentiel libre des armatures n°2 des dallettes étaient comprises entre - 350 et - 530 mV. A la fin du traitement (9 jours), les valeurs ont beaucoup

diminué (comprises entre - 747 et - 923 mV) et indiquent que la polarisation s'est bien effectuée. La dépolarisation (valeurs de potentiel libre stables et voisines de -250 mV) est observée 5 jours après la fin du traitement.

III.3.2.3.2 Dépolarisation des dalles "A6" après le traitement de réhabilitation

Les mêmes phénomènes de polarisation et de dépolarisation (après 8 jours) des armatures des dalles "A6" après le traitement de réhabilitation par courant imposé ont été observés. Les résultats du suivi du potentiel libre sont reportés dans l'Annexe 6.

III.3.3 Traitement de maintenance et de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé anode sacrificielle

Au laboratoire, les paramètres du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle dans le cadre d'une maintenance (4 dalles "A3" : 08-A3-A, 09-A3-A, 10-A3-A, 11-A3-A (juillet 2005)) et d'une réhabilitation (7 dalles "A6" : 21-A6-A, 23-A6-A, 28-A6-A, 31-A6-A, 32-A6-A, 34-A6-A et 36-A6-A (avril 2008)) étaient :

- Les armatures de chaque dalle étaient reliées entre elles et étaient connectées à une anode individuelle.
- Les courants entre les armatures et l'anode sacrificielle de chaque dalle ont été mesurés tout au long du traitement à l'aide d'un datalogger Sefram.
- Pour respecter la charge totale de courant (200 A.h/m²) indiquée dans la spécification technique CEN/TS 14038-1 [29], une durée de 1 mois a été nécessaire pour le traitement de maintenance des dalles "A3" et une durée de 4 mois a été nécessaire pour les dalles "A6".

III.3.3.1 Application du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle

III.3.3.1.1 Mise en œuvre du traitement de maintenance des dalles "A3"

La mise en place du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle a comporté 8 étapes :

- a) Humidification du béton avec l'électrolyte Régéliquide à base de carbonate de sodium (Figure III-21a),

- b) Application d'une couche de pâte saturée d'électrolyte à base de carbonate de sodium sur le béton (Figure III-21b),
- c) Mise en place de l'anode (grille en alliage aluminium/magnésium) qui est fixée sur une baguette en bois qui l'isole du parement béton (Figure III-21c),
- d) Connexion de la grille en aluminium aux 3 armatures de chaque dalle et à une résistance de 1 Ohm reliée en série (Figure III-21d),
- e) Connexion en parallèle des dataloggers Sefram à la résistance de 1 Ohm de chaque dalle,
- f) Humidification journalière de la pâte avec de l'eau, la pâte électrolyte devant être maintenue humide en permanence afin d'assurer une bonne conductibilité (Figure III-21e).
- g) Surveillance du bon fonctionnement du système en observant le courant débité ($i = u/1$) entre la grille et les armatures (calculé à partir de la tension, u , mesurée par le datalogger) et en mesurant le potentiel d'électrode des armatures à l'aide d'une électrode de référence Cu/CuSO_4 .
- h) Dépose de l'ensemble de l'installation quand la charge totale du courant débité a atteint 200 A.h/m^2 d'acier. A la fin du traitement, la grille en alliage aluminium/magnésium est fortement consommée. La Figure III-21f illustre l'état de la grille avant (à gauche) et après (à droite) le traitement.

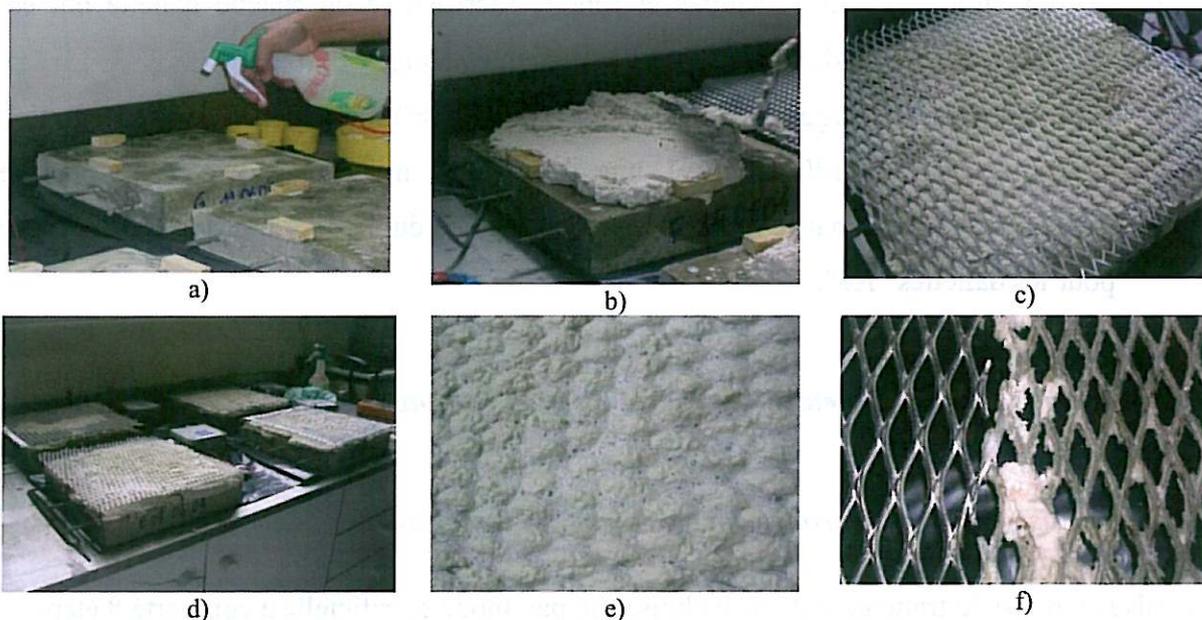


Figure III-21 : Application du traitement de maintenance par réalcalinisation suivant le procédé anode sacrificielle sur les dalles "A3"

III.3.3.1.2 Mise en œuvre du traitement de réhabilitation des dalles "A6"

La mise en œuvre du traitement de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé anode sacrificielle sur les dalles "A6" (Figure III-22) a été réalisé comme pour le traitement de maintenance des dalles "A3", excepté que les dalles "A6" étaient surélevées à l'aide de cales en plastique (Figure III-22a) de manière à ce que la face inférieure en béton ne trempe pas dans l'électrolyte (si ce dernier venait à couler le long des bords de la dalle). Il faut noter que dans ce traitement de réhabilitation les anodes ont dû être renouvelées à 2 reprises (Figure III-22c).

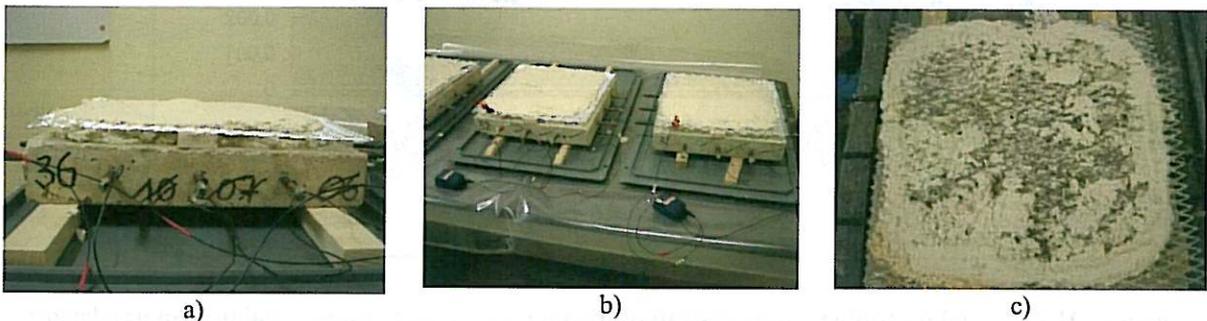


Figure III-22 : Application du traitement de réhabilitation par réalcalinisation suivant le procédé anode sacrificielle sur les dalles "A6"

III.3.3.2 Suivi du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle

III.3.3.2.1 Suivi du traitement de maintenance des dalles "A3"

Le suivi du traitement de maintenance des dalles "A3" a été réalisé à l'aide d'un datalogger Sefram qui enregistre en continu la température du local et la tension mesurée aux bornes d'une résistance de 1 ohm dans le circuit anode/armatures. La température est stable et voisine de 23°C. La mesure en temps réel du courant débité par l'anode sacrificielle permet de calculer la charge totale de courant que reçoivent les armatures de chaque dalle (Annexe 4). A titre d'exemple, l'enregistrement du courant lors du traitement de la dalle 08-A3-A est présenté sur la Figure III-23. En début de traitement, le courant augmente et atteint après 15 jours une valeur maximale de 5 mA. Ensuite, il diminue et devient égal à 1 mA après 3 semaines et reste constant à 1 mA sur la quatrième semaine. Cet enregistrement permet de calculer la charge totale de courant débité par l'anode sacrificielle en fonction du temps de traitement. Il s'avère qu'après 33 jours, pour la dalle 08-A3-A, la charge totale est égale à

202 A.h/m² et donc proche des 200 A.h/m² indiqué dans la spécification technique CEN/TS 14038-1 [29]. La charge totale pour les dalles 09-A3-A, 10-A3-A et 11-A3-A après une durée de traitement de 33 jours est respectivement égale à 226, 269 et 269 A.h/m².

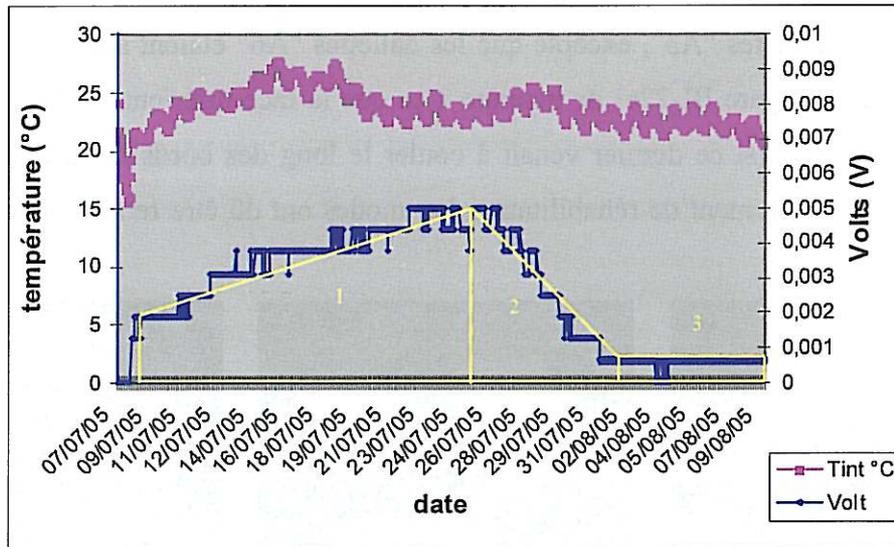


Figure III-23 : Suivi du traitement de réalcalinisation par anode galvanique à l'aide d'un datalogger (dalle 08-A3-A) et le calcul de la charge totale

III.3.3.2.2 Suivi du traitement de réhabilitation des dalles "A6"

Le suivi du traitement de réhabilitation par anode sacrificielle des dalles "A6" a été réalisé de la même manière que pour le traitement de maintenance des dalles "A3". La température est restée stable (22°C). Les courants débités maximum étaient de l'ordre de 3 à 6 mA et diminuaient très rapidement. L'anode sacrificielle a été changée à plusieurs reprises (2 ou 3 fois selon les dalles). Finalement, quatre mois ont été nécessaires pour atteindre la charge totale de 200A.h/m² indiquées dans la spécification technique CEN/TS 14038-1 [29]. Les résultats de charge totale (Annexe 5) sont de 179, 212, 201, 238, 218, 262 et 215 A.h/m² respectivement pour les dalles 21-A6-A, 23-A6-A, 28-A6-A, 31-A6-A, 32-A6-A, 34-A6-A et 36-A6-A après 4 mois.

Remarque : il est vraisemblable que, lors du traitement de réhabilitation, l'application du traitement REGEBETON n'a pas été réalisée avec les mêmes matières premières, nature de l'anode en alliage aluminium/magnésium et formulation de la pâte Régébéton, que lors du traitement de maintenance.

III.3.3.3 Dépolarisation des armatures après le traitement par anode sacrificielle

III.3.3.3.1 Dépolarisation des armatures des dallettes "A3" après le traitement de maintenance

Afin d'estimer le temps de dépolarisation des armatures des dallettes "A3" après le traitement de maintenance, un suivi du potentiel libre de l'armature n°2 (cellule 5) de chaque dallette a été réalisé (Figure III-24).

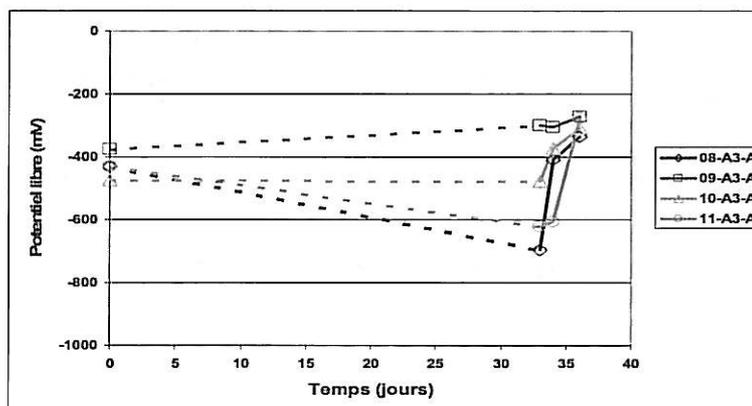


Figure III-24 : Dépolarisation de l'armature n°2 des dallettes "A3" après le traitement de maintenance par anode sacrificielle

Nota : Ici '0' signifie caractérisation initiale des dallettes "A3" après carbonatation accélérée artificielle et avant traitement. L'échéance 33 jours, rend compte de la valeur de potentiel tout de suite après la fin du traitement.

Avant le traitement, les valeurs de potentiel libre des armatures n°2 des dallettes étaient comprises entre -298 et -694 mV. A la fin du traitement (33 jours), les valeurs de potentiels ont diminué pour les dallettes 08 et 11 mais pas pour les dallettes 09 et 10. L'effet de polarisation pour le traitement par anode sacrificielle n'est pas très marqué.

La dépolarisation (valeurs de potentiel libre stables et voisines de -300 mV) est observée 3 jours après la fin du traitement.

III.3.3.3.2 Dépolarisation des armatures des dallettes "A6" après le traitement de réhabilitation

Les armatures des dallettes "A6" ont nécessité environ 8 jours après la fin du traitement par anode sacrificielle. Les résultats du suivi du potentiel libre sont reportés dans l'Annexe 6.

**Chapitre IV. Traitement de maintenance par
réalcalinisation des dalles en béton carbonaté
avec 3 armatures**



Dans ce quatrième chapitre, sont décrits les résultats de l'étude de l'efficacité du traitement de réalcalinisation appliqué en tant que réparation "maintenance" sur les dalles "A3" dont les armatures présentent une corrosion active. L'efficacité a été évaluée notamment par le biais de caractérisations analytiques (pH qualitatif et quantitatif, dosages d'alcalins...), mais aussi électrochimiques. Par ailleurs, la nature des produits de corrosion formés autour des armatures ainsi que l'impact du traitement de réalcalinisation sur la matrice cimentaire ont été étudiés par Microspectroscopie Raman et par MEB + EDS.

Ces différentes caractérisations ont été réalisées à plusieurs échéances : 15 jours, 10 semaines, 6, 12 et 24 mois après traitement et jusqu'à 30 mois après traitement (18 mois au laboratoire et 12 mois en extérieur (conditions naturelles)) afin d'étudier, non seulement, l'efficacité mais, également, la durabilité du traitement de maintenance par réalcalinisation suivant les procédés par courant imposé et par anode sacrificielle.

IV.1 Efficacité et durabilité du traitement de maintenance par réalcalinisation des dalles "A3"

IV.1.1 Caractérisations physico-chimiques du béton des dalles "A3" après traitement de maintenance

Afin d'évaluer l'efficacité du traitement de réalcalinisation, l'évolution du pH du béton d'enrobage a d'abord été suivie qualitativement à l'aide d'indicateurs colorés, puis de manière quantitative par des mesures de pH réalisées sur des suspensions. En complément, un dosage d'alcalins a été réalisé.

IV.1.1.1 Suivi de pH à l'aide d'indicateurs colorés

L'évolution du pH a été étudiée pour les bétons témoins, sains et carbonatés (Figure IV-1), ainsi que pour les bétons traités par réalcalinisation, selon les procédés par courant imposé et par anode sacrificielle (Figure IV-2) à l'aide de deux indicateurs colorés, la phénolphthaléine et la thymolphthaléine.



Figure IV-1 : Suivi de pH des dalles témoins en béton sain et carbonaté à l'aide d'indicateurs colorés

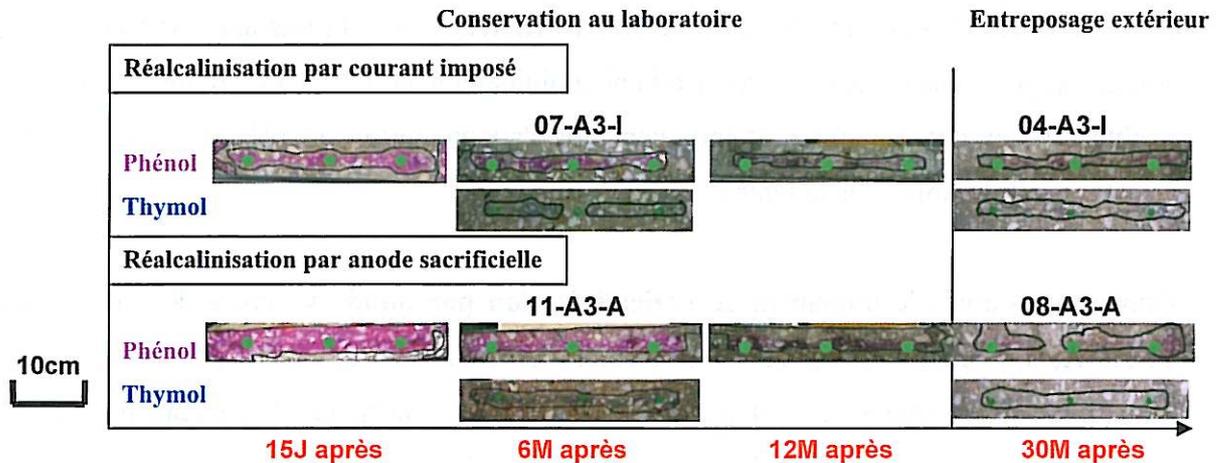


Figure IV-2 : Suivi de pH à l'aide d'indicateurs colorés des dalles "A3" récalcinisées par courant imposé et par anode sacrificielle

Nota : Sont-représentées de gauche à droite, les armatures 1, 2 et 3.

Sur la dalle témoin en **béton sain** (01-A3-S), la phénolphthaléine et la thymolphthaléine révèlent respectivement une coloration rose et bleue sur toute l'épaisseur de béton, ce qui signifie que le pH est supérieur à 11.

Sur la dalle témoin en **béton carbonaté**, 03-A3-C, la phénolphthaléine et la thymolphthaléine, restent incolores sur toute l'épaisseur, ce qui indique que le pH du béton est inférieur à 9 après un vieillissement de carbonatation artificielle de 2 mois. Les armatures des dalles se trouvent donc bien dans un enrobage de béton carbonaté avant le traitement de réalcalinisation. Toutefois, sur la dalle 02-A3-C, la phénolphthaléine et la thymolphthaléine révèlent des colorations rose et bleue autour des armatures 1 et 3 et restent incolores autour de l'armature 2. Ces résultats indiquent que seule l'armature 2 est enrobée dans un béton carbonaté. Etant donné que cette dalle 02-A3-C a servi de témoin carbonaté pour les caractérisations électrochimiques, seuls les résultats de l'armature 2 sont pris en compte.

Quinze jours après le traitement de **réalcalinisation par courant imposé**, sur la dalle 07-A3-I, la phénolphthaléine révèle des zones roses d'environ 2.5 cm de diamètre autour des

armatures et des zones roses également sur les bords extérieurs de la dalle. La réalcalinisation autour des armatures a donc bien eu lieu. Six mois après traitement, cette dalle montre les mêmes zones roses, mais de taille plus restreinte. Les résultats obtenus avec la thymolphtaléine confirment bien la réalcalinisation (valeur de pH supérieure à 11). Il est à noter que 12 mois après traitement, la phénolphtaléine ne vire plus que vers un rose très pâle.

Sur la dalle 04-A3-I entreposée 12 mois en extérieur, soit 30 mois après le traitement par courant imposé, des colorations roses à la phénolphtaléine et bleues à la thymolphtaléine sont visibles autour des armatures et indiquent que l'augmentation du pH du béton autour des armatures est durable dans le temps.

Quinze jours après le traitement de **réalcalinisation par anode sacrificielle**, sur la dalle 11-A3-A, la phénolphtaléine révèle une coloration rose sur l'ensemble de l'enrobage des 3 armatures (du parement de la dalle jusqu'au niveau d'armatures). La réalcalinisation du béton autour des armatures et du parement a donc bien eu lieu. Six mois après traitement, cette dalle montre les mêmes zones roses mais de taille plus restreinte. La coloration bleue révélée par la thymolphtaléine autour des armatures confirme bien la réalcalinisation (valeur de pH supérieure à 11). Il est également à noter que 12 mois après traitement, la phénolphtaléine ne vire plus que vers un rose très pâle.

Sur la dalle 08-A3-A entreposée 12 mois en extérieur, soit 30 mois après le traitement par anode sacrificielle, une coloration rose à la phénolphtaléine et une coloration bleue à la thymolphtaléine restent visibles indiquant que le béton est toujours réalcalinisé avec une valeur de pH supérieure à 11.

IV.1.1.2 Evaluation quantitative du pH à partir des suspensions

Les profils de pH des dalles témoins en béton sain et carbonaté sont présentés sur la Figure IV-3. Ceux des dalles traitées par réalcalinisation par courant imposé et par anode sacrificielle sont illustrés sur la Figure IV-4 et la Figure IV-5. Sur ces deux dernières figures, les droites grise et rouge représentent respectivement la valeur de pH d'un béton témoin sain et d'un béton témoin carbonaté.

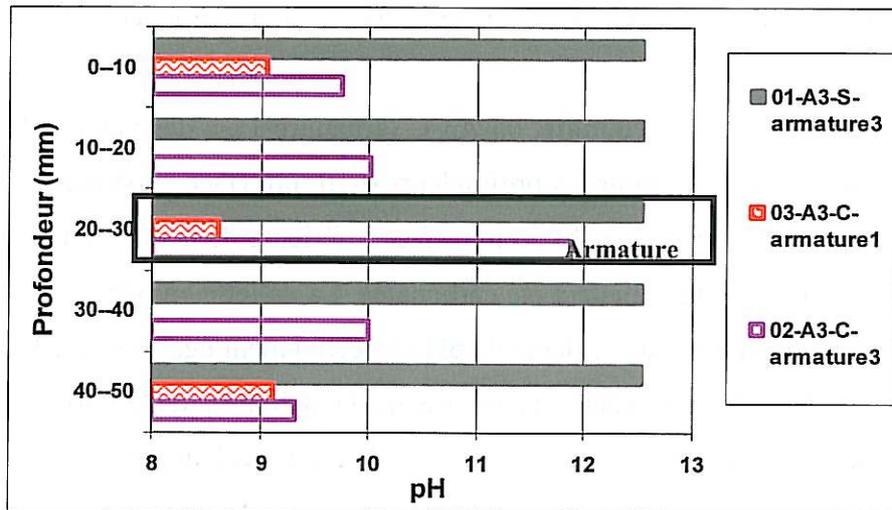


Figure IV-3 : Profils de pH des bétons témoins sain et carbonatés

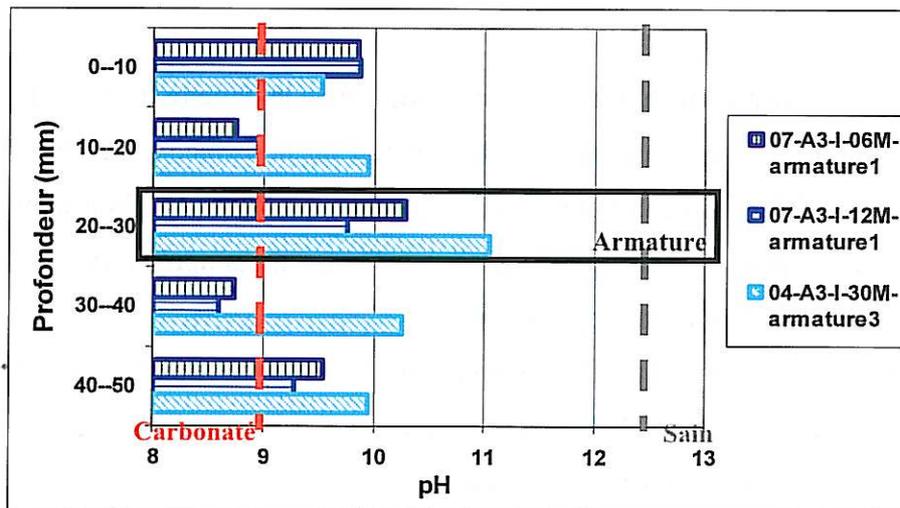


Figure IV-4 : Profils de pH des dalles "A3" après réalcalinisation par courant imposé

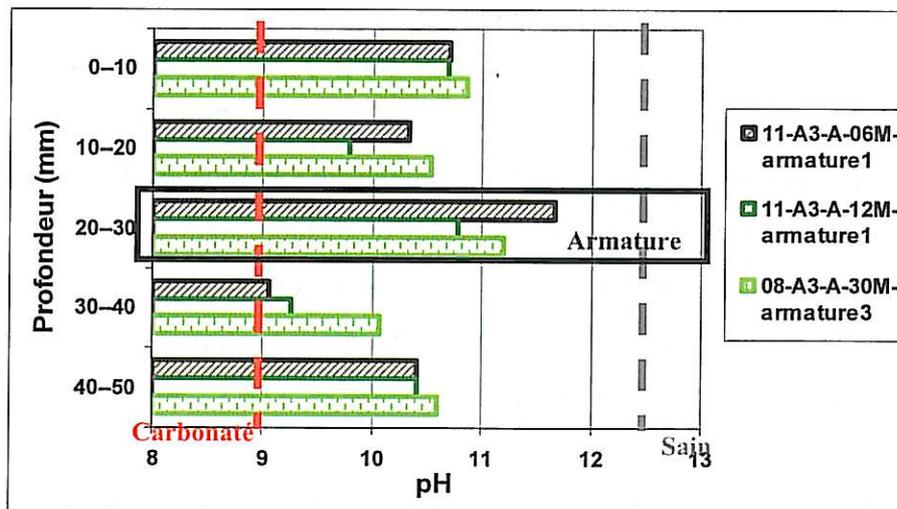


Figure IV-5 : Profils de pH des dalles "A3" après réalcalinisation par anode sacrificielle

Il en ressort que la dalle témoin en **béton sain**, 01-A3-S, a une valeur de pH égale à 12.5 sur toute son épaisseur.

La dalle témoin en **béton carbonaté**, 03-A3-C (armature 1), a des valeurs de pH égales à 9.1, 8.6 et 9.1 respectivement pour les profondeurs 0-10 mm (face supérieure de la dalle), 20-30 mm (niveau de l'armature) et 40-50 mm (face inférieure de la dalle), ce qui confirme que toute l'épaisseur de cette dalle a été carbonatée. La dalle en béton témoin carbonaté, 02-A3-C (armature 3), montre des valeurs de pH respectivement égales à 9.7, 11.9 et 9.3 pour des profondeurs de 0-10 mm (face supérieure de la dalle), de 20-30 mm (niveau de l'armature) et de 40-50 mm (face inférieure de la dalle). Ces résultats montrent que le béton autour de l'armature 3 n'était pas complètement carbonaté. D'après ces résultats, la valeur représentative du béton carbonaté est considérée égale à 9.

Six mois après la **réalcalinisation par courant imposé** de la dalle 07-A3-I, le pH du béton autour de l'armature 1 est égal à 10.3 et le pH du béton sur la surface traitée (profondeur de 0-10 mm) est égal à 9.9. Ces deux valeurs sont supérieures à celle du béton témoin carbonaté (03-A3-C) et démontrent l'efficacité du traitement. Douze mois après traitement, les valeurs de pH n'ont pas évolué de manière significative.

Sur la dalle 04-A3-I, entreposée 12 mois en extérieur soit 30 mois après le traitement par courant imposé, la valeur de pH du béton autour de l'armature 3 est égale à 11.1 ce qui témoigne de la durabilité de la réalcalinisation.

Six mois après la **réalcalinisation par anode sacrificielle** de la dalle 11-A3-A, le pH du béton sur les tranches 0-10 mm (parement, face traitée), 10-20 mm et jusqu'à 20-30 mm (béton autour de l'armature 1) est respectivement égal à 10.7, 10.3 et 11.7. Ces valeurs démontrent l'efficacité du traitement sur l'ensemble de l'enrobage de béton. Douze mois après traitement, les valeurs de pH n'ont pas évolué de manière significative.

Sur la dalle 08-A3-A, entreposée 12 mois en extérieur soit 30 mois après le traitement par anode sacrificielle, la valeur de pH du béton autour de l'armature 3 est égale à 11.2 ce qui témoigne de la durabilité de la réalcalinisation.

Il est à noter qu'après les deux procédés, la face inférieure du béton est également réalcalinisée. Étant donné qu'il n'y a pas de champ électrique en face inférieure, l'augmentation du pH pourrait être attribuée à l'électrolyte (dont la valeur de pH est de 10.4

pour le procédé par courant imposé et de 13.6 pour le procédé par anode sacrificielle) qui aurait coulé le long des dalles lors du traitement.

IV.1.1.3 Dosages d'alcalins

Afin de suivre la pénétration des ions alcalins depuis l'électrolyte jusque dans l'enrobage de béton, des dosages d'alcalins ont été réalisés.

Les concentrations en ions potassium ($K_2O\%$) et en ions sodium ($Na_2O\%$) de la dalle du béton témoin carbonaté (03-A3-C) sont respectivement voisines de 0.14% et de 0.03% quelle que soit la profondeur.

Les profils de concentration en ions potassium après la réalcalinisation par courant imposé et en ions sodium après la réalcalinisation par anode sacrificielle, en fonction du temps, sont respectivement présentés sur les Figure IV-6 et Figure IV-7. Sur ces figures les droites rouge et magenta représentent respectivement la concentration $K_2O\%$ et $Na_2O\%$ de la dalle en béton témoin carbonaté.

Nota : Il a également été vérifié que la concentration en silice de chaque tranche était sensiblement constante.

Six mois après **la réalcalinisation par courant imposé**, sur la dalle 07-A3-I (armature 1), le dosage des ions potassium montre une augmentation sensible de la concentration : 0.38% au niveau du parement, sur la profondeur 0-10mm (soit 2.5 fois supérieure au témoin) et 0.21% sur la profondeur 10-20 mm (soit 1.5 fois supérieure au témoin). Néanmoins la concentration mesurée sur la tranche 20-30 mm (autour de l'armature) est de l'ordre de celle du témoin. Douze mois après traitement, les concentrations en potassium depuis le parement jusqu'à l'armature n'ont pas évolué de manière significative.

Sur la dalle 04-A3-I (armature 3), 30 mois après traitement (dont les 12 derniers mois en extérieur), les résultats montrent toujours un enrichissement en ions potassium sur les profondeurs 0-10 mm et 10-20 mm. Cependant, les alcalins n'ont pas migré en quantité importante jusqu'aux armatures.

Six mois après **la réalcalinisation par anode sacrificielle**, sur la dalle 11-A3-A (armature 1), le dosage des ions sodium montre une augmentation sensible de concentration : 0.63% au niveau du parement sur la profondeur 0-10mm (soit 30 fois plus élevée que le témoin) ;

0.28% sur la profondeur 10-20 mm (soit 9 fois plus élevée que le témoin) ; et 0.15% au niveau de l'armature (soit 5 fois plus élevée que le témoin).

Douze mois après traitement, les concentrations en sodium depuis le parement jusqu'à l'armature n'ont pas évolué de manière significative.

Sur la dalle 08-A3-A (armature 3), 30 mois après traitement (dont les 12 derniers mois en extérieur), les résultats montrent toujours un enrichissement en ions sodium depuis le parement jusqu'à l'armature.

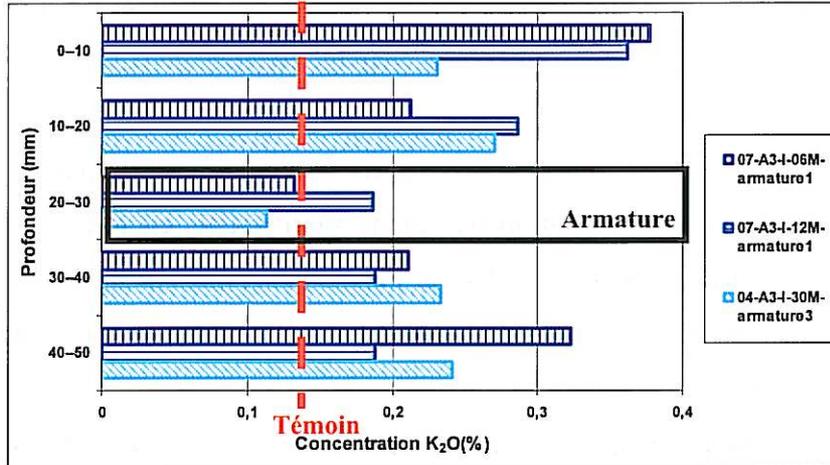


Figure IV-6 : Profils de concentration en K₂O des dalles "A3" après courant imposé

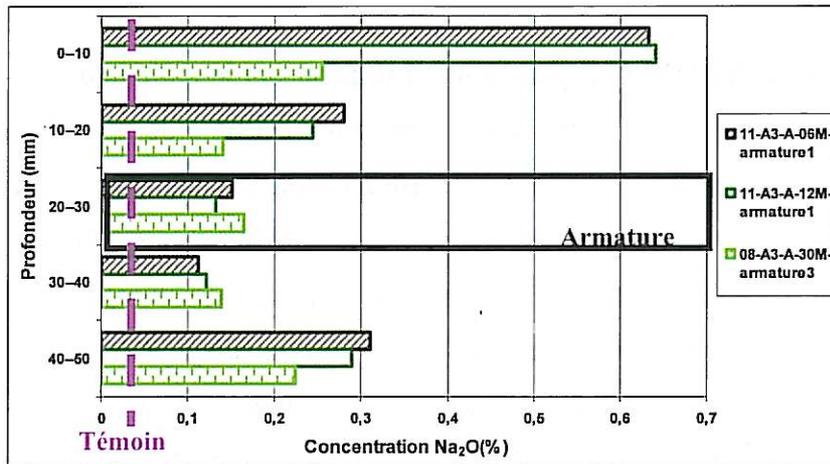


Figure IV-7 : Profils de concentration en Na₂O des dalles "A3" après anode sacrificielle

Les résultats des dosages d'alcalins montrent donc que les traitements de réalcalinisation par courant imposé comme par anode sacrificielle, induisent une pénétration des ions alcalins, initialement contenus dans l'électrolyte, vers l'enrobage béton.

Il est également à noter qu'après les deux types de traitement de réalcalinisation, une augmentation des concentrations en potassium (pour le procédé par courant imposé) et en

sodium (pour le procédé par anode sacrificielle) au niveau de la face inférieure du béton est détectée. Ceci est probablement dû au fait que l'électrolyte alcalin a coulé vers le fond des dalles pendant les traitements. Cette observation peut aussi expliquer l'augmentation de pH du béton de la face inférieure (non soumise au courant électrique).

IV.1.2 Suivi de l'activité de corrosion des armatures des dalles "A3" après maintenance

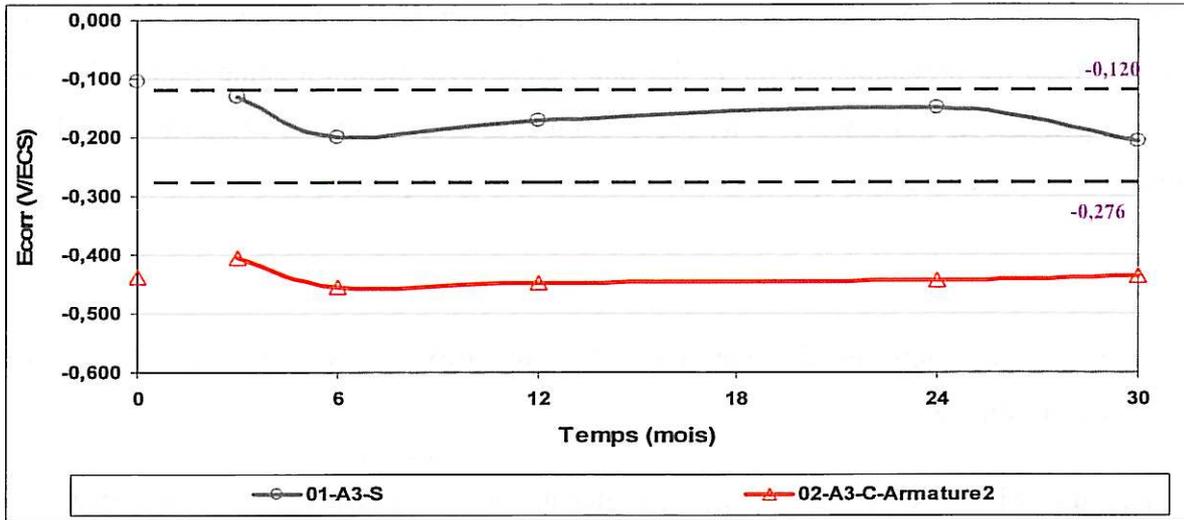
L'étude du pH et des concentrations en alcalins ayant montré que les traitements de maintenance par réalcalinisation ont permis de redonner au béton d'enrobage une certaine basicité, après traitement, les armatures se retrouvent donc dans un environnement moins favorable à la corrosion, dans lequel une diminution de l'activité de corrosion devrait être observée. Afin de vérifier cette hypothèse, des caractérisations électrochimiques non destructives des dalles ont été réalisées.

IV.1.2.1 Evolution du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion des dalles "A3"

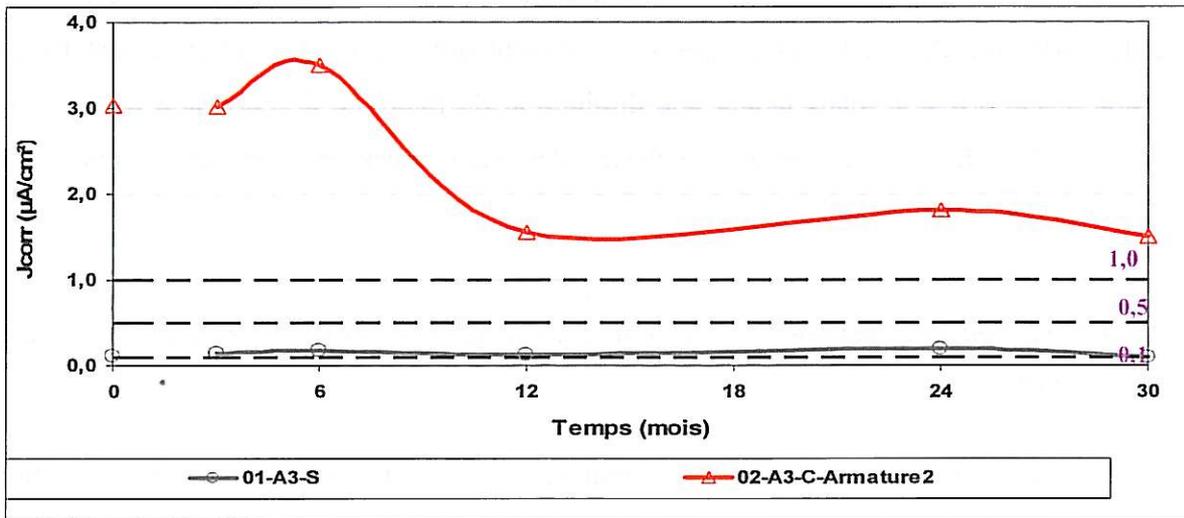
L'évolution de l'activité de corrosion des armatures des dalles traitées par réalcalinisation selon les procédés par courant imposé (Figure IV-9) et par anode sacrificielle (Figure IV-10), avant traitement et jusqu'à 30 mois après traitement a été étudiée en parallèle de celle des armatures des dalles témoins (sain et carbonaté) (Figure IV-8).

Pour la dalle témoin en **béton sain**, 01-A3-S (Figure IV-8a), les potentiels sont supérieurs à -200 mV, quelle que soit l'échance, et indiquent une probabilité de corrosion incertaine [57]. Les valeurs de densité de courant de corrosion (Figure IV-8b), voisines de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, sont stables dans le temps et indiquent un niveau de corrosion de négligeable à faible [83].

Pour la dalle témoin **béton carbonaté**, 02-A3-C (armature 2) (Figure IV-8 a) les valeurs des potentiels libres sont toujours inférieures à -400 mV quelle que soit l'échance, et indiquent une probabilité de corrosion certaine [57]. Les valeurs de densité de courant de corrosion (Figure IV-8b) sont toujours supérieures à $1.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (et vont jusqu'à $3.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) quelle que soit l'échance, ce qui indique un niveau de corrosion élevé [83].



a) Ecorr



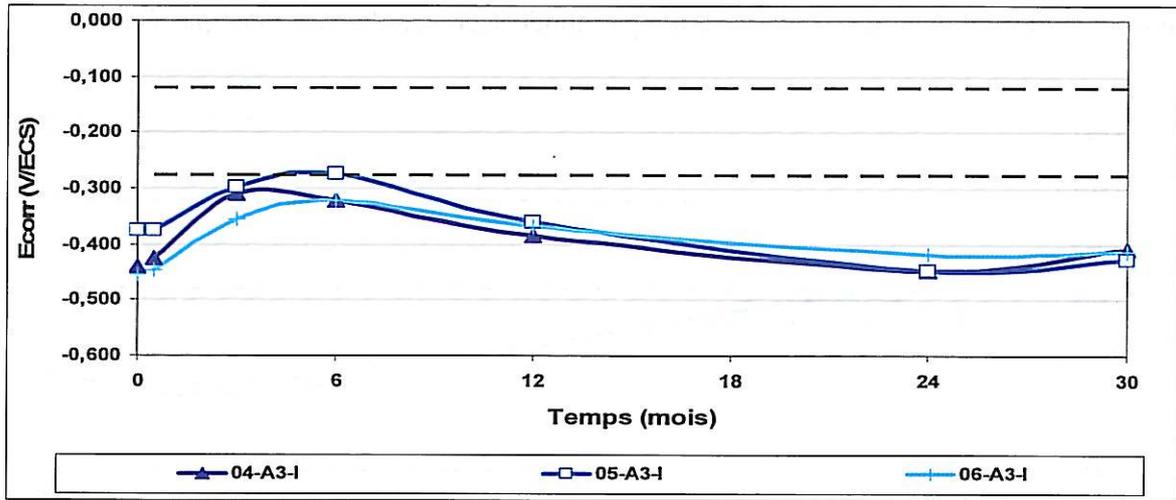
b) Jcorr

Figure IV-8 : Evolution de Ecorr et de Jcorr des dalles "A3" témoins sains et carbonatés

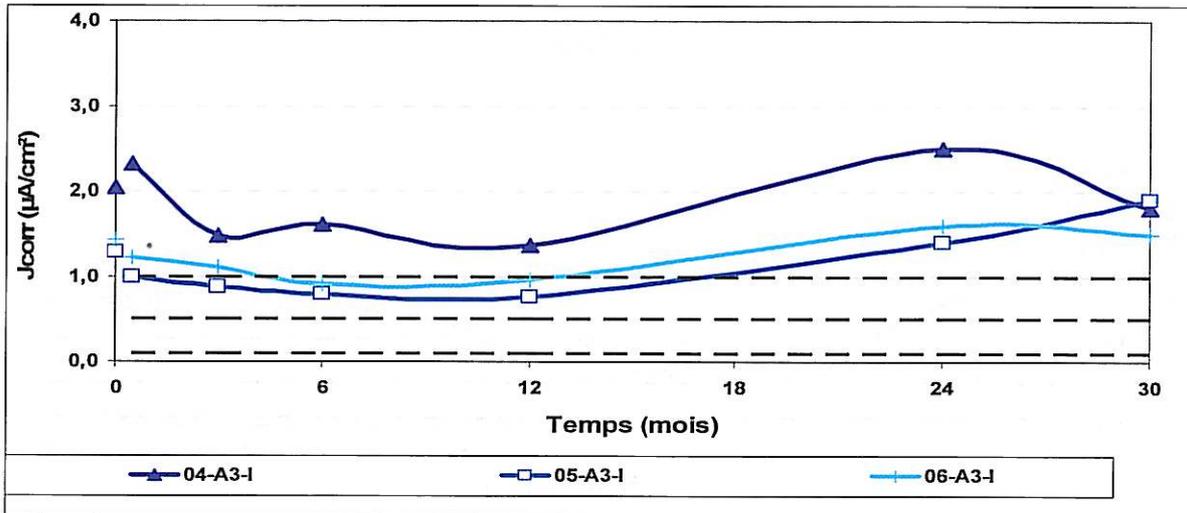
Après la réalcalinisation par courant imposé les dalles montrent une tendance à l'augmentation du potentiel libre et à la diminution de la densité de courant de corrosion jusqu'à 6 à 12 mois après le traitement (Figure IV-9). Avant traitement, les dalles 04-A3-I, 05-A3-I et 06-A3-I, ont des valeurs de potentiel libre de - 438, - 374 et - 454 mV et des densités de courant de corrosion de 2,0, 1,3 et 1,4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Six mois après traitement, ces valeurs sont égales à -322, - 274 et - 322 mV pour les potentiels libres et 1,6, 0,8 et 0,9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les densités de corrosion, ce qui semble indiquer un léger ralentissement de l'activité de corrosion.

Cependant trente mois après le traitement (dont les 12 derniers mois en extérieur), les résultats des caractérisations électrochimiques montrent un retour à l'état initial, avant

traitement. La durabilité du traitement de réalkalinisation par courant imposé n'est donc pas établie.



a) Ecorr



b) Jcorr

Figure IV-9 : Evolution de Ecorr et de Jcorr des dalles "A3" traitées par courant imposé maintenance

Après la réalkalinisation par anode sacrificielle les dalles montrent une tendance à l'augmentation du potentiel libre et à la diminution de la densité de courant de corrosion jusqu'à 6 à 12 mois après le traitement (Figure IV-10). Avant traitement, les dalles 08-A3-A, 09-A3-A et 10-A3-A, ont des valeurs de potentiels libres de - 410, - 332 et - 421 mV et des densités de courant de corrosion de 1,6, 1,1 et 1,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Six mois après traitement, ces valeurs sont égales à - 288, - 337 et - 272 mV pour les potentiels libres et 1,1, 0,8 et 0,8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les densités de corrosion, ce qui semble indiquer un léger ralentissement de l'activité de corrosion.

Cependant 30 mois après le traitement (dont les 12 derniers mois en extérieur), les résultats de caractérisations électrochimiques montrent un retour à l'état initial, avant traitement. La durabilité du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle n'est donc pas établie.

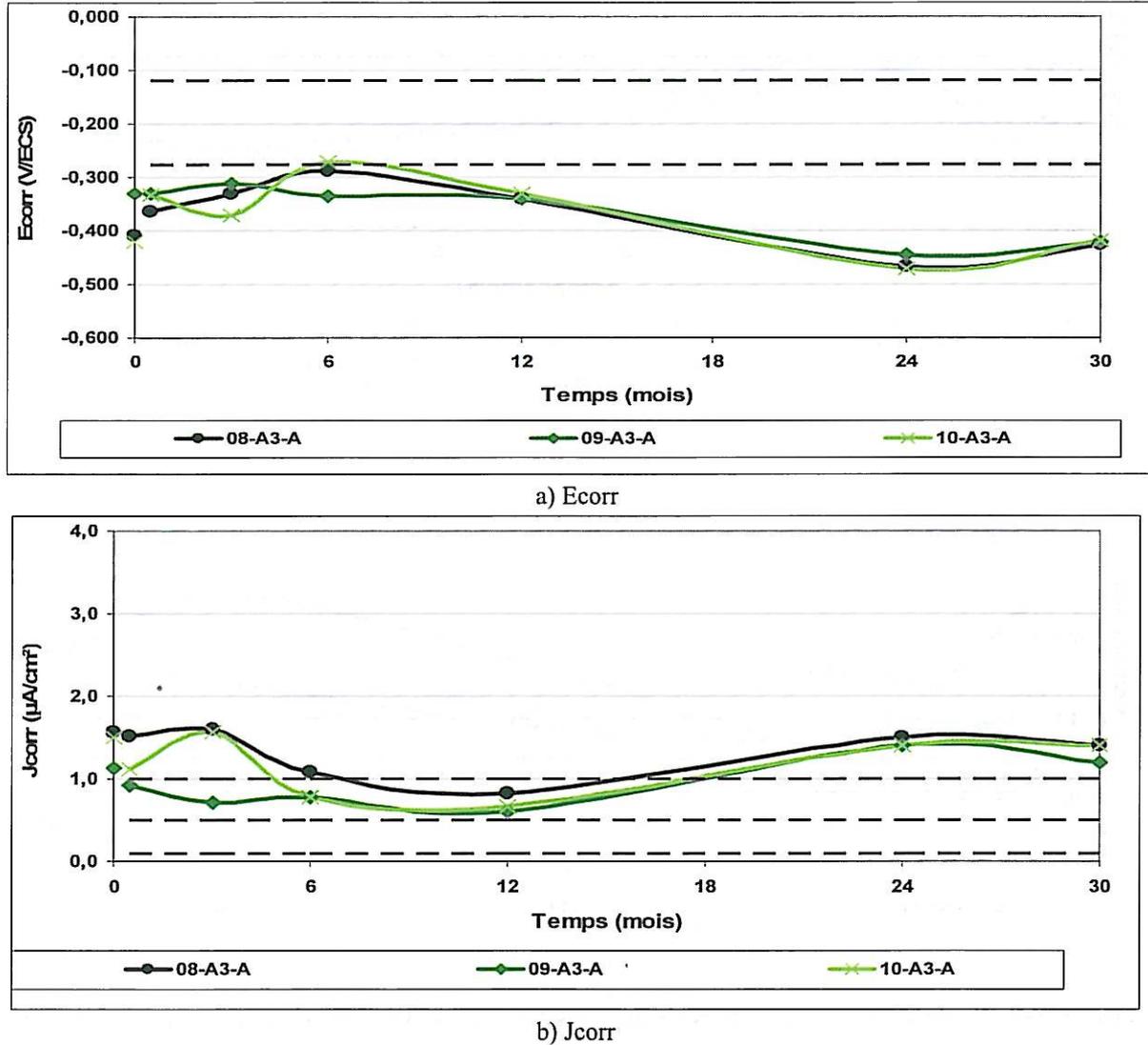
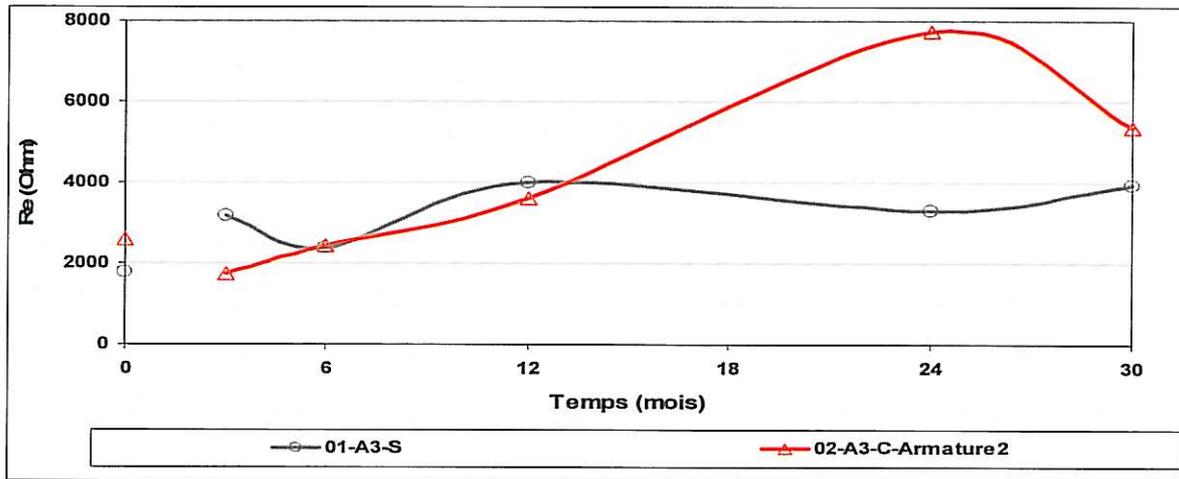


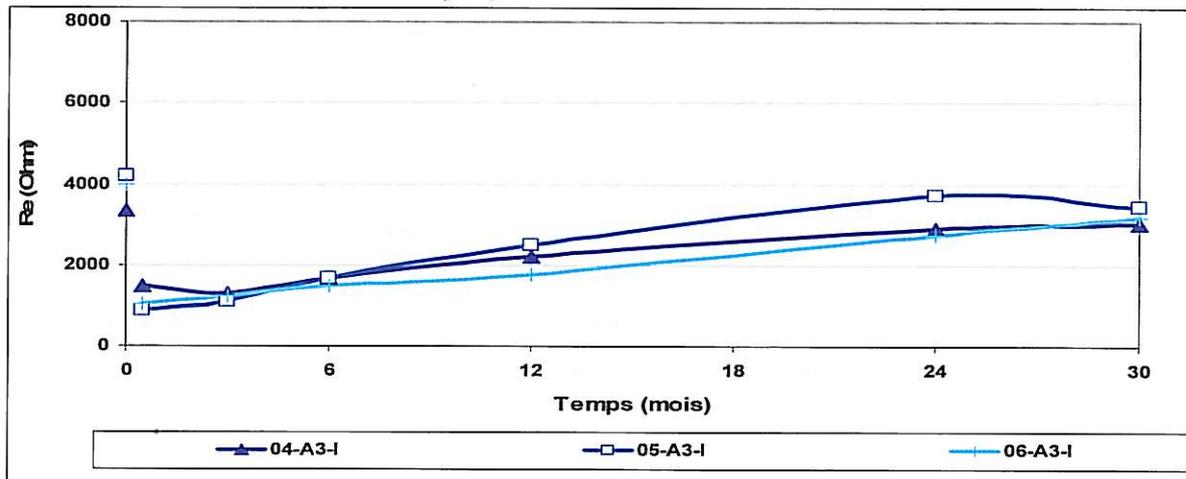
Figure IV-10 : Evolution de Ecorr et de Jcorr des dalles "A3" traitées par anode sacrificielle maintenance

IV.1.2.2 Evolution de la résistance d'enrobage des dalles "A3"

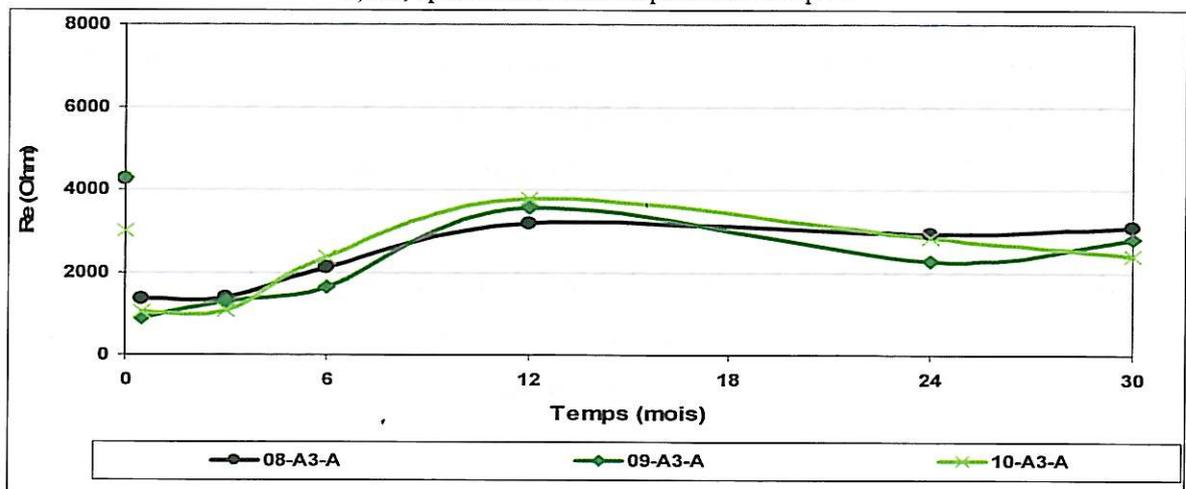
Les résultats des caractérisations électrochimiques montrent une évolution de la résistance de l'enrobage de béton (R_e), suite au traitement de réalcalinisation que ce soit par courant imposé (Figure IV-11b) ou par anode sacrificielle (Figure IV-11c). L'évolution des valeurs de R_e des dalles témoins en fonction du temps est présentée sur la Figure IV-11a).



a) Re, témoins sain et carbonaté



b) Re, après réalcalinisation par courant imposé



c) Re, après réalcalinisation par anode sacrificielle

Figure IV-11 : Evolution de Re des dalles "A3" témoins et traitées après réalcalinisation maintenance

Pour le témoin sain (01-A3-S) la résistance de l'enrobage de béton initialement voisine de 1800 Ohms augmente au fur et à mesure jusqu'à atteindre 4000 Ohms après 30 mois.

Pour le témoin carbonaté (02-A3-C) la résistance de l'enrobage de l'armature 2 initialement voisine de 2600 Ohms augmente de manière significative jusqu'à 5400 Ohms (cette augmentation est plus sensible dès lors que la dalle est entreposée en extérieur).

Les dalles traitées par réalcalinisation, que ce soit par courant imposé ou par anode sacrificielle, présentent avant traitement des valeurs de résistance d'enrobage voisines de 4000 Ohms. Il est singulier d'observer que tout de suite après traitement cette valeur de résistance d'enrobage est divisée par un facteur supérieur à 2. Néanmoins, cet effet se modifie avec le temps, et les valeurs de R_e reviennent progressivement à leur valeur initiale (avant traitement).

IV.1.3 Caractérisations de la matrice cimentaire et des produits de corrosion

Dans cette partie, la matrice cimentaire et les produits de corrosion ont été étudiés par MEB couplé à un EDS et par Microspectroscopie Raman.

IV.1.3.1 Observations au MEB couplé à un EDS

L'observation du béton **témoin sain** (01-A3-S) révèle la présence de nombreux cristaux de Portlandite (Figure IV-12a) confirmant que le béton n'est pas carbonaté.

L'observation de la surface de l'armature 2, ne montre pas la présence de cristaux d'oxydes de fer (Figure IV-12b). L'examen d'une section polie réalisée au niveau de l'interface entre béton et l'armature 1 n'indique pas non plus la présence de produits de corrosion (Figure IV-12c). Ces résultats sont cohérents avec les caractérisations électrochimiques qui indiquent que les armatures présentent un niveau de corrosion négligeable.

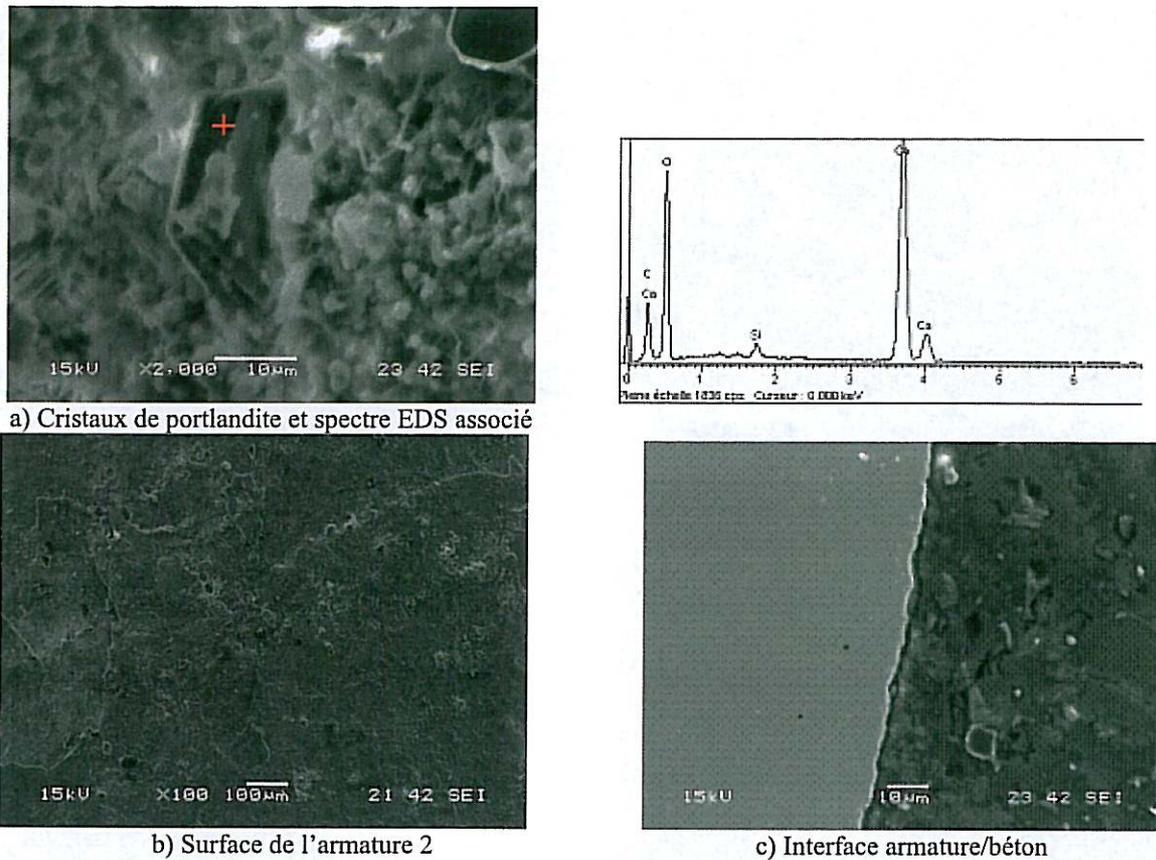


Figure IV-12 : Observations sous MEB et analyses élémentaires EDS du témoin sain 01-A3-S

L'observation du béton **témoin carbonaté** (03-A3-C) révèle la présence d'un voile de calcite (Figure IV-13a), significatif d'une carbonatation du béton. Des oxydes de fer cristallisés sont également visibles dans les pores au voisinage de l'armature 2 (Figure IV-13b et c). Sur une section polie réalisée au niveau l'interface béton/armature 3, une couche de produits de corrosion d'environ 10-15 μm est également observée (Figure IV-13d).

Après 30 mois, dont douze mois d'entreposage sur la terrasse, sur le témoin carbonaté 02-A3-C, une présence importante de cristaux d'oxydes de fer est observée à l'interface béton/armature 2 (Figure IV-13e). L'observation d'une section polie réalisée au niveau de la même armature (2) montre que l'épaisseur d'oxydes formés sur toute la circonférence de l'armature varie entre 50 et 100 μm (Figure IV-13f), ce qui indique un développement important de produits de corrosion après 12 mois de vieillissement naturel.

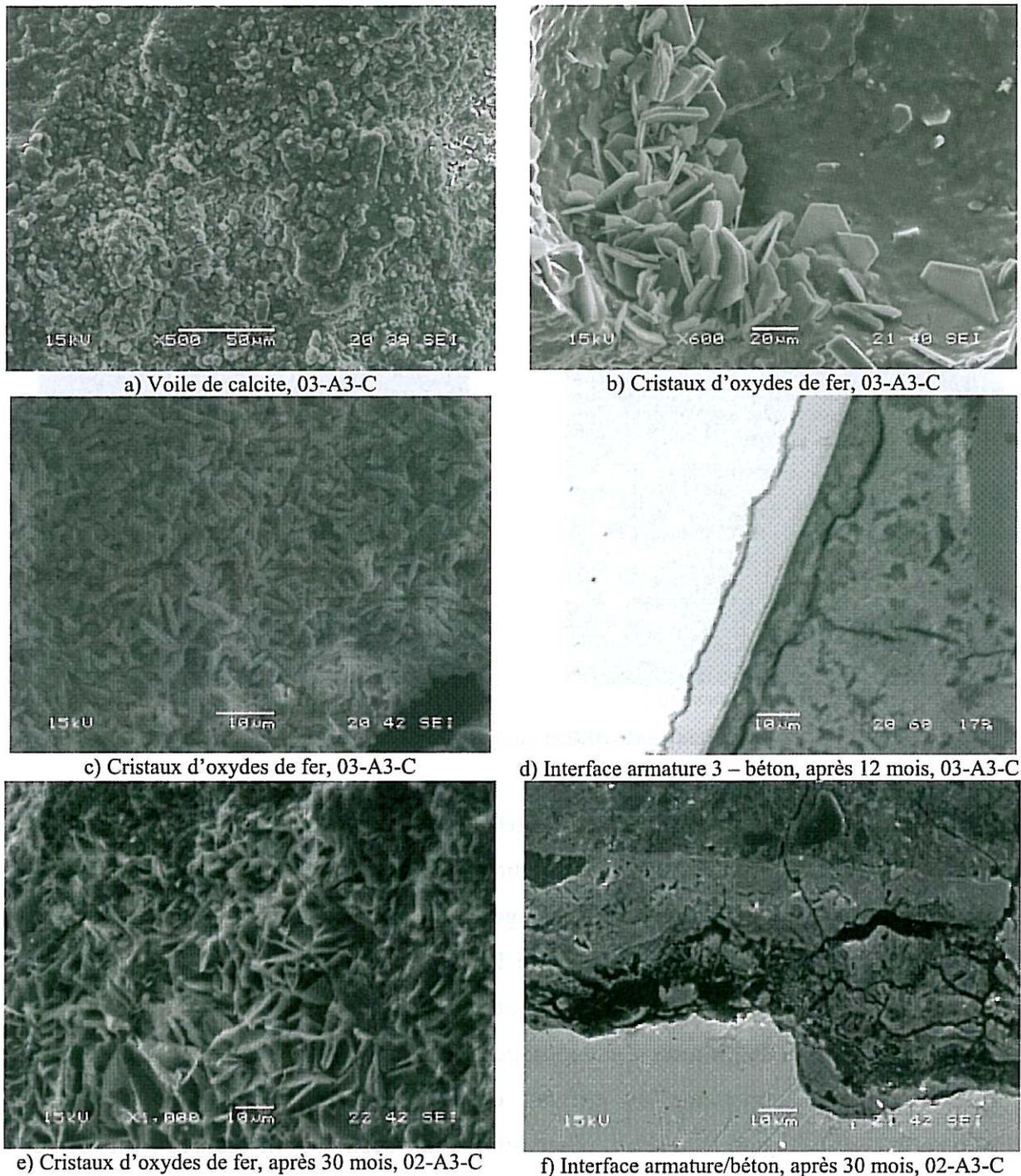


Figure IV-13 : Observations au MEB des témoins carbonatés

L'observation des dalles **réalcalinisées par courant imposé** (07-A3-I et 04-A3-I), indique, six mois après la réalcalinisation (07-A3-I), la présence d'oxydes de fer cristallisés au voisinage de l'armature 2 (Figure IV-14a).

Douze mois après la réalcalinisation (07-A3-I), une couche de produits de corrosion irrégulière d'environ 10-15 μm est observée sur la circonférence de l'armature 3 (Figure IV-14b).

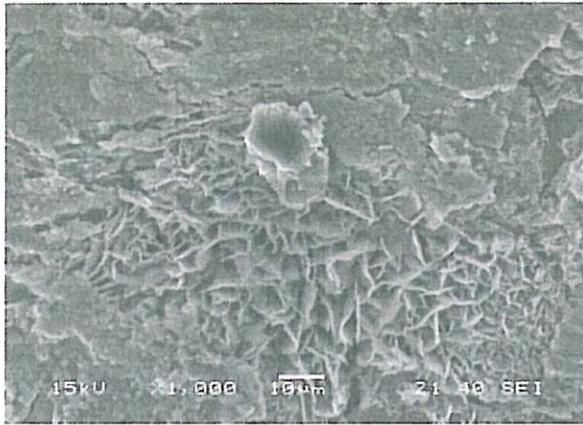
Trente mois après la réalkalisation (04-A3-I), l'observation d'une section polie réalisée à l'interface acier-béton, révèle la présence d'une couche de produits de corrosion irrégulière d'environ 10-15 μm sur toute la circonférence de l'armature (Figure IV-14d et e), identique à celle observée 12 mois après traitement. Ceci semblerait indiquer que les armatures sont toujours dans un état stable de corrosion 30 mois après traitement. Cependant l'observation de l'interface béton –armature 2 et de la surface de l'armature 2 révèle une présence importante de cristaux d'oxydes de fer (Figure IV-14c), beaucoup plus importante qu'après 12 mois, ce qui pourrait indiquer une légère réamorçage de corrosion.

L'observation des dalles **réalkalisées par anode sacrificielle** (11-A3-A et 08-A3-A) indique, six mois après traitement, que peu d'oxydes de fer se sont développés à l'interface armature/béton (Figure IV-15a).

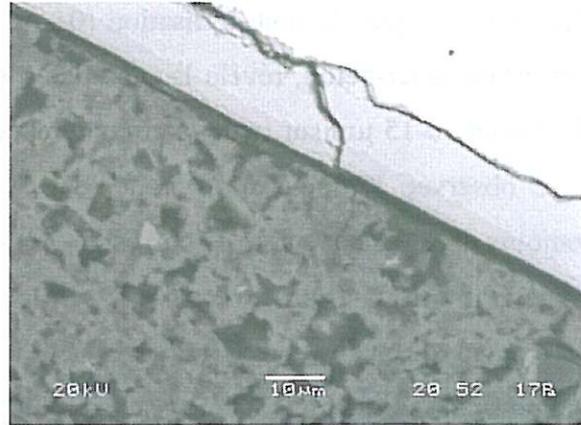
Douze mois après la réalkalisation, la présence d'une couche de produits de corrosion irrégulière d'environ 10-15 μm est observée sur toute la circonférence de l'armature 3 (Figure IV-15b).

Trente mois après la réalkalisation (dont 12 mois d'entreposage sur la terrasse), une couche de produits de corrosion irrégulière est visible sur toute la circonférence de l'armature (Figure IV-15d et e). Elle atteint au maximum 15 μm d'épaisseur et est comparable à celle observée après 12 mois. Ceci semblerait indiquer que les armatures sont restées dans un état de corrosion stable. Cependant, une présence importante de cristaux d'oxydes de fer a été observée à l'interface béton/armature (Figure IV-15c), ce qui est contradictoire et pourrait indiquer un léger redémarrage de la corrosion.

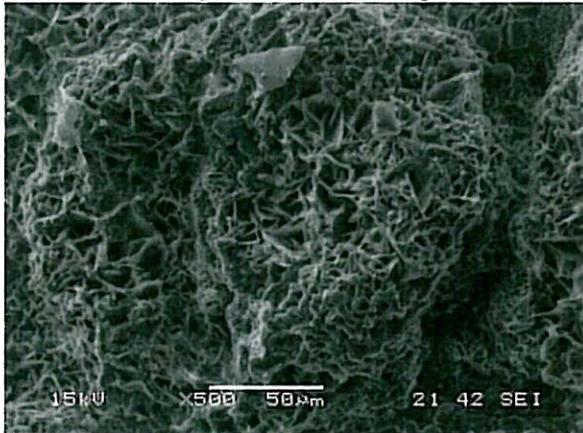
Enfin, la réalkalisation que ce soit par courant imposé ou par anode sacrificielle n'a pas généré de transformations significatives de la matrice cimentaire.



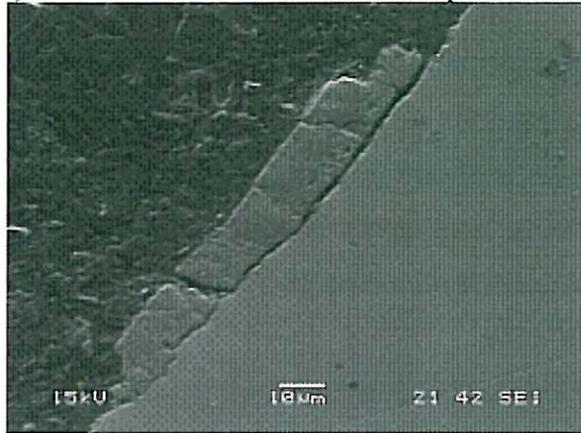
a) Cristaux d'oxydes de fer, 6 mois après, 07-A3-I



b) Interface armature 3 - béton, 12 mois après, 07-A3-I



c) Cristaux de corrosion, 30 mois après, 04-A3-I

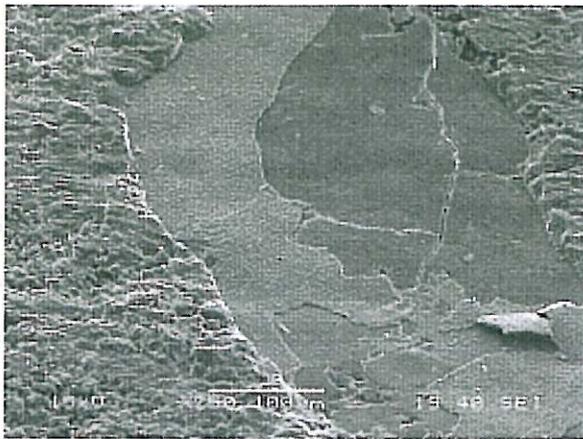


d) interface armature/béton-1, 30 mois après, 04-A-I

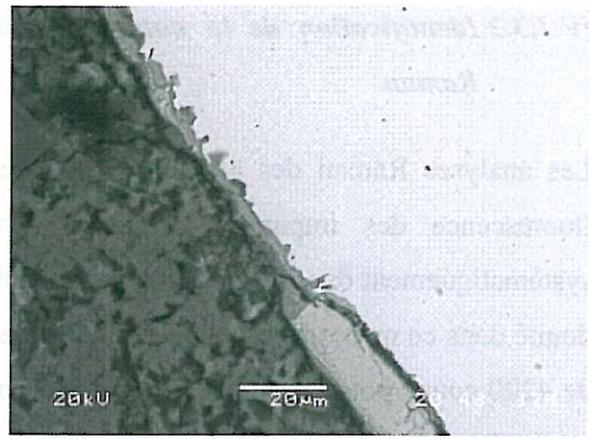


e) interface armature/béton-2, 30 mois après, 04-A-I

Figure IV-14 : Observations MEB des dalles "A3", après réalcalinisation par courant imposé



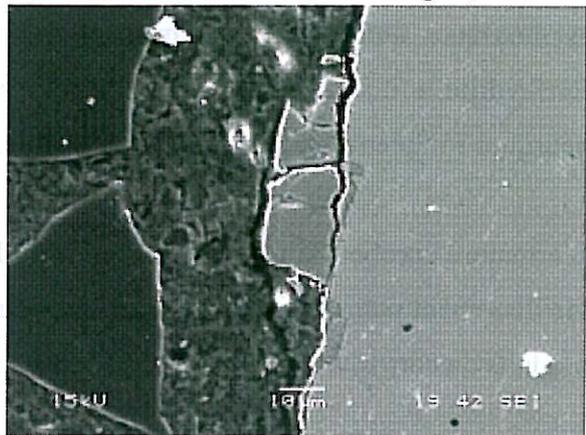
a) Surface d'armature, 6 mois après, 11-A3-A



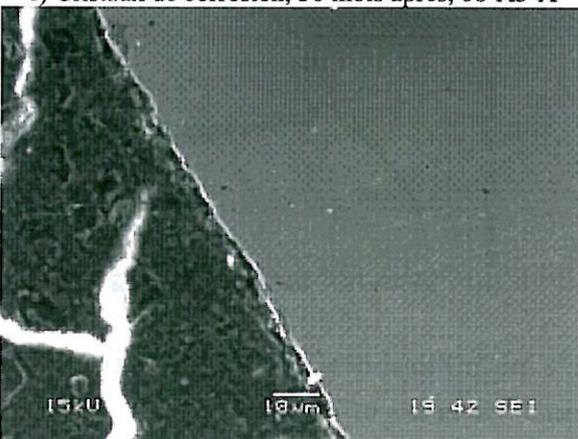
b) interface armature/béton, 12 mois après, 11-A3-A



c) Cristaux de corrosion, 30 mois après, 08-A3-A



d) interface armature/béton-1, 30 mois après, 08-A3-A



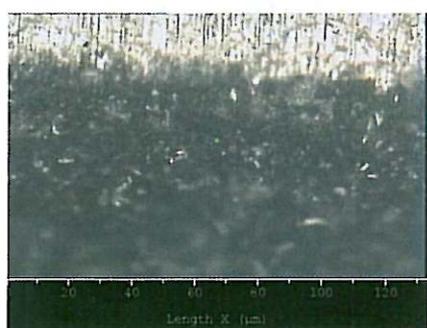
e) interface armature/béton-2, 30 mois après, 08-A3-A

Figure IV-15 : Observations MEB des dalles "A3", après récalinisation par anode sacrificielle

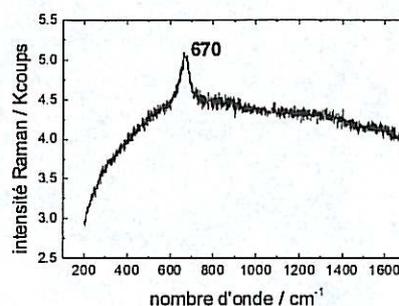
IV.1.3.2 Identification de la nature des produits de corrosion par Microspectroscopie Raman

Les analyses Raman des armatures enrobées dans le béton sont rendues difficiles par la fluorescence des impuretés présentes dans la matrice cimentaire qui se retrouvent systématiquement dans les spectres des produits de corrosion. Le seul exemple de spectre brut donné dans ce mémoire est celui de la Figure IV-16, sur lequel on peut noter le fond continu de 4200 coups pour un signal utile de 500 coups. Ce phénomène complique notablement les attributions de spectre à des espèces bien identifiées en particulier pour les bandes larges asymétriques autour de 700 cm^{-1} qui peuvent appartenir soit à la maghémite, soit à la ferrihydrite, soit à la ferrosyhyte. La bande de la magnétite à 670 cm^{-1} reste symétrique. C'est pourquoi son identification n'est pas ambiguë.

L'armature enrobée dans le béton sain de la dalle 01-A3-S après 30 mois (dont 12 mois de vieillissement naturel) est couverte d'une couche noire, fine et homogène (Figure IV-16a) de produits de corrosion dont le spectre Raman est celui de la magnétite, Fe_3O_4 (Figure IV-16b)



a) photo au microscope optique
acier poli à l'alcool (coupe longitudinale)



b) spectre Raman de la magnétite (100s et 0.1 mW)

Figure IV-16 : Analyse Raman du témoin sain 01-A3-S

A l'échéance 12 mois après traitement de maintenance par réalcalinisation, en coupe transversale, les images Raman et optique au MEB des échantillons témoins carbonatés (Figure IV-17a et b), réalcalinisés par courant imposé (Figure IV-17c et d) et réalcalinisés par anode sacrificielle (Figure IV-17e et f) coïncident :

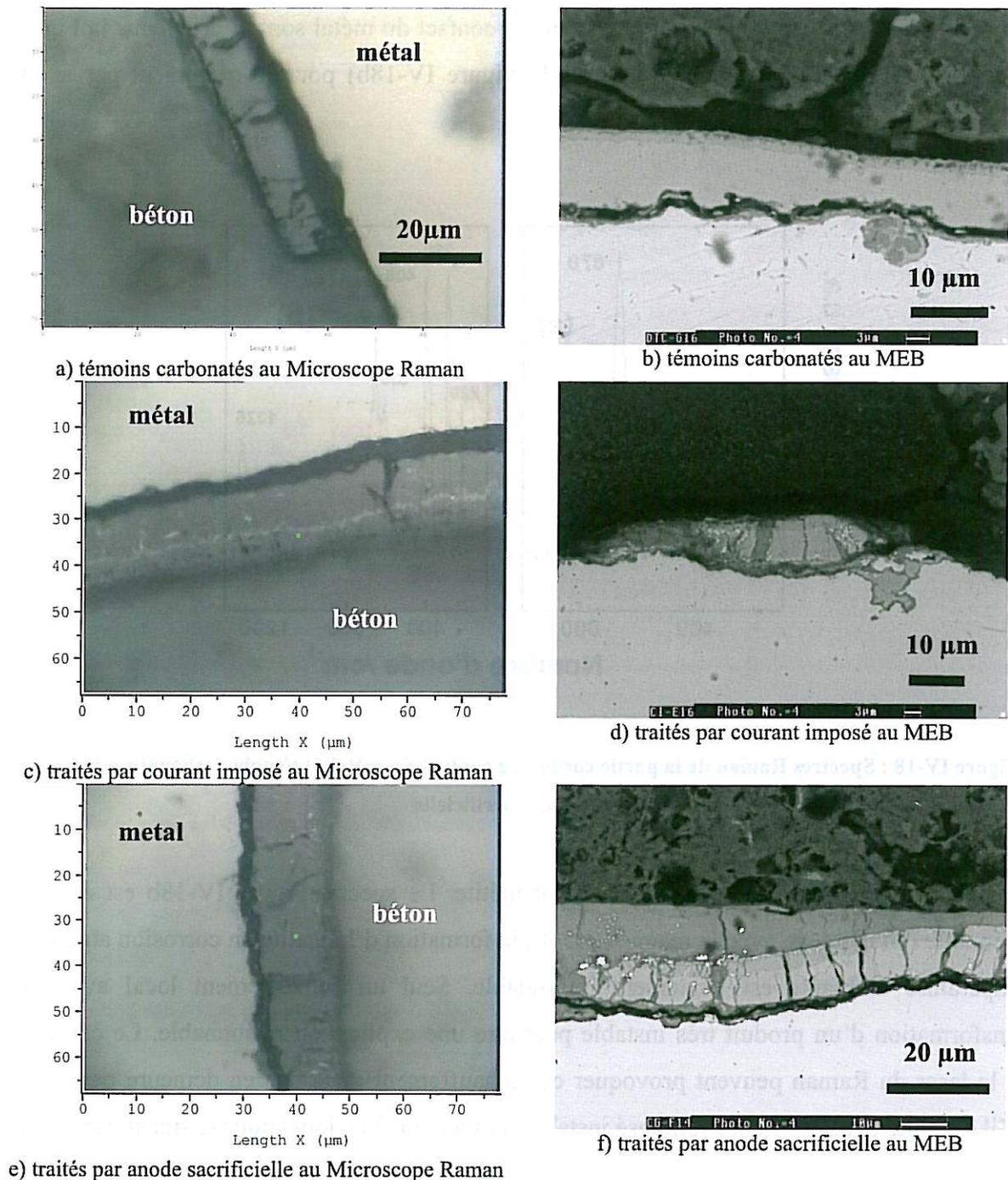


Figure IV-17 : Images Raman et optique au MEB des échantillons témoins carbonatés et des dalles traitées par réalcalinisation-maintenance à l'échéance 12 mois après

Les épaisseurs de couche de corrosion sont similaires sur les trois échantillons (entre 10 et 20 μm suivant les zones). Chaque couche peut être divisée en trois parties : un cordon noir au contact du métal, un autre cordon plus ou moins foncé au contact du béton et entre les deux une couche grise, marbrée, représentant la majorité de la couche.

Les spectres Raman enregistrés sur le cordon au contact du métal sont donnés dans la Figure IV-18a) pour le témoin carbonaté et dans la Figure IV-18b) pour le traitement par anode sacrificielle.

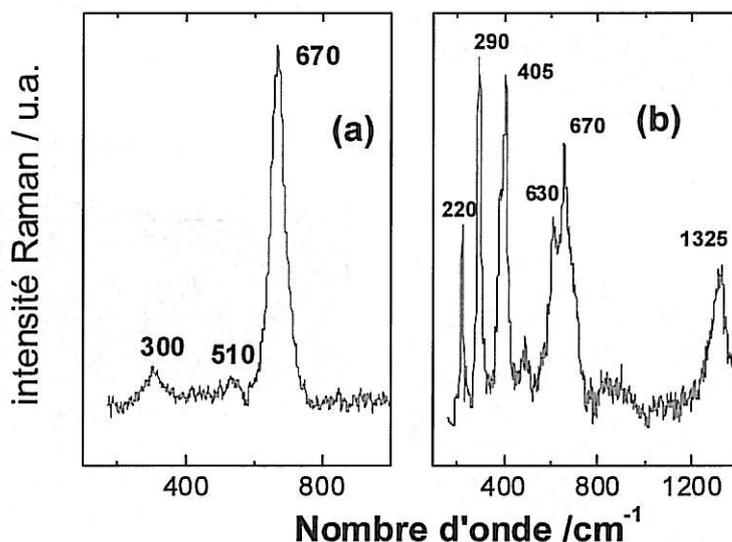


Figure IV-18 : Spectres Raman de la partie cordon au contact du métal a) témoin carbonaté et b) traité par anode sacrificielle

Le spectre Figure IV-18a est celui de la magnétite. Le spectre Figure IV-18b est celui de l'hématite (en mélange avec la magnétite). Or, la formation d'hématite en corrosion aqueuse à température ambiante est hautement improbable. Seul un échauffement local avec une transformation d'un produit très instable peut être une explication raisonnable. Le carottage ou le laser du Raman peuvent provoquer cet échauffement mais il n'en demeure pas moins qu'il faut une couche fine de composé instable (et inconnu à ce jour) pour se transformer ainsi.

Les produits constituant la couche majoritaire donnent pour les trois échantillons des spectres Raman représentés sur la Figure IV-19, les marbrures claires donnant le spectre de la magnétite déjà montré.

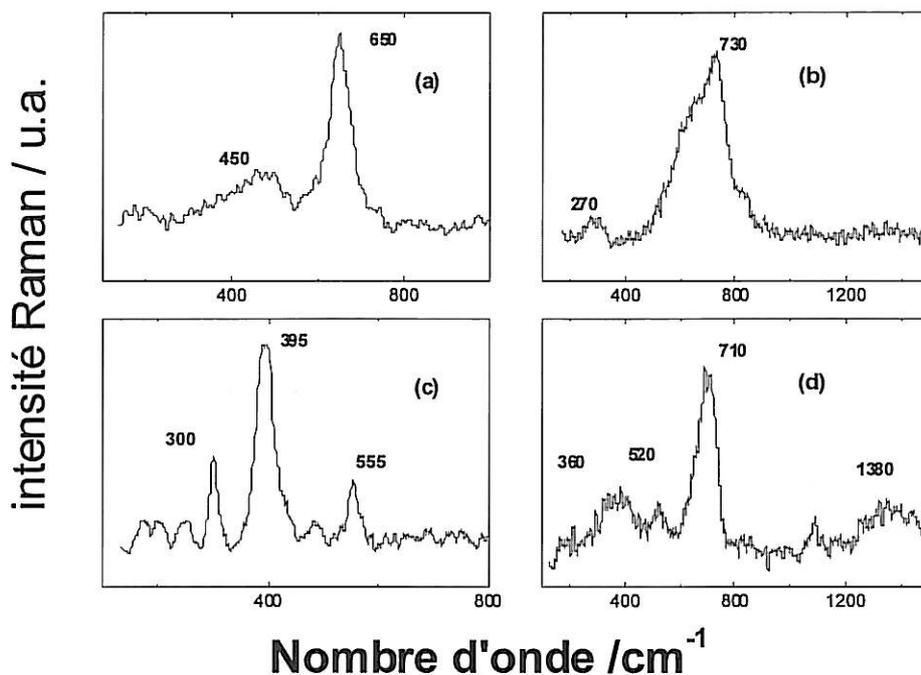


Figure IV-19 : Spectres Raman de la couche majoritaire de produits de corrosion des échantillons témoins carbonatés, traités par réalcalinisation-maintenance

Le spectre Figure IV-19a est celui de la ferroxhyte δ -FeOOH qui se différencie de la magnétite par la position de la bande principale à 650 cm^{-1} et d'un seul épaulement autour de 400 cm^{-1} .

Le spectre Figure IV-19b est celui de la ferrihydrite $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dont la bande principale, large et asymétrique se situe au delà de 700 cm^{-1} .

Le spectre Figure IV-19c est celui de la goethite α -FeOOH qui se différencie de l'hématite par l'écartement des bandes principales à 300 et 400 cm^{-1} ($<100 \text{ cm}^{-1}$ pour la goethite ; $>100 \text{ cm}^{-1}$ pour l'hématite).

Le spectre Figure IV-19d est celui de la maghémite γ -Fe₂O₃ qui se différencie de la ferrihydrite essentiellement par la présence d'une très large bande à 1400 cm^{-1} même quand ce produit est très mal cristallisé.

Les spectres donnés ci-dessus sont les rares sur lesquels une seule phase a donné un signal Raman, la plupart des spectres sont en fait constitués de mélange comme celui de la Figure IV-20a et b et difficiles d'interprétation car les bandes des phases goethite (dans les mélanges)

ferrihydrate et maghémite sont plus larges que dans les spectres de référence, témoignant ainsi d'une faible cristallinité des produits de corrosion. Cette remarque ne s'applique pas à la ferroxhyte qui apparaît clairement dans les photos MEB comme des cristaux hexagonaux mais ce composé a une très faible section efficace de diffusion Raman ce qui le rend également difficile à identifier.

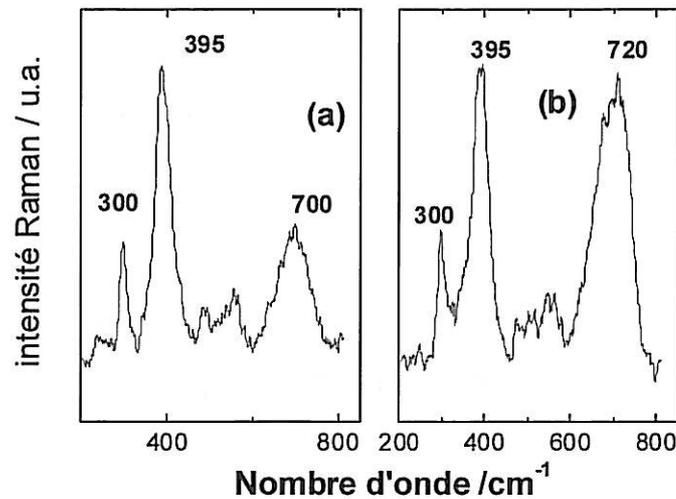


Figure IV-20 : Mélange en différentes proportions des phases uniques

La couche externe est constituée d'oxyhydroxyde alpha et gamma selon les points d'analyse, le spectre de la lépidocrocite γ -FeOOH est donné dans la Figure IV-21.

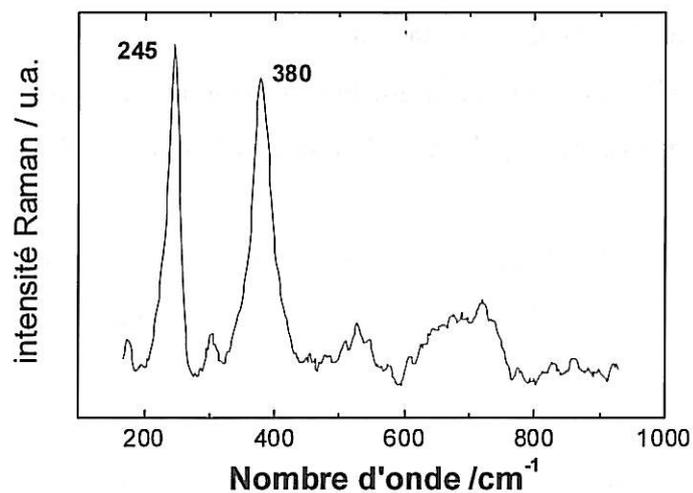


Figure IV-21 : Spectres Raman de la lépidocrocite

A l'échéance 30 mois après le traitement de réalcalinisation, l'analyse des produits de corrosion par spectroscopie Raman n'est pas modifiée par le temps d'entreposage. Il est toutefois possible de suggérer que la goethite devient la phase prépondérante pour les aciers dans un béton carbonaté ou traité par courant imposé; la ferrihydrite étant la phase majoritaire pour les aciers dans le béton traité par anode sacrificielle. Cette remarque n'entraîne aucune déduction sur les vitesses de corrosion respectives.

Concernant l'observation des échantillons témoins carbonatés et réalcalinisés, le Tableau IV-1 résume les différentes phases de produits de corrosion détectées à l'échéance 6, 12, 18 et 30 mois après réalcalinisation, les différents modes de préparation des échantillons sont également indiqués.

Tableau IV-1 : Liste de phases après la réalcalinisation-maintenance des dalles "A3"

Echéance	Mode de préparation		Témoin carbonaté	Après courant imposé	Après anode sacrificielle
6 mois après réalcalinisation	Sciage sans eau		Rouille verte Goethite	Magnétite Hématite(X)	Magnétite Hématite (X)
12 mois après réalcalinisation	Poli à l'eau (4000)		Goethite Magnétite Ferroxyhite	Magnétite Goethite Lépidocrocite Ferroxyhite	Magnétite Hématite(X)
18 mois après réalcalinisation	Tronçonnage à l'eau	Section	Rouille verte Maghémite	Rouille verte Maghémite ou Ferrihydrite Goethite	Rouille verte Magnétite Maghémite Lépidocrocite
		Surface d'acier	Magnétite Rouille verte Lépidocrocite	Magnétite Goethite Lépidocrocite Maghémite ou Ferrihydrite	Maghémite Lépidocrocite Magnétite Hématite(X)
		Interface béton/acier	Goethite Ferrihydrite ou Maghémite Magnétite	Magnétite Maghémite	
30 mois après réalcalinisation	Fracture du béton et polissage à l'alcool sur coupe longitudinale (1200)		Goethite Magnétite Maghémite	Goethite Magnétite Ferrihydrite Ferroxyhite	Hématite(X) Magnétite Ferrihydrite ou Maghémite

La formation de la Rouille Verte a été observée à plusieurs reprises sur différents échantillons mais leur mode de préparation impliquait à chaque fois un long séjour en présence d'eau. Il est tout à fait possible que cette corrosion active ait été provoquée par le mode de préparation. L'existence de cette phase au sein des dalles ne saurait être exclue si une corrosion active est en cours. Le mode de prélèvement des échantillons (petites éprouvettes) à analyser au sein

du corps d'épreuve impliquant de longs séjours à l'air serait alors responsable de l'oxydation de la plupart des produits de corrosion (exceptée la magnétite) au degré III.

La seule différence qui a été notée au cours de cette étude entre les trois types d'échantillons reste l'existence d'une phase dont le spectre Raman est celui de l'hématite au contact du métal pour les échantillons traités par anode sacrificielle et l'absence de goéthite pour ces mêmes échantillons.

La disparition de la goéthite est difficile à expliquer, cette phase étant particulièrement stable même dans des conditions réductrices [85].

Il nous faut à ce stade regretter que l'analyse Raman *ex situ* des produits de corrosion des armatures d'un béton armé carbonaté puis traité ne permette pas de conclure sur la présence ou l'absence de corrosion active, seul le béton sain se distinguant des autres par la présence de la magnétite en constituant unique.

IV.2 Discussions sur l'efficacité du traitement de maintenance - réalcalinisation sur les dalles "A3"

Les **caractérisations de pH** (qualitatives et quantitatives) montrent une augmentation de la basicité de l'enrobage de béton, liée au traitement de réalcalinisation aussi bien par courant imposé que par anode sacrificielle.

Traitement de réalcalinisation	Localisation dans la dalle	6 mois après traitement		30 mois après traitement	
		pH qualitatif	pH quantitatif	pH qualitatif	pH quantitatif
Courant imposé	Armature	>11	10.4	>11	11
	Parement	<9	9.8	<9	9.6
Anode sacrificielle	Armature	>11	11.7	>11	11.2
	Parement	9<pH<11	10.8	9<pH<11	10.9

Quel que soit le procédé utilisé, le pH au niveau de l'armature est toujours supérieur à celui du parement. Le procédé par anode sacrificielle conduit à des valeurs de pH plus élevées autour des armatures et sur le parement que le procédé par courant imposé.

Trente mois après le traitement (dont 12 mois en extérieur), les dalles sont toujours réalcalinisées.

Les résultats des tests qualitatifs de pH sont cohérents avec les mesures quantitatives de pH.

En ce qui concerne les résultats des **dosages d'alcalins**, les traitements de maintenance par les deux procédés introduisent des ions alcalins dans l'enrobage du béton, avec des concentrations décroissantes depuis le parement jusqu'au niveau des armatures.

Les concentrations en ions sodium après traitement par anode sacrificielle sont plus importantes que les concentrations en ions potassium après traitement par courant imposé.

L'augmentation de concentration en alcalins observée sur la face inférieure des dalles met également en évidence l'absorption de l'électrolyte par capillarité dans une zone de béton non soumise au champ électrique.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de la littérature (cf. Chapitre I.4.3) et la présence de deux zones réalcalinisées pourrait être expliquée par les mécanismes suivants :

- autour des armatures, une libération d'ions hydroxydes lors de la réduction de l'eau sous l'effet du courant électrique, et la pénétration de l'électrolyte alcalin expliquent la remontée de pH à une valeur supérieure à 11.
- au niveau du parement, l'absorption de l'électrolyte alcalin seule pourrait expliquer la remontée de pH du béton. Les valeurs de pH mesurées sur le parement sont inférieures à celle de l'électrolyte (10.4 pour le traitement par courant imposé à base de carbonate de potassium et de 13.6 pour le traitement par anode sacrificielle à base de carbonate de sodium).

La remontée de pH, ainsi que l'enrichissement en alcalins observés sur la face inférieure des dalles mettent en évidence l'absorption de l'électrolyte par capillarité dans une zone de béton non soumise au champ électrique.

Mais si le pH de la face traitée est comparable au pH de la face inférieure des dalles, les concentrations en alcalins sont nettement supérieures au niveau de la face traitée.

Ces résultats sont cohérents avec les mécanismes précédemment exposés :

- l'enrichissement en ions alcalins sur la face traitée est dû non seulement à l'absorption de l'électrolyte alcalin (par capillarité et gravité), mais aussi à la migration des ions alcalins sous champ électrique,
- alors que l'enrichissement en ions alcalins sur la face inférieure est seulement dû à l'absorption par capillarité de l'électrolyte alcalin.

Cependant, la migration sous l'effet du champ électrique des ions alcalins sans contribution des ions hydroxyde ne suffit pas à augmenter le pH.

Les augmentations de pH et de concentration en alcalins nettement supérieures observées pour le procédé par anode sacrificielle comparativement au procédé par courant imposé pourraient être expliquées par le fait que la durée du traitement était 4 fois plus longue.

En ce qui concerne les **caractérisations électrochimiques**, les valeurs de potentiel libre et de densité de courant de corrosion indiquent un état passif des armatures enrobées dans un béton sain (non carbonaté) et un état actif pour les armatures enrobées dans un béton carbonaté. Il n'y a pas d'évolution significative de l'activité de corrosion dans le temps pour ces deux témoins.

Après le traitement de réalcalinisation par courant imposé et par anode sacrificielle, les résultats de potentiel libre et de densité de courant de corrosion indiquent une légère diminution de l'activité de corrosion des armatures. Cette efficacité due à la réalcalinisation peut être détectée par les caractérisations électrochimiques jusqu'à 6 - 12 mois après traitement (dalles conservées au laboratoire climatisé). Cependant 30 mois après traitement (dont 12 mois d'entreposage dans des conditions de vieillissement naturel), les caractérisations électrochimiques indiquent que l'activité de corrosion des armatures retourne à son état initial.

Deux hypothèses pourraient expliquer ce phénomène :

- un béton réalcalinisé avec un pH entre 10 et 11 ne pourrait diminuer l'activité de corrosion que pendant une courte période (de l'ordre de 12 mois peut-être),
- le niveau de corrosion des armatures des dalles "A3", avant le traitement de réalcalinisation, n'était pas assez élevé pour que les caractérisations électrochimiques puissent mettre clairement en évidence l'efficacité du traitement. Pour étudier cette hypothèse, de nouveaux essais de traitement de réalcalinisation ont été réalisés sur des dalles en béton armé "A6" dont les armatures présenteront un niveau de corrosion plus élevé avant traitement (Cf. chapitre V).

Pour finir, les **observations réalisées au microscope électronique à balayage**, n'indiquent aucune transformation de la matrice cimentaire liée au traitement de réalcalinisation quel que soit le procédé utilisé.

L'observation de l'interface béton/armature montre que l'épaisseur de produits de corrosion n'a pas augmenté 30 mois après les traitements de maintenance par la réalcalinisation. Cependant une présence plus importante de cristaux d'oxydes de fer a été observée sur la

surface des armatures, la corrosion semblant plus généralisée, ce qui pourrait indiquer une lente reprise de l'activité de corrosion 30 mois traitement (dont 12 mois de vieillissement naturel), comme l'ont mis en évidence les caractérisations électrochimiques.

Pour conclure, certains auteurs considèrent un pH de 11 comme valeur minimale à atteindre pour obtenir une efficacité du traitement [50] ou une repassivation des armatures [41]. Les résultats obtenus dans cette étude sont contradictoires avec ceux décrits dans la littérature, puisque malgré un pH supérieur à 11 après le traitement de maintenance par les deux procédés, aucune repassivation n'a été observée. La repassivation des armatures ne peut donc pas être uniquement corrélée à une simple valeur de pH du béton.

**Chapitre V. Traitement de réhabilitation par
réalcalinisation des dalles en béton carbonaté
avec 6 armatures**



Dans ce cinquième chapitre, sont décrits les résultats de l'étude de l'efficacité du traitement de réalcalinisation appliqué en tant que réparation "réhabilitation" sur les dalles "A6" dont les armatures présentent un état de corrosion élevé (supérieur à celui des dalles "A3"). L'efficacité a été évaluée notamment par le biais de caractérisations analytiques (pH qualitatif et quantitatif, dosages d'alcalins...), mais aussi électrochimiques. Par ailleurs, la nature des produits de corrosion formés autour des armatures ainsi que l'impact du traitement de réalcalinisation sur la matrice cimentaire ont été étudiés par Microspectroscopie Raman et par MEB couplé à un EDS.

Ces différentes caractérisations ont été réalisées à plusieurs échéances, 15 ou 21 jours, 3 mois, jusque 6 mois après le traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle ou jusque 12 mois après courant imposé, afin d'étudier l'efficacité de ces traitements.

Enfin, une étude sur des mini-éprouvettes en microbéton armé a été réalisée par Microspectroscopie Raman de manière à suivre "in-situ" la nature chimique des produits de corrosion et leur évolution après traitement.

V.1 Efficacité du traitement de réhabilitation par réalcalinisation des dalles "A6"

V.1.1 Caractérisations physico-chimiques du béton des dalles "A6" après traitement de réhabilitation

Afin d'évaluer l'efficacité du traitement de réalcalinisation, l'évolution du pH du béton a d'abord été suivie, qualitativement à l'aide d'indicateurs colorés, puis, de manière quantitative par des mesures de pH sur des suspensions. En complément, un dosage d'alcalins a été réalisé.

V.1.1.1 Suivi de pH à l'aide d'indicateurs colorés

A l'aide de deux indicateurs colorés, la phénolphthaléine et la thymolphthaléine, le pH a été étudié pour les témoins en béton sain et carbonaté, ainsi que pour les bétons traités par réalcalinisation, selon les procédés par courant imposé et par anode sacrificielle (2 dalles par procédé, Figure IV-2).

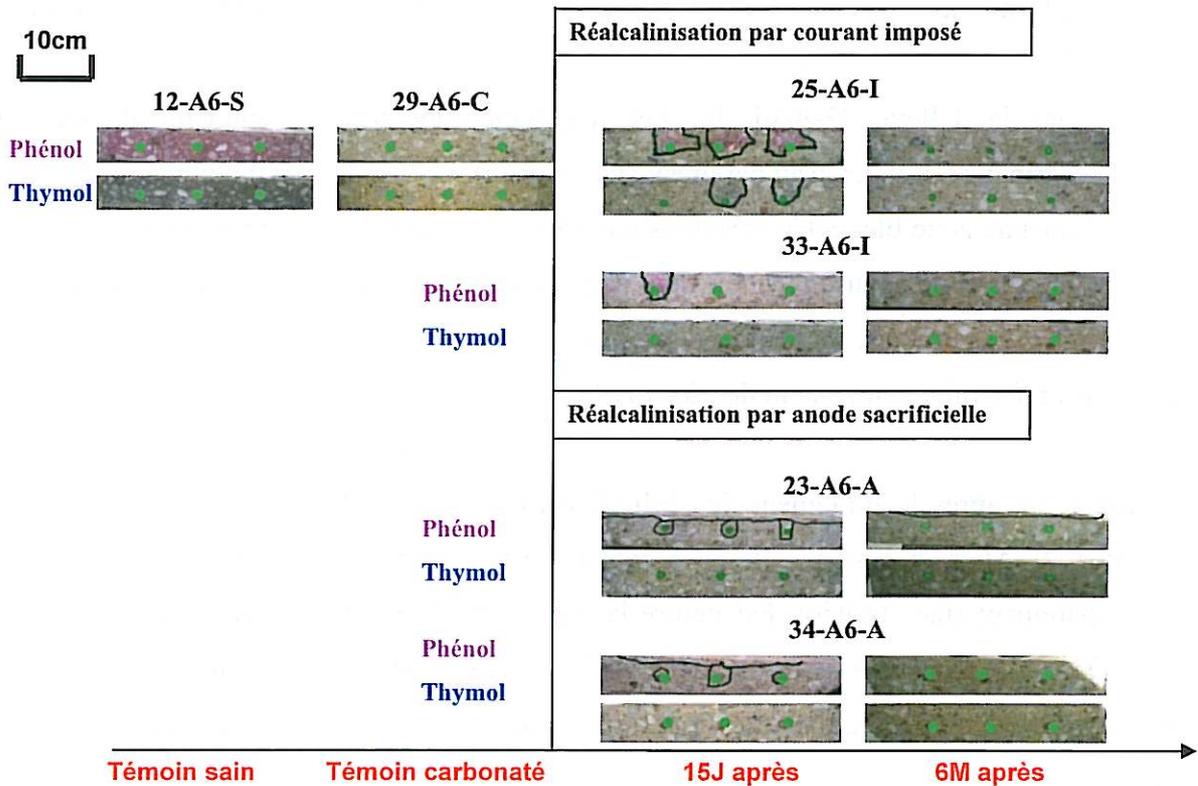


Figure V-1 : Suivi du pH à l'aide d'indicateurs colorés des dalles "A6" récalcinisées par courant imposé et par anode sacrificielle

Nota : Sont représentées de gauche à droite, les armatures 1, 2 et 3.

Sur la dalle **témoin en béton sain** (12-A6-S) la phénolphtaléine et la thymolphtaléine révèlent respectivement une coloration rose et bleue sur toute l'épaisseur de béton, ce qui signifie que le pH est supérieur à 11.

Sur la dalle **témoin en béton carbonaté**, 29-A6-C, la phénolphtaléine et la thymolphtaléine, restent incolores sur toute l'épaisseur, ce qui indique que le pH du béton est inférieur à 9 après une carbonatation artificielle de 2 mois. Les armatures des dalles se trouvent donc bien dans un enrobage de béton carbonaté avant le traitement de réalcalinisation.

Quinze jours après le traitement de **réalcalinisation par courant imposé**, les tests aux indicateurs colorés indiquent des résultats différents selon la dalle traitée :

- sur la dalle 25-A6-I, la phénolphtaléine révèle une couleur rose autour des trois armatures et jusqu'en parement (face traitée). La thymolphtaléine ne vire au bleu qu'autour des armatures 2 et 3. Ces observations indiquent que le pH du béton autour

de l'armature 1 est entre 9 et 11, et qu'il est supérieur à 11 autour des armatures 2 et 3.

- Sur la dalle 33-A6-I, la phénolphthaléine vire au rose uniquement autour de l'armature 1 et jusqu'au parement (face traitée). Le test à la thymolphthaléine ne révèle aucune zone bleue. Ces résultats montrent que seul le béton autour de l'armature 1 a été réalcalinisé jusqu'à une valeur de pH comprise entre 9 et 11. La réalcalinisation ne s'est pas produite autour des deux autres armatures (2 et 3).

Six mois après traitement, aucun des deux indicateurs ne vire au rose ou au bleu.

Quinze jours après le traitement de **réalcalinisation par anode sacrificielle**, sur les deux dalles, 23-A6-A et 34-A6-A, la phénolphthaléine vire au rose autour des trois armatures et sur le parement (face traitée). Par contre la thymolphthaléine ne vire au bleu ni autour des armatures, ni en surface, pour les deux dalles. La réalcalinisation du béton autour des armatures et au niveau du parement a donc bien eu lieu, mais le pH ne se situe qu'entre 9 et 11.

Six mois après traitement, seule la dalle 23-A6-A réagit aux indicateurs colorés avec une zone de parement qui vire au rose.

V.1.1.2 Evolution quantitative du pH à partir des suspensions

Les profils de pH des dalles témoins en béton sain et carbonaté, sont présentés sur la Figure V-2. Ceux des deux dalles traitées par réalcalinisation par courant imposé et des deux dalles traitées par réalcalinisation par anode sacrificielle sont respectivement illustrés sur la Figure V-3 et la Figure V-4. Sur ces quatre dernières figures, les droites verticales grise et rouge représentent respectivement la valeur représentative de pH d'un béton témoin sain (12.5) et d'un béton carbonaté (9.0).

Les profils de pH de la dalle **témoin en béton sain** (12-A6-S) indiquent une valeur moyenne de 12.3 ± 0.3 .

En ce qui concerne la dalle **témoin en béton carbonaté** (29-A6-C), la valeur de pH en fonction de la profondeur est voisine de 9.0, excepté autour de l'armature (9.4).

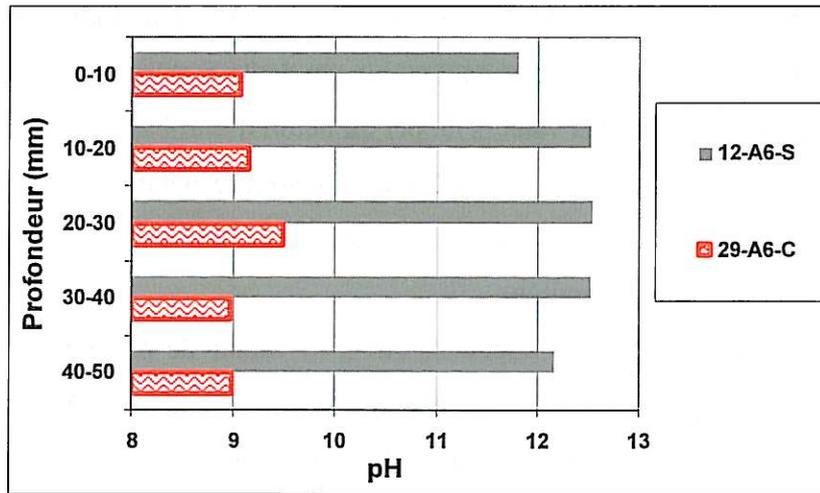


Figure V-2 : Profils de pH des bétons témoins sain et carbonaté

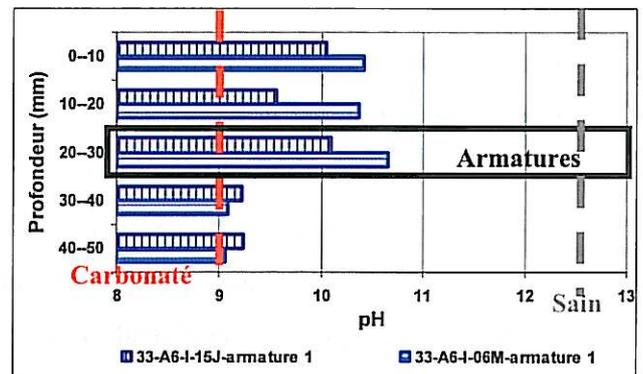
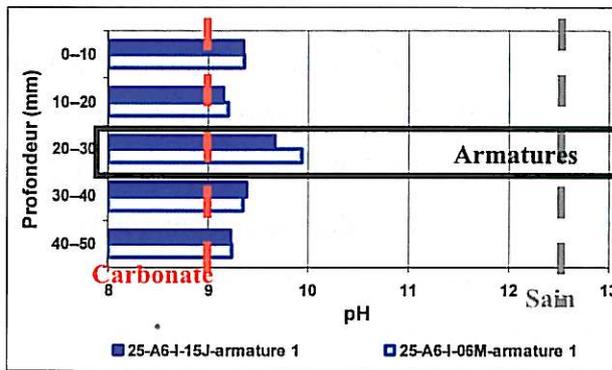


Figure V-3 : Profils de pH des dalles "A6" après réalcalinisation par courant imposé

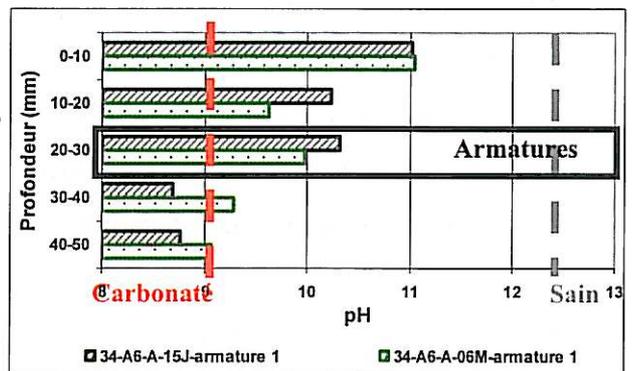
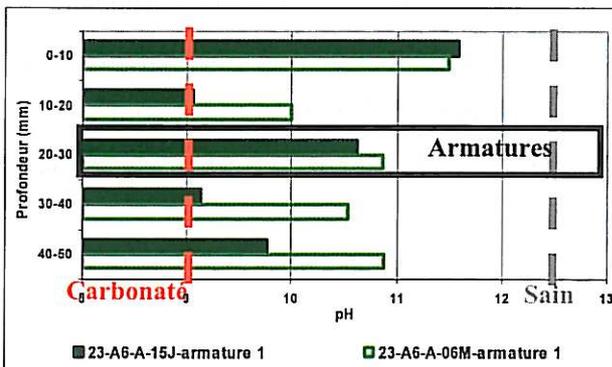


Figure V-4 : Profils des pH des dalles "A6" après réalcalinisation par anode sacrificielle

Quinze jours après la réalcalinisation par courant imposé, les résultats quantitatifs de pH diffèrent selon les dalles :

- sur la dalle 25-A6-I, les valeurs de pH du béton d'enrobage de l'armature 1 sur les profondeurs 0-10 mm (face traitée), 10-20 mm et 20-30 mm (autour de l'armature)

sont respectivement égales à 9.3, 9.2 et 9.7 ce qui indiquerait une légère réalcalinisation du béton uniquement au niveau de l'armature ;

- sur la dalle 33-A6-I, les valeurs de pH du béton d'enrobage de l'armature 1 sur les profondeurs 0-10 mm, 10-20 mm et 20-30 mm sont respectivement égales à 10.0, 9.6 et 10.1 ce qui indique que le béton est bien réalcalinisé autour de l'armature 1 et jusqu'au parement (face traitée).

Six mois après traitement, pour la dalle 25-A6-I, la valeur de pH autour de l'armature a augmenté jusqu'à 9.9 et pour la dalle 33-A6-I les valeurs de pH sur les profondeurs 0-10, 10-20 et 20-30 mm ont toutes augmenté d'au moins 0.4.

Le traitement de réalcalinisation semble donc avoir été plus efficace sur l'armature 1 de la dalle 33-A6-I que sur l'armature 1 de la dalle 25-A6-I.

Quinze jours après la **réalcalinisation par anode sacrificielle**, les valeurs de pH de l'enrobage béton de l'armature 1, sur les profondeurs 0-10 mm (face traitée), 10-20 mm et 20-30 mm (autour de l'armature) sont respectivement égales à 11.6, 9.1 et 10.6 pour la dalle 23-A6-A et à 11.0, 10.2 et 10.3 pour la dalle 34-A6-A. Ces résultats indiquent que le béton a bien été réalcalinisé autour de l'armature 1 et jusqu'au parement. Les résultats à 6 mois confirment l'efficacité de la réalcalinisation sur ces deux dalles.

Les valeurs de pH pour la face inférieure (30-40 et 40-50 mm) des dalles traitées par réalcalinisation restent relativement proches des valeurs du béton témoin carbonaté. Ce résultat est cohérent avec le fait que lors de la réparation "réhabilitation", les dalles "A6" étaient surélevées sur des cales en bois pour ne pas "baigner" dans l'électrolyte qui coule le long de la dalle pendant le traitement (Figure III-18 et Figure III-22) et il n'y a pas eu d'absorption capillaire par la face inférieure.

V.1.1.3 Dosages d'alcalins

Afin de suivre la pénétration des ions alcalins depuis l'électrolyte jusque dans l'enrobage de béton, des dosages d'alcalins ont été réalisés sur toute l'épaisseur des dalles.

Les profils de concentration en ions potassium après la réalcalinisation par courant imposé et en ions sodium après la réalcalinisation par anode sacrificielle, en fonction du temps, sont respectivement présentés sur la Figure V-5 et la Figure V-6. Sur ces figures, les droites rouge

et magenta représentent les concentrations respectivement en K_2O (0.06%) et en Na_2O (0.03%) déterminées sur la dalle témoin en béton carbonaté (29-A6-C).

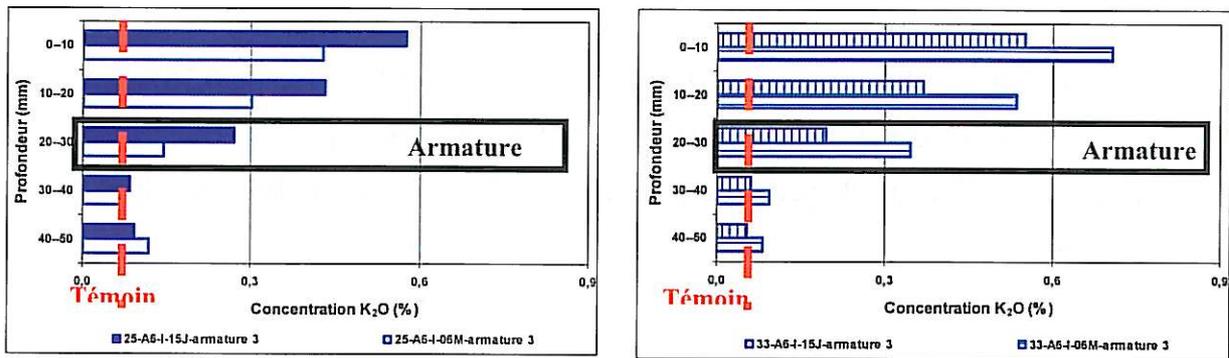


Figure V-5 : Profils de concentration en K_2O des dalles "A6" après réalcalinisation par courant imposé

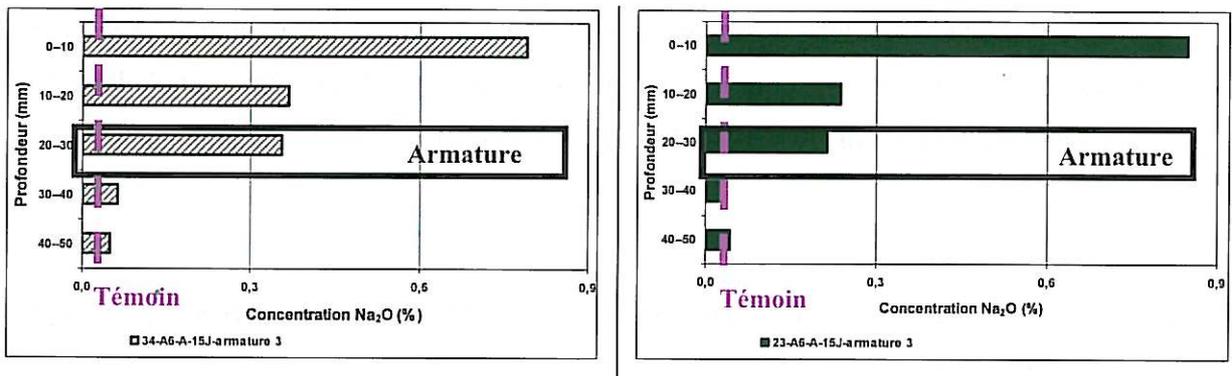


Figure V-6 : Profils de concentration en Na_2O des dalles "A6" après réalcalinisation par anode sacrificielle

Quinze jours après la **réalcalinisation par courant imposé**, les concentrations en K_2O ont augmenté de manière très importante sur les deux dalles traitées :

- dalle 25-A6-I (armature 3) : 0.58% pour la tranche 0-10 mm (face traitée), 0.43% pour la tranche 10-20 mm et 0.28% pour la tranche 20-30 mm (autour de l'armature) ;
- dalle 33-A6-I (armature 3) : 0.55% pour la tranche 0-10 mm (face traitée), 0.37% pour la tranche 10-20 mm et 0.19% pour la tranche 20-30 mm (autour de l'armature).

Six mois après traitement, ces concentrations restent élevées, indiquant un enrichissement conséquent en ions potassium provenant de l'électrolyte, depuis la surface traitée jusqu'au niveau des armatures.

Quinze jours après la **réalcalinisation par anode sacrificielle**, les concentrations en ions sodium ont très fortement augmenté sur les deux dalles traitées.

- dalle 23-A6-A (armature 3) : 0.85% pour la profondeur 0-10 mm, 0.24% pour la tranche 10-20 mm et 0.21% pour la tranche 20-30 mm (armature)
- dalle 34-A6-A (armature 3) : 0.79% pour la tranche à-10mm, 0.36% la tranche 10-20 mm et 0.36% pour la tranche 20-30 mm (armature).

Ces résultats indiquent que la pénétration des alcalins dans l'enrobage de béton a bien eu lieu et ce jusqu'aux armatures.

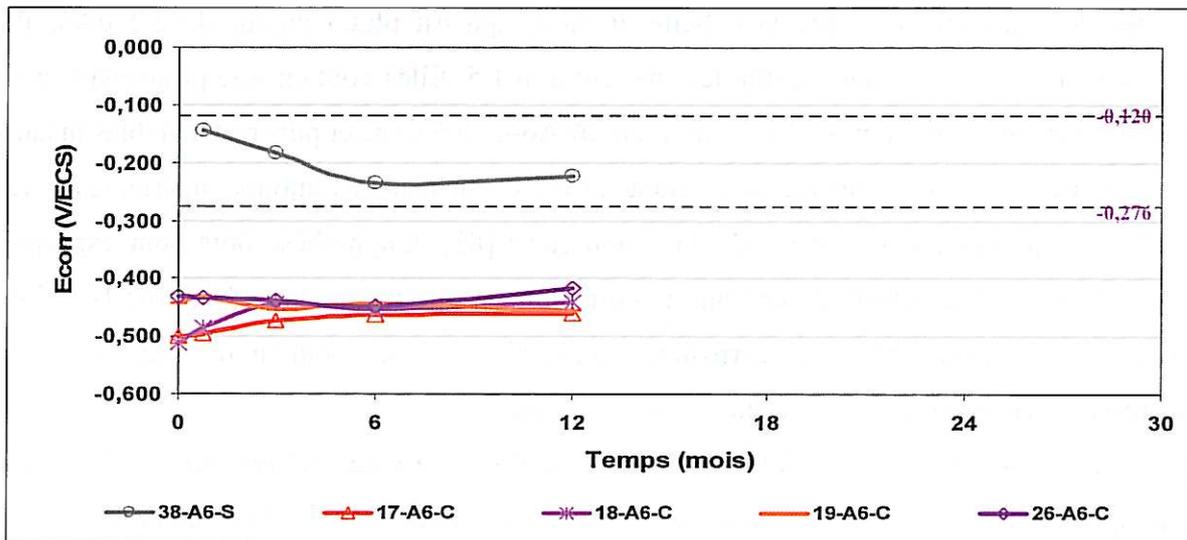
Il est également intéressant de noter que les dosages réalisés pour les profondeurs 30-40 mm et 40-50 mm indiquent que pour la face inférieure de la dalle, les concentrations en ions alcalins restent relativement proches des valeurs du béton témoin carbonaté. Ce résultat est cohérent avec le fait que lors de la réparation "réhabilitation", les dalles "A6" étaient surélevées sur des cales en bois pour ne pas "baigner" dans l'électrolyte qui coule le long de la dalle pendant le traitement (Figure III-18 et Figure III-22).

V.1.2 Suivi de l'activité de corrosion des armatures des dalles "A6" après réhabilitation

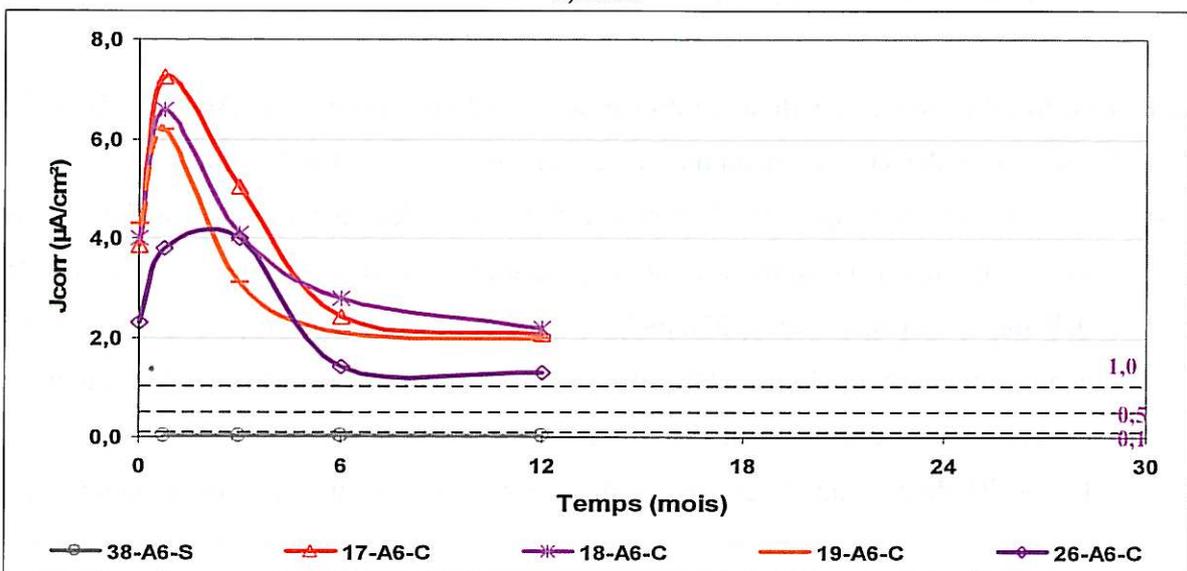
Les traitements de réhabilitation par réalcalinisation étant efficaces pour redonner au béton d'enrobage une basicité accrue comme l'ont démontré les études de pH et les dosages d'alcalins, les armatures se retrouvent dans un environnement dans lequel une diminution de l'activité de corrosion pourrait se produire. Aussi, afin de suivre les processus de corrosion, des caractérisations électrochimiques non destructives ont été réalisées sur les dalles armées.

V.1.2.1 Evolution du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion des dalles "A6"

L'évolution de l'activité de corrosion des armatures des dalles témoins (sain et carbonatés) en fonction du temps est présentée sur la Figure V-7. Les résultats des caractérisations électrochimiques des dalles traitées par réalcalinisation, avant traitement et jusqu'à 12 mois après traitement par courant imposé ou 6 mois après traitement par anode sacrificielle sont présentés respectivement sur la Figure V-8 et la Figure V-9.



a) Ecorr



b) Jcorr

Figure V-7 : Evolution de Ecorr et de Jcorr des dalles "A6" témoins sains et carbonatés

Pour la dalle **témoine en béton sain**, 38-A6-S, les potentiels, (Figure V-7a), sont voisins de -200 mV, quelle que soit l'échéance de mesure, et indiquent une probabilité de corrosion incertaine [57]. Les valeurs de densité de courant de corrosion (Figure V-7b), voisines de 0.03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, sont stables dans le temps et indiquent un niveau de corrosion de négligeable [83].

Les quatre dalles **témoins en béton carbonaté** (17-A6-C, 18-A6-C, 19-A6-C et 26-A6-C) montrent la même évolution des caractéristiques électrochimiques en fonction du temps. Les potentiels libres (Figure V-7a) sont compris entre -400 et -500 mV quelle que soit l'échéance de mesure, et indiquent une probabilité de corrosion certaine [57]. Les valeurs de densité de courant de corrosion, (Figure V-7b), après le traitement de corrosion intentiostatique, sont

proches de $4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (excepté la dalle 26-A6-C qui est plutôt autour de $2.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Quinze jours après, elles sont multipliées par environ 1.5. Elles vont ensuite progressivement diminuer jusque $2.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour 26-A6-C) à 6 mois et puis rester stables jusqu'à 12 mois. Les valeurs de densité de courant de corrosion restent toujours supérieures à $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, ce qui indique un niveau de corrosion élevé [83]. L'hypothèse faite pour expliquer l'augmentation de la densité de courant de corrosion est que même après la fin de l'essai de corrosion intentiostatique, la corrosion engendrée va se poursuivre puis elle va progressivement se stabiliser (sur une période de 6 mois).

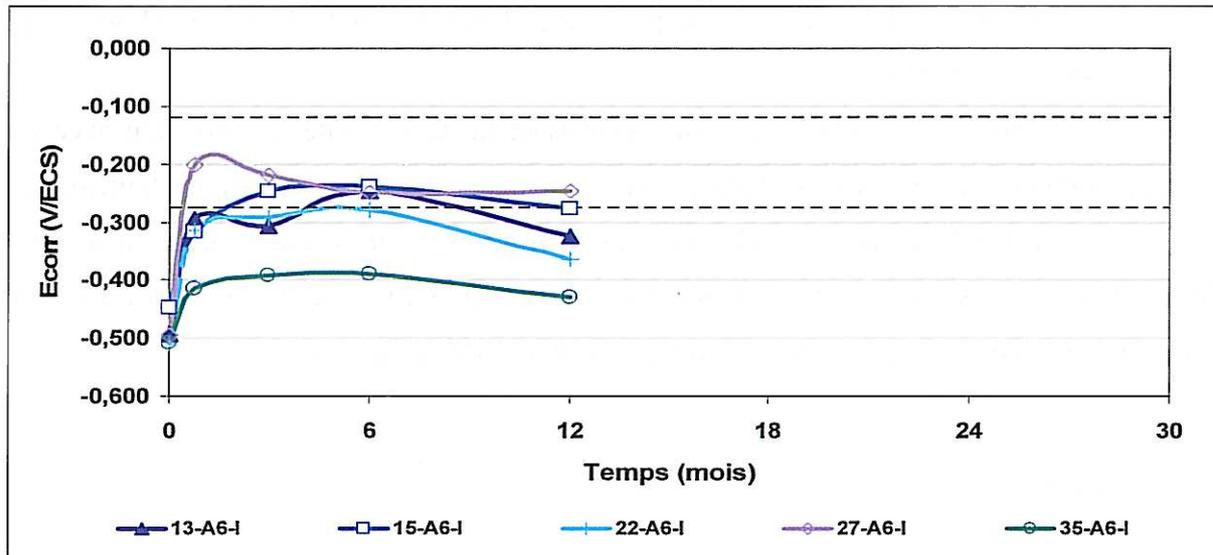
Nota : la courbe J_{corr} de la dalle 26-A6-C est déplacée vers des valeurs plus faibles ce qui s'explique par une valeur de résistance d'enrobage importante (6000 Ohms comparativement aux 2000 Ohms des 4 autres dalles).

Après la **réhabilitation par courant imposé**, les 5 dalles traitées (13-A6-I, 15-A6-I, 22-A6-I, 27-A6-I et 35-A6-I) témoignent du même comportement électrochimique :

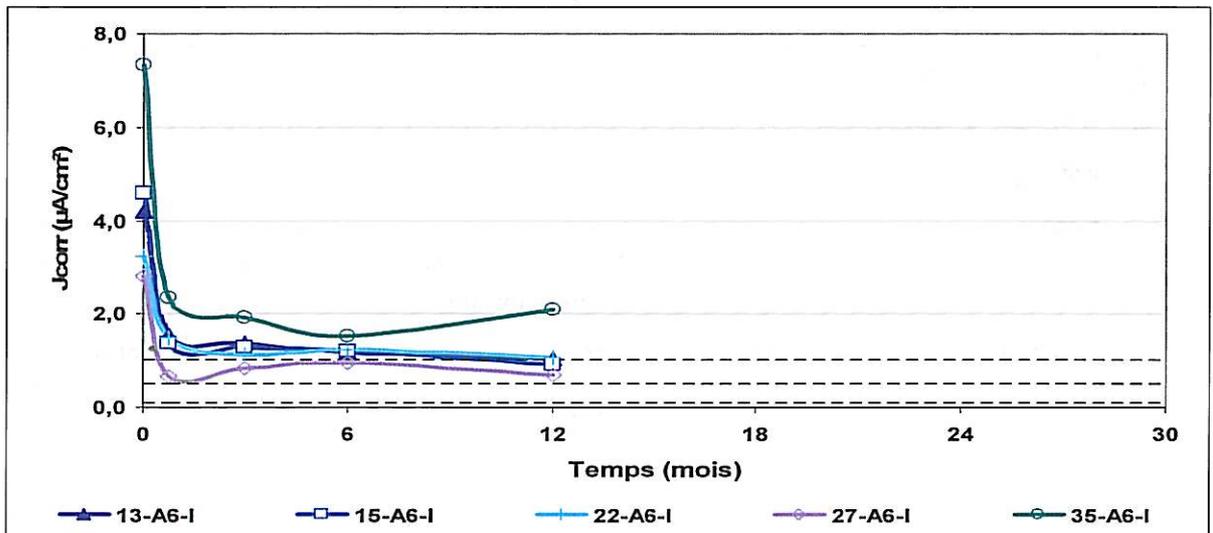
- le potentiel libre augmente d'environ 225 mV vers des valeurs plus positives ce qui est significatif d'une diminution de la probabilité de corrosion (les valeurs pour les dalles 13-A6-I, 15-A6-I, 22-A6-I, 27-A6-I et 35-A6-I sont respectivement égales, avant traitement, à - 493, - 448, - 506, - 496 et - 508 mV, et 6 mois après traitement, à - 246, - 237, - 278, - 248 et -390 mV) et
- la densité de courant de corrosion, divisée par un facteur voisin de 3, indique une diminution significative et importante de la vitesse de corrosion (les valeurs pour les dalles 13-A6-I, 15-A6-I, 22-A6-I, 27-A6-I et 35-A6-I sont respectivement égales, avant traitement, à 4.2, 4.6, 3.2, 2.8 et 7.4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, et 6 mois après traitement, à 1.2, 1.2, 0.9 et 2.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Les résultats obtenus 12 mois après le traitement indiquent toujours une diminution de l'activité de corrosion et donc une bonne efficacité du traitement de réhabilitation par courant imposé. Le niveau de corrosion évolue d'élevé avant traitement à modéré après traitement.

Nota : les courbes E_{corr} et J_{corr} des dalles 27-A6-I et 35-A6-I, sont placées en bas et en haut du faisceau des différentes courbes. Ces dalles présentent respectivement les valeurs de résistance d'enrobage la plus importante et la plus faible (Figure V-10).



a) Ecorr



b) Jcorr, après réalcalinisation par courant imposé

Figure V-8 : Evolution de Ecorr et de Jcorr des dalles "A6" traitées par courant imposé réhabilitation

Après la réhabilitation par anode sacrificielle, les 5 dalles traitées (21-A6-A, 28-A6-A, 31-A6-A, 32-A6-A et 36-A6-A) montrent une évolution des caractérisations électrochimiques similaire :

- Augmentation du potentiel libre d'environ 100 mV vers des valeurs plus positives (les valeurs sont respectivement égales, avant traitement, à - 521, - 453, - 536, - 543 et - 541 mV et 6 mois après traitement, à - 363, - 368, - 357, - 404 et - 463 mV pour les dalles 21-A6-A, 28-A6-A, 31-A6-A, 32-A6-A et 36-A6-A), et
- Diminution de la densité de courant de corrosion (les valeurs sont respectivement égales, avant traitement, à 4.2, 2.8, 4.7, 2.8 et 5.4 µA/cm², et 6 mois après traitement,

à 1.0, 0.5, 1.0, 1.1 et 1.8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les dalles 21-A6-A, 28-A6-A, 31-A6-A, 32-A6-A et 36-A6-A)

Ces résultats démontrent, clairement, un ralentissement de l'activité de corrosion avec une évolution du niveau de corrosion d'élevé avant traitement à modéré – élevé après traitement.

Nota : les courbes E_{corr} et J_{corr} des dalles 28-A6-A et 36-A6-A, sont placées en bas et en haut du faisceau des différentes courbes. Ces dalles présentent respectivement les valeurs de résistance d'enrobage la plus importante et la plus faible (Figure V-10).

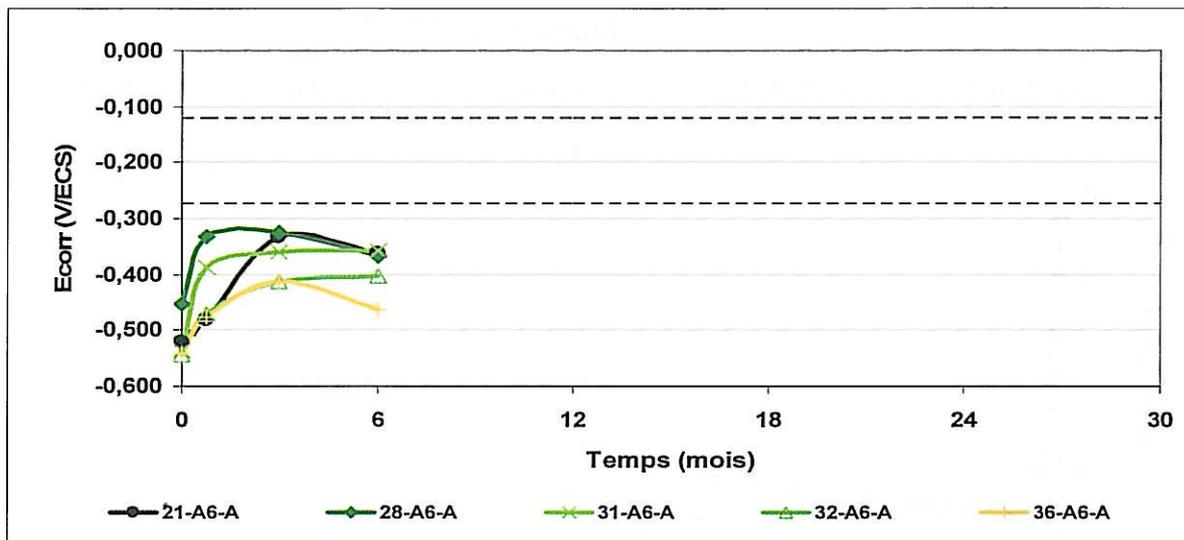
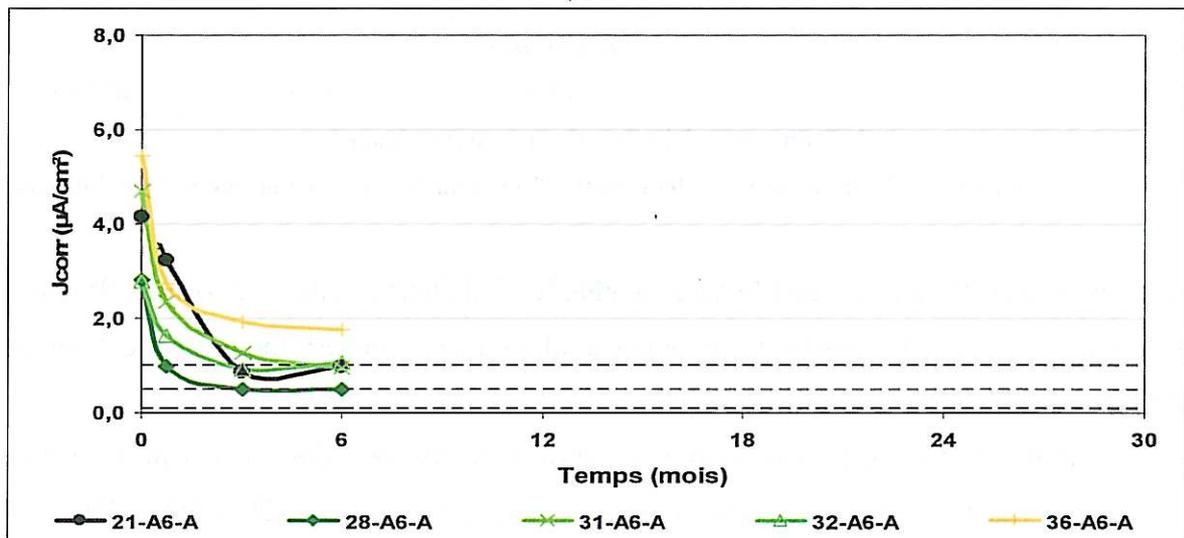
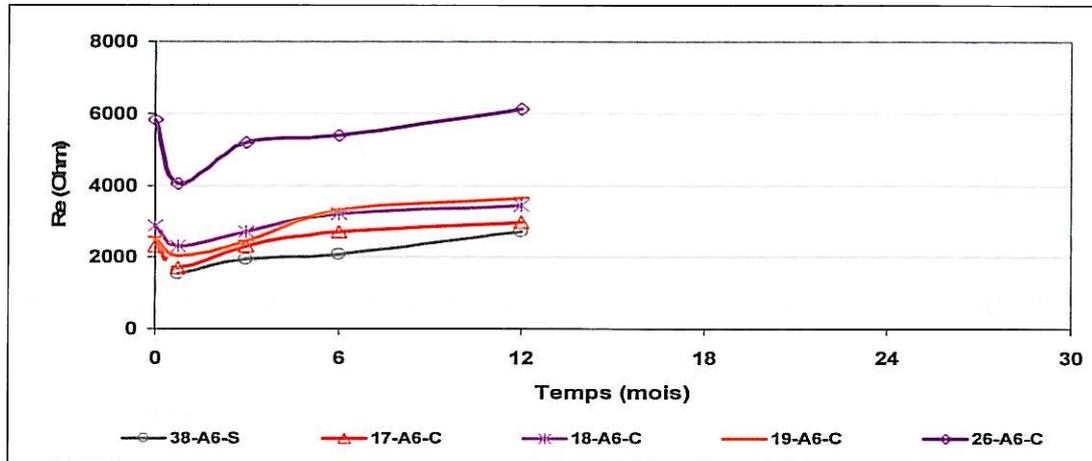
a) E_{corr} b) J_{corr}

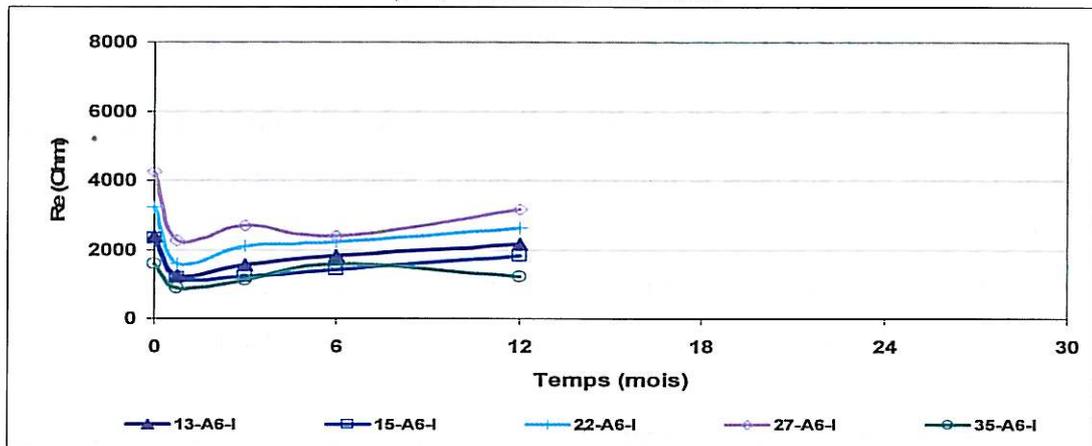
Figure V-9 : Evolution de E_{corr} et de J_{corr} des dalles "A6" traitées par anode sacrificielle réhabilitation

V.1.2.2 Evolution de la résistance d'enrobage des dalles "A6"

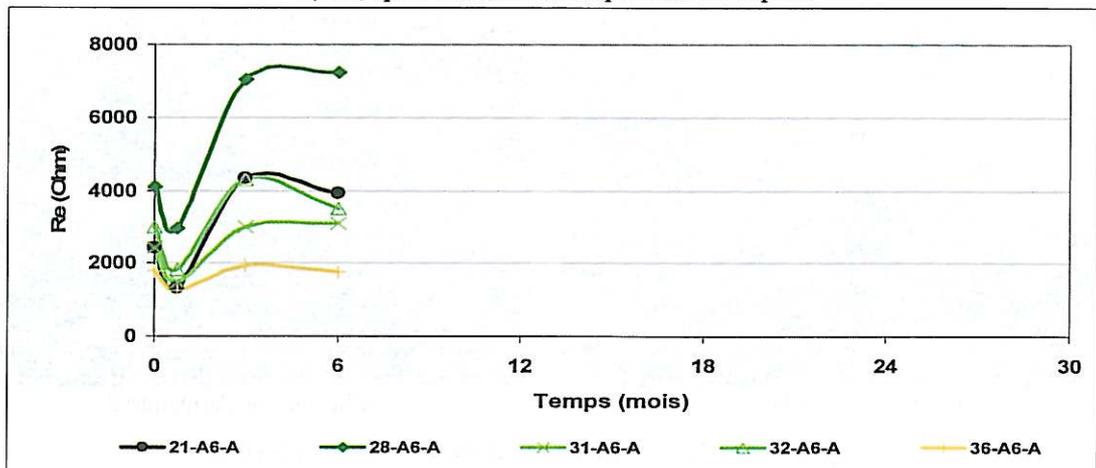
Les résultats des caractérisations électrochimiques montrent une évolution de la résistance de l'enrobage de béton (R_e), suite aux traitements de réalcalinisation que ce soit par courant imposé (Figure V-10b) ou par anode sacrificielle (Figure V-10c). L'évolution des valeurs de R_e des dalles témoins en fonction du temps est présentée sur la Figure V-10a.



a) R_e , témoins sain et carbonaté



b) R_e , après réalcalinisation par courant imposé



c) R_e , après réalcalinisation par anode sacrificielle

Figure V-10 : Evolution de R_e des dalles "A6" témoins et traitées après réalcalinisation réhabilitation

Pour l'ensemble des dalles témoins et des dalles traitées, la valeur de la résistance d'enrobage commence par diminuer puis, progressivement, elle remonte vers des valeurs proches des valeurs déterminées initialement voir légèrement supérieures. Toutefois, la diminution observée pour les dalles traitées et ce, tout de suite après traitement, est particulièrement conséquente (les valeurs sont sensiblement divisées par deux). Il semble donc que la résistance soit influencée par le traitement puis qu'elle se ré-équilibre.

V.1.3 Caractérisations de la matrice cimentaire et des produits de corrosion

Dans cette partie, la matrice cimentaire et les produits de corrosion ont été étudiés au MEB couplé à un EDS. Un suivi de l'évolution de la nature des produits de corrosion a également été réalisé sur des "mini-éprouvettes" à l'aide de la Microspectroscopie Raman.

V.1.3.1 Observations au MEB couplé à un EDS

L'observation du **témoin sain** (12-A6-S) révèle la présence de nombreux des cristaux de portlandite (Figure IV-12a) dans la matrice cimentaire, indiquant bien que le béton n'est pas carbonaté. Sur la surface de l'armature 2, la présence de cristaux d'oxydes de fer n'a pas été constatée (Figure IV-12b). Ces résultats confirment les caractérisations électrochimiques qui indiquent que les armatures présentent un niveau de corrosion négligeable.

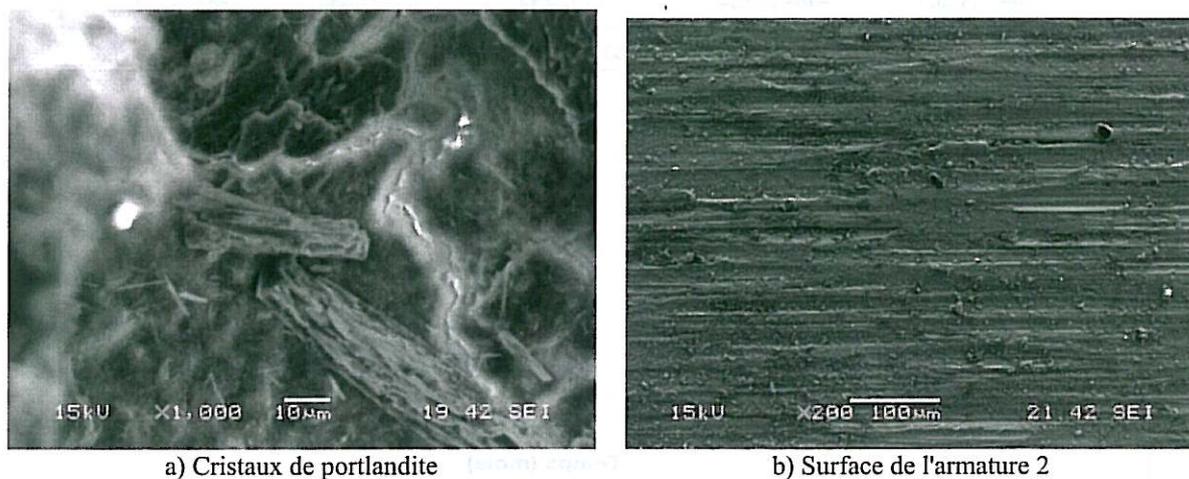
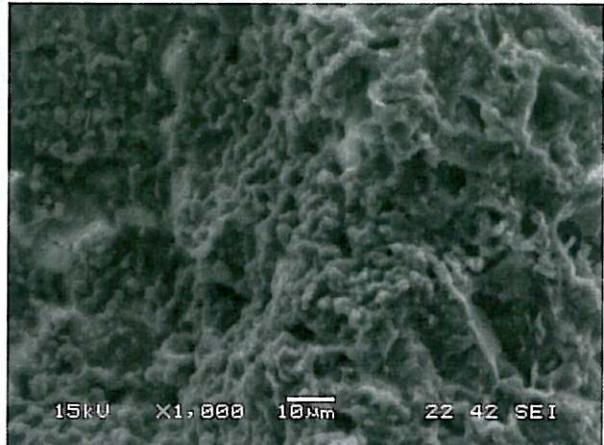


Figure V-11 : Observations MEB du témoin sain 12-A6-S

L'observation du **témoïn en béton carbonaté** (29-A6-C) révèle la présence d'un voile de calcite, significatif d'une carbonatation (Figure IV-13a). Des oxydes de fer cristallisés ont également été identifiés dans les pores, au voisinage de l'armature 2 (Figure IV-13b).

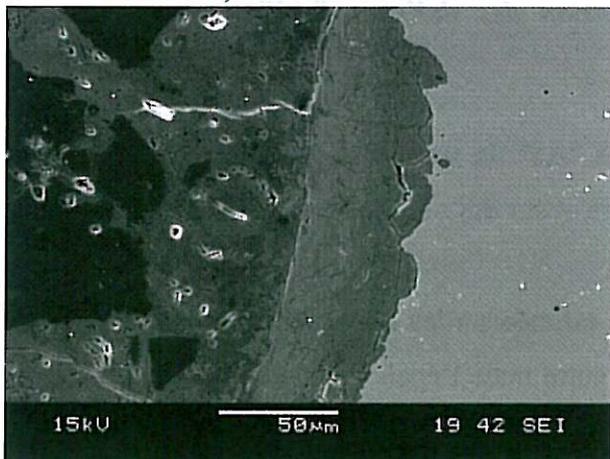
Douze mois après la corrosion intentiostatique, sur une section polie transversale réalisée niveau de l'armature 1, une couche de produits de corrosion de 50 à 100 μm d'épaisseur a été observée à l'interface béton/armature (Figure IV-13c), ce qui indique un développement important de produits de corrosion.



a) Voile de calcite



b) Cristaux d'oxydes de fer

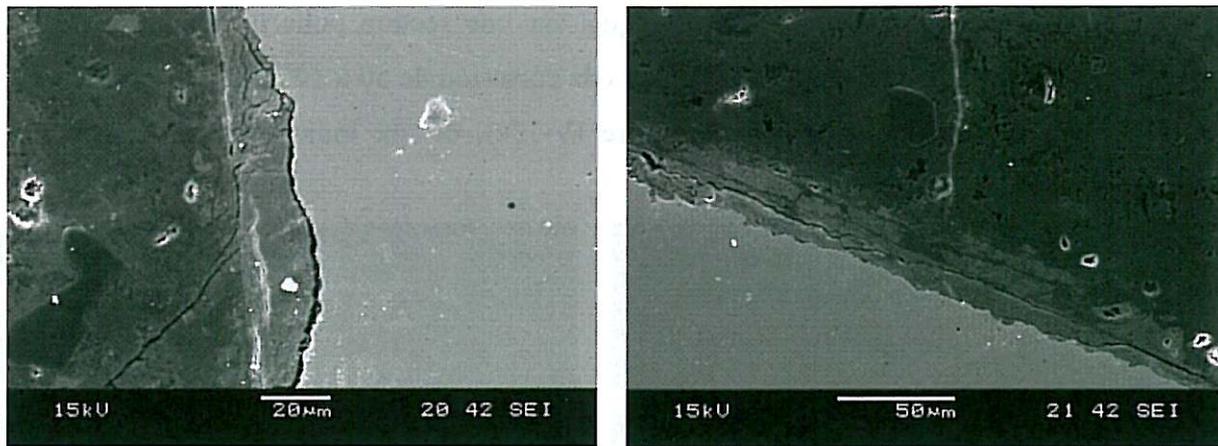


c) interface armature/béton

Figure V-12 : Observations au MEB du témoin carbonaté 29-A6-C après 12 mois

Douze mois après la **réalcalinisation par courant imposé**, aucune évolution de la matrice cimentaire n'a été observée. Sur une section polie transversale à l'armature 2, une épaisseur de produits de corrosion de 10 à 20 μm d'épaisseur a été observée à l'interface béton/armature (Figure IV-14a). La corrosion ne semble donc pas s'être re-développée à l'issue du traitement de réalcalinisation par courant imposé.

Six mois après la **réalcalinisation par anode sacrificielle**, aucune évolution de la matrice ni aucun développement supplémentaire de produits de corrosion (Figure IV-14b) n'ont été observés.



a) interface armature/béton, 33-A6-I, 12 mois après réalcalinisation par courant imposé

b) interface armature/béton, 34-A6-A, 6 mois après réalcalinisation par anode sacrificielle

Figure V-13 : Observations au MEB des dalles "A6" traitées par réalcalinisation

V.1.3.2 Identification des produits de corrosion des dalles "A6" par spectroscopie Raman

Comme décrit précédemment pour les dalles "A3", la spectroscopie Raman a été réalisée sur les produits adhérents au béton après fracture et sur des sections polies à l'alcool.

L'épaisseur des produits de corrosion peut être estimée sur les images de microscopie (Figure V-14). Elle est inhomogène d'une section à l'autre mais l'épaisseur de la couche du témoin carbonaté est plus importante que celle des échantillons traités qui diffèrent peu l'un de l'autre.

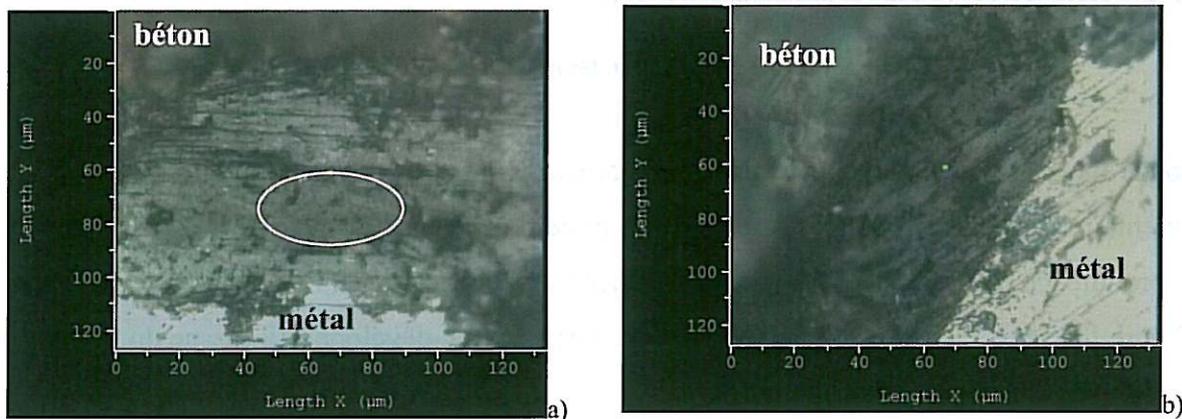


Figure V-14 : a) témoin carbonaté, la forme soulignée un cristal de calcite, b) témoin traité par courant imposé

L'étagement spatial des différents produits de corrosion est suivi par l'analyse des spectres en partant du métal vers le béton. Les plus caractéristiques sont représentés sur la Figure V-15 pour le témoin carbonaté.

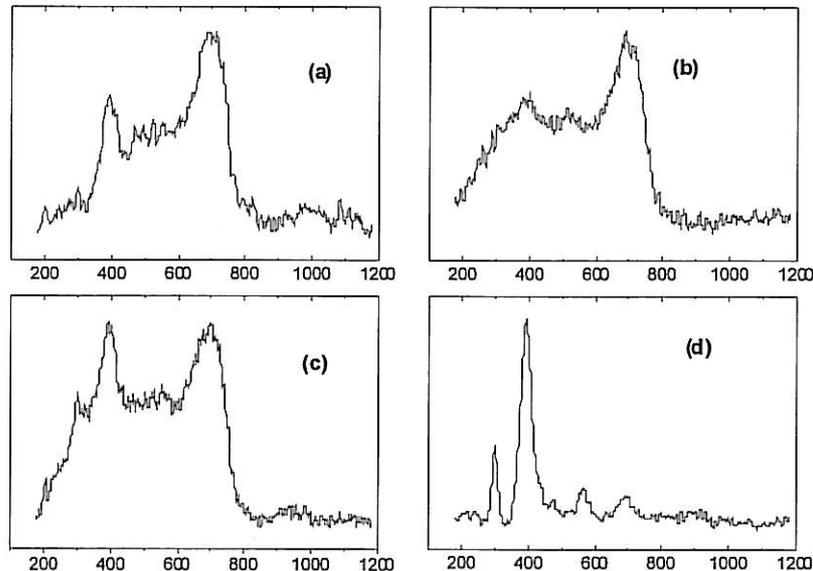


Figure V-15 : Spectres Raman enregistrés en partant du métal vers le béton sur le témoin carbonaté de la Figure V-14 (a) ; spectre(a) à 5-20 μm du métal; (b) idem mais autre point (c) dans l'épaisseur, (d) près du béton à 60 μm du métal

Le spectre Figure V-15 (a) avec deux bandes mal définies mais intenses à 400 et 660 cm^{-1} est caractéristique de la ferroxhyhite.

Le spectre Figure V-15 (b) voit la bande à 700 cm^{-1} s'élargir jusqu'à 730 cm^{-1} . La bande à 400 cm^{-1} est à présent un épaulement accompagné d'un autre à 520 cm^{-1} , ce spectre est attribuable à la ferrihydrite, bien que la présence de maghémite ne soit pas exclue.

Le spectre Figure V-15 (d) est celui de la goéthite sans aucune ambiguïté puisque les bandes sont fines et correspondent à la référence.

Le spectre Figure V-15 (c) est typiquement rencontré dans toute l'épaisseur de la couche avec des variations dans les intensités respectives du doublet de la goéthite et la bande à 700 cm^{-1} . Ce spectre est un mélange des phases précédemment citées.

Cette répartition se retrouve également sur les échantillons traités avec toutefois l'apparition d'un spectre de magnétite sur la zone la plus proche du métal (5µm d'épaisseur maximum), mais inégalement répartie sur le pourtour de l'électrode.

Le Tableau V-1 récapitule les phases identifiées sur les produits de corrosion des armatures enrobées dans un béton carbonaté, réalkalinisé par courant imposé et anode sacrificielle 2 mois après le traitement ainsi que les épaisseurs estimées des couches de corrosion.

Tableau V-1 : Liste de phases des produits de corrosion des armatures dans un béton carbonaté et réalkalinisé des dalles "A6"

Echéance	Préparations des échantillons	Témoin carbonaté (29-A6-C)	Après courant imposé (33-A6-I)	Après anode sacrificielle (34-A6-A)
2 mois après la réalkalinisation	Produits adhérents à la paroi après fracture du béton	Ferrihydrite Ferroxyhite Goethite	Magnétite Goethite Lépidocrocite	Magnétite
	Observation de la section après polissage à l'alcool	Ferrihydrite Ferroxyhite Goethite	Magnétite Ferroxyhite Ferrihydrite ou Maghémite Goethite Lépidocrocite	Magnétite Goethite
	Épaisseur estimée +/-10µm	60µm	40µm	40µm

Le traitement de réalkalinisation ne modifie pas en profondeur l'étagement des produits de corrosion autour des armatures. Il faut noter la formation de magnétite, qui comporte du Fer au degré d'oxydation 2 dans sa structure, après le traitement. Toutefois, ce produit ne peut être assimilé à la couche passive du fer dans un béton sain. De même l'épaisseur de produits de corrosion est plus faible dans le cas des échantillons traités juste après l'oxydation accélérée. La structure de produits étant identique, il est possible d'affirmer que la corrosion dans le béton carbonaté s'est propagée alors qu'elle est freinée dans le béton traité ce qui corrobore les mesures de densité de courant de corrosion à deux mois.

Nous n'avons pas pu mettre en évidence de phases correspondant à une corrosion active en milieu pauvre en oxygène, telles que les Rouilles Vertes. Le temps de préparation et donc d'exposition à l'air des échantillons avant analyse avec carottage, tronçonnage, fracture et polissage explique cela.

C'est pourquoi l'étude suivante sur des mini-éprouvettes permettant d'analyser les produits de corrosion pendant leur formation et transformation à l'abri de l'atmosphère a été menée.

V.1.3.3 Evolution de la nature des produits de corrosion des mini-éprouvettes par spectroscopie Raman

V.1.3.3.1 Produits de corrosion des armatures dans un béton carbonaté

Dans un premier temps, des armatures enrobées dans un micro-béton non vibré lors de la fabrication des éprouvettes, donc très poreux, ont été étudiées. Après avoir mis les mini-éprouvettes en milieu borate (pH = 8.4), ce dernier remplissait très vite (en 1 heure environ) l'espace entre le métal et la lamelle. La croissance d'une couche de corrosion autour des armatures (Figure V-16) a été observée sur plusieurs mini-éprouvettes au potentiel libre alors que d'autres ne présentaient pas de corrosion visible.

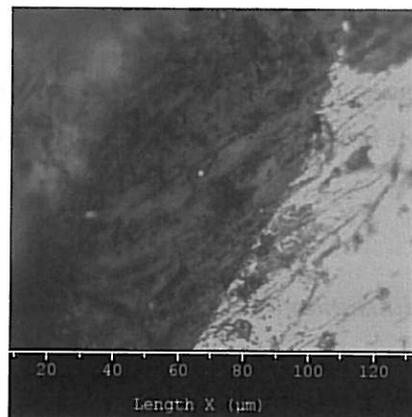


Figure V-16 : Couche de corrosion d'une armature dans un béton carbonaté ; de droite à gauche : métal, couche de corrosion et béton

Le spectre Raman enregistré sur ces produits de corrosion est celui de la Rouille Verte [86] (Figure V-17a). Vingt quatre heures après la formation de Rouille Verte à l'interface béton/armature, le spectre Raman est modifié et correspond à la lépidocrocite γ -FeOOH (Figure V-17b) [87].

Les armatures enrobées dans un micro-béton vibré et compact restent passives dans les mêmes conditions. Selon les expériences des essais de corrosion accélérée sur les dalles "A6", un courant anodique a été imposé sur ces mini-éprouvettes afin d'accélérer artificiellement la corrosion. Ce courant a été choisi de l'ordre de $30 \mu\text{A}$ ($16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) au lieu de $188 \mu\text{A}$ ($100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les dalles "A6") afin d'éviter une oxydation trop rapide. L'électrolyte était une solution de borate (pH = 8.4) afin d'éviter la contamination du béton par des anions agressifs.

Sur toutes les mini-éprouvettes, l'imposition d'un courant anodique a conduit à la formation d'une couronne de Rouille Verte autour des armatures, identique à celle formée sur les échantillons présentant une corrosion spontanée (idem que Figure V-16).

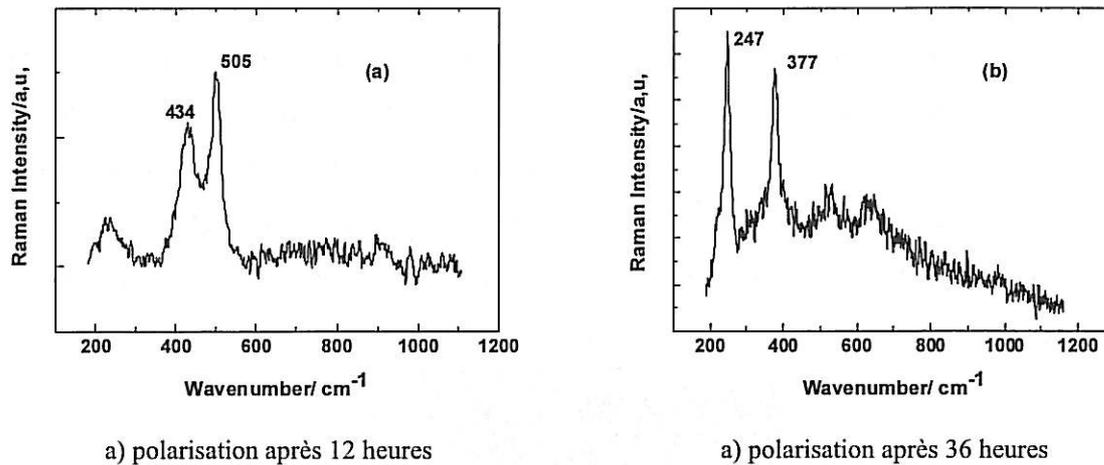


Figure V-17 : Spectre Raman de la couche de corrosion des armatures dans un béton carbonaté

V.1.3.3.2 Traitement de réalcalinisation (réduction cathodique)

Une fois la corrosion établie (dès que la couche de Rouille Verte atteint 10 μm d'épaisseur environ), l'électrolyte est échangé par du carbonate de potassium (40 g/L comme dans le protocole de Novbéton[®]) et un courant cathodique de l'ordre de $-188 \mu\text{A}$ ($1\text{A}/\text{m}^2$ d'acier) a été imposé sur ces mini-éprouvettes. Ce traitement de réalcalinisation a été stoppé dès que la densité de charge totale atteignait $1 \text{Ah}/\text{m}^2$.

V.1.3.3.2.1 Evolution de la nature des produits de corrosion pendant la réalcalinisation

Les spectres Raman collectés pendant ce traitement cathodique par courant imposé indiquent qu'il n'y a pas de modification des produits de corrosion pendant la première heure. Cependant dès que les micro-bulles H_2 ont été observées à l'interface béton/armature, les spectres Raman ont été modifiés (Figure V-18). Après 2 heures de réduction, la bande de la magnétite à 670cm^{-1} (Figure V-18a) est détectée et les bandes caractéristiques de la structure brucite [88] apparaissent avec les deux bandes de la Rouille Verte (Figure V-18b).

Vingt-quatre heures après, il ne reste que de la magnétite pure (Figure V-18c) et de l'hydroxyde ferreux presque pur (Figure V-18d). La présence d'une bande faible à 498cm^{-1} pourrait être due à quelques ions Fe^{3+} restant dans la structure de l'hydroxyde. L'intensité de

ces spectres n'augmente plus avec le temps, assurant que le processus de corrosion a été stoppé.

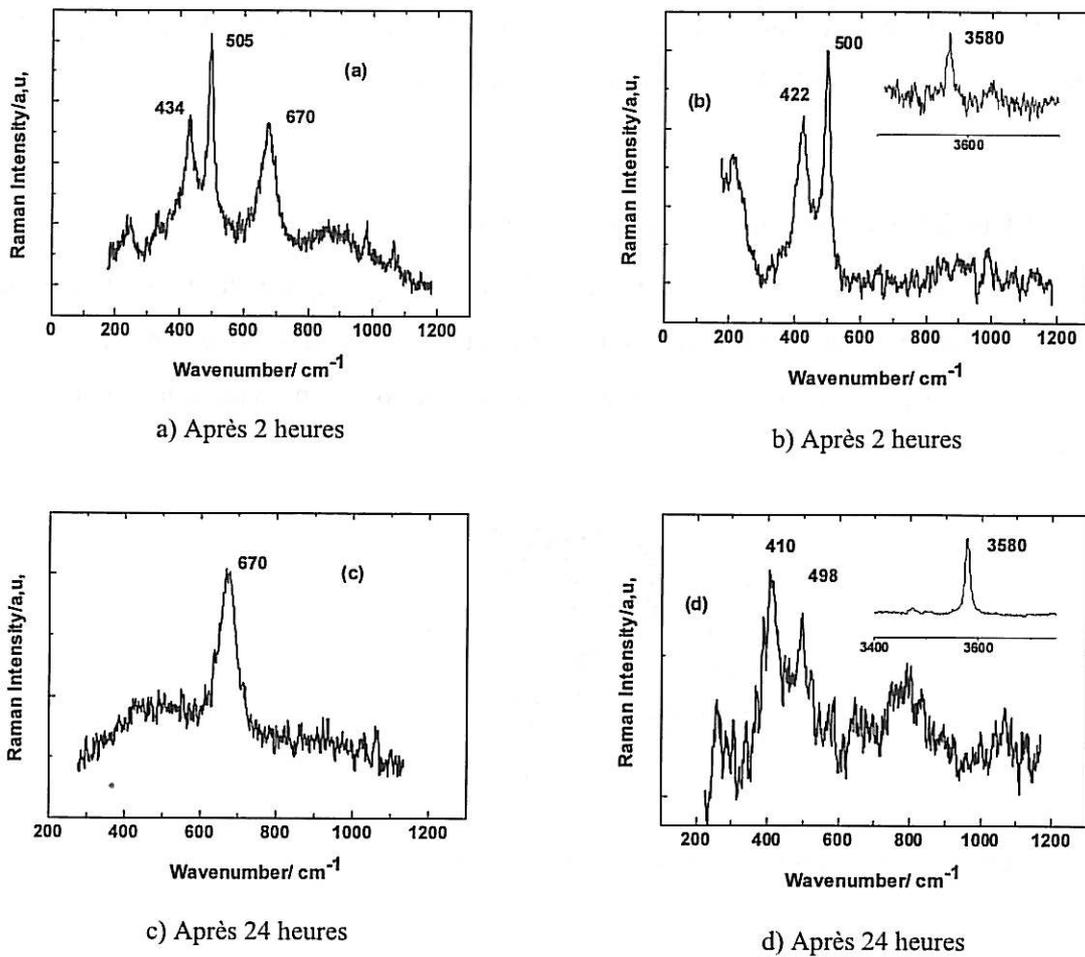


Figure V-18 : Spectres Raman pendant le traitement de réalcalinisation (réduction galvanique à $-100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)

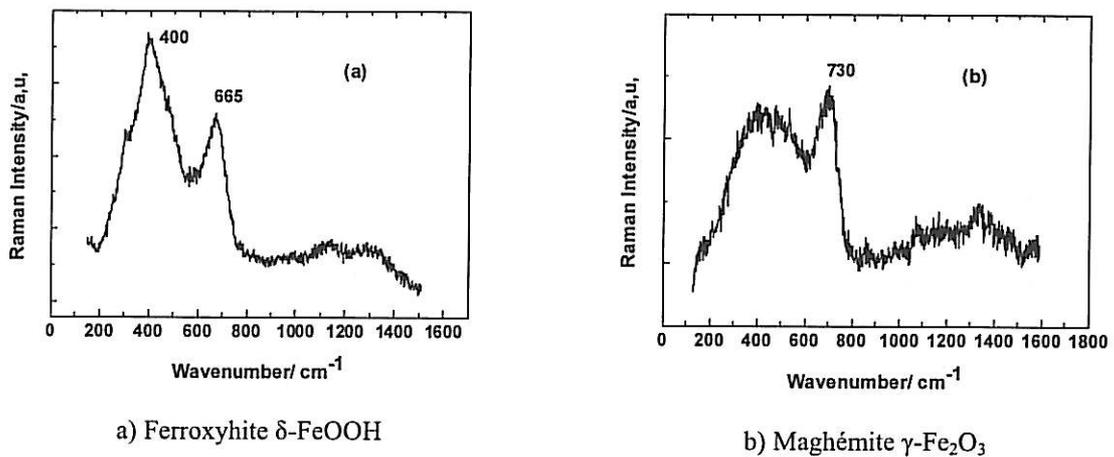


Figure V-19 : Spectres Raman enregistrés 6 mois après réalcalinisation et abandon à l'atmosphère.

Les mini-épreuves ont ensuite été laissées à l'atmosphère du laboratoire pendant 6 mois après le traitement de réalkalinisation. Une oxydation de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ en ferroxihite $\delta\text{-FeOOH}$ a été détectée par spectroscopie Raman (Figure V-19a). Cet oxyhydroxyde est un produit d'oxydation de la brucite dans un milieu alcalin [89]. L'oxydation de la magnétite en maghémite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Figure V-19b) a été également observée.

V.1.3.3.2 Durabilité du traitement de réalkalinisation

Après 6 mois d'abandon à l'atmosphère du laboratoire, la fenêtre en verre d'une mini-épreuve a été enlevée et la phénolphthaléine a été tout de suite pulvérisée sur le micro-béton mouillé à l'eau. La coloration rose indique que le micro-béton avait une valeur de pH supérieure à 10 (Figure V-20).



Figure V-20 : Coloration rose de la phénolphthaléine 6 mois après réalkalinisation

Cette mini-épreuve a été ensuite polie à l'alcool et une autre fenêtre en verre a été de nouveau collée sur la surface du béton. Il n'a pas été observé de reprise de corrosion en circuit ouvert. Cependant après avoir de nouveau imposé un courant anodique sur l'armature dans ce micro-béton réalkalinisé, le spectre de la Rouille Verte a été détecté comme au début des essais sur les armatures dans un béton carbonaté.

V.1.3.3.3 Produits de corrosion des armatures dans un béton sain

Il a été impossible de corroder les armatures noyées dans un béton sain même sous polarisation anodique. Le dégagement d'oxygène ou des piqûres sur la surface de l'acier sont apparues pour des densités de courant supérieures à $30 \mu\text{A}$ (Figure V-21).

Ces témoins sains ont ensuite été laissés pendant un an à l'atmosphère du laboratoire. Après les avoir cassés, l'analyse de la couche fine de produits de corrosion adhérente sur les armatures a confirmé la présence de magnétite comme attendu.

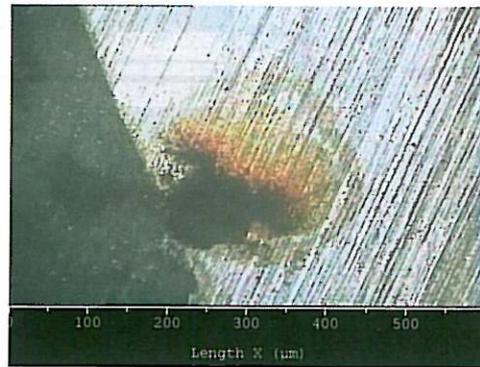


Figure V-21 : Piqûre sur les témoins sains soumis à un courant anodique de $60 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

V.2 Discussions sur l'efficacité du traitement de réalcalinisation de type "réhabilitation" sur les dalles "A6"

A l'issue de l'essai de corrosion intentiostatique réalisé sur les armatures des dalles "A6", une couche homogène de produits de corrosion a été observée (Figure III-14). Son épaisseur est de l'ordre de $10 \mu\text{m}$.

Après le traitement de réhabilitation que ce soit par courant imposé ou par anode sacrificielle, **les mesures de pH** montrent une réalcalinisation hétérogène du béton autour des différentes armatures (alors même qu'elles ont toutes été connectées ensemble), et d'une échance à l'autre sur la même armature. Il est à noter que ces hétérogénéités sont moins marquées dans le cas du procédé par anode sacrificielle. D'autre part, les valeurs de pH atteintes après traitement par anode sacrificielle sont supérieures à celles obtenues par courant imposé.

Un essai complémentaire a été réalisé afin d'étudier la réalcalinisation du béton en fonction de la position des armatures. Ainsi, la carotte 1 a été prélevée à l'intersection de deux armatures et la carotte 2 juste à côté dans une zone sans armatures (Figure V-22). Il en ressort que la réalcalinisation ne se produit qu'au voisinage des armatures, ce qui est cohérent avec les principaux mécanismes supposés être mis en jeu lors d'un traitement de réalcalinisation.

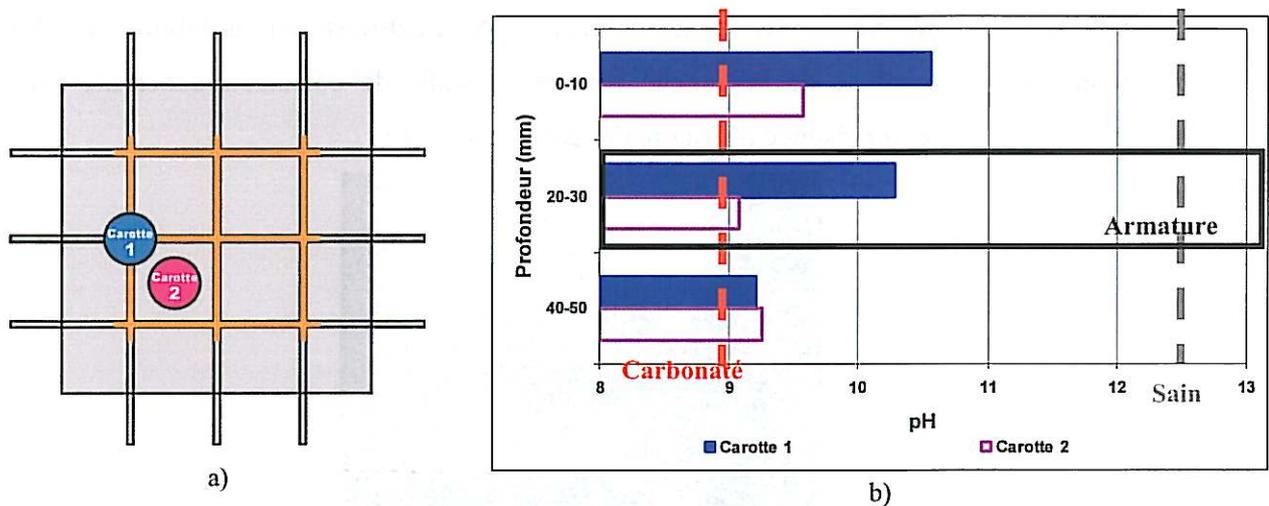


Figure V-22 : Localisation des prélèvements des carottes 1 et 2 sur la dalle 33-A6-I et valeurs de pH

En ce qui concerne **les résultats des dosages d'alcalins**, les traitements de réhabilitation par les deux procédés introduisent des ions alcalins dans l'enrobage du béton depuis le parement jusqu'au niveau de l'armature. L'augmentation de concentration est plus importante sur le parement où l'électrolyte alcalin a été appliqué lors du traitement que celle observée au niveau de l'armature. La pénétration des ions sodium induite par le procédé par anode sacrificielle est plus importante que celle des ions potassium due au procédé par courant imposé, ce qui s'explique par une durée plus longue du traitement (4 mois par anode sacrificielle et 8.5 jours par courant imposé).

Concernant **l'activité de corrosion**, les valeurs de potentiel libre et de courant de corrosion indiquent un état passif des armatures enrobées dans un béton sain (non carbonaté) et un état actif pour les armatures enrobées dans un béton carbonaté. Il n'y a pas d'évolution significative d'activité de corrosion dans le temps pour le témoin en béton sain. En ce qui concerne le témoin en béton carbonaté, la corrosion se stabilise à partir de 6 mois après l'arrêt de la corrosion intentiostatique.

Pour les dalles réalcalinisées par courant imposé ou par anode sacrificielle, les résultats de potentiel libre et de courant de corrosion juste après traitement indiquent clairement une diminution de l'activité de corrosion des armatures.

Les observations réalisées en **microscopie électronique** à balayage indiquent qu'aucun développement supplémentaire de produits de corrosion ne s'est produit à l'issue de la réalcalinisation, alors que la corrosion s'est largement développée sur le témoin carbonaté. Les deux procédés semblent donc avoir ralenti la vitesse de corrosion. Par ailleurs, aucune

néoformation à caractère pathogène n'a été observée, ce qui indique que le traitement n'a pas eu d'impact visible sur la matrice cimentaire.

Enfin, concernant les **analyses réalisées en Micro-Raman**, il est à noter que la corrosion des armatures dans un béton carbonaté donne lieu à la formation de la Rouille Verte, un hydroxyde instable de Fe II et Fe III de formule générale [90] :



Ici A^- représente un anion (carbonate, chlorure pour RV II ou sulfate pour RV I) intercalé dans l'inter-feuillet de brucite pour compenser la charge positive due à la présence des ions Fe^{III} . Ce composé est très sensible à l'oxydation à l'air et se transforme en lépidocrocite ou en Rouille Verte ferrique selon la teneur en oxygène. Ce produit est également sensible à la valeur de pH de la solution et se transforme en magnétite à pH basique [91]. Cette dernière réaction a été attestée dans la littérature, mais l'influence de la cinétique et de la thermodynamique n'est pas encore définie. Le seuil de pH de stabilisation de la Rouille Verte n'est pas établi non plus.

A notre connaissance, c'est la première fois que la réduction de Rouille Verte en hydroxyde ferreux $\text{Fe}(\text{OH})_2$ est attestée pendant une expérience électrochimique.

L'application d'un courant cathodique sur les produits de corrosion dans un béton carbonaté provoque la réduction cathodique de la Rouille Verte et sa transformation simultanée en magnétite par l'augmentation du pH de la solution.

L'oxydation lente des produits de corrosion a été détectée après 6 mois. Cependant la présence de ferrosyhyte ne devrait pas être détectée si l'armature était passive.

De plus, un nouveau processus d'oxydation accélérée entraîne une nouvelle formation de Rouille Verte, même si le pH autour de l'armature a été augmenté à un niveau suffisant pour atteindre la stabilisation de la magnétite. Ces résultats indiquent que la réalcalinisation a bien été obtenue mais la présence des ions carbonates, qui ne sont pas déplacés par le potentiel cathodique, pourrait stabiliser la formation d'un composé instable de type Rouille Verte lors d'un futur processus de corrosion.

La vitesse de corrosion peut être ralentie par l'augmentation de pH du béton, mais les armatures ne peuvent plus retourner à leur état initial de passivation.

V.3 Comparaison des réalcalinisations de type maintenance ou réhabilitation

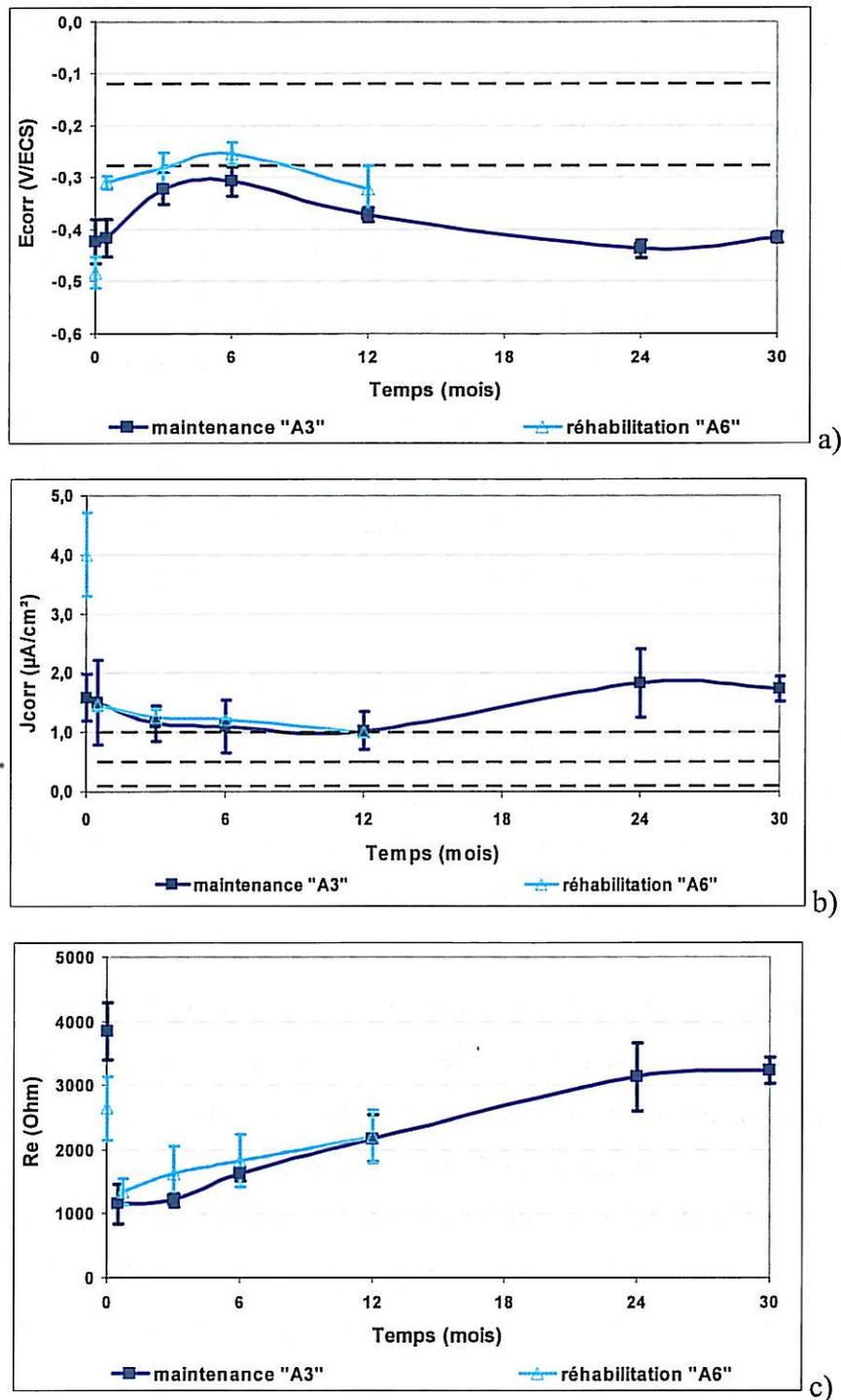


Figure V-23 : Comparaison des caractérisations électrochimiques des traitements de maintenance (04-A3-I, 05-A3-I et 06-A3-I) et de réhabilitation (13-A6-I, 15-A6-I et 22-A6-I) par courant imposé

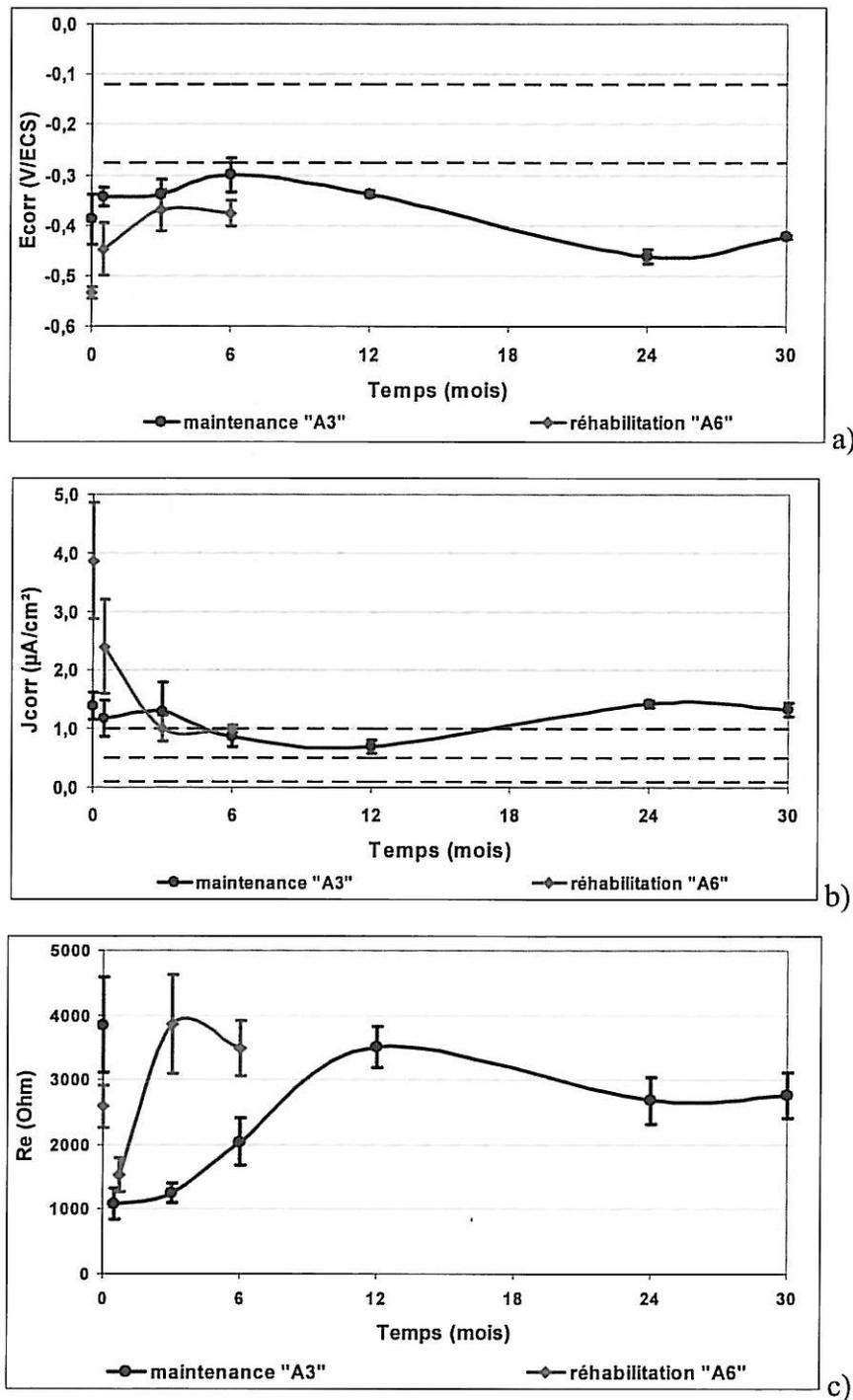


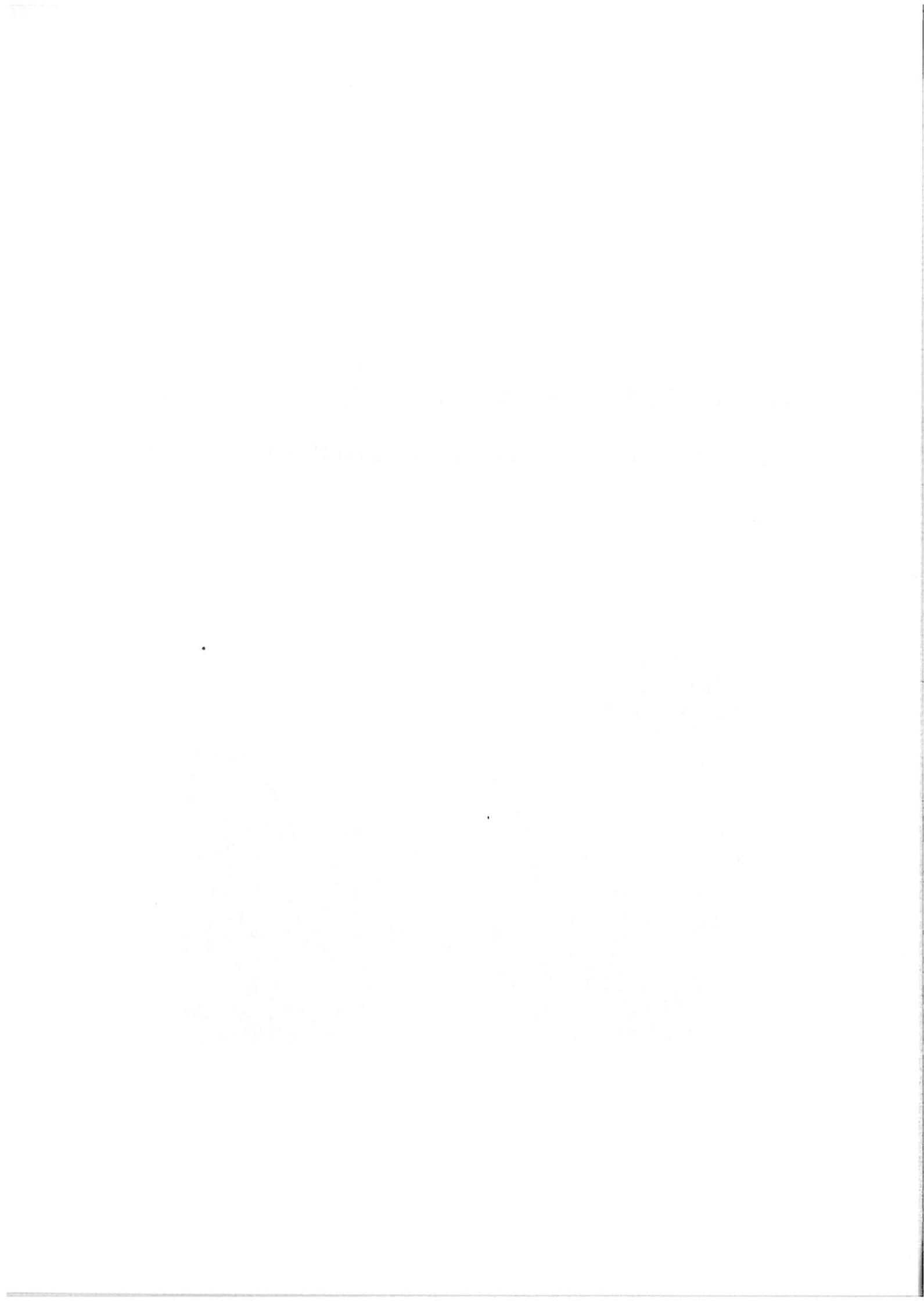
Figure V-24 : Comparaison des caractérisations électrochimiques des traitements de maintenance (08-A3-A, 09-A3-A et 10-A3-A) et de réhabilitation (21-A6-A, 31-A6-A et 32-A6-A) par anode sacrificielle

L'évolution du potentiel libre, de la densité de courant de corrosion et de la résistance de l'enrobage jusque 30 mois après le traitement de maintenance sur les dalles "A3" et jusque 6 ou 12 mois après le traitement de réhabilitation sur les dalles "A6" sont comparées sur la Figure V-23 (par le procédé courant imposé) et sur la Figure V-24 (par le procédé anode sacrificielle). Il s'agit de vérifier l'influence du niveau de corrosion initial des armatures sur

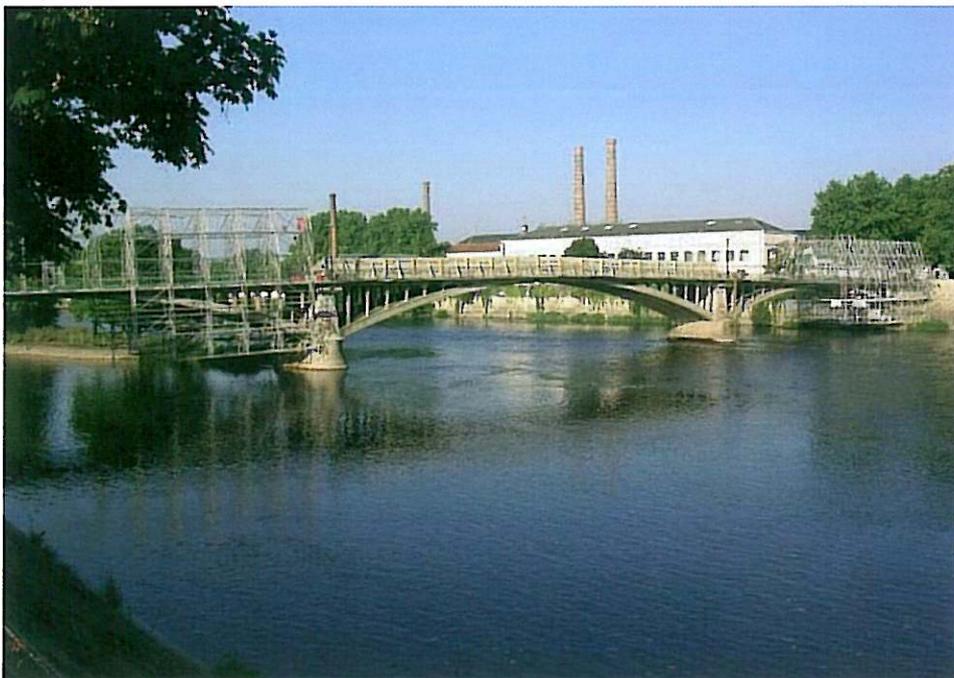
l'efficacité du traitement de réalcalinisation. Sur ces graphiques, sont présentées les valeurs moyennes de 3 dalles traitées. La barre d'erreur correspond à une fois l'écart type.

Après l'application des deux procédés (courant imposé et anode sacrificielle), les résultats des mesures du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion montrent que l'état initial de corrosion n'influence pas de manière significative le résultat du traitement. La seule différence entre un traitement de maintenance et de réhabilitation reste le gain par rapport aux valeurs initiales plus important dans le cas du traitement de réhabilitation.

Contrairement aux travaux de Gonzalez et al. [47] (cf. Chapitre I.4.1.2), ces résultats électrochimiques tendent à montrer que le traitement de réalcalinisation ne peut pas seulement réparer les armatures lorsque la corrosion n'en est qu'à ses prémices, mais aussi lorsque la corrosion est plus avancée (10 μm de produits de corrosion uniformément répartis). Le traitement de réalcalinisation semble donc pouvoir être utilisé à la fois en tant que réparation de maintenance ou de réhabilitation.



Chapitre VI. Suivi du traitement de réalcalinisation par courant imposé du pont Camille de Hogues



Ce sixième chapitre est constitué d'un rapport du suivi du chantier de réalcalinisation par courant imposé du pont Camille de Hogues, Châtelleraut, Vienne, 86.

Les participants à ce travail sont :

V. Bouteiller, M. Bouichou, J. Dauthuille, A. Deman, E. Marie-Victoire et Y.Y. Tong

Version au 27 juillet 2009

CHATELLERAULT - 86, Vienne

Suivi du chantier de réalcalinisation par courant imposé du pont Camille de Hogues

1. INTRODUCTION

Les principales altérations des ouvrages d'art et édifices en béton armé sont liées à la corrosion des armatures. Deux mécanismes peuvent induire cette corrosion : la présence de chlorures en quantité suffisante au niveau des armatures et la carbonatation du béton. Ce dernier phénomène est le plus fréquent. Il consiste en une réaction entre les principaux composés du béton durci tels que la portlandite ou les silicates de calcium hydratés (CSH), et le dioxyde de carbone contenu dans l'air, pour former de la calcite. Il en résulte une diminution importante du pH du béton de valeurs initiales proches de 13, vers des valeurs inférieures à 9. Ainsi, les armatures en acier initialement protégées de la corrosion dans un béton sain vont dans un béton carbonaté se retrouver dans un environnement favorable à la corrosion.

Afin de pouvoir prescrire des solutions pérennes de réparation, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) mènent depuis plusieurs années des recherches dans ce domaine en étudiant plus particulièrement les traitements électrochimiques tels que la déchloruration et la réalcalinisation. Ainsi depuis 2006, une thèse a été initiée sur la thématique de la réalcalinisation. Cette thèse comportant de nombreux essais en laboratoire, il semblait intéressant de la compléter par un suivi de chantier.

Or en juillet 2006, démarrait, sous la direction de M. Jeanneau, Architecte en Chef des Monuments Historiques (ACMH) et grâce au co-financement de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC) et du Conseil Général de la Vienne, la première des 4 tranches du chantier de restauration du pont Camille de Hogues à Châtellerault, construit en béton armé. Les travaux prévus comportaient une réparation traditionnelle (consistant en une purge du béton altéré et une reprise des épaufrures et enduits à l'aide de mortiers à base de liants hydrauliques), à laquelle un traitement de réalcalinisation par courants imposés, réalisé par la société Renofors a été associé.

Aussi, en accord avec la DRAC (M. Goubeau), l'ACMH et avec la collaboration de la société Renofors (M. Dedieu), à partir d'août 2007 et jusqu'en novembre 2008, sur deux poutres de 170x25cm, un suivi du traitement de réalcalinisation a été réalisé par le LCPC et le LRMH (sur fonds propres). Les essais se sont déroulés en 3 phases :

- des essais préliminaires ont permis de repérer et de caractériser les zones d'essais,
- puis le traitement de réalcalinisation a été réalisé,
- enfin, l'efficacité du traitement a été évaluée à court (juste après) et moyen (deux mois après) et long terme (un an après).

2. CONTEXTE

2.1. Historique et caractéristiques du Pont Camille de Hogues

Le « pont de la manufacture », re-baptisé « Pont Camille de Hogues » en mémoire du maire qui a décidé de sa construction, est le premier pont civil en béton armé de France. Traversant la Vienne sur la commune de Châtellerault à hauteur de la manufacture d'armes, la construction de ses fondations a débuté en août 1899, puis des essais de charges ont été réalisés entre le 25 mars et le 5 avril 1900, le gros œuvre ayant été achevé le 5 novembre et le décintrement ayant été effectué le 15 décembre de cette même année.

Le pont a été construit en béton armé sous la direction de l'architecte et entrepreneur François Hennebique, qui y a mis en œuvre son fameux système d'étriers pour ligaturer les armatures (photo 1). L'ouvrage, large de 8 mètres, long de 150 mètres et comportant 3 arches, est supposé ne pas nécessiter d'entretien.

Cependant, dès 1902, des fissures apparaissent, notamment sur la chaussée en ciment et des travaux de réparation vont être réalisés jusqu'en 1910. Dans les années 30, une nouvelle série de travaux est engagée « pour cause d'usure ».



Photo 1 : Système d'étriers permettant de lier les armatures entre elles, mis au point par François Hennebique.

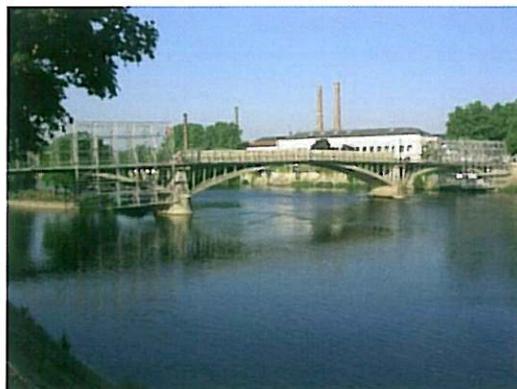


Photo 2 : Vue d'ensemble du Pont Camille de Hogues à Châtellerault.

Cependant plus de 100 ans après sa construction et avec un trafic de 2000 à 3000 véhicules par jour, l'ouvrage, classé monument historique depuis le 22 novembre 2002 et labellisé "Patrimoine du XX^e siècle", présentait de multiples dégradations nécessitant de nouveaux travaux de restauration.

2.2. Diagnostic préliminaire

2.2.1. Observations visuelles

Lors d'une première visite en août 2007, de multiples altérations ont été observées à la fois sur les arches et sur le tablier.

◆ Ainsi, des fissures étaient visibles sur les trottoirs (photo 3), en bordure desquels la présence de végétaux supérieurs a été constatée (photo 4).



Photo 3 : Fissures visibles sur les trottoirs.



Photo 4 : Présence de végétaux supérieurs en nez de trottoirs.



Photo 5 : Nombreuses traces d'infiltration en sous-face du tablier.



Photo 6 : Présence de concrétions blanches en sous-face du tablier.



Photo 7 : Localement des stalactites blanches ou ocre sont visibles en sous-face du tablier.



Photo 8 : Présence de nombreuses épaufrures laissant apparaître des armatures très corrodées en sous-face du tablier.

En sous-face du tablier, de très nombreux points d'infiltration d'eau associés à des efflorescences (photo 5), des concrétions et stalactites (photos 6 & 7), des fissures, des épaufrures et une corrosion des armatures ont été observées (photo 8).

◆ Au niveau des arches, le même type de pathologies a été observé, notamment sur les poutres (photo 9). Ainsi la présence de gonflements associés à une fissuration (photo 10) ainsi que de très nombreuses épaufrures laissant apparaître des armatures très oxydées (photos 11 & 12) a été constatée. Localement les étriers sont rongés par la corrosion, jusqu'à la rupture (photo 13). La qualité du béton est également assez pauvre (présence de nids de cailloux, photo 14). La présence d'un enduit d'épaisseur variant de quelques millimètres à quelques centimètres a cependant probablement joué un rôle protecteur (photo 14).



Photo 9 : Des infiltrations d'eau, localement associées à des stalactites blanches ou ocre sont visibles au niveau des poutres.



Photo 10 : Sur quelques poutres des gonflements ont été observés sur des surfaces assez considérables.



Photos 11 & 12 : De très nombreuses épaufrures ont été observées, notamment sur les poutres.



Photo 13 : Localement les étriers sont rongés par la corrosion jusqu'à la rupture.



Photo 14 : Epaufrure au droit d'un nid de cailloux. Un enduit d'environ 1cm d'épaisseur recouvrait le béton.

2.2.2. Premiers éléments de diagnostic

A la demande du Centre d'Etude Technique de l'Equipement (CETE), des analyses ont été réalisées par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Angers et le LCPC de Paris².

Ainsi, des armatures prélevées au niveau d'une colonnette et d'une poutre de l'un des arcs ont été identifiées comme des armatures en acier ductile soudable, de classe mécanique Fe E235.

Par ailleurs, les analyses ont montré que le béton était constitué d'un mélange de granulats essentiellement issus de roches siliceuses et silicatées (quartz, feldspaths, micacés et plagioclases) et probablement d'un ciment portland ordinaire dosé à 380 ± 40 kg/m³ de béton.

La porosité ouverte de ce béton s'est révélée assez élevée (de l'ordre de 21%), ses performances mécaniques étant aussi assez faibles (résistance à la compression de 15 à 20Mpa).

Aucune pathologie de type réaction alcali-granulat ou réaction sulfatique, ni aucune pollution en chlorures n'ont été mises en évidence. Par contre, une profondeur de carbonatation variant de 10 à 20mm a été mesurée. Si dans la zone du tablier, les armatures étaient suffisamment enrobées, au niveau des longerons et des colonnettes les épaisseurs d'enrobage qui variaient de 15 à 25mm étaient en moyenne inférieures à la profondeur de carbonatation.

Le pont était donc affecté par un problème généralisé d'infiltration d'eau, lié à une absence d'étanchéité au niveau du tablier, localement aggravé par un phénomène de carbonatation. Sur la base de ces éléments, une reprise d'étanchéité complétée par une réparation traditionnelle du béton ont été engagées. Pour traiter le problème de la carbonatation, notamment du béton des colonnettes, un traitement de réalcalinisation complémentaire a été également programmé.

3. OBJECTIF DE L'ETUDE ET PROTOCOLE D'ESSAIS

3.1. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude était d'étudier un traitement de réalcalinisation mis en œuvre dans des conditions de chantier, en utilisant des outils de diagnostic de terrain. Aussi, l'efficacité et la durabilité du traitement ont été évalués sur une période d'un an et demi, essentiellement par des mesures électrochimiques de terrain mais aussi par quelques caractérisations analytiques. L'impact de la réalcalinisation sur la matrice cimentaire pourra être évalué dans un second temps, notamment par des observations en microscopie électronique à balayage (MEB), couplée à un EDS (Energy Dispersive Spectrometer).

3.2. Protocole d'essais

Afin de suivre l'évolution du pH du béton et de la corrosion des armatures, un protocole d'essais en 6 étapes a été adopté :

- détection des armatures,
- mesures de potentiel (réalisation de cartographies de potentiels),
- mesures des résistivités,
- mesures de vitesses de corrosion,
- suivi du pH par des tests avec indicateurs colorés,
- et prélèvement de carottes pour les observations au MEB.

3.2.1. Détection des armatures

La **localisation des armatures** a été réalisée avec un **pachomètre** « Rebar plus[®] » (photo 15). Le principe de l'appareil (Figure 1) consiste à créer un champ électromagnétique primaire. Tout métal conducteur électrique et/ou magnétique soumis à ce champ, engendre un champ électromagnétique secondaire détectable. Si la densité d'armatures n'est pas trop importante, il permet d'établir un plan du premier lit de ferrailage.

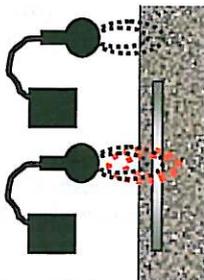


Figure 1 : Schéma de principe du fonctionnement d'un pachomètre.



Photo 15 : Localisation des armatures avec un pachomètre « Rebar plus[®] ».

² Rapport n°15.03.86.102 du LCPC, du 8 mars 2004.

3.2.2. Mesures de potentiel

Des **mesures de potentiel** ont ensuite été effectuées, avec un corrosimètre « CANIN® », équipé d'une électrode de référence au Cuivre/Sulfate de Cuivre (photo 16).

La méthode consiste à mesurer des différences de potentiel spontanées entre les armatures auscultées et une électrode de référence placée sur le parement préalablement humidifié. En fonction des électrodes de référence, des seuils de potentiel ont été établis, correspondant à des probabilités de corrosion. Mais les variations des conditions climatiques, la présence de chlorures... perturbent ces seuils. Aussi, dans la pratique, des cartographies de potentiel sont plutôt réalisées et la corrosion est considérée comme probable, non pas dans les zones à potentiel très négatif, mais dans les zones à fort gradient de potentiel.



Photo 16 : Les mesures de potentiel ont été réalisées avec un corrosimètre CANIN, équipé d'une électrode de référence au Cuivre/Sulfate de Cuivre.

3.2.3. Mesures de résistivité

La **résistivité** du béton est évaluée à partir de mesures de résistance électrique. La résistance de l'enrobage (R, en kohms) est mesurée en polarisant les armatures à l'aide d'une contre-électrode placée au contact de la surface de béton, en dehors des zones armées (sinon la résistivité obtenue cumule la valeur propre au béton et celle des armatures). La résistivité (ρ , en kohm.cm) peut alors être calculée selon la formule suivante : $\rho = 2xRxD$ (D étant le diamètre de la contre-électrode, en cm).

La résistivité du béton a été évaluée avec un « Gecor6® », équipé d'une électrode au Cuivre/Sulfate de Cuivre (photo 17).

Des seuils associant résistivité et risque de corrosion (tableau 1) ont été fixés par le fabricant (GEOCISA). Cependant dans la pratique, la résistivité qui est une grandeur liée à l'humidité et à la teneur en sels dans le béton, est plutôt utilisée comme indicateur de pertinence des essais électrochimiques. Ainsi, on considère que pour des résistivités inférieures à 5, le béton est trop humide, alors que pour des valeurs supérieures à 100, il est trop sec ou trop résistif.



Photo 17 : Mesures de résistivité réalisées avec un « Gecor6® ».

Résistivité (k Ω .cm)	Risque de corrosion
> 100	Nul
50-100	Faible
10-50	Modéré
< 10	Elevé

Tableau 1 : Corrélation entre résistivité et risque de corrosion. Seuils établis par le fabricant du « Gecor6® » [3].

3.2.4. Résistance de polarisation et courant de corrosion

Les **courants de corrosion** ont été évalués avec un « Gecor6® » (photo 18), équipé d'électrodes au cuivre/sulfate de cuivre. La technique consiste à mesurer la résistance du béton à la polarisation (R_p). Un courant

de corrosion (I_{corr} , en $\mu A/cm^2$) peut ensuite être calculé selon la formule simplifiée suivante : $I_{corr} = B/R_p$, (B étant un coefficient généralement égal à 30 mV). Dans le processus de corrosion, si la dissolution du métal est uniforme, on estime que : $I_{corr} = 10\mu A/cm^2$ correspond à une corrosion de $100\mu m/an$. Comme dans le cas de la résistivité, des seuils associant courant de corrosion et risque de corrosion (tableau 2) ont été fixés par le fabricant (GEOCISA).



Courant de corrosion ($\mu A/cm^2$)	Niveau de corrosion
$I_{corr} < 0.2$	Négligeable
$0.2 \leq I_{corr} \leq 0.5$	Faible
$0.5 \leq I_{corr} \leq 1$	Modéré
$I_{corr} > 1$	Elevé

Tableau 2 : Corrélation entre courant de corrosion et risque de corrosion. Seuils établis par le fabricant du « Gecoro[®] » [2].

Photo 18 : Mesures de résistance de polarisation réalisées avec un « Gecoro[®] ».

3.2.5. Suivi du pH par indicateurs colorés

La carbonatation consiste en une réaction entre certains composés du ciment hydraté (notamment la portlandite et les CSH) et le dioxyde de carbone contenu dans l'air, en présence d'eau. Le processus de carbonatation conduit à la formation de calcite. Or dans un béton « jeune », la présence de portlandite ($Ca(OH)_2$) génère un pH de l'ordre de 13 à 14. La transformation, progressive de la portlandite en calcite induit une diminution du pH vers des valeurs inférieures à 9.

Dans des conditions de pH très basiques, une couche d'oxydes dite « passive » se forme, les armatures sont protégées. En dessous de 9, sous réserve de la présence d'eau et d'oxygène, une corrosion active peut démarrer. C'est pourquoi, le béton lorsqu'il se carbonate ne constitue plus un milieu protecteur pour les armatures, qui vont s'oxyder et conduire à la formation d'écailles, puis d'épaufrures, du fait de la poussée des couches d'oxyde très expansives formées.

La profondeur de carbonatation est usuellement évaluée par pulvérisation de phénolphthaléine sur carottes de béton fraîchement prélevées. La phénolphthaléine est en effet un indicateur de pH dont la zone de virage se situe autour de 9 : il est rose vif lorsque le pH est supérieur à 9 (béton sain) ; et incolore lorsque le pH est inférieur à 9. La phénolphthaléine est donc un bon indicateur de carbonatation.

A Châtelleraut, les tests ont été réalisés à la fois sur des prélèvements de poudres à différentes profondeurs (photos 19 & 20) et sur des carottes (photos 21 & 22).



Photo 19 : Prélèvement de poudre à différentes profondeurs.



Photo 20 : A un pH supérieur à 9 (béton sain), la phénolphthaléine est rose vif, alors qu'elle est incolore à un pH inférieur à 9 (béton carbonaté).



Photo 21 : Prélèvement par carottage.



Photo 22 : A un pH supérieur à 9 (béton sain), la phénolphthaléine est rose vif, alors qu'elle est incolore à un pH inférieur à 9 (béton carbonaté).

Afin de suivre plus précisément l'impact de la réalcalinisation sur le pH du béton, après traitement, un second indicateur coloré dont la zone de virage se situe autour d'un pH de 11 a été utilisé : la thymolphthaléine (Tableau 3).

PH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Phénol	Béton carbonaté									Béton sain				
Thymol	Béton carbonaté									Béton sain				

Tableau 3 : Zones de virage des indicateurs colorés utilisés.

4. RESULTATS

4.1. Recherche de zones d'essais

Le chantier de restauration s'est déroulé en trois tranches. En accord avec l'entreprise RENOFORS et pour des raisons d'accessibilité au chantier, les essais ont été réalisés dans le cadre de la seconde tranche, sur l'arche de la rive gauche du pont. Dans un premier temps, en août 2007, une zone d'essais d'au moins 1m², dans laquelle le béton était carbonaté jusqu'aux armatures a été recherchée, afin de pouvoir évaluer l'efficacité du traitement de réalcalinisation. Au total 10 zones ont été considérées.

4.1.1. Zone 1

La première zone examinée était un mur côté rive droite du pont, où une épaufrure laissait apparaître une armature très oxydée (photos 23 & 24).



Photo 23 : Zones d'essais n°1 et 5.



Photo 24: Epaufrure visible en zone 1, laissant apparaître une armature très corrodée.

Dans cette zone, les tests à la phénolphtaléine réalisés sur prélèvements de poudre à différentes profondeurs (photo 25) ont révélé une très faible carbonatation, inférieure à 1cm. La carbonatation du béton n'atteignant pas les armatures, cette zone n'a pas été sélectionnée.



Photo 25 : Test à la phénolphtaléine réalisé sur prélèvements de poudre à différentes profondeurs, en zone 1.

4.1.2. Zones 2, 3 et 4

Les trois zones suivantes correspondaient des colonnettes situées face au mur de la zone 1 (photo 26). La section des colonnettes étant d'environ 20cm x 20cm, il était probable de trouver une carbonatation du béton jusqu'aux armatures sur cette partie de l'ouvrage.

Des prélèvements de poudre ont été réalisés à différentes profondeurs sur la face « rive droite » d'une première colonnette (Zone 2). Cependant, de nouveau les tests réalisés à la phénolphtaléine et à la thymolphtaléine ont indiqué une très faible carbonatation du béton (inférieure à 1 cm. Photo 27).



Photo 26 : Zone d'essais n°2.



Photo 27 : Tests à la phénolphtaléine et à la thymolphtaléine réalisés en zone 2.

La face amont de deux autres colonnettes a ensuite été examinée (zones 3 et 4. photos 28, 29 & 30). Dans les deux cas une profondeur de carbonatation de l'ordre du centimètre a été mesurée.



Photo 28 : Localisation des zones d'essais n° 3 et 4.

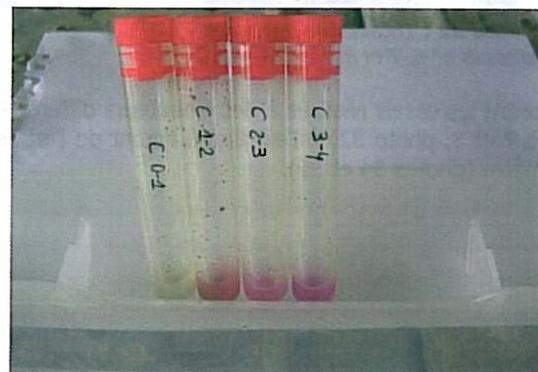


Photo 29: Test à la phénolphtaléine réalisé en zone n°3.



Photo 30 : Test à la phénolphthaléine réalisé en zone n°4.

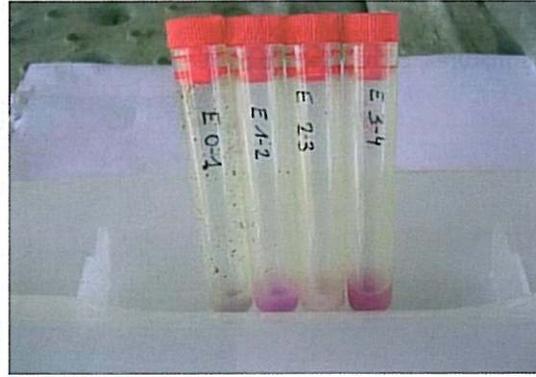


Photo 31 : Test à la phénolphthaléine réalisé en zone n°5.

La profondeur de carbonatation étant inférieure à l'épaisseur d'enrobage sur ces trois colonnettes, elles n'ont pas été retenues comme zone d'essais.

4.1.3. Zone 5

Une cinquième zone a ensuite été considérée au niveau du sol de l'arc (photo 23). Mais là encore, la profondeur de carbonatation mesurée était de l'ordre du centimètre (photo 31). Cette zone n'a donc pas non plus été retenue.

4.1.4. Zones 6, 7 et 8

La face « rive droite » d'une poutre a ensuite été examinée (zone n°6. photo 32). Sur cette poutre, une profondeur de carbonatation de l'ordre de 4 cm a été mesurée (photo 33).



Photo 32 : Localisation des zones d'essais n° 6, 7 et 8.

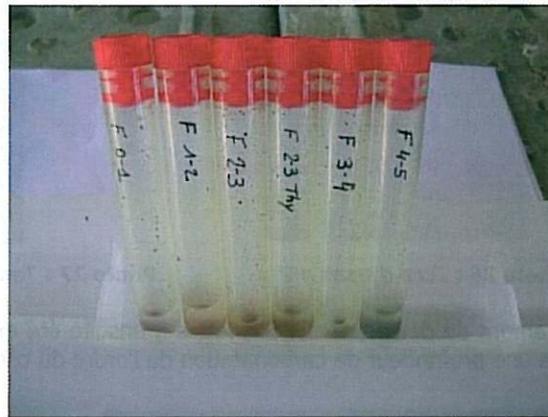


Photo 33 : Tests à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine réalisés en zone n°6.

Par contre les essais réalisés à deux hauteurs différentes de la face amont d'une colonnette proche de la zone 6 (zones 7 et 8, photo 32) à l'extrémité amont de l'arc ont indiqué une profondeur de carbonatation de l'ordre du centimètre (photos 34 et 35).

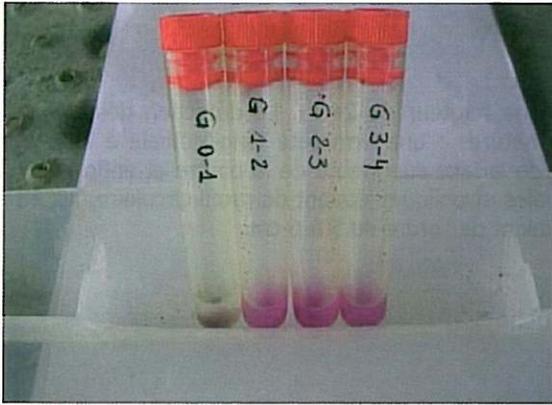


Photo 34 : Tests à la phénolphtaléine réalisé en zone 7.

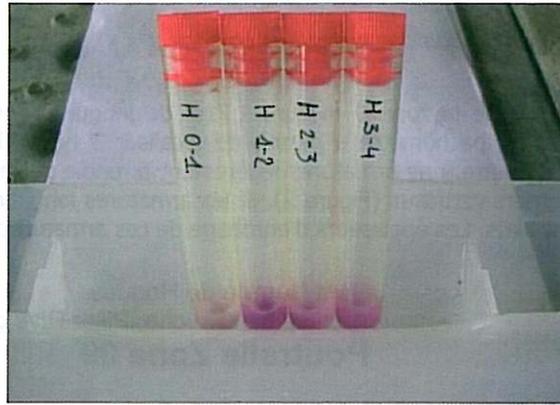


Photo 35 : Tests à la phénolphtaléine réalisé en zone 8.

Parmi les huit zones examinées, seule la zone 6 présentait donc une profondeur de carbonatation atteignant les armatures (enrobées de 4cm de béton). Aussi, les deux dernières poutres, comparables à la zone 6, mais plus accessibles, ont été étudiées.

4.1.5. Zones 9 et 10

La neuvième zone considérée est donc la poutre opposée à celle de la zone 6, la face examinée coté « rive gauche » (photo 36). Enfin, la dixième zone examinée est également une poutre située sur le coté aval du pont, sur sa face coté « rive droite » (photo 37). Sur ces deux poutres, une profondeur de carbonatation supérieure ou égale à l'épaisseur d'enrobage des armatures a été mesurée ($P_c > 5\text{cm}$ en zone 9, les armatures étant enrobées de 5 à 6cm de béton, photo 38 ; $P_c > 7\text{cm}$ en zone 10 où les armatures étaient également enrobées de 5 à 6cm de béton, photo 38). Ces deux zones ont donc été retenues pour la suite de l'étude.



Photo 36 : Zone d'essais n°9.



Photo 37: Zone d'essais n°10.

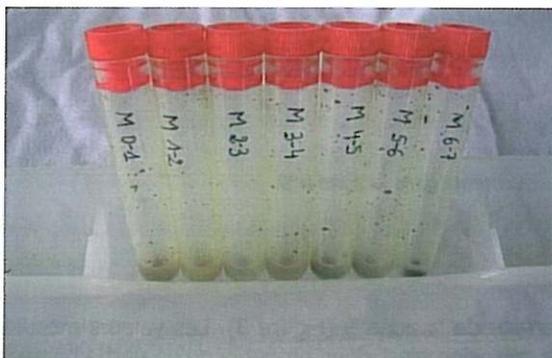


Photo 38 : Tests à la phénolphtaléine réalisé en zone 9.

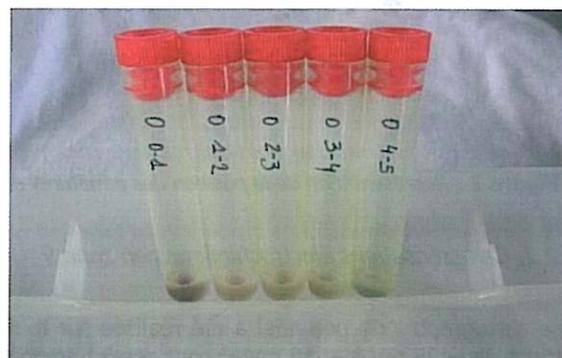


Photo 38 : Tests à la phénolphtaléine réalisé en zone 10.

4.2. Caractérisation préliminaire de la zone 9

4.2.1. Localisation des armatures en zone 9

La poutre de la zone 9 mesure 1,71m de longueur pour une hauteur de 24cm. La détection des armatures réalisée au pachomètre a permis de localiser 3 types d'armatures : une armature longitudinale à la base de chaque poutre, une armatures légèrement arrondie partant de la face supérieure de la poutre et enfin une série de 9 étriers verticaux (Figure 2). Si les armatures longitudinales et obliques étaient de profil circulaire, les étriers étaient plats. Les épaisseurs d'enrobage de ces armatures étaient de l'ordre de 5 à 6 cm.

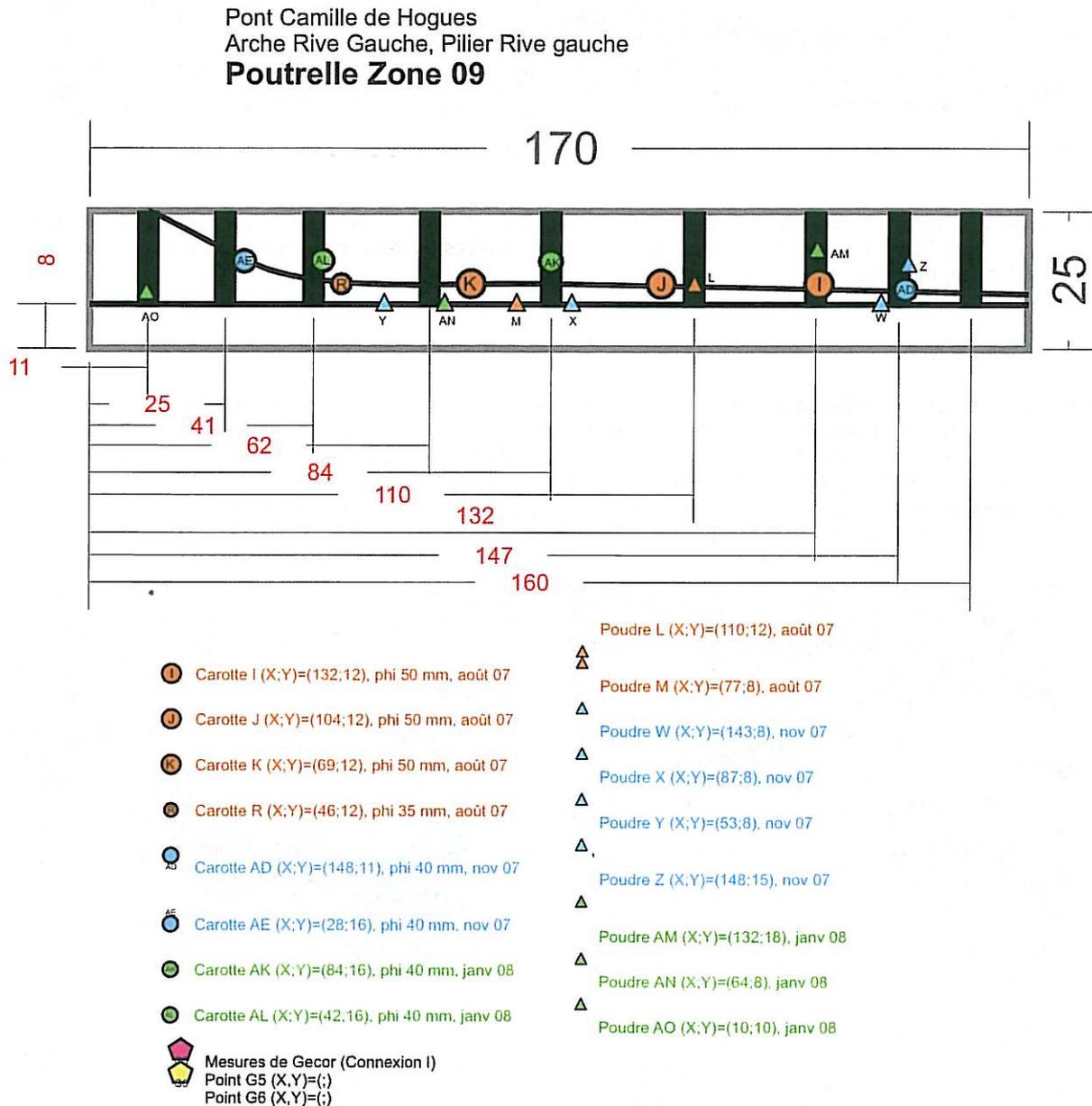


Figure 2 : Représentation de la position des armatures et des prélèvements dans la zone n°9.

4.2.2. Caractérisations électrochimiques en zone 9

Une cartographie de potentiel a été réalisée sur toute la surface de la zone 9 (Figure 3). Les valeurs mesurées varient de -425 mV à -518 mV et sont assez homogènes. La corrosion n'est donc probable qu'en partie basse, au centre de la poutre (gradient de 100mV).

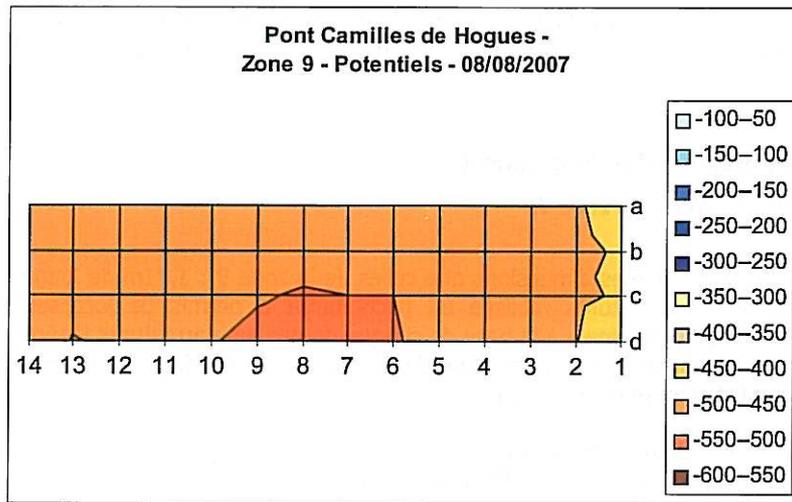


Figure 3 : Cartographie de potentiel réalisée en zone n°9, en août 2007.

Une cartographie de résistivité a également été réalisée en zone 9. Les valeurs mesurées varient entre 28 et 125kΩ.cm, mais sont dans l'ensemble supérieures à 50kΩ.cm ce qui indique que un risque de corrosion faible à nul (tableau 1).

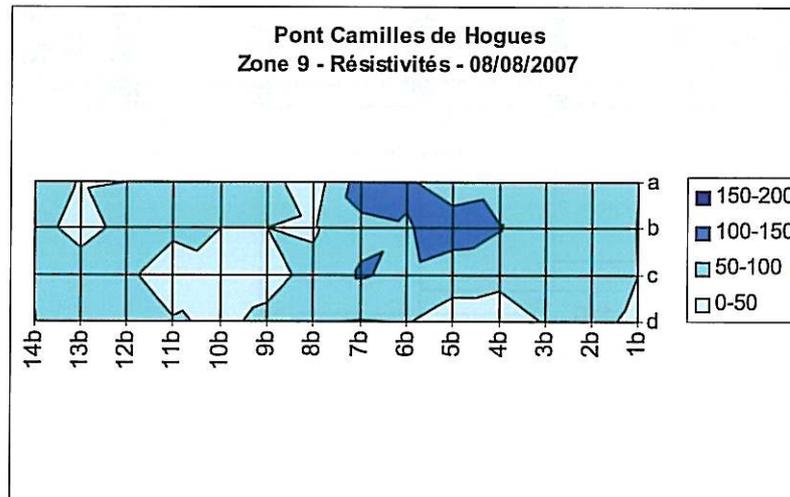


Figure 4 : Cartographie de résistivité réalisée en zone n°9, en août 2007.

Des mesures de résistance de polarisation ont enfin été réalisées en deux points (G5 et G6, Figure 2). Les courants de corrosion résultants sont inférieurs à 0.2 μA/cm² (tableau 4), ce qui indique un niveau de corrosion négligeable (tableau 2), ce qui est cohérent avec les mesures de résistivité.

Zone 9	Ecorr (mV)	Icorr (μA/cm ²)	R (kohm)
G5			
mes1	-480	0,04	3,17
mes2	-487	0,113	2,95
mes3	-497	0,094	5,52
moy	-488	0,082	3,88
G6			
mes1	-477	0,006	12,08
mes2	-476	0,009	13,44
mes3	-478	0,006	5,3
moy	-477	0,007	10,27

Tableau 4 : Mesures de résistance de polarisation réalisées en zone n°9, en août 2007.

Au bilan, bien qu'un phénomène de carbonatation affecte le béton de la zone 9 jusqu'aux armatures, lors des mesures réalisées en août 2007, ce béton était trop résistif (probablement sec) pour qu'une corrosion active soit mesurable.

4.3. Caractérisation préliminaire de la zone 10

4.3.1. Localisation des armatures en zone 10

La poutre de la zone 10 a les mêmes dimensions que celles de la zone 9 : 1,71m de longueur pour une hauteur de 24cm. La détection des armatures réalisée au pachomètre a permis de localiser les 3 mêmes types d'armatures : une première longitudinale à la base de chaque poutre, une armatures légèrement arrondie partant de la face supérieure de la poutre et enfin une série de 9 étriers verticaux (Figure 5). Les épaisseurs d'enrobage de ces armatures étaient de l'ordre de 5 à 6 cm.

Pont Camille de Hogues
Arche Rive Gauche, Pilier Rive gauche
Poutrelle Zone 10

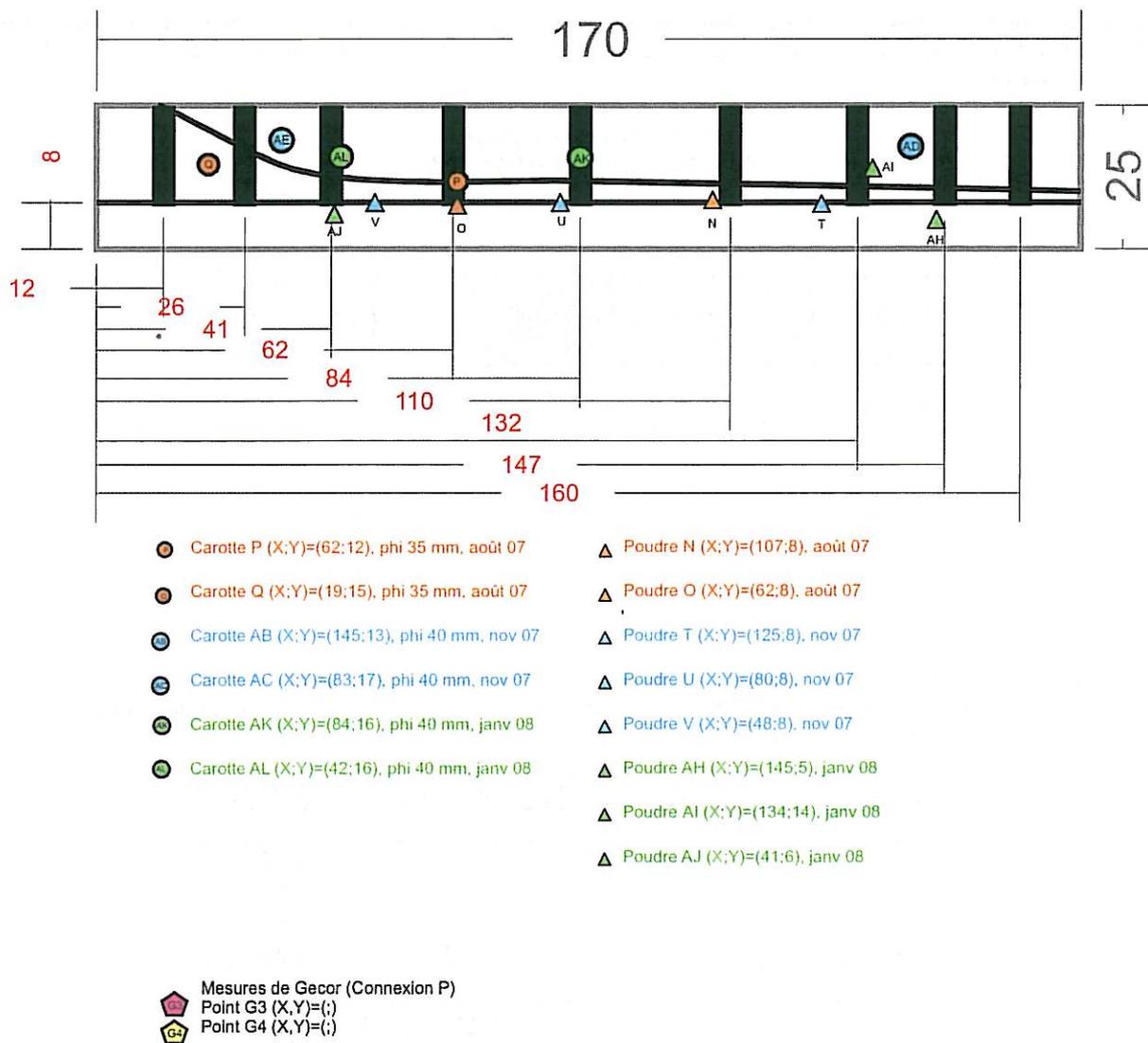


Figure 5: Représentation de la position des armatures et des prélèvements dans la zone n°10.

4.3.2. Caractérisations électrochimiques en zone 10

Les potentiels mesurés en zone 10 sont, comme en zone 9, assez homogènes. Ils varient entre -340mV et -466mV (Figure 6), ce qui signifie que sur l'ensemble de la poutre, la corrosion n'est probable qu'en partie gauche (gradient supérieur à 100mV).

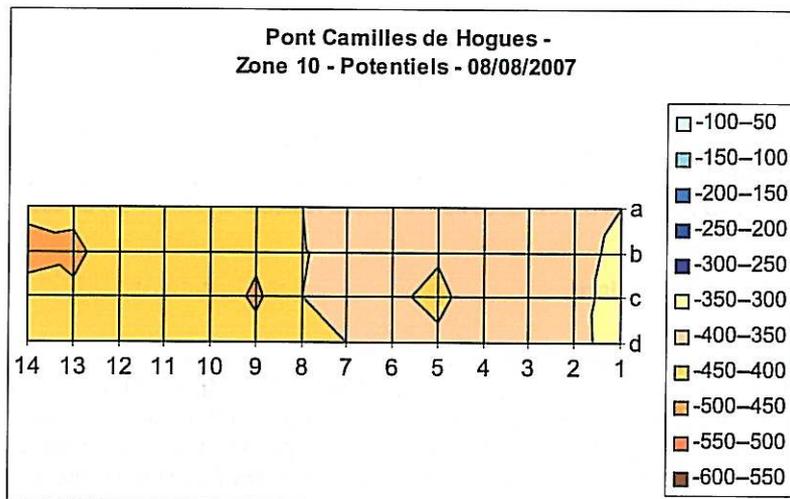


Figure 6 : Cartographie de potentiel réalisée en zone n°10, en août 2007.

Les résistivités mesurées en zone 10 sont comprises entre 12 et 118kΩ.cm et indiquent un risque de corrosion de nul à modéré (tableau 1).

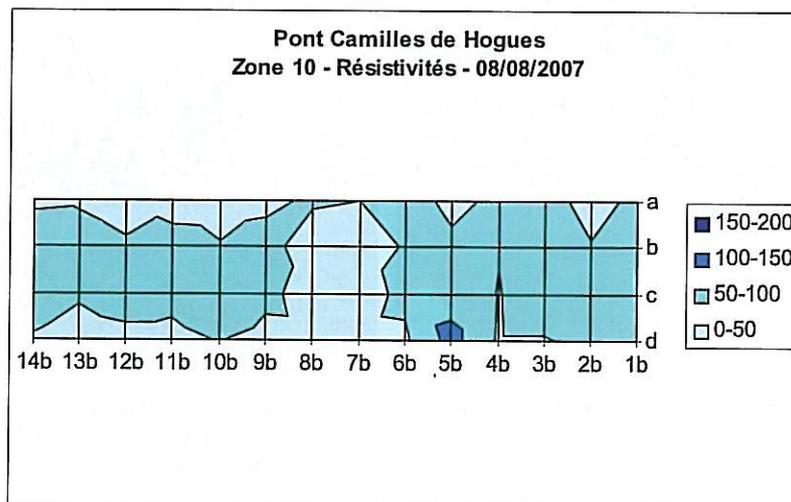


Figure 7 : Cartographie de résistivité réalisée en zone n°10, en août 2007.

Enfin des mesures de résistance de polarisation ont été réalisées en 2 points (G3 et G4, Figure 5). Les courants de corrosion résultants sont très faibles et largement inférieurs à 0.2 μA/cm² (tableau 5), ce qui indique un niveau de corrosion négligeable (tableau 2). Comme en zone 9 ces résultats sont cohérents avec les mesures de résistivité.

Pour conclure, en zone 10 comme en zone 9, si le béton est carbonaté jusqu'aux armatures, il était trop résistif (probablement trop sec) pour qu'une corrosion active soit mesurée.

Zone 10	Ecorr (mV)	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R (kohm)
G3			
mes1	-431	0,041	3,01
mes2	-433	0,047	3,04
mes3	-436	0,09	2,99
moy	-433	0,059	3,01
G4			
mes1	-373	0,008	3,87
mes2	-382	0,019	3,86
mes3	-384	0,008	3,99
moy	-380	0,012	3,91

Tableau 5 : Mesures de résistance de polarisation réalisées en zone n°10, en août 2007.

4.4. Traitement de réalcalinisation

A l'issue de ces essais préliminaires, le traitement de réalcalinisation par courant imposé a été appliqué sur l'arche de la rive gauche. Après une purge de l'enduit et du béton non adhérent (photo 39), les connections entre armatures ont été vérifiées, puis ces armatures ont été reliées à un générateur de courant électrique (photo 40). Afin d'éviter tout court-circuit, les épaufrures ont ensuite été réparées. Puis une pulpe de papier imbibée d'un électrolyte alcalin (à base de carbonate de potassium) a été appliquée à la surface du béton. Un treillis en acier (de maille 5x5cm et de 3mm de diamètre), devant servir d'anode a enfin été fixé temporairement à la surface du béton, relié au générateur de courant (photo 41) et enrobé d'une seconde couche de pulpe de papier (photo 42). Un courant de 1 A/m² a alors été maintenu pendant une période de 15j. Du fait d'un vent permanent, la pulpe de papier a du être ré-humidifiée très régulièrement.



Photo 39 : Béton et enduit non adhérents ont été purgés.



Photo 40 : Les connections entre armatures ont été vérifiées et en environ tous les 1m², les armatures ont été connectées à un générateur de courant électrique.



Photo 41 : Environ tous les 1m², les armatures, ainsi que l'anode en acier fixée temporairement à la surface du béton ont été connectées à un générateur de courant électrique.



Photo 42 : Une pulpe de papier imbibée d'un électrolyte alcalin a été projetée à la surface du béton, enrobant l'anode en acier fixée temporairement à la surface du béton.

4.5. Essais juste après traitement

Juste après le traitement de réalcalinisation, en novembre 2007, une seconde série d'essais a été réalisée au niveau des deux poutres de l'arche rive gauche sélectionnées dans la première étape de l'étude (zones 9 et 10).

4.5.1 Suivi du pH

En zone 9 comme en zone 10, on observe une remontée du pH au voisinage des armatures vers des valeurs supérieures à 10, comme l'indiquent les tests réalisés à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine (photos 43 & 44).

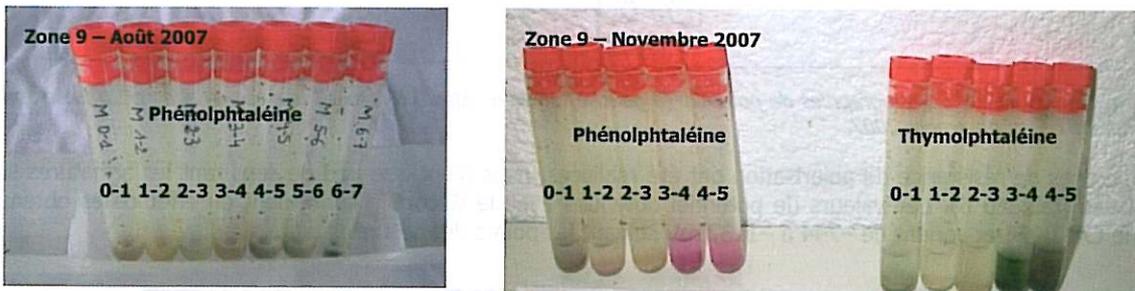


Photo 43 : Test à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine avant (à gauche) et juste après traitement (à droite). Zone 9.

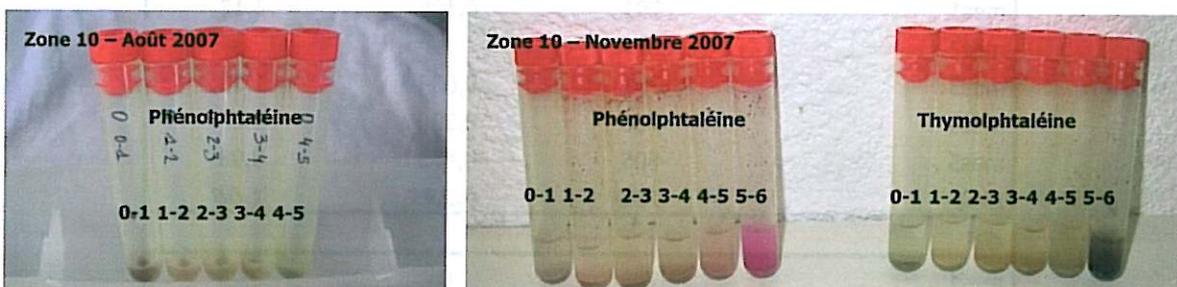
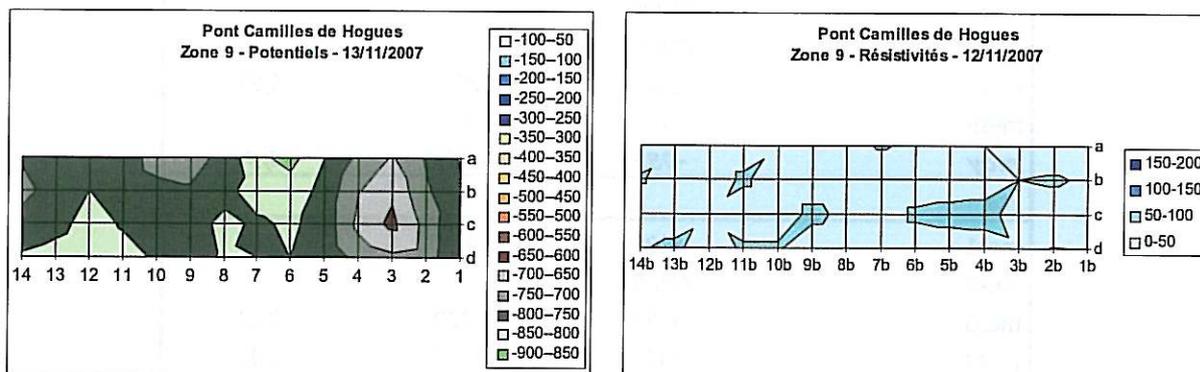


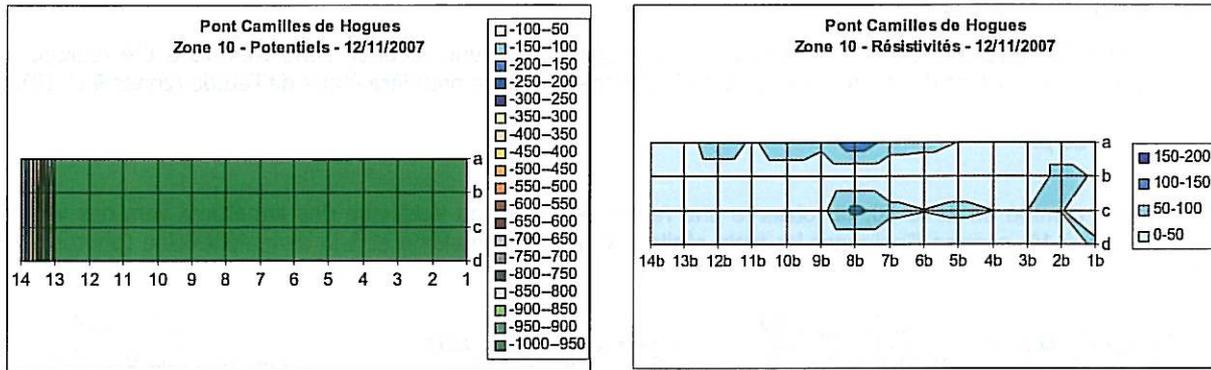
Photo 44 : Test à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine avant (à gauche) et juste après traitement (à droite). Zone 10.

4.5.2 Mesures électrochimiques

Les cartographies de potentiel et de résistivité réalisées en zones 9 et 10 juste après le traitement (Figures 8, 9, 10 et 11) indiquent clairement que le béton est moins résistif (résistivité en zone 9 : 0 à 89 k Ω .cm ; résistivité en zone 10 : 0 à 116 k Ω .cm), mais aussi que les armatures ont été polarisées par le traitement (potentiels en zone 9 : -637 à -866 mV ; potentiels en zone 10 en limite du seuil de détection du CANIN[®] : -965 à -966mV).



Figures 8 et 9 : Cartographie de potentiel (à gauche) et de résistivité (à droite) réalisée en zone n°9 juste après traitement, en novembre 2007.



Figures 10 et 11 : Cartographies de potentiel (à gauche) et de résistivité (à droite) réalisée en zone n°10 juste après traitement, en novembre 2007.

Des mesures de résistance de polarisation ont été réalisées, mais n'ont que peu de sens tant les armatures sont polarisées (tableau 6). Les valeurs de potentiel obtenues avec le Gecor6® confirment en effet celles obtenues avec le CANIN® et varient de -744 à -1137 mV suivant les points de mesure.

Zone 9	Ecorr (mV)	Icorr (µA/cm²)	R (kohm)
G5			
mes1	-791	0,106	1,12
mes2	CNFA		
mes3	-791	0,034	1,13
mes4	-798	0,328	1,07
mes5	-805	0,473	0,98
moy	-796	0,235	1,08
G6			
mes1	-750	0	2,25
mes2	-738	0,06	1,35
mes3	-741	0,074	1,55
mes4	-745	0,032	1,73
mes5	/	/	/
moy	-744	0,042	1,72
Zone 10	Ecorr (mV)	Icorr (µA/cm²)	R (kohm)
G3			
mes1	CNFA		
mes2	CNFA		
mes3	CNFA		
mes4	-983	0,026	0,91
mes5	/	/	/
moy	-983	0,026	0,91
G4			
mes1	-1137	0,0249	3,05
mes2	CNFA	/	/
mes3	-1137	0,072	3,01
mes4	-1137	0,009	3,13
mes5	/	/	/
moy	-1137	0,035	3,06

Tableau 6 : Mesures de résistance de polarisation réalisées en zones 9 et 10, juste après le traitement, en novembre 2007.

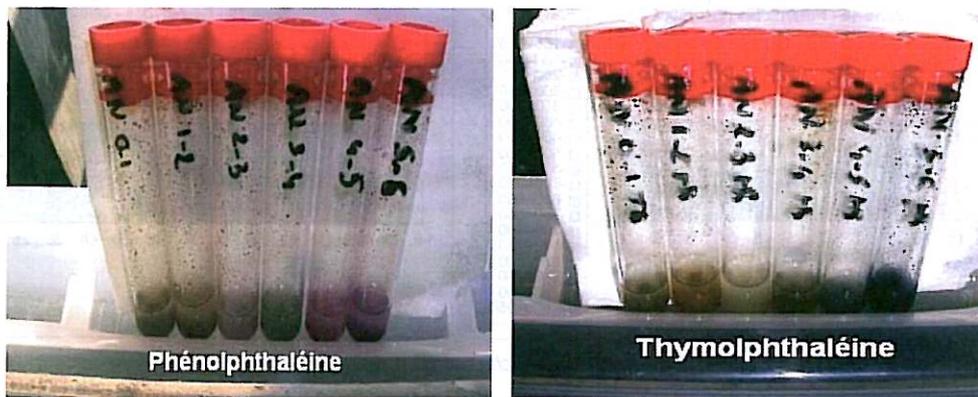
Pour 3 des points de mesure, les courants de corrosion associés sont inférieurs à $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (niveau de corrosion négligeable, tableau 2), le niveau de corrosion restant faible pour le quatrième point de mesure (G5 en zone 9).

4.6. Essais deux mois après traitement

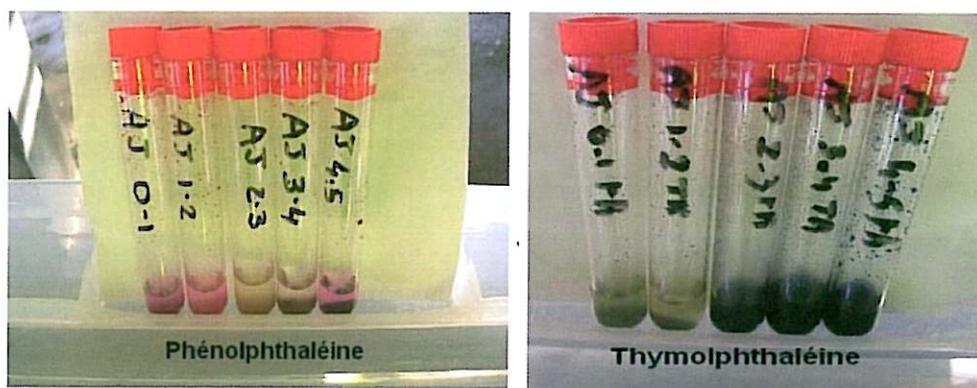
Une troisième série d'essais a été réalisée en janvier 2008, soit deux mois après le traitement de réalkalination.

4.6.1. Suivi du pH

Deux mois après traitement, les tests à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine (photos 44, 45, 46 & 47) confirment les résultats obtenus juste après traitement, le pH étant toujours au voisinage des armatures à des valeurs supérieures à 10 (virage au bleu de la thymolphthaléine), en zone 9 comme en zone 10.



Photos 44 & 45 : Tests à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine réalisés deux mois après traitement en zone 9.



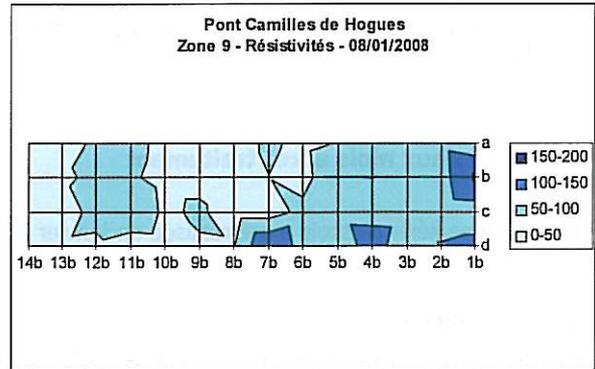
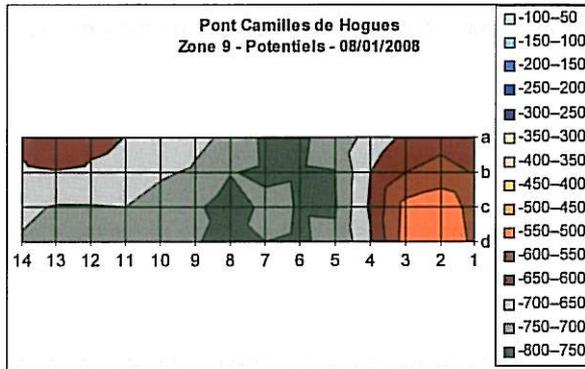
Photos 46 & 47 : Tests à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine réalisés deux mois après traitement en zone 10.

4.6.2. Mesures électrochimiques

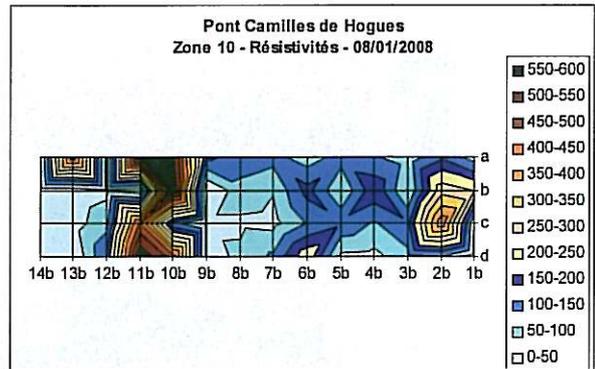
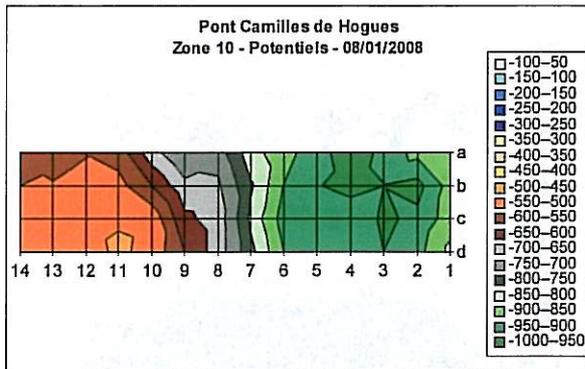
Les cartographies de résistivité réalisées deux mois après le traitement (Figures 13 et 15) indiquent que le béton est plus résistif que juste après traitement (il était probablement en train de sécher), notamment en zone 10 (25 à $158 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ en zone 9 ; 34 à $673 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ en zone 10).

Les potentiels mesurés sont toujours très négatifs (-508 à -772 mV en zone 9 ; -488 à -968 mV en zone 10. Cf Figures 12 & 14), indiquant que deux mois après traitement, les armatures sont encore polarisées.

Là encore les mesures de résistance de polarisation ont été réalisées mais n'ont que peu de sens. Elles sont comparables à celles obtenues juste après traitement (tableau 7) et indiquent un risque de corrosion de négligeable (en G3, G4, G6) à faible (en G5).



Figures 12 et 13 : Cartographie de potentiel (à gauche) et de résistivité (à droite) réalisée en zone n°9 deux mois après traitement, en janvier 2008.



Figures 14 et 15 : Cartographie de potentiel (à gauche) et de résistivité (à droite) réalisée en zone n°10 deux mois après traitement, en janvier 2008.

Zone 9	Ecorr (mV)	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R (kohm)
G5			
mes1	CNFA		
mes2	-733	0,293	1,23
mes3	-736	0,372	34,3
mes4	-732	0,228	1,17
mes5	/	/	/
moy	-734	0,298	12,23
G6			
mes1	-757	0,01	2,74
mes2	-748	0,011	2,73
mes3	-743	0,012	5,26
mes4	-744	0,01	7,15
mes5	/	/	/
moy	-748	0,011	4,47
Zone 10	Ecorr (mV)	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R (kohm)
G3			
mes1	CNFA		
mes2	-518	0,165	0,64
mes3	-523	0,077	1,37
mes4	-522	0,175	1,95
mes5	/	/	/
moy	-521	0,139	1,32
G4			
mes1	-683	0,025	2,5
mes2	-941	0,031	1,67
mes3	CNFA		
mes4	-942	0,113	1,8
mes5	/	/	/
moy	-855	0,056	1,99

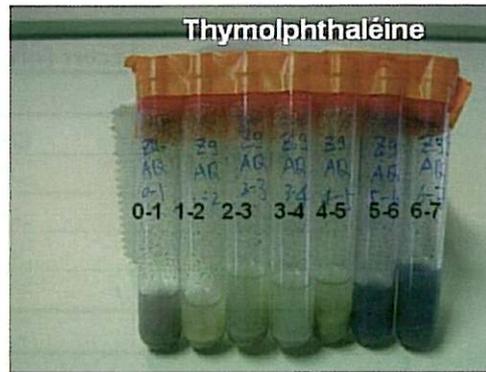
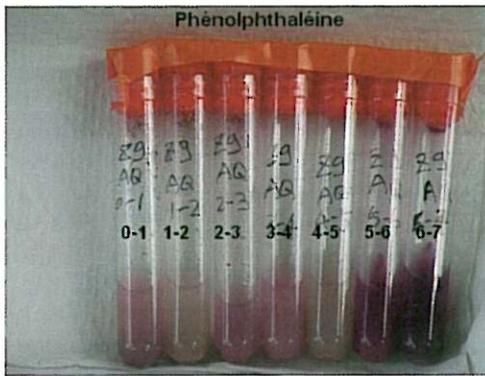
Tableau 7 : Mesures de résistance de polarisation réalisées en zones 9 et 10, juste après le traitement, en novembre 2007.

4.7. Essais un an après traitement

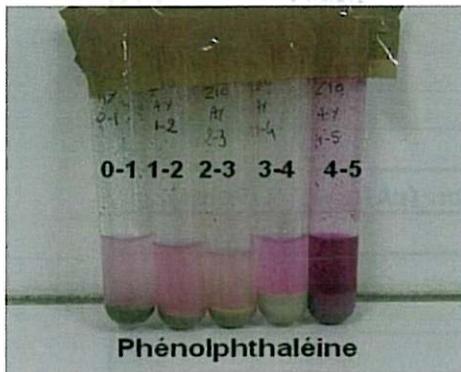
Une quatrième série d'essais a été réalisée en novembre 2008, soit un an après le traitement de réalcalinisation. Il est cependant à noter que la réception du chantier ayant eu lieu entre temps, les zones d'essais ont été recouvertes d'un enduit de finition pendant plusieurs mois. Cet enduit a été éliminé par l'entreprise Renofors quelques jours avant cette dernière série d'essais.

4.7.1. Suivi du pH

Un an après traitement, le pH du béton est toujours supérieur à 10 au voisinage des armatures, en zone 9 (photos 48 & 49), comme en zone 10 (photos 50 & 51).



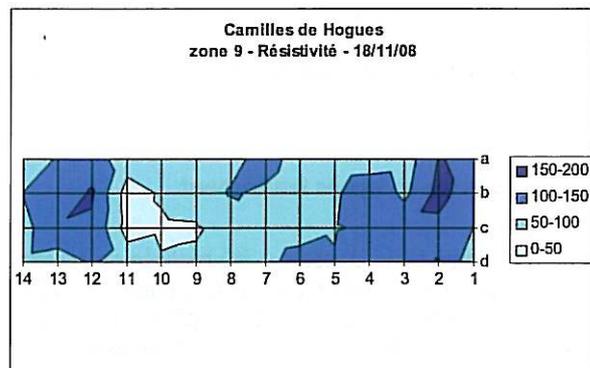
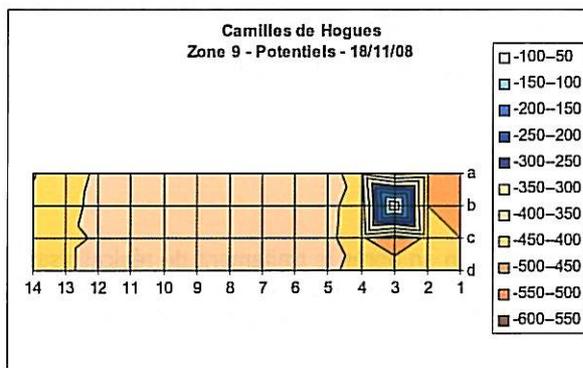
Photos 48 & 49 : Tests à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine réalisés un an après traitement en zone 9.



Photos 50 & 51 : Tests à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine réalisés un an après traitement en zone 10.

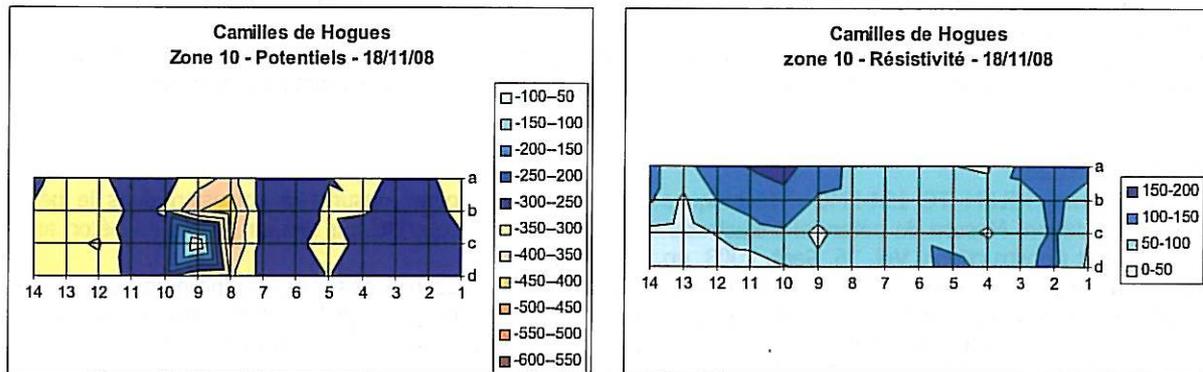
4.7.2 Mesures électrochimiques

Les cartographies de résistivité obtenues en zone 9 comme en zone 10 (Figures 17 et 19) indiquent que le béton est de nouveau très résistif (30 à 165 k Ω .cm en zone 9 ; 4 à 166 k Ω .cm en zone 10). La présence de l'enduit à la surface des zones d'essais aura certainement contribué à cette augmentation de la résistivité (assèchement probable).



Figures 16 et 17 : Cartographie de potentiel (à gauche) et de résistivité (à droite) réalisée en zone n°10 un an après traitement, en novembre 2008.

Les cartographies de potentiel sont cohérentes avec les résistivités mesurées et montrent une tendance à l'augmentation vers des valeurs plus positives (-363 à -467 mV en zone 9 ; -274 à -432 mV en zone 10. Figures 16 et 18).



Figures 18 et 19 : Cartographie de potentiel (à gauche) et de résistivité (à droite) réalisée en zone n°10 un an après traitement, en novembre 2008.

Le capteur permettant de réaliser les mesures de résistance de polarisation étant en panne, ces mesures n'ont pas pu être réalisées un an après le traitement. Il est cependant probable, vues les résistivités assez élevées mesurées que les courants de corrosions soient restés dans le domaine de la corrosion négligeable.

5. CONCLUSION

Dans le cadre du chantier de restauration du Pont Camille de Hogues enjambant la Vienne à Châtelleraut, un traitement de réalcalinisation a été programmé. En coopération avec le LCPC, le LRMH et Renofors, des essais ont été menés sur deux zones d'essais pendant un an, afin d'étudier l'efficacité, mais aussi l'impact du traitement.

Le diagnostic réalisé en préalable au chantier a permis de montrer que le pont Camille de Hogues, enjambant la Vienne à Châtelleraut, a été réalisé en béton armé, recouvert d'un enduit décoratif destiné à imiter la pierre et utilisant le système d'étriers Hennebique. Le béton s'est révélé relativement poreux avec localement la présence de nids de cailloux. Aussi une carbonatation atteignant les armatures les moins enrobées a été constatée, notamment au niveau des colonnettes reliant l'intrados et le tablier du pont. Par ailleurs, du fait de l'absence d'étanchéité du tablier, des circulations d'eau importantes se sont produites, générant efflorescences, stalactites, fissures et épaufrures, justifiant les travaux de restauration.

Cependant la recherche de zone d'essais réalisée dans le cadre de cette étude a montré que le béton était particulièrement hétérogène. En effet, sur 10 zones examinées au niveau de l'arche de la rive gauche, seules 3 ont montré une carbonatation importante. Dans les 7 autres zones, il est probable que l'enduit ait protégé le béton de la carbonatation.

Après une caractérisation préliminaire, chimique et électrochimique, réalisée en août 2007, 3 séries d'essais ont été réalisées respectivement en novembre 2007, janvier 2008 et août 2008, soit juste après le traitement de réalcalinisation, deux mois après et un an après.

Les tests réalisés à la phénolphthaléine et à la thymolphthaléine, ont mis en évidence, à l'issue du traitement de réalcalinisation, une remontée du pH au voisinage des armatures dans les 2 zones d'essais. Le suivi de pH réalisé sur une période de un an après traitement montre que le pH se maintient à des valeurs supérieures à 10 (tableau 8 et 9). Par contre, aucune évolution du pH n'a été observée en surface du béton traité.

Les mesures de potentiel, de résistivité et de résistance de polarisation n'indiquant pas un niveau de corrosion élevé avant traitement, n'ont pas permis de mettre en évidence clairement une efficacité du traitement vis à vis des phénomènes de corrosion. Il est important de préciser que la géométrie inhabituelle des armatures a rendu ces mesures plus complexes à réaliser et à interpréter.

La seule réelle conclusion qui puisse donc être tirée de ces essais électrochimiques de terrain, est que les armatures restent polarisées plus de deux mois après le traitement, ce qui est un délai plus important qu'attendu.

En termes de perspectives, des observations en microscopie électronique à balayage d'échantillons de béton prélevés par carottage pourraient compléter cette étude dans les prochains mois et permettront d'évaluer l'impact du traitement de réalcalinisation sur le béton des poutres dans les deux zones d'essais.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier M. Jean DAUTHUILLE, technicien de la section Durabilité des Ouvrages d'art et Mlle Myriam BOUICHOU, ingénieur de recherche du Cercle des partenaires du Patrimoine pour leur active participation aux essais de terrain.

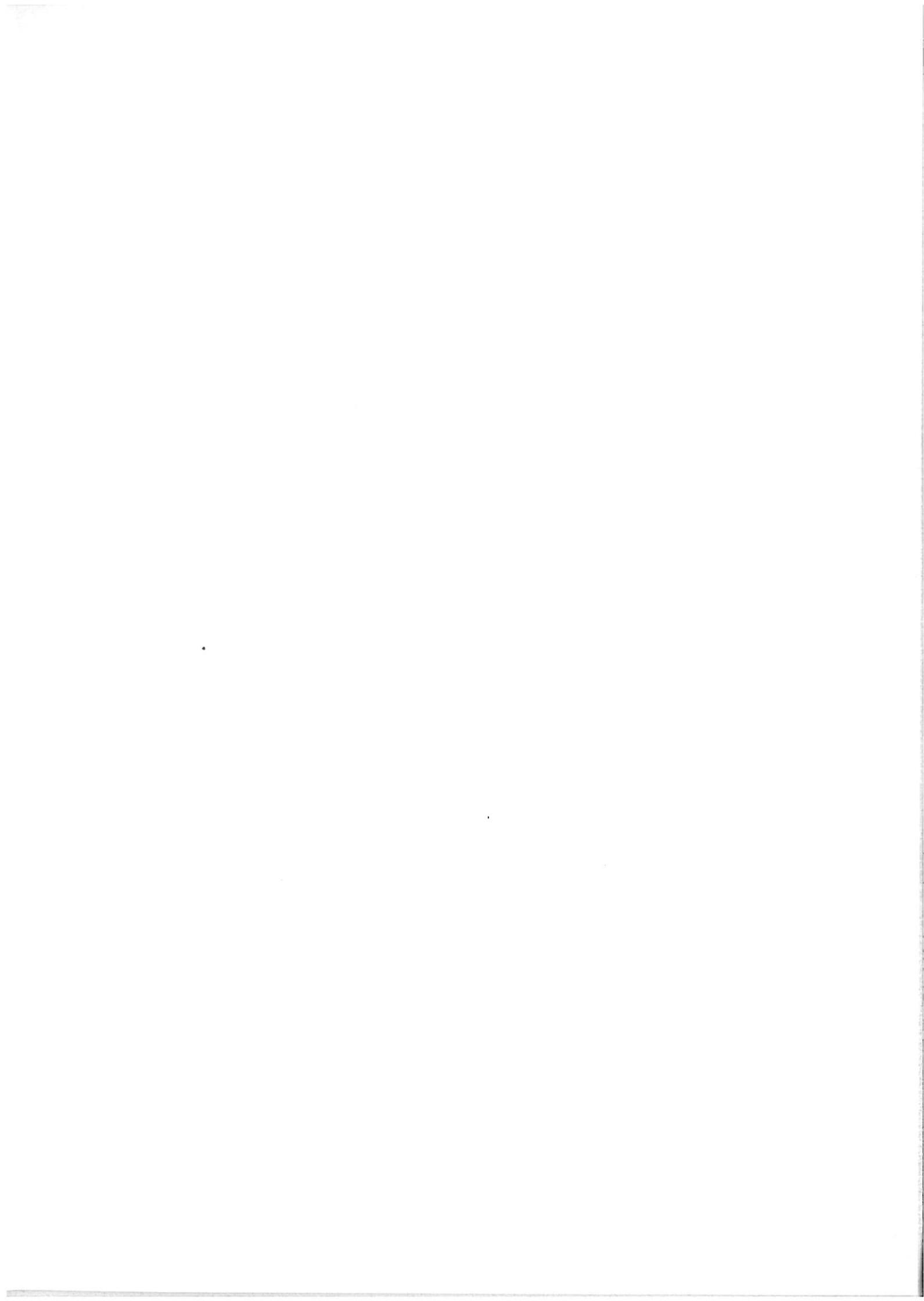
Ils tiennent également à remercier M. Thierry LAMY et tous les membres de son équipe de la société RENOFORS, pour leur accueil, leur disponibilité et leur assistance notamment lors des prélèvements par carottage.

7. REFERENCES

[1] B. Elsener, RILEM TC 154-EMC : "Techniques électrochimiques pour mesurer la corrosion dans le béton" Recommandation, Mesure de potentiel d'électrode – cartographie de potentiel sur des structures en béton armé, Matériaux et Constructions, Vol. 36, Sept. 2003, pp. 461-471.

[2] C. Andrade and C. Alonso, RILEM TC 154-EMC : "Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion" recommendations, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Materials and Structures, 2004, Vol. 37, pp. 623-643.

[3] R. Polder, RILEM TC 154-EMC : "Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion" recommendations, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, Materials and Structures, 2000, Vol. 33, pp. 603-611.



Conclusions et perspectives

Conclusions générales

Les principaux objectifs de ce travail de thèse étaient d'étudier l'efficacité, les effets secondaires et la durabilité du traitement électrochimique de réalcalinisation, qu'il soit utilisé en réparation de type maintenance pour des bétons carbonatés dont les armatures se corrodent, ou bien en réparation de type réhabilitation pour des bétons carbonatés avec des armatures présentant des vitesses de corrosion plus élevées.

Les deux procédés de réalcalinisation actuellement commercialisés, par courant imposé ou par anode sacrificielle, ont donc été étudiés à l'aide de caractérisations analytiques et de mesures électrochimiques.

Il en ressort que les deux procédés ont bien permis, d'une part, de réalcaliniser le béton d'enrobage et, d'autre part, de diminuer l'activité de corrosion des armatures. Cependant, des hétérogénéités ont été constatées dans l'efficacité de ces procédés, avec sur une même dalle des zones correctement réalcalinisées et d'autres zones avec un pH ayant insuffisamment augmenté.

Concernant les effets secondaires, aucune transformation de la matrice cimentaire liée à la réalcalinisation n'a été observée (le béton avait été formulé afin de limiter les possibilités de réactions alcali-granulat).

En ce qui concerne la durabilité de la réalcalinisation en maintenance, la basicité du béton apportée par le traitement tend à diminuer avec le temps d'après les tests qualitatifs de pH, mais reste stable d'après les mesures quantitatives de pH. Les caractérisations électrochimiques quant à elles, indiquent que l'activité de corrosion des armatures, après avoir ralenti durant la première année, retourne à son état initial 30 mois après traitement (dont 12 mois de vieillissement naturel). La repassivation des armatures n'a jamais été obtenue.

L'étude de la durabilité de la réalcalinisation en réhabilitation est toujours en cours, mais les niveaux de corrosion atteints après les deux types de réparations sont comparables.

Sur la base de ces résultats, un guide méthodologique pour le diagnostic de la corrosion des structures en béton armé affectées par une carbonatation et le suivi d'un traitement électrochimique de réalcalinisation peut être proposé :

◆ Diagnostic préliminaire

Il est impératif et doit comporter les 8 étapes suivantes :

1. observation visuelle de l'état de l'ouvrage,
2. inspection de l'environnement autour de l'ouvrage (climat, humidité et pollutions...),
3. détection des armatures (localisation, diamètre et épaisseur d'enrobage),
4. détermination de la profondeur de carbonatation à l'aide de tests qualitatifs de pH,
5. réalisation de cartographies de potentiels,
6. mesures de résistivité du béton,
7. mesures de vitesse de corrosion au niveau des points singuliers identifiés par les cartographies de potentiel,
8. prélèvement de carottes destinées à des caractérisations analytiques en laboratoire et notamment à l'identification de la nature du ciment et des granulats, mais aussi à des dosages préliminaires de sulfates et d'alcalins ou encore à la recherche de néoformations pathogènes.

◆ Choix du traitement

Une corrosion induite par la carbonatation du béton ayant été diagnostiquée, le traitement électrochimique de réalcalinisation pourrait être envisagé. Au préalable, il faut s'assurer de l'absence de laitiers dans le ciment, de granulats réactifs vis-à-vis de la RAG et de pollution en sulfates. De plus, la durabilité de la réalcalinisation d'après les résultats de ces travaux semble limitée, ce dernier point nécessitant d'être confirmé. Si le traitement de réalcalinisation est décidé, les deux procédés, par courant imposé ou par anode sacrificielle peuvent indifféremment être choisis puisque dans le cadre de cette étude, leur efficacité a été similaire. Au delà des conditions de mise en œuvre spécifiques à chaque procédé, seule la durée du traitement a varié, la réalcalinisation par courant imposé ayant nécessité environ une semaine alors que la réalcalinisation par anode sacrificielle a nécessité entre 1 et 4 mois (avec changement d'anode sacrificielle) pour atteindre le seuil d'efficacité de la spécification technique (200 Ah/m²) [40].

◆ Suivi du traitement

Il doit inclure :

- un suivi de la charge totale, qui doit atteindre 200 Ah/m²,

- une vérification tout de suite après traitement, que les armatures ont bien été polarisées (à l'aide de cartographies de potentiel),
- un contrôle de l'activité de corrosion des armatures afin de s'assurer qu'elle a diminué (augmentation du potentiel libre et diminution de la densité de corrosion) doit être réalisé après la dépolarisation des armatures (qui a nécessité plus de deux mois dans le cas du Pont Camille de Hogues).
- une évaluation du pH du béton autour des armatures (à l'aide d'indicateurs colorés), afin de vérifier qu'il a bien augmenté. Il est également possible de mesurer le pH par des tests quantitatifs et de réaliser des profils de concentration en ions alcalins sur des carottes prélevées au droit des armatures.
- et la vérification qu'aucun effet secondaire indésirable n'a été généré. Ce qui pourra être réalisé par l'observation de prélèvements de béton au MEB, afin de rechercher d'éventuelles néoformations à caractère pathogène, au sein de la matrice cimentaire.

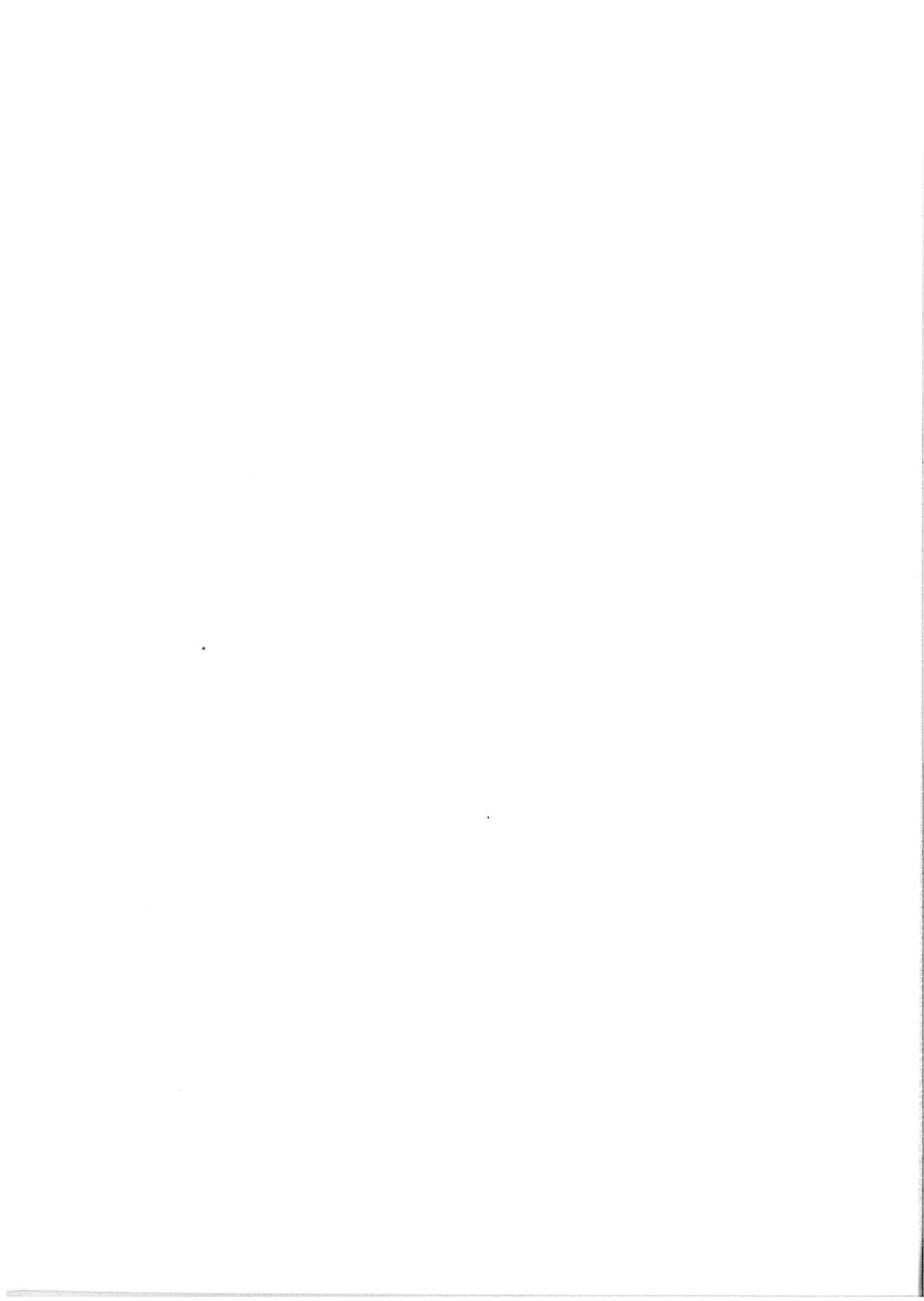
Perspectives

Afin de compléter ce travail, les caractérisations électrochimiques et analytiques des dalles "A6" seront poursuivies dans le but d'étudier la durabilité du traitement de réalcalinisation de type réhabilitation.

Il serait également intéressant de réaliser des essais de porosité au mercure, mais aussi des essais mécaniques (traction, compression, module d'élasticité, adhérence,...), dans le but d'étudier l'impact du traitement sur les performances du béton d'enrobage, mais aussi sur l'interface acier/béton.

Afin de confirmer les observations des produits de corrosion, mais aussi de tenter de mieux les corréler avec les caractérisations électrochimiques, il serait également utile de procéder à une étude plus statistique, par exemple par des observations au MEB sur sections polies transversales réalisées tous les centimètres le long d'une armature.

Pour finir, afin de tenter d'améliorer l'efficacité du traitement, il serait utile de faire varier les paramètres de la réalcalinisation (charge totale de courant, densité du courant et durée du traitement).



Références

- [1] M. Thiery, G. Villain, P. Dangla and G. Platret, Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials : Effects of the chemical kinetics, *Cement and Concrete Research*, 2007, 37, pp. 1047-1058.
- [2] M. Vénuat et J. Alexandre, De la carbonatation du béton – Partie II, *Revue des matériaux de construction*, 1968, 639, pp. 469-481.
- [3] M. Thiery, Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires : prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, Thèse de l'Ecole National des Ponts et Chaussées, 2005.
- [4] G. VERBECK, Carbonation of hydrated Portland cement, *ASTM Special Publication*, 1958, n°205, pp. 17-36.
- [5] P. Rougeau, Les résultats d'essais croisés AFREM : Essai de carbonatation accélérée, *Rapport CERIB*, 1998.
- [6] G. Villain, D. Cochet, G. Olivier et M. Thiery, Vers un mode opératoire performant et discriminant de carbonatation accélérée des bétons pour ouvrages d'art, *Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 2007, n° 267, pp. 63-78.
- [7] G. Villain, M. Thiery, and G. Platret, Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry, *Cement and Concrete Research*, 2007, 37, pp. 1182-1192.
- [8] G. Villain and M. Thiery, Gammadensimetry: A method to determine drying and carbonation profiles in concrete, *NDT&E International*, 2006, 39, pp. 328-337.
- [9] Pourbaix M. << Atlas d'équilibres électrochimiques à 25°C >> Edit. Gauthiers-Villars, Paris, 1963.
- [10] G.D.J. Fajardo San Miguel, Technique d'extraction électrochimique des chlorures : contribution à la connaissance de son domaine d'efficacité, Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2004.
- [11] R.S. Schrebler, J.R. Vilche et A.J. Arvia, The potentiodynamic behaviour of iron in alkaline solutions, *Electrochemical Acta*, 1979, 24, p. 395.

- [12] B. Huet, Comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté : influence de la chimie de la solution interstitielle et d'une barrière de transport, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [13] C. Andrade, M. Keddam, X.R. Nova, Electrochemical behaviour of steel bars in concrete: influence of environmental factors and cement chemistry, *Electrochimica Acta*, 2001, 46, pp 3905-3912.
- [14] C. Andrade, P. Merino, X.R. Nova, Passivation of reinforcing steel in concrete, *Materials Science Forum*, 1995, 192-194, pp 891-898.
- [15] Y. F. Houst, Carbonatation du béton et corrosion des armatures, *Chronique des matériaux de construction*, Chantiers/Suisse, 1989, Vol 15, 6, pp. 569-574.
- [16] John P. Broomfield, *Corrosion of steel in concrete, understanding, investigation and repair*, E & FN SPON, 1997, p. 8.
- [17] K.R. Gowers, S.G. Millard, J.S. Gill and R.P. Gill, Programmable linear polarisation meter for determination of corrosion rate of reinforcement in concrete structures, *British Corrosion Journal*, 1994, Vol. 29, N° 1, pp. 25-32.
- [18] A. Raharinaivo, G. Arliguie, T. Chaussadent, G. Grimaldi, V. Pollet, G. Taché, *La corrosion et la protection des aciers dans le béton*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1998.
- [19] J.C. Orellan Herrera, Efficacité et effets secondaires des techniques électrochimiques de maintenance des structures en béton armé, Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2002.
- [20] N.G. Thompson, M. Islam, D.A. Lamkard and Y.P. Virman, Environmental factors in the deterioration of reinforced concrete, *Materials Performances*, 1995, Vol. 34, No 9, pp. 43-47.
- [21] A. Sulaimani, K. Kaleemullah, I.A. Basunbul and M. Rasheeduzzafar, Influence of corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members, *ACI Structure Journal*, 1990, 87, pp. 220-231.
- [22] G.S. Duffo, W. Morris, I. Raspini and C. Saragovi, A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years, *Corrosion Science*, 2004, 46, pp. 2143-2157.
- [23] V. L'Hostis, L. Vincent, V. Praca, D. Neff, L. Bellot-Gurlet and P. Dillmann, Characterization of long-term corrosion of rebars embedded in concretes from French Historical Building aged from 50 to 80 years, *Proceeding of EUROCORR 2007*, p. 88.

- [24] B. Huet, V. L'Hostis, F. Miserque and H. Idrissi, Electrochemical behaviour of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution, *Electrochimica Acta*, 2005, 51, pp. 172-180.
- [25] Q.T. Nguyen, Etudes expérimental et théorique de l'effet de la corrosion sur la fissuration du béton et le comportement global des structures en béton armé, Thèse de l'Université de Paris VI, 2008.
- [26] C. Andrade, C. Alonso and F.J. Molina, Cover cracking as function of rebar corrosion : Part 1 - experimental test, *Materials and Structures*, 1993, 26, pp. 453-464.
- [27] S. Caré and A. Raharinaivo, Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel, *Cement and Concrete Research*, 2007, 37, pp. 1598-1612.
- [28] Y.S. Yuan, Y.S. Ji and S.P. Shah, Comparison of two accelerated corrosion techniques for concrete structures, *ACI Structural Journal*, 2007, pp. 344-347.
- [29] Documents scientifiques et techniques du groupe de travail AFGC / CEFRACOR (Centre Français de l'Anti-corrosion), Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, édité par l'AFGC, Novembre 2003.
- [30] Corrosion and protection of metals in contact with concrete: corrosion protection, corrosion inhibitors, Material science European concerted action COST 509, 1997, ISSN 1018-5593, pp. 13-16.
- [31] Corrosion of steels in reinforced concrete structures, Prevention – Monitoring – Maintenance, COST 521, Ed Romain Weydert, 2002.
- [32] J.B. Miller, Electrochemical desalination (chloride) extraction and realkalisation – Principles, durability, experience and post treatment, Norecon State, Millab Consult a.s., Rev. 3, February 2004.
- [33] J.S. Mattila and M.J. Pentti, Durability of electrochemically realkalised concrete structures, Corrosion of reinforcement in concrete structures, Ed. C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, SCI, London, 1996, pp. 512-521.
- [34] J.E. Slater and P.J. Moreland, Electrochemical removal of Chlorides from concrete bridge decks, *Materials Performance*, 1976, 15, 11, pp.21-26.

- [35] Corrosion and protection of metals in contact with concrete: maintenance, electrochemical realkalisation, Material science European concerted action COST 509, 1997, ISSN 1018-5593, pp.120-124.
- [36] D. Pocock, Chloride extraction and realkalisation – six years on, Construction repair, 1995, vol. 9, n° 2, pp. 42-47.
- [37] E. Cailleux, E. Marie-Victoire, A. Texier, G. Marchese, Experimental investigation of realkalisation treatments used for restoration of historical monuments made of reinforced concrete, Concrete solutions : conference proceedings of the 1st International conference on concrete repair, St-Malo, France, 15-17 July 2003, pp. 527-534..
- [38] E. Cailleux and E. Marie-Victoire, Influence of the concrete composition on the efficiency and the durability of realkalisation treatment, Concrete solutions : proceedings of the second international conference on concrete repair, St Malo, France, 2006, pp. 271-279.
- [39] G. Sergi, R. J. Walker and C. L. Page, Mechanisms and criteria for the realkalisation of concrete, Proceedings of the fourth international symposium on corrosion of reinforcement in concrete constructions, Ed. C.L. Page, P.B. Bamforth, J.W. Figg, Society of Chemical Industry, 1996, pp. 491-500.
- [40] Spécification Technique CEN/TS 14038-1, Ré-alkalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures applicables au béton armé – Partie 1: Ré-alkalinisation, Octobre 2004.
- [41] C. Andrade, M. Castellote, J. Sarria and C. Alonso, Evolution of pore solution chemical, electro-osmosis and rebar corrosion rate induced by realkalisation, Materials and Structures, July 1999; vol. 32, pp. 427-436.
- [42] M. Castellote, I. Llorente, C. Andrade, X. Turrillas, C. Alonso and J. Campo, Neutron diffraction as a tool to monitor the establishment of the electro-osmotic flux during realkalisation of carbonated concrete, Physica B 385-386, 2006, pp. 526-528.
- [43] J. Mietz, Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures, Materials and corrosion 1995, 46, pp. 527-533.
- [44] C. Andrade, I. Martinez, M. Castellote and P. Garcia de Viedma, Efficiency control of electrochemical repair techniques, Proceeding of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 2008, II, pp. 31-37.

- [45] V. Pollet, Electrochemical maintenance method – Specific information on realkalisation, COST 521: corrosion of steel in reinforced concrete structures – Prevention – Monitoring – Maintenance, Edited by R. Waydert, 2002, pp. 523-528.
- [46] A.J. Van Den Hondel and R.B. Polder, Laboratory investigation of electrochemical realkalisation of reinforced concrete, Eurocorr'98, 1998.
- [47] J.A. Gonzalez, A. Cobo, M. N. Gonzalez et E. Otero, On the effectiveness of realkalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures, *Materials and Corrosion*, 2000, 51 ; pp. 97-103.
- [48] J.S. Mattila, M.J. Pentti and T.A. Raiski, Re-alkalisation of carbonated concrete by cement-based coatings, *Corrosion of reinforcement in concrete structures*, Ed. C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, SCI, London, 1996, pp. 481-490.
- [49] A.J. Van Den Hondel and R.B. Polder, Electrochemical realkalisation and chloride removal of concrete, *Construction Repair*, 1992, pp. 19-24.
- [50] W. Yeih, J.J. Chang, A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete, *Construction and Building Materials*, 2005, 19, pp. 516-524.
- [51] P. Longuet, L. Burglen, A. Zelwer, La phase liquide du ciment hydrate, *Revue Matériaux Construction Travaux*, 1973, 676, pp. 35-41.
- [52] A. Hidalgo, J.L. Garcia, M.C. Alonso, L. Fernandez-Luco and C. Andrade, Testing methodology for pH determination of cementitious materials, application to low pH binders for use in HLNWR, R&D on low-pH cement for a geological depository, *Proceedings of the 2nd low pH Workshop*, Madrid, 2005.
- [53] A.A. Sagüés, E.I. Moreno, and C. Andrade, Evolution of pH in-situ leaching in small concrete cavities, *Cement and Concrete Research*, 1997, Vol. 27. No.11, pp. 1747-1759.
- [54] L. Li, J. Nam, W. H. Hartt, Ex situ leaching measurement of concrete alkalinity, *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, pp. 277-283.
- [55] V. Räsänen, V. Penttala, The pH measurement of concrete and smoothing mortar using a concrete powder suspension, *Cement and Concrete Research*, 2004, 34, pp. 813-820.
- [56] L. Odden, The repassivating effect of electrochemical realkalisation and chloride extraction, *proceedings of international conference corrosion and corrosion protection of steel in concrete*, Edited by R. Narayan Swamy, University of Sheffield, 1994.

- [57] ASTM C876-91, Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete.
- [58] B. Elsener, RILEM TC 154-EMC : "Techniques électrochimiques pour mesurer la corrosion dans le béton" Recommandation, Mesure de potentiel d'électrode – cartographie de potentiel sur des structures en béton armé, Matériaux et Constructions, Vol. 36, Sept. 2003, pp. 461-471.
- [59] F. Wenger, Etude de la corrosion de l'acier doux dans le béton par des méthodes électrochimiques – Application au contrôle des ouvrages de génie civil, Thèse de l'Université de Paris Sud, Centre d'Orsay, 1986.
- [60] M. Stern and A. Geary, A theoretical analysis of the shape of polarization curves, Journal of the Electrochemical Society, 1957, 104, 56.
- [61] F. Wenger, Mesure de la vitesse de corrosion par la mesure de la résistance de polarisation – limites de la méthode, cours du Laboratoire C. F. H., Ecole Centrale Paris.
- [62] V. L'Hostis (sous la dir. de), Benchmark des poutres de la Rance – Diagnostic et modélisation mécanique des poutres en béton armé et précontraint atteintes par la corrosion des aciers, Numéro Spécial de la Revue Européenne de Génie Civil, 2007, Vol. 1-2.
- [63] C. Andrade and C. Alonso, RILEM TC 154-EMC : " Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion " recommendations, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Materials and Structures, 2004, Vol. 37, pp. 623-643.
- [64] S. Feliu, J.A. Gonzalez, M.L Escudero, S. Feliu Jr. and M.C. Andrade, Possibilities of the Guard Ring of electrical signal confinement in the polarization measurements of reinforcements, Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, December 1990, Vol. 46, N° 12, pp. 1015-1020.
- [65] S.C. Kranc and A.A. Sagüés, Polarization current distribution and electrochemical impedance response of reinforced concrete when using guard ring electrodes, Electrochimica Acta, 1993, Vol. 38, N° 14, pp. 2055-2061.
- [66] J. E. Randles, Discussion Faraday Soc., 1947, 1, p. 11.
- [67] F. Wenger and J. Galland, Etude de la corrosion de matériaux de réparation pour béton armé par la méthode des impédances électrochimiques, Matériaux & Techniques, 1993, N° 10-11.

- [68] M. Keddam, H. Takenouti, X.R. Novoa, C. Andrade and C. Alonzo, Impedance measurements on cement paste, *Cement and Concrete Research*, 1997, 27, 8, pp.1191-1201.
- [69] C. Andrade, L. Soler, C. Alonso, X.R. Novoa and M. Keddam, The importance of geometrical considerations in the measurement of steel corrosion in concrete by means of AC impedance, *Corrosion Science*, 1995, Vol. 37, N° 12, pp. 2013-2023.
- [70] C. Andrade, M. Keddam, X.R. Novoa, M.C. Pérez, C.M. Rangel and H. Takenouti, Electrochemical behaviour of steel rebars in concrete: influence of environmental factors and cement chemistry, *Electrochimica Acta*, 2001, 46, 3905-3912.
- [71] R. Polder, RILEM TC 154-EMC : “ Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion ” recommendations, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Materials and Structures*, 2000, Vol. 33, pp. 603-611.
- [72] E. Cailleux, E. Marie-Victoire, Les traitements de réacalcalinisation aux bétons armés carbonates – revue bibliographique, rapport N° 1207, Laboratoire de recherche des monuments historiques, avril 2007.
- [73] B. Elsener, L. Zimmermann, D. Bürchler et H. Böhni, Repair of reinforced concrete structures by electrochemical techniques – field experience, *Corrosion of steel in concrete*, ed. J. Mietz, B. Elsener and R. Polder, EFC Publication No. 25, The Institute of Materials, London, 1998, pp. 125-140.
- [74] M. Castellote, I. Llorente, C. Andrade, X. Turrillas, C. Alonso and J. Campo, In-situ monitoring the realkalisation process by neutron diffraction : Electroosmotic flux and portlandite formation, *Cement and Concrete Research*, 2006, 36, pp. 791-800.
- [75] B. Elsener, R. Gabriel, L. Zimmermann, D. Bürchler et H. Böhni, Electrochemical realkalization – field experience, *Proceedings Eurocorr 1996*.
- [76] P.F.G. Banfill, Re-alkalisation of carbonated concrete – effet on concrete properties, *Construction and Building Materials*, 1997, Vol. 11, No. 4, pp. 255-258.
- [77] T.K.H. Al-Kadhimi, P.F.G. Banfill, S.G. Millard and J.H. Bungey, An experimental investigation into the effects of electrochemical re-alkalisation on concrete, *Corrosion of reinforcement in concrete construction*, eds C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, Hartnolls, Cornwall, 1996a, 501-511.

- [78] T.K.H. Al-Kadhimi, P.F.G. Banfill, The effect of electrochemical re-alkalisation on alkali-silica expansion in concrete, Proceedings of the 10th international conference on alkali aggregate reaction in concrete, edited by A. Shayan, Melbourne, August 1996, pp. 637-644.
- [79] M. Ali, Realkalisation treatment status in Australia, Australasian Corrosion Association Inc Conference on Corrosion & Prevention-O₂, Adelaide, Australia, 2002.
- [80] L. Lanarde, Etude de l'influence de la polarisation cathodique sur la nature des produits de corrosion d'un acier bas carbone dans le sol, Thèse de l'Université de Paris VI, 2005.
- [81] R. L. McCreery, Raman Spectroscopy for Chemical Analysis, Wiley-Interscience, 2000.
- [82] J. Barbillat, D. Bougeard, G. Buntinx, M. Delhaye, P. Dhamelincourt, F. Fillaux, Spectrométrie Raman, Techniques de l'ingénieur - Traité Analyse et Caractérisation, 1999.
- [83] RILEM recommendations of TC 154-EMC : "Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete", Progress report 1994-97, Materials and Structures, 1998, 31, pp.153-157.
- [84] Q.T. Nguyen, S. Caré, A. Millard et Y. Berthaud, Analyse de la fissuration du béton armé en corrosion accélérée, Compte Rendu Mécanique, 2007, 335, pp. 99-104.
- [85] M.C. Bernard et S. Joiret, Understanding corrosion of ancient metals for the conservation of cultural heritage, Electrochimica Acta, 2009, Volume 54, Issue 22, pp. 5199-5205.
- [86] N. Boucherit, A. Hugot-Le Goff and S. Joiret, Corrosion Science, 1991, 32, p. 497.
- [87] D. L. A. de Faria, S. Venâncio Silva and M. T. de Oliveria, Journal Raman Spectroscopy, 1997, 28, p. 873.
- [88] H. D. Lutz, H. Moeller and M. Schmidt, J. Mol. Struct., 1994, 328, p. 121.
- [89] A. A. Olowe, Y. Marie, P. Refait and J. M. R. Genin, Hyperfine Interact., 1994, 93, p. 1783.
- [90] P. Refait, D. Rezel, A. A. Olowe and J. M. R. Genin, Hyperfine Interact., 1992, 69, p. 839.
- [91] A. Sumoondur, S. Shaw, I. Ahmed and L. G. Benning, Mineral. Mag., 2008, 72, p. 201.
- [92] R. M. Cornell, U. Schwertmann, The Iron oxides, 3e ed. Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [93] G. Nauer, P. Strecha, N. Brinda-Konopik, G. Liptay, Journal of Thermal Analysis, 1985, p. 813.
- [94] L. Mazzetti, P. J. Thistlethwaite, Journal Raman Spectroscopy, 2002, 33, p.104.

Annexes

Annexe 1 : Méthode de confection des dalles au LRPC de Lille

La gâchée du béton à base de Palvadeau et de ciment CEM I est de 30 litres pour un volume total utile de 23 litres pour 5 dalles. On utilise un malaxeur Couvrot de capacité maximale 80 litres et 50 litres de capacité utile. La méthode de gâchage est celle de la norme pour adjuvants NF EN 480-1 de Janvier 2007. La préparation est effectuée à température ambiante aux alentours de 20 °C. Les moules sont huilés avec du SIKA plastique, les armatures sont nettoyées au préalable avec du papier de verre de faible granularité.

Températures air et eau sont mesurées. Les différents ingrédients sont préparés à l'avance pour être à température ambiante :

- Préparation d'une quantité d'eau divisée par deux dans deux seaux (pré-humidifiés).
- Humidification de tout le matériel, y compris le malaxeur.
- Introduction des granulats dans le malaxeur de la plus grande à la plus petite granulométrie.
- Mise en marche du malaxeur et introduction de la première moitié d'eau en 30 secondes et malaxage 2 minutes.
- Arrêt du malaxeur et repos 2 minutes.
- Mise en marche du malaxeur et introduction du ciment en 30 secondes puis en 30 secondes l'autre moitié de l'eau;
- Malaxage pendant 2 minutes pour atteindre 7 minutes entre le début et la fin du malaxage.
- Ouverture de la trappe et transfert du béton dans la brouette, prise de la température du béton frais.

Concernant la confection des dalles, chaque dalle installée sur la micro-table vibrante (norme NF P 18-421) sera vibrée en 2 couches :

- Introduction du béton frais jusqu'à moitié du coffrage.
- Vibration pendant 10 secondes, jusqu'à absence de bulles d'air.
- Nouvelle introduction de béton jusqu'au ras du moule.
- Vibration pendant 10 secondes dans les mêmes conditions.
- Talochage à la truelle jusqu'à l'obtention d'une surface plane.

La surface des dalles est protégée par un sac plastique qui ne touche pas la surface. Les dalles sont ainsi conservées pendant 24 heures +/- 30 min avant démoulage. Identification de chaque dalle puis immersion dans l'eau de ville à 20°C. Elles seront superposées par campagne de confection.

Annexe 2 : Mesures quantitatives de pH à partir de suspensions - répétabilité et variations spatiales

Afin de vérifier la répétabilité de mesures de pH quantitatif à partir de suspensions, trois fois de mesures sont répétées sur les mêmes poudres (15 g pour chaque mesure). Les poudres sont prélevées autour des armatures. Les résultats sont montrés dans le Tableau A- 1.

Tableau A- 1: Répétabilité de mesures quantitatives de pH à partir de suspensions

pH quantitatif (profondeur 20-30 mm)	Béton sain (12-A6-S)	Béton carbonaté (20-A6-C)	Béton réalkalinisé (33-A6-CI)
1 ^{er} mesure	12.69	9.35	10.70
2 ^{ème} mesure	12.75	9.36	10.59
3 ^{ème} mesure	12.70	9.34	10.64
Moyenne	12.71	9.35	10.64
Ecart-type	0.03	0.01	0.06

Afin de vérifier les variations spatiales pH des dalles en béton sain et carbonaté, trois carottes ont été prélevées sur les positions "cellule 3", "cellule 6" et "cellule 9" des dalles 12-A6-S et 29-A6-C. Les mesures quantitatives de pH à partir de suspensions ont été réalisées sur les poudres de la tranche 0-10 mm. Les résultats sont montrés dans le Tableau A- 2.

Tableau A- 2 : Variations spatiales de mesures quantitatives de pH à partir de suspensions

pH quantitatif (Profondeur 0-10 mm)	Béton sain (12-A6-S)	Béton carbonaté (29-A6-C)
Cellule 3	12.61	9.25
Cellule 6	12.46	9.28
Cellule 9	12.56	9.22
Moyenne	12.54	9.25
Ecart-type	0.08	0.03

Annexe 3 : Aspect structural des produits de corrosion et leurs spectres [80]

La nature physique des produits de corrosion influence fortement la vitesse de corrosion. Les produits de corrosion peuvent être des ions dissous ou des espèces solides conduisant à des dépôts compacts ou non compacts. Sous certaines conditions, les produits de corrosion sont peu solubles et précipitent à la surface du métal sous forme d'hydroxydes ou de sels. Il se forme des films superficiels peu compacts ou poreux ne protégeant pas le métal contre la corrosion, mais provoquant un ralentissement de la réaction. Les films compacts, notamment les oxydes, peuvent former une barrière entre le métal et l'environnement, protégeant ainsi le métal. D'après Pourbaix [9], la formation d'un film non poreux empêchant pratiquement tout contact direct entre le métal et l'électrolyte peut constituer une protection parfaite contre la corrosion. Néanmoins, selon leur nature, les produits de corrosion se déposant à la surface d'un acier peuvent tout aussi bien favoriser une corrosion localisée que ralentir plus ou moins la corrosion uniforme de ce dernier.

D'une façon générale, la formation/transformation des produits de corrosion implique l'un ou plusieurs des mécanismes basiques suivants [92]:

- Formation, par précipitation directe du fer ferreux et/ou ferrique contenu en solution, d'oxydes, hydroxydes, carbonates, sulfates...de fer.
- Formation par oxydation de sels de Fe(II), suivie d'une hydrolyse.
- Formation, par hydrolyse, de sels de Fe(III) à différentes températures et pH (ratio $[\text{OH}^-]/[\text{Fe}^{3+}]$).
- Transformation avec modification chimique par déshydratation (thermique), déshydroxylation ou oxydation/réduction.
- Transformation reconstructive par dissolution-reprécipitation conduite par un gradient d'énergie et dépendant du taux de solubilité et de dissolution du produit initial.
- Transformation topotactique (ie en phase solide) entraînant des réarrangements structuraux du produit initial.

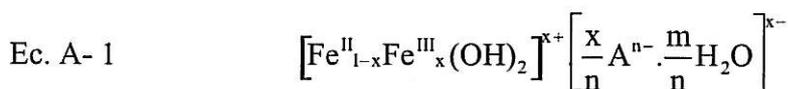
Les rouilles de différentes natures, leurs structures et leurs spectres sont présentées par la suite.

Hydroxyde ferreux, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ présente une structure hexagonale en feuillets réguliers, composés d'octaèdres trigonaux et déformés de $\text{Fe}(\text{OH})_6$, empilés suivant la direction (001), et liés par la mise en commun de 6 arêtes dont la cohésion est assurée par un tissu de liaisons faibles, identique à la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Les ions Fe^{II} occupent la moitié des interstices octaédriques, ce qui entraîne une structure alternée de couches de sites vacants et de couches de sites occupés.

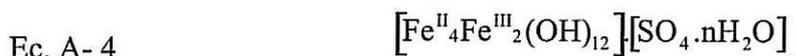
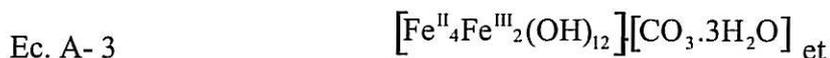
La Figure A- 1a illustre un spectre d'hydroxyde ferreux, qui a été enregistré sur la surface de fer pur dans une solution aqueuse désaérée de 1 mol.l^{-1} de NaOH, et après ajout d'une goutte d'une solution de NaCl (3 mol.l^{-1}), une fois la passivité établie, au Laboratoire des Interfaces et Systèmes Electrochimiques [80]. Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Rouilles Vertes Les Rouilles Vertes sont une famille de composés hydroxydes mixtes $\text{Fe}^{\text{II}}/\text{Fe}^{\text{III}}$ basés sur une structure hexagonale type LDH (layered double hydroxyde) dérivée de $\text{Fe}(\text{OH})_2$. La formule chimique générale de la Rouille Verte peut s'écrire :



Les cations métalliques Fe^{II} en site octaédrique forment avec les OH^- des feuillets d'hydroxyde. Quelques ions ferreux Fe^{II} sont oxydés en ions ferriques Fe^{III} , la compensation de la charge étant assurée par des anions A^{n-} et des molécules d'eau dans l'inter-couche. Les anions en insertion, qui proviennent du milieu environnant, peuvent être des chlorures, des carbonates ou bicarbonates, ou des sulfates. Des différences notables de structure des inter-couches en fonction de la nature des anions ont été observées.

Elles sont classées en 2 catégories : la Rouille Verte I lorsque l'anion est planaire (chlorures, carbonates ou bicarbonates) et la Rouille Verte II lorsque l'anion est tri-dimensionnel (sulfates). Les formules chimiques stoechiométriques de la Rouille Verte, obtenues à partir d'hydroxyde ferreux sont respectivement :



La Rouille Verte est fréquemment formée comme espèce intermédiaire pour des valeurs de pH voisines de la neutralité. Cette espèce, comme l'hydroxyde ferreux, est instable en présence d'oxygène

La Figure A- 1b illustre un spectre d'une rouille verte (CO_3^{2-}), qui est précipitée puis lavée à l'eau désaérée, au Laboratoire des Interfaces et Systèmes Electrochimiques [80]. Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Magnétite, Fe₃O₄ La structure cubique de la magnétite, aussi écrite Fe^{III}[Fe^{II}Fe^{III}]O₄ où les crochets indiquent des sites octaédriques, est constituée de couches d'octaèdres et de couches mixtes d'octaèdres et de tétraèdres empilées le long de la direction (111). Les ions Fe^{II} et Fe^{III} se répartissent 8 sites tétraédriques, i.e. les ions Fe^{III} occupent à la fois des sites tétraédriques et des sites octaédriques.

La magnétite est obtenue en solution aqueuse alcaline :

- par la précipitation d'une solution de Fe^{II}/Fe^{III},
- par l'oxydation d'une solution de Fe^{II} via Fe(OH)₂ ou via la Rouille Verte,
- par l'interaction des ions Fe^{II} avec des oxyhydroxydes de fer, la lépidocrocite en milieu alcalin, la ferrihydrite...

La Figure A- 1c illustre un spectre de magnétite, qui a été enregistré sur un monocristal synthétique, fabriqué par croissance en phase vapeur au Laboratoire de Chimie du Solide de l'Université Bordeaux I (France). Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Maghémite, γ-Fe₂O₃ La maghémite, de structure cubique, γ-Fe₂O₃, peut être considérée comme de la magnétite oxydée. Malgré l'oxydation des ions Fe^{II}, la structure de la magnétite est pratiquement conservée mais l'éjection de 11.1% de fer, pour compenser les charges, crée des lacunes sur les sites octaédriques. La formule de la maghémite peut s'écrire :



Sa structure est constituée d'octaèdres FeO₆ et de tétraèdres FeO₄. L'entourage de l'oxygène est composé de 4 ions Fe^{III} (OFe₄), 3 sur des sites octaédriques et 1 sur un site tétraédrique.

La maghémite se forme par transformation topotactique lors de l'oxydation humide ou sèche de la magnétite.

La Figure A- 1d illustre un spectre de maghémite, qui a été donnée par Nauer et al. [93] en référence à leur publication. Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Hématite, α-Fe₂O₃ La structure de l'hématite, trigonale, α-Fe₂O₃, est construite avec des entités de deux octaèdres FeO₆ trigonaux et déformés empilés suivant la direction (001). Le triplet Fe-O₃-Fe influence les propriétés magnétiques de l'oxyde. L'oxygène et son entourage

constituent des tétraèdres OFe_4 . Des relations structurales existent entre certains plans de l'hématite et ceux de la goethite et de la magnétite.

L'hématite est obtenue :

- en maintenant une solution de sels de Fe^{III} à des températures proches de $100^\circ C$,
- par agrégation – cristallisation en solution aqueuse à pH 6-8 ou déshydratation thermique - réarrangement de la ferrihydrite 2 lignes,
- à haute température, par transformation en phase solide de plusieurs oxy-hydroxyde de fer,
- par oxydation de la magnétite,
- par décomposition thermique de sels de Fe^{II} .

Il est à noter que la magnétite et l'hématite sont les oxydes les plus denses. Leur formation est susceptible d'induire les moins fortes contraintes mécaniques dans la couche de corrosion. La magnétite est le meilleur conducteur électronique parmi l'ensemble des produits de corrosion du fer, ce qui implique des transports possibles d'électrons dans les produits de corrosion. La magnétite (noire) et la maghémite (brun rougeâtre) présentent un caractère ferromagnétique qui permet de les attirer avec un aimant.

La Figure A- 1e illustre un spectre d'hématite, qui est identifié à la base des minéraux provenant de la collection minéralogique de l'université Paris VI (France). Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Goethite, α - $FeOOH$ La structure orthorhombique de la goethite, α - $FeOOH$, est construite avec des entités de deux octaèdres $FeO_3(OH)_3$, reliés par une arête OH-OH. Chaque doublet est relié à quatre autres par une arête O-OH. L'alternance de cette double chaîne d'octaèdre et d'une double chaîne de sites vacants donne à la structure un aspect tunnel suivant la direction (010). L'oxygène et son entourage constituent des tétraèdres OFe_3 ou OFe_3H .

La goethite est obtenue en solution aqueuse :

- par la précipitation directe d'une solution de Fe^{III} ,
- par la dissolution d'un précurseur solide comme la ferrihydrite suivie de sa cristallisation en solution,
- par l'oxydation/hydrolyse d'une solution de Fe^{II} .

Il est à noter que l'hématite et la goethite sont les composés de Fer III les plus stables thermodynamiquement. A température ambiante, la goethite se forme préférentiellement à l'hématite.

La Figure A- 1f illustre un spectre de goethite, qui est identifié à la base des minéraux provenant de la collection minéralogique de l'université Paris VI (France). Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Lépidocrocite, γ -FeOOH La structure de la lépidocrocite, orthorhombique, γ -FeOOH, connue jusqu'à présent comme étant un ensemble d'octaèdres $\text{FeO}_3(\text{OH})_3$.

La lépidocrocite est moins stable thermodynamiquement que la goethite, i.e. son énergie d'activation est plus faible que celle de la goethite à cristallinité et taille de particules équivalentes. La présence d'un oxygène possédant un environnement particulier, constitué de deux atomes de fer et d'un atome d'hydrogène, est vraisemblablement responsable de cette métastabilité.

La Figure A- 1g illustre un spectre de lépidocrocite, qui est identifié à la base des minéraux provenant de la collection minéralogique de l'université Paris VI (France). Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Ferroyhite, δ -FeOOH La structure trigonale de la ferroyhite, δ -FeOOH, peut être présentée en feuillets.

La Figure A- 1h illustre un spectre de ferroyhite obtenue par oxydation violente (H_2O_2) de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ précipité en milieu anaérobie au LISE. La structure du composé obtenu a été vérifiée par diffraction X. Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Ferrihydrite, $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ La ferrihydrite, $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, présente un faible degré d'ordre qui peut être variable. Les deux états extrêmes de la ferrihydrite, de la moins à la plus ordonnée, sont référencés comme étant de la ferrihydrite 2 et 6 lignes. Les diffractogrammes respectifs sont constitués de 2 et 6 à 8 réflexions. Une fois formée, la ferrihydrite ne devient pas mieux cristallisée avec le temps.

La Figure A- 1i illustre un spectre de ferrihydrite, qui a été enregistré par Mazzetti et al. [94]. Les positions des pics ou épaulements Raman sont résumées dans le Tableau A- 3.

Sidérite, FeCO_3 La sidérite est un carbonate de Fe^{II} . Le spectre Raman de cette phase est reporté dans le Tableau A- 3, bien qu'elle n'ait jamais été observée dans nos expériences.

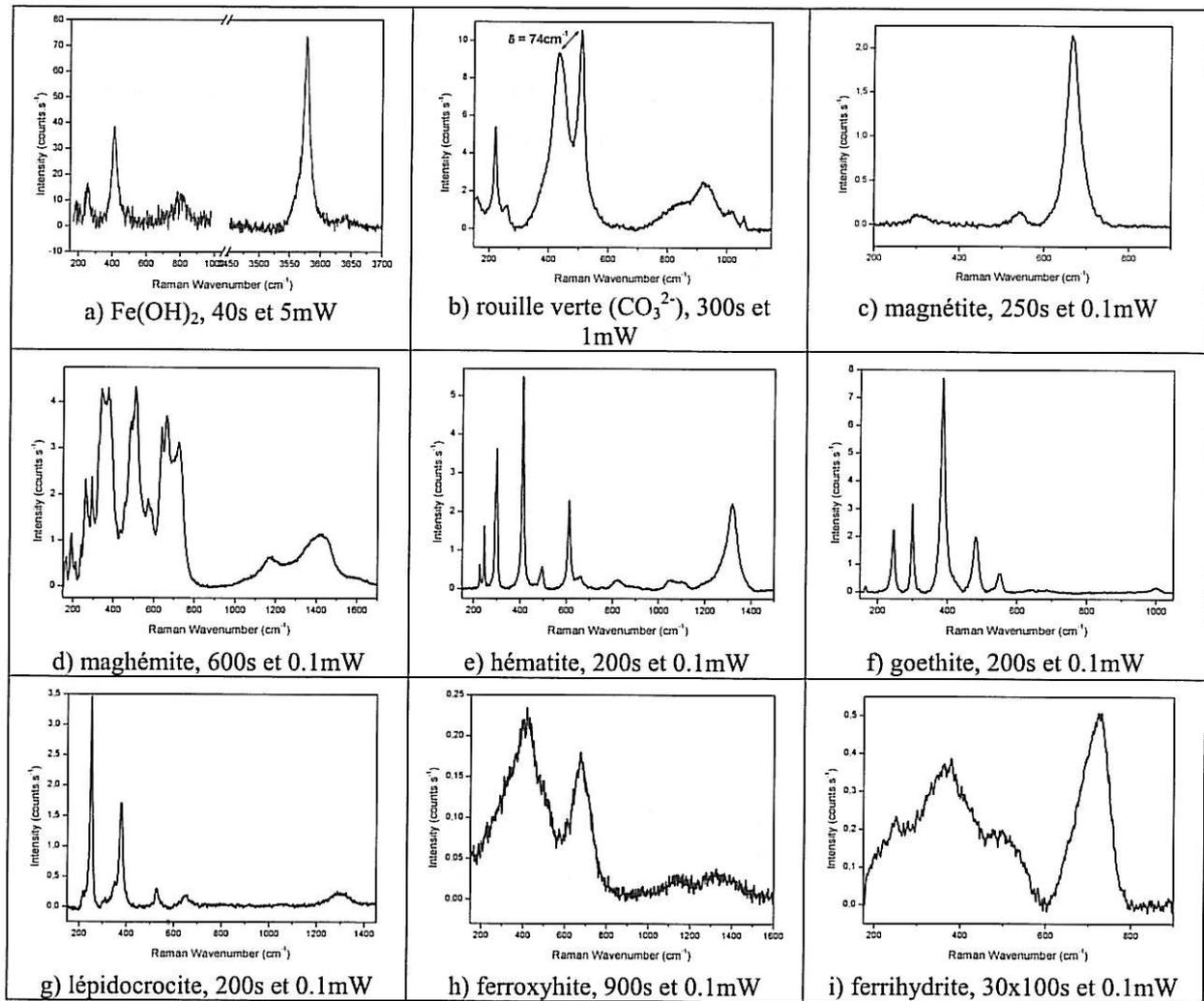


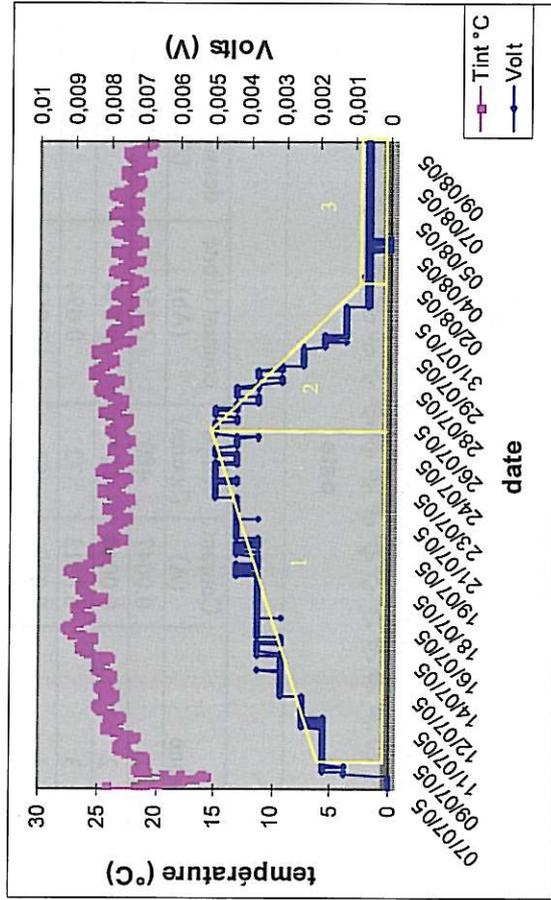
Figure A- 1 : Spectre Raman des produits de corrosion [80]

Tableau A-3 : Nombres d'onde des modes Raman des oxydes et oxyhydroxydes de fer. Bande intense (largeur à mi-hauteur).

Fe(OH) ₂	254 411 811 3577
Rouilles Vertes (CO ₃ ²⁻)	220 258 435 509 835 926 1013 1057
Fe ₃ O ₄	305 540 665 (25)
γ-Fe ₂ O ₃	190 260 290 345-375 (80) 485-505 (50) 570 635-660-725 (120) 1173 1417
α-Fe ₂ O ₃	225 245 300 (15) 410 (10) 495 610 (15) 660 820 1050 1105 1320 (55)
α-FeOOH	245 300 (10) 395 (15) 480 550 1000
γ-FeOOH	220 250 (10) 350 375 (15) 530 655 1295
δ-FeOOH	410 (150) 670 (90) 1135 1320
5Fe ₂ O ₃ ·9H ₂ O	375 500 725 (80)
FeCO ₃	190 300 505 735 1090 (10)

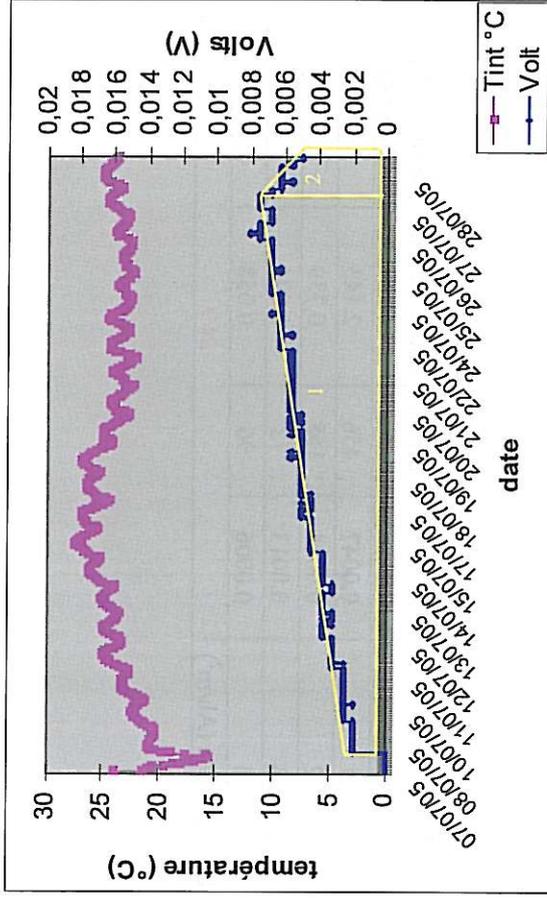
Annexe 4 : Suivi du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle sur les dallettes "A3" à l'aide de datalogger

- Dallette 08-A3-A



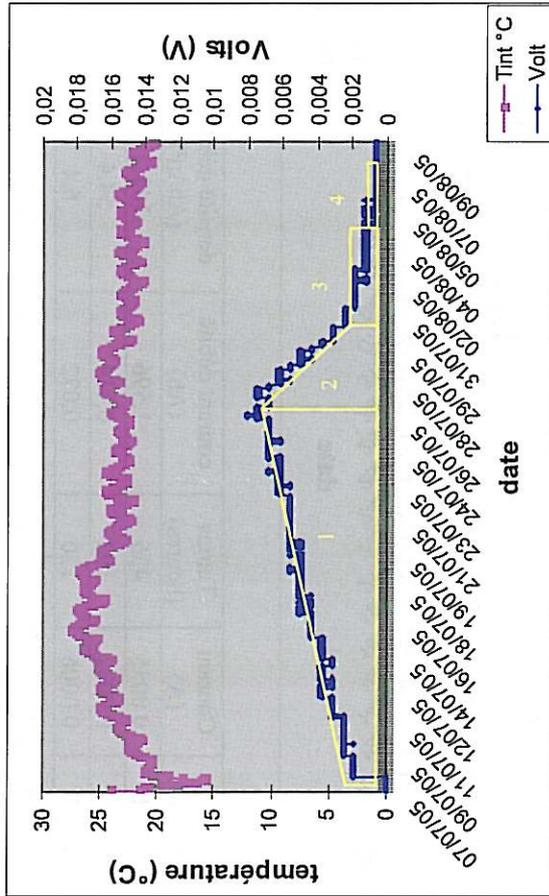
zone	Courant (A)	Temps (heures)	courant débité (Ah)	densité débitée (Ah/m ²)
1	0.0035	456	1.596	141.2
2	0.0032	192	0.614	54.4
3	0.0006	120	0.072	6.4
Charge totale (Ah/m ²)				202

- Dallette 09-A3-A



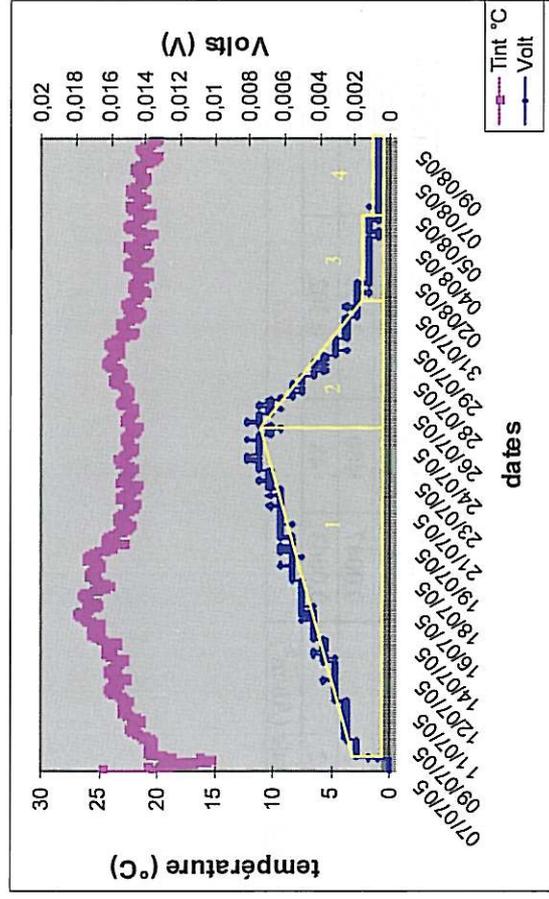
zone	Courant (A)	Temps (heures)	courant débité (Ah)	densité débitée (Ah/m ²)
1	0.0047	480	2.256	199.6
2	0.0063	48	0.302	26.8
Charge totale (Ah/m ²)				226

- Dallette 10-A3-A



zone	Courant (A)	temps (heures)	courant débité (Ah)	densité débitée (Ah/m ²)
1	0.0047	480	2.256	199.6
2	0.0044	144	0.634	56.1
3	0.0013	72	0.094	8.3
4	0.0006	96	0.058	5.1
Charge totale (Ah/m ²)			2.69	

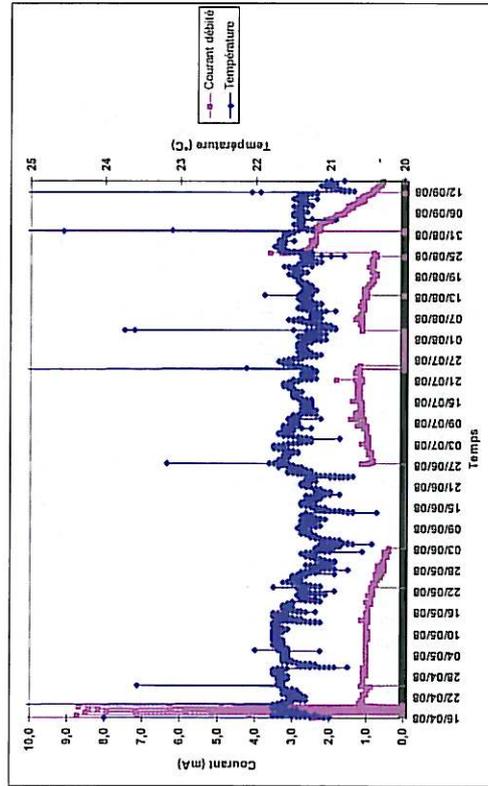
- Dallette 11-A3-A



zone	courant (A)	Temps (heures)	courant débité (Ah)	densité débitée (Ah/m ²)
1	0.0047	456	2.143	189.7
2	0.0044	168	0.739	65.4
3	0.0013	72	0.094	8.3
4	0.0006	96	0.058	5.1
Charge totale (Ah/m ²)			2.69	

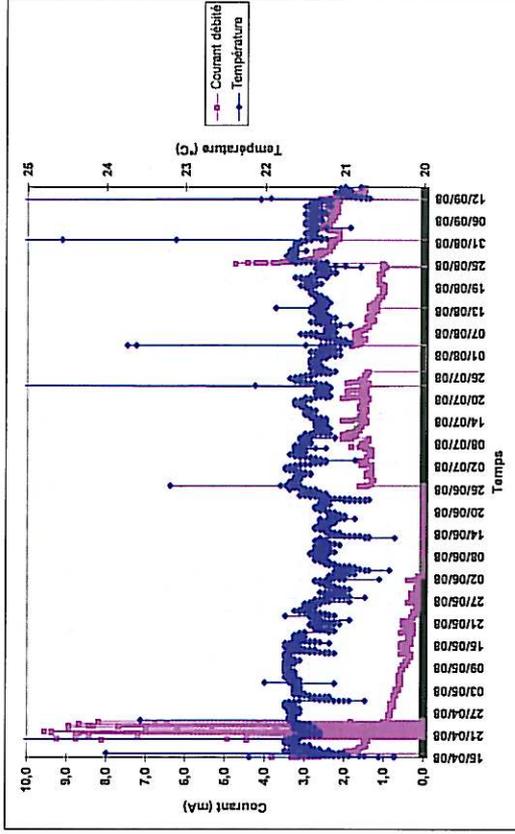
Annexe 5 : Suivi du traitement de réalcalinisation par anode sacrificielle sur les dallettes "A6" à l'aide de datalogger

- Dallette 21-A6-A



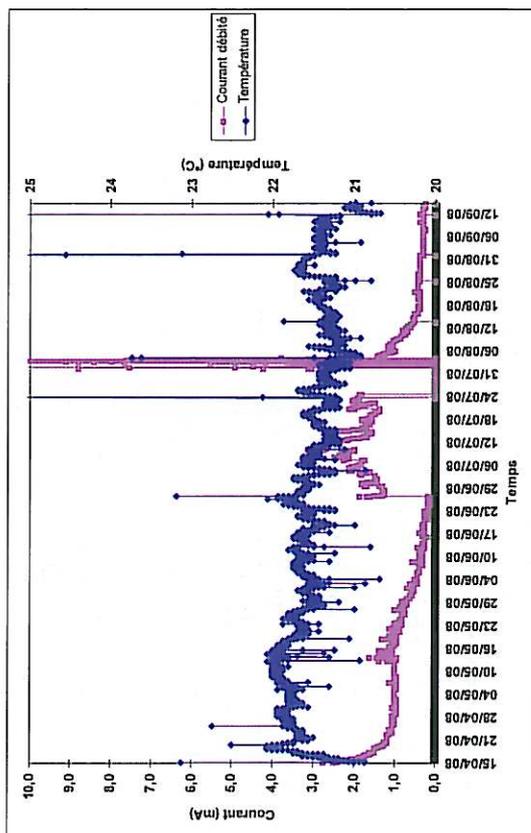
zone	courant débité (A)	Temps (heures)	Densité débitée (Ah)
1	0.0026	128	0.3328
2	0.001	832	0.832
3	0.00045	788	0.3546
4	0.0011	672	0.7392
5	0.0012	262	0.3144
6	0.0011	240	0.264
7	0.00095	264	0.2508
8	0.0026	168	0.4368
9	0.00175	264	0.462
10	0.00075	78	0.0585
Charge totale (Ah/m ²)			179

- Dallette 23-A6-A



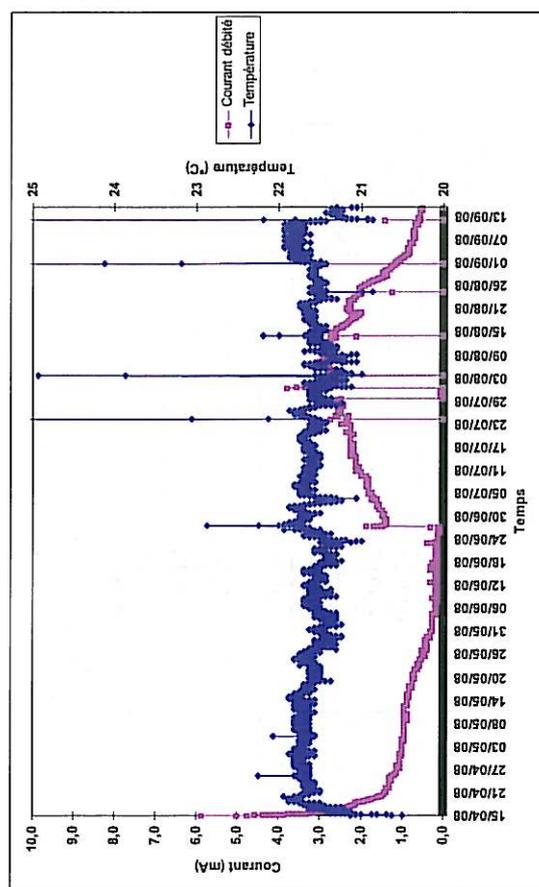
zone	courant débité (A)	Temps (heures)	Densité débitée (Ah)
1	0.0029	32	0.0928
2	0.0015	210	0.315
3	0.0006	1508	0.9048
4	0.0017	672	1.1424
5	0.0016	262	0.4192
6	0.0015	240	0.36
7	0.00125	264	0.33
8	0.0028	168	0.4704
9	0.0023	264	0.6072
10	0.002	78	0.156
Charge totale (Ah/m ²)			212

● Dallette 28-A6-A



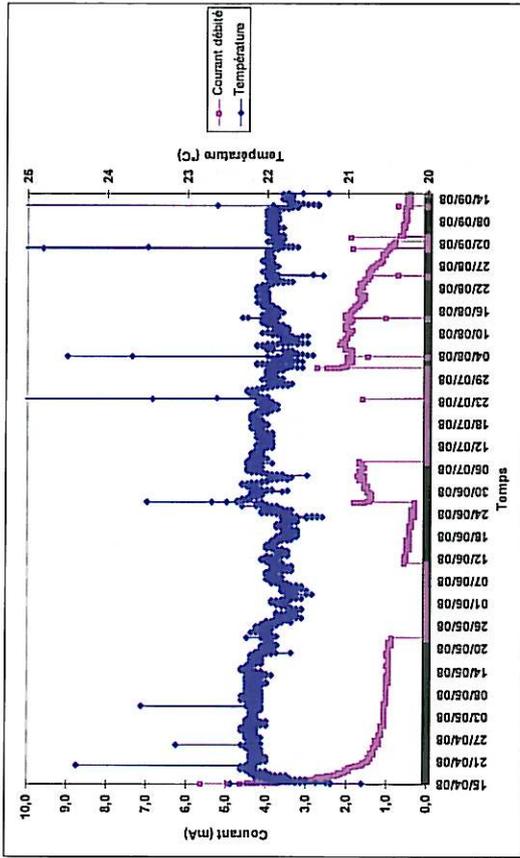
zone	courant débité (A)	Temps (heures)	Densité débitée (Ah)
1	0.00235	66	0.1551
2	0.0014	244	0.3416
3	0.001	414	0.414
4	0.0011	103	0.1133
5	0.00075	392	0.294
6	0.00035	562	0.1967
7	0.00225	320	0.72
8	0.0022	324	0.7128
9	0.004	262	1.048
10	0.0012	120	0.144
11	0.0008	119	0.0952
12	0.0005	264	0.132
13	0.0004	168	0.0672
14	0.0003	264	0.0792
15	0.0003	78	0.0234
Charge totale (Ah/m ²)			201

● Dallette 31-A6-A



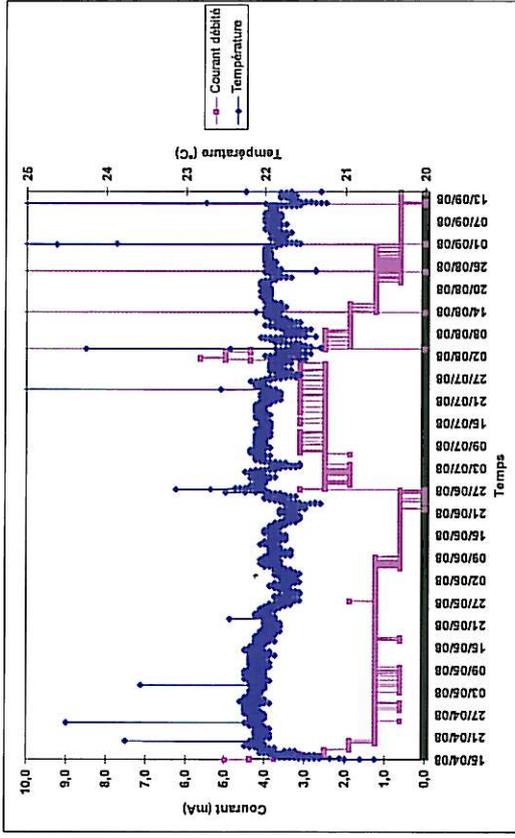
zone	courant débité (A)	Temps (heures)	Densité débitée (Ah)
1	0.0045	24	0.108
2	0.0022	148	0.3256
3	0.00105	718	0.7539
4	0.0004	857	0.3428
5	0.0019	672	1.2768
6	0.0028	262	0.7336
7	0.0028	240	0.672
8	0.0024	264	0.6336
9	0.0016	168	0.2688
10	0.0008	264	0.2112
11	0.0006	78	0.0468
Charge totale (Ah/m ²)			238

● Dallette 32-A6-A



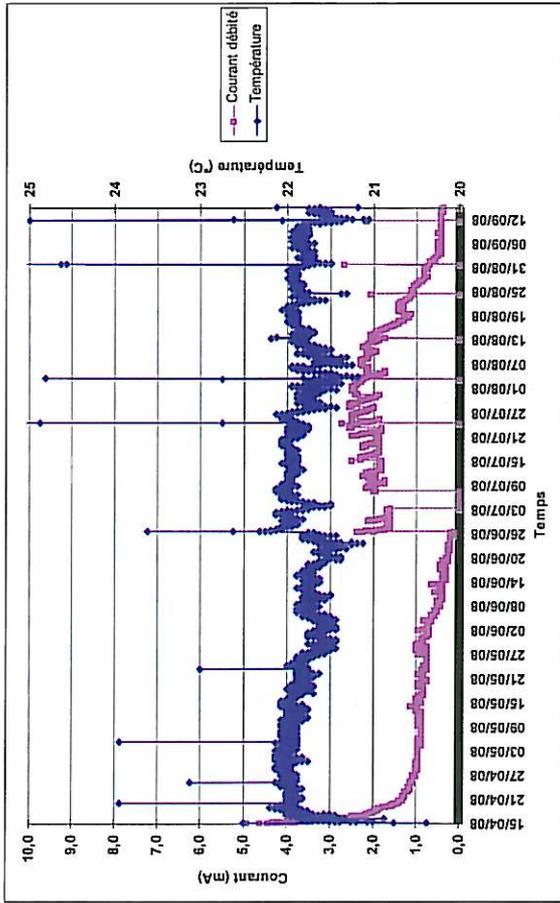
zone	courant débité (A)	Temps (heures)	Densité débitée (Ah)
1	0.004	87	0.348
2	0.0015	582	0.873
3	0.00065	1076	0.6994
4	0.0017	672	1.1424
5	0.002	262	0.524
6	0.002	240	0.48
7	0.00175	264	0.462
8	0.0012	168	0.2016
9	0.0006	264	0.1584
10	0.0005	78	0.039
Charge totale (Ah/m ²)			218

● Dallette 34-A6-A



zone	courant débité (A)	Temps (heures)	Densité débitée (Ah)
1	0.004	40	0.16
2	0.0025	25	0.0625
3	0.0019	40	0.076
4	0.0012	1176	1.4112
5	0.0006	504	0.3024
6	0.0028	863	2.4164
7	0.0048	71	0.3408
8	0.002	240	0.48
9	0.0019	56	0.1064
10	0.0012	208	0.2496
11	0.0007	168	0.1176
12	0.0006	264	0.1584
13	0.0006	78	0.0468
Charge totale (Ah/m ²)			262

● Dallette 36-A6-A



zone	courant débité (A)	Temps (heures)	Densité débitée (Ah)
1	0.00385	29	0.11165
2	0.00205	87	0.17835
3	0.0013	123	0.1599
4	0.001	682	0.682
5	0.00065	360	0.234
6	0.00035	480	0.168
7	0.0022	672	1.4784
8	0.0024	262	0.6288
9	0.0021	240	0.504
10	0.00155	264	0.4092
11	0.0009	168	0.1512
12	0.00045	264	0.1188
13	0.0004	78	0.0312
Charge totale (Ah/m ²)			215

Annexe 6 : Suivi de la dépolarisation des armatures après la fin du traitement de réalcalinisation des dallettes "A6"

- Après le procédé par courant imposé

Dallette	INI	Tf+1j	Tf+3j	Tf+5j	Tf+8j
Ecorr (mV)					
13-A6-I	-507	-829	-296	-211	-170
25-A6-I	-502	-943	-723	-256	-192
27-A6-I	-508	-849	-230	-216	-207
35-A6-I	-509	-663	-409	-324	-310
Rp (Ohm pour 10,2 cm²)					
13-A6-I	265	108	619	1035	969
25-A6-I	468	142	190	993	1330
27-A6-I	454	122	1121	1159	1575
35-A6-I	646	113	166	338	408
Jcorr (µA/cm²)					
13-A6-I	4,8	11,8	2,1	1,2	1,3
25-A6-I	2,7	9,0	6,7	1,3	1,0
27-A6-I	2,8	10,4	1,1	1,1	0,8
35-A6-I	10,0	11,3	7,7	3,8	3,1

- Après le procédé par anode sacrificielle

Dallette	INI	Tf+1j	Tf+3j	Tf+8j	Tf+10j
Ecorr (mV)					
21-A6-A	-519	-299	-317	-257	-267
23-A6-A	-460	-905	-370	-252	-267
28-A6-A	-454	-298	-307	-264	-241
31-A6-A	-546	-307	-301	-266	-254
32-A6-A	-548	-298	-299	-265	-261
34-A6-A	-547	-369	-314	-244	-231
36-A6-A	-541	-344	-307	-246	-251
Rp (Ohm pour 10,2 cm²)					
21-A6-A	370	240	242	303	323
23-A6-A	330	72	391	203	234
28-A6-A	395	598	1098	2551	863
31-A6-A	268	327	414	707	684
32-A6-A	409	517	442	1221	821
34-A6-A	325	212	problème	448	392
36-A6-A	207	762	1046	615	2325
Jcorr (µA/cm²)					
21-A6-A	3,4	5,3	5,3	4,2	4,0
23-A6-A	3,9	17,7	3,3	6,3	5,5
28-A6-A	3,2	2,1	1,2	0,5	1,5
31-A6-A	4,7	3,9	3,1	1,8	1,9
32-A6-A	3,1	2,5	2,9	1,0	1,6
34-A6-A	3,9	6,0	problème	2,8	3,2
36-A6-A	6,2	1,7	1,2	2,1	0,5

Annexe 7 : Résultats électrochimiques des dallettes "A3" pour chaque échéance

01-A3-S-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	01-A3-S-1-1	-0.104	17 153	0.96	1 770	15 383	0.2
	01-A3-S-1-2	-0.103	16 978	0.97	2 040	14 938	0.2
	01-A3-S-1-3	-0.121	17 331	0.97	1 840	15 491	0.2
Armature 2	01-A3-S-2-4	-0.097	28 169	0.95	1 630	26 539	0.1
	01-A3-S-2-5	-0.094	27 933	0.95	1 640	26 293	0.1
	01-A3-S-2-6	-0.101	28 090	0.94	1 910	26 180	0.1
Armature 3	01-A3-S-3-7	-0.104	31 250	0.94	1 530	29 720	0.1
	01-A3-S-3-8	-0.107	33 003	0.94	1 710	31 293	0.1
	01-A3-S-3-9	-0.111	31 153	0.93	2 040	29 113	0.1
Dallette	moyenne	-0.105	25 673		1 790	23 883	0.1
	écart-type	0.008	6 613		182	6 682	0.0

01-A3-S-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	01-A3-S-1-1	-0.143	20 833	0.98	2 300	18 533	0.1
	01-A3-S-1-2	-0.140	16 474	0.99	2 800	13 674	0.2
	01-A3-S-1-3	-0.144	12 920	0.99	2 660	10 260	0.2
Armature 2	01-A3-S-2-4	-0.145	22 523	0.98	2 430	20 093	0.1
	01-A3-S-2-5	-0.134	18 349	0.99	2 880	15 469	0.2
	01-A3-S-2-6	-0.117	23 095	0.99	4 600	18 495	0.1
Armature 3	01-A3-S-3-7	-0.124	38 610	0.96	2 400	36 210	0.1
	01-A3-S-3-8	-0.113	26 178	0.98	3 690	22 488	0.1
	01-A3-S-3-9	-0.126	21 882	0.98	4 750	17 132	0.1
Dallette	moyenne	-0.132	22 318		3 168	19 150	0.1
	écart-type	0.012	7 259		948	7 336	0.0

01-A3-S-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	01-A3-S-1-1	-0.142	21 692	0.91	1 947	19 745	0.1
	01-A3-S-1-2	-0.143	19 342	0.89	2 300	17 042	0.2
	01-A3-S-1-3	-0.154	13 966	0.95	1 900	12 066	0.2
Armature 2	01-A3-S-2-4	-0.291	11 547	0.97	1 867	9 680	0.3
	01-A3-S-2-5	-0.273	12 563	0.94	2 842	9 721	0.3
	01-A3-S-2-6	-0.248	14 025	0.94	3 400	10 625	0.2
Armature 3	01-A3-S-3-7	-0.167	30 211	0.85	1 778	28 433	0.1
	01-A3-S-3-8	-0.177	23 148	0.83	3 200	19 948	0.1
	01-A3-S-3-9	-0.196	21 692	0.92	2 300	19 392	0.1
Dallette	moyenne	-0.199	18 688		2 393	16 295	0.2
	écart-type	0.057	6 161		610	6 322	0.1

01-A3-S-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	01-A3-S-1-1	-0.211	16 207	0.96	2 540	13 667	0.2
	01-A3-S-1-2	-0.198	17 483	0.95	4 060	13 423	0.2
	01-A3-S-1-3	-0.186	17 452	0.96	3 010	14 442	0.2
Armature 2	01-A3-S-2-4	-0.181	23 095	0.91	3 000	20 095	0.1
	01-A3-S-2-5	-0.180	24 570	0.89	4 850	19 720	0.1
	01-A3-S-2-6	-0.174	27 933	0.88	6 000	21 933	0.1
Armature 3	01-A3-S-3-7	-0.139	49 505	0.72	3 180	46 325	0.1
	01-A3-S-3-8	-0.137	50 251	0.66	5 580	44 671	0.1
	01-A3-S-3-9	-0.140	45 872	0.68	3 740	42 132	0.1
Dallette	moyenne	-0.172	30 263		3 996	26 267	0.1
	écart-type	0.027	14 264		1 229	13 946	0.1

01-A3-S-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	01-A3-S-1-1	-0.183	13 933	0.87	3 400	10 533	0.2
	01-A3-S-1-2	-0.163	13 084	0.87	3 020	10 064	0.3
	01-A3-S-1-3	-0.150	14 679	0.82	4 050	10 629	0.2
Armature 2	01-A3-S-2-4	-0.154	18 647	0.78	3 450	15 197	0.2
	01-A3-S-2-5	-0.170	20 280	0.78	2 690	17 590	0.1
	01-A3-S-2-6	-0.151	22 240	0.73	3 480	18 760	0.1
Armature 3	01-A3-S-3-7	-0.119	36 132	0.48	3 290	32 842	0.1
	01-A3-S-3-8	-0.135	43 712	0.39	2 760	40 952	0.1
	01-A3-S-3-9	-0.124	44 743	0.36	3 650	41 093	0.1
Dallette	Moyenne	-0.150	25 272		3 310	21 962	0.2
	Ecart-type	0.021	12 769		432	12 849	0.1

01-A3-S-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	01-A3-S-1-1	-0.233	16 048	0.98	3 230	12 818	0.2
	01-A3-S-1-2	-0.240	17 199	0.98	3 420	13 779	0.2
	01-A3-S-1-3	-0.217	19 257	0.98	4 310	14 947	0.2
Armature 2	01-A3-S-2-4	-0.213	26 295	0.95	4 550	21 745	0.1
	01-A3-S-2-5	-0.233	26 360	0.89	3 490	22 870	0.1
	01-A3-S-2-6	-0.217	25 912	0.88	4 030	21 882	0.1
Armature 3	01-A3-S-3-7	-0.155	41 562	0.73	5 070	36 492	0.1
	01-A3-S-3-8	-0.177	49 300	0.69	3 350	45 950	0.1
	01-A3-S-3-9	-0.169	44 670	0.72	4 040	40 630	0.1
Dallette	Moyenne	-0.206	29 623		3 943	25 679	0.1
	Écart-type	0.031	12 438		625	12 305	0.1

02-A3-C-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	02-A3-C-1-1	-0.419	7 092	0.99	2 921	4 171	0.6
	02-A3-C-1-2	-0.394	7 752	0.99	3 450	4 302	0.6
	02-A3-C-1-3	-0.381	8 197	0.99	3 866	4 331	0.6
Armature 2	02-A3-C-2-4	-0.479	3 546	1.00	2 241	1 305	2.0
	02-A3-C-2-5	-0.470	3 509	1.00	2 448	1 061	2.4
	02-A3-C-2-6	-0.457	3 953	1.00	2 658	1 295	2.0
Armature 3	02-A3-C-3-7	-0.484	6 757	0.99	3 945	2 812	0.9
	02-A3-C-3-8	-0.474	6 410	0.99	3 469	2 941	0.9
	02-A3-C-3-9	-0.468	6 536	0.99	3 780	2 756	0.9
Dallette	moyenne	-0.447	5 972		3 198	2 775	1.2
	écart-type	0.039	1 821		645	1 324	0.7

02-A3-C-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	02-A3-C-1-1	-0.478	9 346	0.99	3 860	5 486	0.5
	02-A3-C-1-2	-0.439	10 846	0.99	5 250	5 596	0.5
	02-A3-C-1-3	-0.421	10 787	0.99	5 660	5 127	0.5
Armature 2	02-A3-C-2-4	-0.457	4 902	1.00	3 310	1 592	1.6
	02-A3-C-2-5	-0.447	5 076	1.00	3 540	1 536	1.7
	02-A3-C-2-6	-0.439	5 848	1.00	4 010	1 838	1.4
Armature 3	02-A3-C-3-7	-0.474	8 403	0.99	5 000	3 403	0.7
	02-A3-C-3-8	-0.466	8 130	0.99	4 670	3 460	0.7
	02-A3-C-3-9	-0.462	7 937	0.99	4 680	3 257	0.8
Dallette	moyenne	-0.454	7 919		4 442	3 477	0.9
	écart-type	0.019	2 252		804	1 632	0.5

02-A3-C-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	02-A3-C-1-1	-0.379	12 407	0.97	7 060	5 347	0.5
	02-A3-C-1-2	-0.383	14 683	0.94	8 240	6 443	0.4
	02-A3-C-1-3	-0.387	15 282	0.91	9 180	6 102	0.4
Armature 2	02-A3-C-2-4	-0.446	7 881	0.90	6 270	1 611	1.6
	02-A3-C-2-5	-0.449	10 905	0.72	9 020	1 885	1.4
	02-A3-C-2-6	-0.436	9 024	0.81	7 990	1 034	2.5
Armature 3	02-A3-C-3-7	-0.459	13 931	0.60	9 400	4 531	0.6
	02-A3-C-3-8	-0.455	15 021	0.55	9 800	5 221	0.5
	02-A3-C-3-9	-0.473	11 386	0.70	8 900	2 486	1.0
Dallette	Moyenne	-0.430	12 280		8 429	3 851	1.0
	Écart-type	0.037	2 685		1 158	2 093	0.7

02-A3-C-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	02-A3-C-1-1	-0.322	6 098	0.99	2 600	3 498	0.7
	02-A3-C-1-2	-0.320	6 410	0.99	2 800	3 610	0.7
	02-A3-C-1-3	-0.339	7 143	0.99	3 200	3 943	0.7
Armature 2	02-A3-C-2-4	-0.403	2 688	0.99	1 725	963	2.7
	02-A3-C-2-5	-0.420	2 519	1.00	1 700	819	3.2
	02-A3-C-2-6	-0.391	2 597	0.99	1 784	813	3.2
Armature 3	02-A3-C-3-7	-0.371	6 993	0.99	3 264	3 729	0.7
	02-A3-C-3-8	-0.401	7 407	0.99	3 481	3 926	0.7
	02-A3-C-3-9	-0.362	6 803	0.99	3 248	3 555	0.7
Dallette	moyenne	-0.370	5 406		2 645	2 762	1.5
	écart-type	0.037	2 139		730	1 431	1.2

02-A3-C-30M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	02-A3-C-1-1	-0.410	12 273	0.98	6 090	6 183	0.4
	02-A3-C-1-2	-0.394	14 242	0.98	7 170	7 072	0.4
	02-A3-C-1-3	-0.390	13 397	0.97	7 150	6 247	0.4
Armature 2	02-A3-C-2-4	-0.442	6 229	0.99	4 620	1 609	1.6
	02-A3-C-2-5	-0.437	7 679	0.99	5 970	1 709	1.5
	02-A3-C-2-6	-0.425	7 349	0.99	5 510	1 839	1.4
Armature 3	02-A3-C-3-7	-0.419	10 932	0.98	7 310	3 622	0.7
	02-A3-C-3-8	-0.409	12 942	0.96	8 380	4 562	0.6
	02-A3-C-3-9	-0.418	10 482	0.98	7 600	2 882	0.9
Dallette	Moyenne	-0.416	10 614		6 644	3 969	0.9
	Écart-type	0.017	2 909		1 175	2 139	0.5

04-A3-I-10M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	04-A3-I-1-1	-0.412	6 410	0.99	5 050	1 360	1.9
	04-A3-I-1-2	-0.416	4 444	0.99	3 710	734	3.5
	04-A3-I-1-3	-0.427	4 525	0.99	3 540	985	2.6
Armature 2	04-A3-I-2-4	-0.451	4 831	0.99	3 500	1 331	1.9
	04-A3-I-2-5	-0.433	3 906	0.99	2 790	1 116	2.3
	04-A3-I-2-6	-0.453	4 098	1.00	2 840	1 258	2.0
Armature 3	04-A3-I-3-7	-0.453	4 950	1.00	3 030	1 920	1.3
	04-A3-I-3-8	-0.442	4 505	0.99	2 700	1 805	1.4
	04-A3-I-3-9	-0.454	4 651	0.99	2 920	1 731	1.5
Dallette	moyenne	-0.438	4 702		3 342	1 360	2.0
	écart-type	0.017	719		738	396	0.7

04-A3-I-15J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	04-A3-I-1-1	-0.357	3 876	0.14	1 370	2 506	1.0
	04-A3-I-1-2	-0.336	6 410	0.07	1 150	5 260	0.5
	04-A3-I-1-3	-0.310	2 833	0.24	1 370	1 463	1.7
Armature 2	04-A3-I-2-4	-0.333	6 849	0.07	1 870	4 979	0.5
	04-A3-I-2-5	-0.319	3 623	0.20	1 500	2 123	1.2
	04-A3-I-2-6	-0.321	3 937	0.20	1 210	2 727	0.9
Armature 3	04-A3-I-3-7	-0.619	2 257	0.18	1 530	727	3.5
	04-A3-I-3-8	-0.618	2 012	0.30	1 500	512	5.0
	04-A3-I-3-9	-0.615	2 392	0.20	2 000	392	6.5
Dallette	moyenne	-0.425	3 799		1 500	2 299	2.3
	écart-type	0.145	1 756		280	1 810	2.2

04-A3-I-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	04-A3-I-1-1	-0.309	3 155	0.99	1 375	1 780	1.4
	04-A3-I-1-2	-0.284	2 571	0.99	1 113	1 458	1.7
	04-A3-I-1-3	-0.284	2 604	0.99	1 038	1 566	1.6
Armature 2	04-A3-I-2-4	-0.359	3 145	0.99	1 448	1 697	1.5
	04-A3-I-2-5	-0.352	2 703	0.99	1 160	1 543	1.7
	04-A3-I-2-6	-0.371	3 086	0.99	1 099	1 987	1.3
Armature 3	04-A3-I-3-7	-0.288	3 165	0.99	1 444	1 721	1.5
	04-A3-I-3-8	-0.264	3 257	0.99	1 412	1 845	1.4
	04-A3-I-3-9	-0.265	3 663	0.99	1 545	2 118	1.2
Dallette	moyenne	-0.309	3 039		1 293	1 746	1.5
	écart-type	0.042	354		188	214	0.2

04-A3-I-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	04-A3-I-1-1	-0.335	3 413	0.99	1 852	1 561	1.6
	04-A3-I-1-2	-0.330	2 849	0.99	1 500	1 349	1.9
	04-A3-I-1-3	-0.311	1 916	0.99	1 300	616	4.1
Armature 2	04-A3-I-2-4	-0.332	3 676	0.99	1 754	1 922	1.3
	04-A3-I-2-5	-0.324	3 390	0.99	1 500	1 890	1.3
	04-A3-I-2-6	-0.345	4 405	0.99	1 422	2 983	0.9
Armature 3	04-A3-I-3-7	-0.276	5 556	0.99	2 574	2 982	0.9
	04-A3-I-3-8	-0.302	3 425	0.99	1 529	1 896	1.3
	04-A3-I-3-9	-0.346	3 953	0.99	1 761	2 192	1.2
Dallette	moyenne	-0.322	3 620		1 688	1 932	1.6
	écart-type	0.022	1 007		377	749	1.0

04-A3-I-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	04-A3-I-1-1	-0.378	3 968	0.99	2 440	1 528	1.7
	04-A3-I-1-2	-0.375	3 846	0.99	2 340	1 506	1.7
	04-A3-I-1-3	-0.364	3 984	0.99	2 330	1 654	1.5
Armature 2	04-A3-I-2-4	-0.345	4 525	0.99	2 310	2 215	1.2
	04-A3-I-2-5	-0.346	4 329	0.99	2 210	2 119	1.2
	04-A3-I-2-6	-0.345	4 587	0.99	2 120	2 467	1.0
Armature 3	04-A3-I-3-7	-0.440	3 831	0.99	2 080	1 751	1.5
	04-A3-I-3-8	-0.439	3 802	0.99	1 910	1 892	1.3
	04-A3-I-3-9	-0.431	4 255	0.99	2 220	2 035	1.3
Dallette	Moyenne	-0.385	4 125		2 218	1 908	1.4
	Écart-type	0.041	305		162	328	0.2

04-A3-I-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	04-A3-I-1-1	-0.416	3 018	0.99	2 280	738	3.5
	04-A3-I-1-2	-0.413	3 045	0.99	2 520	525	4.9
	04-A3-I-1-3	-0.440	3 615	1.00	2 440	1 175	2.2
Armature 2	04-A3-I-2-4	-0.410	4 166	1.00	3 000	1 166	2.2
	04-A3-I-2-5	-0.402	4 648	0.99	3 280	1 368	1.9
	04-A3-I-2-6	-0.420	4 154	0.99	2 970	1 184	2.2
Armature 3	04-A3-I-3-7	-0.511	4 461	0.99	3 180	1 281	2.0
	04-A3-I-3-8	-0.502	4 504	0.98	3 070	1 434	1.8
	04-A3-I-3-9	-0.502	4 566	0.98	3 350	1 216	2.1
Dallette	Moyenne	-0.446	4 019		2 899	1 121	2.5
	Ecart-type	0.045	640		389	297	1.0

04-A3-I-30M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	04-A3-I-1-1	-0.399					
	04-A3-I-1-2	-0.406	4 281	0.99	3 180	1 101	2.3
	04-A3-I-1-3	-0.391	4 114	1.00	2 850	1 264	2.0
Armature 2	04-A3-I-2-4	-0.392	4 759	0.99	3 240	1 519	1.7
	04-A3-I-2-5	-0.394	5 155	0.99	3 570	1 585	1.6
	04-A3-I-2-6	-0.406	3 924	0.99	2 810	1 114	2.3
Armature 3	04-A3-I-3-7	-0.425	4 740	0.99	2 930	1 810	1.4
	04-A3-I-3-8	-0.428	4 572	0.99	2 760	1 812	1.4
	04-A3-I-3-9	-0.426	4 485	0.99	3 020	1 465	1.7
Dallette	Moyenne	-0.407	4 504		3 045	1 459	1.8
	Ecart-type	0.015	394		273	281	0.4

05-A3-I-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	05-A3-I-1-1	-0.230	4 902	0.99	1 187	3 715	0.7
	05-A3-I-1-2	-0.260	4 762	0.99	963	3 799	0.7
	05-A3-I-1-3	-0.274	4 967	0.99	1 009	3 358	0.8
Armature 2	05-A3-I-2-4	-0.315	3 676	0.99	1 055	2 621	1.0
	05-A3-I-2-5	-0.316	3 344	0.99	920	2 424	1.1
	05-A3-I-2-6	-0.335	3 268	0.99	850	2 418	1.1
Armature 3	05-A3-I-3-7	-0.314	4 505	0.99	1 249	3 256	0.8
	05-A3-I-3-8	-0.356	3 584	0.99	1 275	2 309	1.1
	05-A3-I-3-9	-0.286	4 167	0.99	1 316	2 851	0.9
Dallette	Moyenne	-0.298	4 064		1 092	2 972	0.9
	Ecart-type	0.039	614		170	575	0.2

05-A3-I-15J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	05-A3-I-1-1	-0.323	3 413	0.83	960	2 453	1.0
	05-A3-I-1-2	-0.316	3 322	0.85	839	2 483	1.0
	05-A3-I-1-3	-0.302	3 802	0.82	922	2 880	0.9
Armature 2	05-A3-I-2-4	-0.279	3 846	0.85	830	3 016	0.8
	05-A3-I-2-5	-0.273	4 525	0.69	818	3 707	0.7
	05-A3-I-2-6	-0.236	3 049	0.79	658	2 391	1.1
Armature 3	05-A3-I-3-7	-0.551	4 673	0.52	955	3 718	0.7
	05-A3-I-3-8	-0.551	3 106	0.61	1 130	1 976	1.3
	05-A3-I-3-9	-0.542	2 778	0.75	958	1 820	1.4
Dallette	Moyenne	-0.375	3 613		897	2 716	1.0
	Ecart-type	0.133	656		131	679	0.2

05-A3-I-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	05-A3-I-1-1	-0.262	4 785	0.99	1 700	3 085	0.8
	05-A3-I-1-2	-0.284	4 762	0.99	1 533	3 229	0.8
	05-A3-I-1-3	-0.330	4 808	0.99	1 700	3 108	0.8
Armature 2	05-A3-I-2-4	-0.254	3 759	0.99	1 361	2 378	1.1
	05-A3-I-2-5	-0.287	4 425	0.99	1 423	3 002	0.8
	05-A3-I-2-6	-0.338	4 149	0.99	1 475	2 674	1.0
Armature 3	05-A3-I-3-7	-0.157	9 804	0.99	1 580	8 224	0.3
	05-A3-I-3-8	-0.325	4 762	0.99	1 882	2 880	0.9
	05-A3-I-3-9	-0.231	6 250	0.99	2 295	3 955	0.6
Dallette	Moyenne	-0.274	5 278		1 663	3 615	0.8
	Ecart-type	0.057	1 828		284	1 781	0.2

05-A3-I-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	05-A3-I-1-1	-0.424	5 747	0.98	2 310	3 437	0.7
	05-A3-I-1-2	-0.393	5 747	0.97	2 170	3 577	0.7
	05-A3-I-1-3	-0.369	7 463	0.97	2 690	4 773	0.5
Armature 2	05-A3-I-2-4	-0.351	5 128	0.99	2 230	2 898	0.9
	05-A3-I-2-5	-0.349	4 878	0.99	2 260	2 618	1.0
	05-A3-I-2-6	-0.354	4 950	0.99	2 350	2 600	1.0
Armature 3	05-A3-I-3-7	-0.337	7 042	0.99	2 710	4 332	0.6
	05-A3-I-3-8	-0.332	6 803	0.98	2 980	3 823	0.7
	05-A3-I-3-9	-0.324	6 329	0.99	2 870	3 459	0.7
Dallette	Moyenne	-0.359	6 010		2 508	3 502	0.8
	Ecart-type	0.032	950		305	740	0.2

05-A3-I-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	05-A3-I-1-1	-0.456	3 992	1.00	3 010	982	2.6
	05-A3-I-1-2	-0.457	4 102	1.00	2 490	1 612	1.6
	05-A3-I-1-3	-0.442	6 451	0.99	4 000	2 451	1.0
Armature 2	05-A3-I-2-4	-0.417	5 421	1.00	3 520	1 901	1.3
	05-A3-I-2-5	-0.402	5 690	0.99	3 610	2 080	1.2
	05-A3-I-2-6	-0.403	5 120	0.99	3 350	1 770	1.4
Armature 3	05-A3-I-3-7	-0.476	7 273	0.97	4 110	3 163	0.8
	05-A3-I-3-8	-0.479	7 383	0.94	4 900	2 483	1.0
	05-A3-I-3-9	-0.488	6 485	0.93	4 610	1 875	1.4
Dallette	Moyenne	-0.447	5 769		3 733	2 035	1.4
	Ecart-type	0.033	1 241		760	617	0.5

05-A3-I-30M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	05-A3-I-1-1	-0.429	3 327	0.99	2 840	487	5.2
	05-A3-I-1-2	-0.451	4 102	0.99	2 680	1 422	1.8
	05-A3-I-1-3	-0.415	6 234	0.98	3 920	2 314	1.1
Armature 2	05-A3-I-2-4	-0.411	4 529	0.99	3 330	1 199	2.1
	05-A3-I-2-5	-0.415	4 585	0.99	3 240	1 345	1.9
	05-A3-I-2-6	-0.404	4 769	0.99	3 310	1 459	1.7
Armature 3	05-A3-I-3-7	-0.430	6 860	0.98	3 430	3 430	0.7
	05-A3-I-3-8	-0.439	6 683	0.98	4 270	2 413	1.1
	05-A3-I-3-9	-0.447	5 698	0.98	4 010	1 688	1.5
Dallette	Moyenne	-0.427	5 198		3 448	1 751	1.9
	Ecart-type	0.017	1 225		530	854	1.3

06-A3-I-15J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	06-A3-I-1-1	-0.383	9 174	0.93	6 570	2 604	1.0
	06-A3-I-1-2	-0.396	7 813	0.96	5 160	2 653	1.0
	06-A3-I-1-3	-0.415	9 259	0.92	5 310	3 949	0.6
Armature 2	06-A3-I-2-4	-0.509	6 494	0.96	4 330	2 164	1.2
	06-A3-I-2-5	-0.536	2 786	0.99	2 080	706	3.6
	06-A3-I-2-6	-0.529	3 378	0.99	2 480	898	2.8
Armature 3	06-A3-I-3-7	-0.424	9 259	0.93	4 320	4 939	0.5
	06-A3-I-3-8	-0.443	5 495	0.98	2 760	2 735	0.9
	06-A3-I-3-9	-0.453	5 000	0.98	2 940	2 060	1.2
Dallette	moyenne	-0.454	6 517		3 994	2 523	1.4
	écart-type	0.057	2 522		1 522	1 334	1.1

06-A3-I-15J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	06-A3-I-1-1	-0.375	3 367	0.77	1 170	2 197	1.2
	06-A3-I-1-2	-0.353	3 322	0.80	1 140	2 182	1.2
	06-A3-I-1-3	-0.348	3 953	0.84	1 300	2 653	1.0
Armature 2	06-A3-I-2-4	-0.446	2 770	0.83	1 010	1 760	1.4
	06-A3-I-2-5	-0.451	1 869	0.94	1 380	489	5.2
	06-A3-I-2-6	-0.450	2 564	0.99	600	1 964	1.3
Armature 3	06-A3-I-3-7	-0.533	4 049	0.75	1 250	2 799	0.9
	06-A3-I-3-8	-0.534	2 755	0.99	911	1 844	1.4
	06-A3-I-3-9	-0.530	2 817	0.77	1 030	1 787	1.4
Dallette	moyenne	-0.446	3 200		1 051	2 148	1.2
	écart-type	0.081	569		223	394	0.2

06-A3-I-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	06-A3-I-1-1	-0.314	4 184	0.99	1 457	2 727	0.9
	06-A3-I-1-2	-0.312	3 676	0.99	1 321	2 355	1.1
	06-A3-I-1-3	-0.332	3 802	0.99	1 404	2 398	1.1
Armature 2	06-A3-I-2-4	-0.369	2 809	0.99	1 230	1 579	1.6
	06-A3-I-2-5	-0.366	2 257	0.99	830	1 427	1.8
	06-A3-I-2-6	-0.377	2 809	0.99	765	2 044	1.2
Armature 3	06-A3-I-3-7	-0.371	5 181	0.99	1 492	3 689	0.7
	06-A3-I-3-8	-0.413	4 000	0.99	1 137	2 863	0.9
	06-A3-I-3-9	-0.335	5 348	0.99	1 401	3 947	0.6
Dallette	moyenne	-0.355	3 785		1 226	2 559	1.1
	écart-type	0.033	1 052		268	859	0.4

06-A3-I-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	06-A3-I-1-1	-0.330	4 348	0.99	1 640	2 708	0.9
	06-A3-I-1-2	-0.316	4 065	0.99	1 640	2 425	1.1
	06-A3-I-1-3	-0.320	4 464	0.99	1 700	2 764	0.9
Armature 2	06-A3-I-2-4	-0.348	3 448	0.99	1 340	2 108	1.2
	06-A3-I-2-5	-0.338	2 732	0.99	967	1 765	1.4
	06-A3-I-2-6	-0.345	3 663	0.99	1 086	2 577	1.0
Armature 3	06-A3-I-3-7	-0.301	6 135	0.99	1 844	4 291	0.6
	06-A3-I-3-8	-0.309	6 173	0.99	1 571	4 602	0.6
	06-A3-I-3-9	-0.294	6 757	0.99	1 658	5 099	0.5
Dallette	moyenne	-0.322	4 643		1 494	3 149	0.9
	écart-type	0.019	1 393		298	1 194	0.3

06-A3-I-30M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	06-A3-I-1-1	-0.398	4 533	0.99	3 060	1 478	1.7
	06-A3-I-1-2	-0.412	5 168	0.99	3 270	1 898	1.3
	06-A3-I-1-3	-0.431	5 422	0.99	3 730	1 692	1.5
Armature 2	06-A3-I-2-4	-0.413	4 580	0.99	2 950	1 630	1.6
	06-A3-I-2-5	-0.398	3 630	1.00	2 420	1 210	2.1
	06-A3-I-2-6	-0.403	4 675	0.99	3 310	1 365	1.9
Armature 3	06-A3-I-3-7	-0.430	6 397	0.99	3 750	2 647	1.0
	06-A3-I-3-8	-0.419	5 243	0.99	3 480	1 763	1.4
	06-A3-I-3-9	-0.409	5 206	0.99	2 870	2 336	1.1
Dallette	Moyenne	-0.412	4 984		3 204	1 779	1.5
	Ecart-type	0.012	761		430	461	0.4

06-A3-I-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	06-A3-I-1-1	-0.385	4 310	0.99	1 810	2 500	1.0
	06-A3-I-1-2	-0.360	4 367	0.99	1 880	2 487	1.0
	06-A3-I-1-3	-0.361	5 208	0.99	2 340	2 868	0.9
Armature 2	06-A3-I-2-4	-0.412	4 167	0.99	1 890	2 277	1.1
	06-A3-I-2-5	-0.406	2 660	0.99	1 210	1 450	1.8
	06-A3-I-2-6	-0.416	3 534	0.99	1 550	1 984	1.3
Armature 3	06-A3-I-3-7	-0.356	7 092	0.97	2 080	5 012	0.5
	06-A3-I-3-8	-0.313	6 250	0.99	1 680	4 570	0.6
	06-A3-I-3-9	-0.304	6 897	0.98	1 630	5 267	0.5
Dallette	Moyenne	-0.368	4 943		1 786	3 157	1.0
	Ecart-type	0.041	1 531		323	1 411	0.4

07-A3-I-1N1		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	07-A3-I-1-1	-0.370	3 367	0.99	2 147	1 220	2.1
	07-A3-I-1-2	-0.399	3 077	0.99	1 967	1 110	2.3
	07-A3-I-1-3	-0.424	4 310	1.00	2 218	2 092	1.2
Armature 2	07-A3-I-2-4	-0.422	6 061	0.99	1 953	4 108	0.6
	07-A3-I-2-5	-0.425	5 263	0.99	1 509	3 754	0.7
	07-A3-I-2-6	-0.419	6 369	0.99	2 077	4 292	0.6
Armature 3	07-A3-I-3-7	-0.365	5 917	0.99	2 976	2 941	0.9
	07-A3-I-3-8	-0.402	5 000	1.00	2 958	2 042	1.2
	07-A3-I-3-9	-0.387	6 757	0.99	3 409	3 348	0.8
Dallette	moyenne	-0.402	5 126		2 357	2 767	1.2
	écart-type	0.023	1 309		615	1 203	0.6

06-A3-I-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	06-A3-I-1-1	-0.436	4 605	0.98	2 780	1 825	1.4
	06-A3-I-1-2	-0.427	4 774	0.98	2 970	1 804	1.4
	06-A3-I-1-3	-0.450	4 339	0.98	3 080	1 259	2.0
Armature 2	06-A3-I-2-4	-0.361	4 474	0.98	2 500	1 974	1.3
	06-A3-I-2-5	-0.357	3 464	0.98	2 070	1 394	1.8
	06-A3-I-2-6	-0.365	3 917	0.98	2 590	1 327	1.9
Armature 3	06-A3-I-3-7	-0.459	5 843	0.96	3 160	2 663	1.0
	06-A3-I-3-8	-0.457	4 276	0.98	2 890	1 386	1.8
	06-A3-I-3-9	-0.444	4 464	0.98	2 770	1 694	1.5
Dallette	Moyenne	-0.417	4 462		2 757	1 705	1.6
	Ecart-type	0.043	649		335	446	0.4

08-A3-A-1N1		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	08-A3-A-1-1	-0.393	7 576	1.00	5 550	2 026	1.3
	08-A3-A-1-2	-0.410	5 882	1.00	4 300	1 582	1.6
	08-A3-A-1-3	-0.418	6 410	1.00	4 610	1 800	1.4
Armature 2	08-A3-A-2-4	-0.423	4 505	1.00	3 210	1 295	2.0
	08-A3-A-2-5	-0.432	3 650	1.00	2 660	990	2.6
	08-A3-A-2-6	-0.434	4 929	1.00	3 100	1 229	2.1
Armature 3	08-A3-A-3-7	-0.407	6 944	1.00	5 240	1 704	1.5
	08-A3-A-3-8	-0.389	7 463	1.00	5 070	2 393	1.1
	08-A3-A-3-9	-0.387	8 621	1.00	4 600	4 021	0.6
Dallette	moyenne	-0.410	6 153		4 260	1 893	1.6
	écart-type	0.018	1 692		1 032	905	0.6

08-A3-A-15J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	08-A3-A-1-1	-0.399	3 322	0.81	1 260	2 062	1.2
	08-A3-A-1-2	-0.393	2 907	0.84	1 250	1 657	1.5
	08-A3-A-1-3	-0.392	3 058	0.82	1 430	1 628	1.6
Armature 2	08-A3-A-2-4	-0.373	2 105	0.95	924	1 181	2.2
	08-A3-A-2-5	-0.382	2 304	0.93	885	1 419	1.8
	08-A3-A-2-6	-0.368	2 358	0.94	884	1 474	1.7
Armature 3	08-A3-A-3-7	-0.322	3 663	0.85	1 990	1 673	1.5
	08-A3-A-3-8	-0.323	4 237	0.81	1 940	2 297	1.1
	08-A3-A-3-9	-0.318	4 049	0.85	1 580	2 469	1.0
Dallette	moyenne	-0.363	3 112		1 349	1 762	1.5
	écart-type	0.033	772		426	426	0.4

08-A3-A-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	08-A3-A-1-1	-0.349	3 597	0.99	1 360	2 237	1.2
	08-A3-A-1-2	-0.334	3 425	0.99	1 278	2 147	1.2
	08-A3-A-1-3	-0.331	3 690	0.99	1 437	2 253	1.2
Armature 2	08-A3-A-2-4	-0.416	2 070	0.99	945	1 125	2.3
	08-A3-A-2-5	-0.395	1 848	0.99	953	895	2.9
	08-A3-A-2-6	-0.379	1 984	0.99	970	1 014	2.6
Armature 3	08-A3-A-3-7	-0.260	4 329	0.99	2 016	2 313	1.1
	08-A3-A-3-8	-0.260	4 219	0.99	1 695	2 524	1.0
	08-A3-A-3-9	-0.259	4 587	0.99	1 700	2 887	0.9
Dallette	moyenne	-0.331	3 306		1 373	1 933	1.6
	écart-type	0.060	1 070		381	726	0.8

08-A3-A-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	08-A3-A-1-1	-0.296	5 000	0.99	1 917	3 083	0.8
	08-A3-A-1-2	-0.282	5 000	0.99	1 900	3 100	0.8
	08-A3-A-1-3	-0.261	5 618	0.99	2 028	3 590	0.7
Armature 2	08-A3-A-2-4	-0.345	2 841	0.99	1 250	1 591	1.6
	08-A3-A-2-5	-0.331	2 890	0.99	1 500	1 390	1.9
	08-A3-A-2-6	-0.323	3 195	0.99	1 424	1 771	1.5
Armature 3	08-A3-A-3-7	-0.249	5 650	0.99	2 830	2 820	0.9
	08-A3-A-3-8	-0.226	6 098	0.99	3 030	3 068	0.8
	08-A3-A-3-9	-0.280	7 246	0.99	3 238	4 008	0.6
Dallette	moyenne	-0.288	4 838		2 124	2 713	1.1
	écart-type	0.040	1 549		734	920	0.4

08-A3-A-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	08-A3-A-1-1	-0.362	7 692	0.98	2 900	4 792	0.5
	08-A3-A-1-2	-0.346	7 143	0.98	3 130	4 013	0.6
	08-A3-A-1-3	-0.314	5 780	0.99	2 360	3 420	0.8
Armature 2	08-A3-A-2-4	-0.367	4 525	0.99	2 290	2 235	1.2
	08-A3-A-2-5	-0.381	4 739	0.99	2 810	1 929	1.3
	08-A3-A-2-6	-0.373	4 505	0.99	1 720	2 785	0.9
Armature 3	08-A3-A-3-7	-0.312	8 130	0.99	4 430	3 700	0.7
	08-A3-A-3-8	-0.303	8 264	0.98	4 610	3 654	0.7
	08-A3-A-3-9	-0.314	8 850	0.98	4 300	4 550	0.6
Dallette	Moyenne	-0.341	6 625		3 172	3 453	0.8
	Ecart-type	0.031	1 749		1 041	979	0.3

08-A3-A-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	08-A3-A-1-1	-0.467	3 832	0.97	2 440	1 392	1.8
	08-A3-A-1-2	-0.490	4 478	0.96	3 030	1 448	1.8
	08-A3-A-1-3	-0.487	3 658	0.98	2 020	1 638	1.6
Armature 2	08-A3-A-2-4	-0.462	5 229	0.94	3 260	1 969	1.3
	08-A3-A-2-5	-0.479	4 272	0.95	2 830	1 442	1.8
	08-A3-A-2-6	-0.449	3 956	0.96	2 430	1 526	1.7
Armature 3	08-A3-A-3-7	-0.456	5 430	0.93	3 520	1 910	1.3
	08-A3-A-3-8	-0.451	5 541	0.93	3 750	1 791	1.4
	08-A3-A-3-9	-0.450	5 686	0.93	3 210	2 476	1.0
Dallette	Moyenne	-0.466	4 676		2 943	1 732	1.5
	Ecart-type	0.016	799		564	349	0.3

08-A3-A-30M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	08-A3-A-1-1	-0.430	3 506	1.00	2 470	1 036	2.5
	08-A3-A-1-2	-0.457	4 663	1.00	3 150	1 513	1.7
	08-A3-A-1-3	-0.453	4 207	1.00	2 440	1 767	1.4
Armature 2	08-A3-A-2-4	-0.377	5 578	1.00	3 220	2 358	1.1
	08-A3-A-2-5	-0.395	5 072	1.00	3 170	1 902	1.3
	08-A3-A-2-6	-0.375	4 754	1.00	2 550	2 204	1.2
Armature 3	08-A3-A-3-7	-0.450	5 126	1.00	3 350	1 776	1.4
	08-A3-A-3-8	-0.444	6 461	1.00	3 960	2 501	1.0
	08-A3-A-3-9	-0.449	5 873	1.00	3 510	2 363	1.1
Dallette	Moyenne	-0.426	5 027		3 091	1 936	1.4
	Ecart-type	0.034	886		516	474	0.4

09-A3-A-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	09-A3-A-1-1	-0.338	6 410	0.99	5 140	1 270	2.0
	09-A3-A-1-2	-0.361	5 263	0.99	3 890	1 373	1.9
	09-A3-A-1-3	-0.396	5 747	0.99	4 460	1 287	2.0
Armature 2	09-A3-A-2-4	-0.349	8 850	0.99	5 940	2 910	0.9
	09-A3-A-2-5	-0.376	6 061	0.99	3 860	2 181	1.2
	09-A3-A-2-6	-0.399	6 897	0.99	4 500	2 397	1.1
Armature 3	09-A3-A-3-7	-0.242	10 460	0.99	3 820	6 640	0.4
	09-A3-A-3-8	-0.254	9 174	0.99	3 210	5 964	0.4
	09-A3-A-3-9	-0.271	9 346	0.99	3 720	5 626	0.5
Dallette	moyenne	-0.332	7 579		4 284	3 294	1.1
	écart-type	0.061	1 885		834	2 173	0.7

09-A3-A-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	09-A3-A-1-1	-0.370	3 984	0.98	1 210	2 774	0.9
	09-A3-A-1-2	-0.373	4 000	0.98	1 448	2 552	1.0
	09-A3-A-1-3	-0.373	3 861	0.99	1 693	2 168	1.2
Armature 2	09-A3-A-2-4	-0.309	5 495	0.98	1 300	4 195	0.6
	09-A3-A-2-5	-0.339	5 208	0.98	1 865	3 343	0.8
	09-A3-A-2-6	-0.333	5 650	0.97	1 900	3 750	0.7
Armature 3	09-A3-A-3-7	-0.307	6 369	0.98	1 115	5 254	0.5
	09-A3-A-3-8	-0.310	5 988	0.99	2 229	3 759	0.7
	09-A3-A-3-9	-0.318	6 173	0.97	2 037	4 136	0.6
Dallette	moyenne	-0.337	5 192		1 644	3 548	0.8
	écart-type	0.028	996		393	955	0.2

09-A3-A-15J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	09-A3-A-1-1	-0.357	1 934	0.62	552	1 382	1.8
	09-A3-A-1-2	-0.352	2 331	1.00	697	1 634	1.6
	09-A3-A-1-3	-0.339	3 690	0.26	740	2 950	0.9
Armature 2	09-A3-A-2-4	-0.336					
	09-A3-A-2-5	-0.337	4 149	0.22	1 110	3 039	0.8
	09-A3-A-2-6	-0.325	10 515	0.04	1 120	9 395	0.3
Armature 3	09-A3-A-3-7	-0.311					
	09-A3-A-3-8	-0.313	26 042	0.01	884	25 158	0.1
	09-A3-A-3-9	-0.304	3 636	0.25	991	2 645	1.0
Dallette	moyenne	-0.330	7 471		871	6 601	0.9
	écart-type	0.018	8 672		217	8 619	0.6

09-A3-A-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	09-A3-A-1-1	-0.385	5 682	0.99	2 000	3 682	0.7
	09-A3-A-1-2	-0.373	5 988	0.99	2 290	3 698	0.7
	09-A3-A-1-3	-0.362	5 882	0.98	1 730	4 152	0.6
Armature 2	09-A3-A-2-4	-0.323	7 874	0.99	3 330	4 544	0.6
	09-A3-A-2-5	-0.334	7 634	0.99	4 250	3 384	0.8
	09-A3-A-2-6	-0.329	7 246	0.99	4 020	3 226	0.8
Armature 3	09-A3-A-3-7	-0.316	10 449	0.98	4 460	5 989	0.4
	09-A3-A-3-8	-0.322	10 288	0.99	4 670	5 618	0.5
	09-A3-A-3-9	-0.317	11 198	0.99	5 250	5 948	0.4
Dallette	Moyenne	-0.340	8 027		3 556	4 471	0.6
	Ecart-type	0.026	2 124		1 276	1 110	0.1

09-A3-A-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	09-A3-A-1-1	-0.304	4 444	0.97	1 032	3 412	0.7
	09-A3-A-1-2	-0.307	4 082	0.99	941	3 141	0.8
	09-A3-A-1-3	-0.290	4 386	0.95	870	3 516	0.7
Armature 2	09-A3-A-2-4	-0.341	4 292	0.99	1 242	3 050	0.8
	09-A3-A-2-5	-0.358	4 566	0.99	1 587	2 979	0.9
	09-A3-A-2-6	-0.339	4 762	0.99	1 641	3 121	0.8
Armature 3	09-A3-A-3-7	-0.280	6 711	0.99	1 400	5 311	0.5
	09-A3-A-3-8	-0.329	6 494	0.91	1 400	5 094	0.5
	09-A3-A-3-9	-0.265	5 291	0.99	1 551	3 740	0.7
Dallette	moyenne	-0.312	5 003		1 296	3 707	0.7
	écart-type	0.031	970		289	884	0.1

09-A3-A-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	09-A3-A-1-1	-0.448	3 284	0.99	1 650	1 634	1.6
	09-A3-A-1-2	-0.464	3 754	0.98	1 940	1 814	1.4
	09-A3-A-1-3	-0.449	3 652	0.98	1 980	1 672	1.5
Armature 2	09-A3-A-2-4	-0.470	3 734	0.98	2 160	1 574	1.6
	09-A3-A-2-5	-0.469	2 974	0.99	1 930	1 044	2.4
	09-A3-A-2-6	-0.466	3 939	0.98	2 400	1 539	1.7
Armature 3	09-A3-A-3-7	-0.410	6 826	0.93	2 500	4 326	0.6
	09-A3-A-3-8	-0.408	6 527	0.92	3 060	3 467	0.7
	09-A3-A-3-9	-0.419	6 209	0.91	2 770	3 439	0.7
Dallette	Moyenne	-0.445	4 544		2 266	2 279	1.4
	Ecart-type	0.026	1 517		454	1 147	0.6

09-A3-A-30M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	09-A3-A-1-1	-0.413	3 870	1.00	2 150	1 720	1.5
	09-A3-A-1-2	-0.438	4 915	1.00	2 580	2 335	1.1
	09-A3-A-1-3	-0.429	4 425	1.00	2 450	1 975	1.3
Armature 2	09-A3-A-2-4	-0.427	3 943	1.00	2 600	1 343	1.9
	09-A3-A-2-5	-0.424	3 832	1.00	2 430	1 402	1.8
	09-A3-A-2-6	-0.421	5 312	0.99	3 290	2 022	1.3
Armature 3	09-A3-A-3-7	-0.416	7 556	0.98	3 060	4 496	0.6
	09-A3-A-3-8	-0.400	6 949	0.98	3 100	3 849	0.7
	09-A3-A-3-9	-0.418	7 724	0.98	3 660	4 064	0.6
Dalette	Moyenne	-0.421	5 392		2 813	2 579	1.2
	Écart-type	0.011	1 603		488	1 219	0.5

10-A3-A-1N1		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	10-A3-A-1-1	-0.376	6 211	1.00	4 840	1 371	1.9
	10-A3-A-1-2	-0.380	5 076	1.00	3 210	1 866	1.4
	10-A3-A-1-3	-0.389	5 076	1.00	3 250	1 826	1.4
Armature 2	10-A3-A-2-4	-0.452	4 854	1.00	2 980	1 874	1.4
	10-A3-A-2-5	-0.474	2 695	1.00	1 860	835	3.1
	10-A3-A-2-6	-0.467	3 690	1.00	2 320	1 370	1.9
Armature 3	10-A3-A-3-7	-0.415	6 897	1.00	3 270	3 627	0.7
	10-A3-A-3-8	-0.414	5 000	1.00	2 340	2 660	1.0
	10-A3-A-3-9	-0.426	5 814	1.00	2 970	2 844	0.9
Dalette	moyenne	-0.421	5 035		3 004	2 030	1.5
	écart-type	0.037	1 264		849	866	0.7

10-A3-A-15J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	10-A3-A-1-1	-0.331	3 003	0.76	1 060	1 943	1.3
	10-A3-A-1-2	-0.323	3 021	0.84	925	2 096	1.2
	10-A3-A-1-3	-0.336	3 012	0.81	1 050	1 982	1.3
Armature 2	10-A3-A-2-4	-0.333	3 030	0.82	834	2 196	1.2
	10-A3-A-2-5	-0.335	2 786	0.87	758	2 028	1.3
	10-A3-A-2-6	-0.342	3 012	0.87	814	2 198	1.2
Armature 3	10-A3-A-3-7	-0.331	4 329	0.75	1 290	3 039	0.8
	10-A3-A-3-8	-0.323	4 219	0.77	1 180	3 039	0.8
	10-A3-A-3-9	-0.343	4 219	0.77	1 500	2 719	0.9
Dalette	moyenne	-0.333	3 404		1 046	2 358	1.1
	écart-type	0.007	644		245	450	0.2

10-A3-A-10S		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	10-A3-A-1-1	-0.318	3 584	0.99	1 100	2 484	1.0
	10-A3-A-1-2	-0.309	3 546	0.99	956	2 590	1.0
	10-A3-A-1-3	-0.315	3 704	0.99	1 070	2 634	1.0
Armature 2	10-A3-A-2-4	-0.429	1 980	1.00	879	1 101	2.3
	10-A3-A-2-5	-0.426	1 647	1.00	783	864	2.9
	10-A3-A-2-6	-0.421	1 855	1.00	913	942	2.7
Armature 3	10-A3-A-3-7	-0.374	3 984	0.99	1 328	2 656	1.0
	10-A3-A-3-8	-0.370	3 571	0.99	1 187	2 384	1.1
	10-A3-A-3-9	-0.382	3 968	0.99	1 562	2 406	1.1
Dalette	moyenne	-0.372	3 093		1 086	2 007	1.6
	écart-type	0.048	966		244	786	0.8

10-A3-A-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	10-A3-A-1-1	-0.237	6 410	0.99	2 147	4 263	0.6
	10-A3-A-1-2	-0.230	6 849	0.99	1 967	4 882	0.5
	10-A3-A-1-3	-0.223	6 623	0.99	2 218	4 405	0.6
Armature 2	10-A3-A-2-4	-0.298	4 329	0.99	1 953	2 376	1.1
	10-A3-A-2-5	-0.283	3 953	0.99	1 509	2 444	1.0
	10-A3-A-2-6	-0.284	4 902	0.99	2 077	2 825	0.9
Armature 3	10-A3-A-3-7	-0.304	6 536	0.99	2 976	3 560	0.7
	10-A3-A-3-8	-0.268	6 944	0.99	2 958	3 986	0.6
	10-A3-A-3-9	-0.322	6 289	0.99	3 409	2 880	0.9
Dalette	moyenne	-0.272	5 871		2 357	3 513	0.8
	écart-type	0.035	1 150		615	920	0.2

10-A3-A-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	10-A3-A-1-1	-0.303	10 173	0.99	3 480	6 693	0.4
	10-A3-A-1-2	-0.289	9 174	0.99	2 900	6 274	0.4
	10-A3-A-1-3	-0.282	9 346	0.99	3 490	5 856	0.4
Armature 2	10-A3-A-2-4	-0.343	6 329	0.99	3 460	2 869	0.9
	10-A3-A-2-5	-0.334	4 926	0.99	2 360	2 566	1.0
	10-A3-A-2-6	-0.353	6 024	0.99	3 210	2 814	0.9
Armature 3	10-A3-A-3-7	-0.356	9 709	0.98	5 220	4 489	0.6
	10-A3-A-3-8	-0.357	8 000	0.98	4 160	3 840	0.7
	10-A3-A-3-9	-0.366	9 174	0.98	5 820	3 354	0.8
Dalette	Moyenne	-0.331	8 095		3 789	4 306	0.7
	Écart-type	0.032	1 880		1 105	1 599	0.2

10-A3-A-24M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	10-A3-A-1-1	-0.447	4 236	1.00	2 560	1 676	1.5
	10-A3-A-1-2	-0.450	3 828	1.00	2 210	1 618	1.6
	10-A3-A-1-3	-0.444	4 566	1.00	2 490	2 076	1.2
Armature 2	10-A3-A-2-4	-0.466	4 748	1.00	2 760	1 988	1.3
	10-A3-A-2-5	-0.468	4 389	1.00	2 910	1 479	1.7
	10-A3-A-2-6	-0.462	4 338	1.00	2 370	1 968	1.3
Armature 3	10-A3-A-3-7	-0.499	5 715	0.97	3 770	1 945	1.3
	10-A3-A-3-8	-0.495	4 531	0.97	3 020	1 511	1.7
	10-A3-A-3-9	-0.506	5 330	0.95	3 390	1 940	1.3
Dalle	Moyenne	-0.471	4 631		2 831	1 800	1.4
	Ecart-type	0.024	574		504	228	0.2

10-A3-A-30M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	10-A3-A-1-1	-0.386	3 815	0.99	2 270	1 545	1.7
	10-A3-A-1-2	-0.401	3 801	1.00	2 300	1 501	1.7
	10-A3-A-1-3	-0.402	4 611	0.96	2 390	2 221	1.1
Armature 2	10-A3-A-2-4	-0.422	4 352	1.00	2 190	2 162	1.2
	10-A3-A-2-5	-0.417	3 816	1.00	2 280	1 536	1.7
	10-A3-A-2-6	-0.418	4 317	0.99	2 120	2 197	1.2
Armature 3	10-A3-A-3-7	-0.445	4 456	0.99	2 760	1 696	1.5
	10-A3-A-3-8	-0.438	3 860	1.00	2 180	1 680	1.5
	10-A3-A-3-9	-0.439	4 610	1.00	2 920	1 690	1.5
Dalle	Moyenne	-0.419	4 182		2 379	1 803	1.4
	Ecart-type	0.020	355		276	301	0.2

11-A3-A-1N1		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	11-A3-A-1-1	-0.340	7 353	1.00	4 710	2 643	1.0
	11-A3-A-1-2	-0.360	5 988	1.00	3 770	2 218	1.1
	11-A3-A-1-3	-0.389	5 587	1.00	3 680	1 907	1.3
Armature 2	11-A3-A-2-4	-0.410	3 546	1.00	2 650	896	2.8
	11-A3-A-2-5	-0.432	3 745	1.00	2 390	1 355	1.9
	11-A3-A-2-6	-0.443	3 831	1.00	2 290	1 541	1.7
Armature 3	11-A3-A-3-7	-0.324	5 682	1.00	3 590	2 092	1.2
	11-A3-A-3-8	-0.366	4 878	1.00	2 990	1 888	1.4
	11-A3-A-3-9	-0.398	4 132	1.00	3 160	972	2.6
Dalle	moyenne	-0.385	4 971		3 248	1 724	1.7
	écart-type	0.040	1 281		775	581	0.7

Annexe 8 : Résultats électrochimiques des dallettes "A6" pour chaque échéance

12-A6-S-INI		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	12-A6-S-1-1	-0.163	322 581	0.54	1 430	321 151	0.004
	12-A6-S-1-2	-0.158	442 478	0.41	1 820	440 658	0.003
	12-A6-S-1-3	-0.155	476 190	0.32	1 810	474 380	0.003
Armature 2	12-A6-S-2-4	-0.132	588 235	0.28	1 560	586 675	0.002
	12-A6-S-2-5	-0.144	662 252	0.26	1 890	660 362	0.002
	12-A6-S-2-6	-0.147	806 452	0.17	2 120	804 332	0.002
Armature 3	12-A6-S-3-7	-0.088	353 357	0.49	1 850	351 507	0.004
	12-A6-S-3-8	-0.094	380 228	0.43	1 840	378 388	0.003
	12-A6-S-3-9	-0.105	353 357	0.48	1 930	351 427	0.004
Dallette	moyenne	-0.132	487 237		1 806	485 431	0.003
	écart-type	0.029	165 554		202	165 459	0.001

13-A6-I-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	13-A6-I-1-1	-0.422	4 902	0.82	3 510	1 392	0.9
	13-A6-I-1-2	-0.397	4 673	0.86	3 320	1 353	0.9
	13-A6-I-1-3	-0.389	5 650	0.83	3 930	1 720	0.7
Armature 2	13-A6-I-2-4	-0.381	3 597	0.92	2 700	897	1.4
	13-A6-I-2-5	-0.374	3 861	0.91	2 790	1 071	1.2
	13-A6-I-2-6	-0.372	4 115	0.90	3 040	1 075	1.2
Armature 3	13-A6-I-3-7	-0.368	4 167	0.89	3 140	1 027	1.2
	13-A6-I-3-8	-0.370	3 876	0.91	3 030	846	1.5
	13-A6-I-3-9	-0.369	4 098	0.89	3 230	868	1.5
Dallette	moyenne	-0.382	4 327		3 188	1 139	1.2
	écart-type	0.018	640		374	293	0.3

13-A6-I-INI (après-corrosion-accéléérées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	13-A6-I-1-1	-0.459	2 663	1.00	2 370	293	4.3
	13-A6-I-1-2	-0.447	3 098	0.99	2 640	458	2.8
	13-A6-I-1-3	-0.436	2 951	1.00	2 550	411	3.1
Armature 2	13-A6-I-2-4	-0.512	2 367	1.00	2 090	277	4.6
	13-A6-I-2-5	-0.507	2 585	1.00	2 320	285	4.8
	13-A6-I-2-6	-0.509	2 854	0.99	2 570	264	4.5
Armature 3	13-A6-I-3-7	-0.511	2 630	1.00	2 340	290	4.4
	13-A6-I-3-8	-0.530	2 604	1.00	2 330	274	4.7
	13-A6-I-3-9	-0.526	2 634	1.00	2 350	284	4.5
Dallette	moyenne	-0.493	2 711		2 396	315	4.2
	écart-type	0.036	222		167	69	0.7

13-A6-I-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	13-A6-I-1-1	-0.281	2 319	1.00	1 540	779	1.6
	13-A6-I-1-2	-0.279	2 355	1.00	1 610	745	1.7
	13-A6-I-1-3	-0.269	2 674	1.00	1 880	794	1.6
Armature 2	13-A6-I-2-4	-0.273	1 681	1.00	764	917	1.4
	13-A6-I-2-5	-0.270	1 966	1.00	1 290	676	1.9
	13-A6-I-2-6	-0.274	1 879	1.00	891	988	1.3
Armature 3	13-A6-I-3-7	-0.453	2 395	0.99	1 190	1 205	1.1
	13-A6-I-3-8	-0.282	1 709	1.00	949	760	1.7
	13-A6-I-3-9	-0.272	1 985	1.00	1 230	755	1.7
Dallette	moyenne	-0.295	2 107		1 260	847	1.5
	écart-type	0.059	342		366	165	0.3

13-A6-I-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	13-A6-I-1-1	-0.327	2 822	0.99	1 770	1 052	1.2
	13-A6-I-1-2	-0.312	2 869	1.00	1 880	989	1.3
	13-A6-I-1-3	-0.307	3 230	1.00	2 200	1 030	1.2
Armature 2	13-A6-I-2-4	-0.310	2 057	1.00	1 090	967	1.3
	13-A6-I-2-5	-0.304	2 099	1.00	1 310	789	1.6
	13-A6-I-2-6	-0.301	2 379	1.00	1 230	1 149	1.1
Armature 3	13-A6-I-3-7	-0.301	2 429	1.00	1 460	969	1.3
	13-A6-I-3-8	-0.294	2 061	1.00	1 230	831	1.5
	13-A6-I-3-9	-0.290	2 365	1.00	1 600	765	1.7
Dallette	moyenne	-0.305	2 479		1 530	949	1.4
	écart-type	0.011	412		364	129	0.2

13-A6-I-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	13-A6-I-1-1	-0.269	3 230	1.00	1 990	1 240	1.0
	13-A6-I-1-2	-0.254	3 405	1.00	2 290	1 115	1.1
	13-A6-I-1-3	-0.251	3 784	1.00	2 610	1 174	1.1
Armature 2	13-A6-I-2-4	-0.249	2 472	1.00	1 320	1 152	1.1
	13-A6-I-2-5	-0.233	2 235	1.00	1 440	795	1.6
Armature 3	13-A6-I-2-6	-0.248	2 949	1.00	1 510	1 439	0.9
	13-A6-I-3-7	-0.237	2 836	1.00	1 710	1 126	1.1
	13-A6-I-3-8	-0.235	2 474	1.00	1 520	954	1.3
Dallette	13-A6-I-3-9	-0.236	2 996	1.00	1 990	1 036	1.2
	moyenne	-0.246	2 931		1 817	1 115	1.2
	écart-type	0.012	495		431	180	0.2

13-A6-I-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	13-A6-I-1-1	-0.350	3 856	0.99	2 320	1 536	0.8
	13-A6-I-1-2	-0.334	4 195	0.99	2 590	1 605	0.8
	13-A6-I-1-3	-0.330	4 526	0.98	3 000	1 526	0.8
Armature 2	13-A6-I-2-4	-0.334	3 003	0.99	1 750	1 253	1.0
	13-A6-I-2-5	-0.320	2 820	0.99	1 830	990	1.3
Armature 3	13-A6-I-2-6	-0.323	3 303	0.98	1 890	1 413	0.9
	13-A6-I-3-7	-0.312	3 137	0.98	1 950	1 187	1.1
	13-A6-I-3-8	-0.312	2 864	0.98	1 890	974	1.3
Dallette	13-A6-I-3-9	-0.309	3 172	0.98	2 170	1 002	1.3
	moyenne	-0.325	3 431		2 154	1 276	1.0
	écart-type	0.013	614		416	253	0.2

15-A6-I-avant-corrosion-accelerées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	15-A6-I-1-1	-0.399	5 319	0.80	3 350	1 969	0.6
	15-A6-I-1-2	-0.398	3 968	0.90	2 660	1 308	1.0
	15-A6-I-1-3	-0.395	4 405	0.89	2 940	1 465	0.9
Armature 2	15-A6-I-2-4	-0.371	4 098	0.90	2 820	1 278	1.0
	15-A6-I-2-5	-0.362	3 344	0.93	2 320	1 024	1.2
Armature 3	15-A6-I-2-6	-0.352	4 292	0.89	3 040	1 252	1.0
	15-A6-I-3-7	-0.343	4 902	0.84	3 300	1 602	0.8
	15-A6-I-3-8	-0.339	4 255	0.88	2 710	1 545	0.8
Dallette	15-A6-I-3-9	-0.332	4 386	0.86	2 940	1 446	0.9
	moyenne	-0.366	4 330		2 898	1 432	0.9
	écart-type	0.026	556		320	267	0.2

15-A6-I-INI (après-corrosion-accelerées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	15-A6-I-1-1	-0.451	2 975	0.99	2 700	275	4.6
	15-A6-I-1-2	-0.461	2 432	0.99	2 210	222	5.7
	15-A6-I-1-3	-0.450	2 479	1.00	2 150	329	3.9
Armature 2	15-A6-I-2-4	-0.465	2 676	1.00	2 390	286	4.5
	15-A6-I-2-5	-0.470	2 532	1.00	2 260	272	4.7
Armature 3	15-A6-I-2-6	-0.457	2 656	1.00	2 400	256	5.0
	15-A6-I-3-7	-0.430	2 878	1.00	2 510	368	3.5
	15-A6-I-3-8	-0.425	2 329	1.00	2 060	269	4.7
Dallette	15-A6-I-3-9	-0.424	2 557	1.00	2 290	267	4.8
	moyenne	-0.448	2 613		2 330	283	4.6
	écart-type	0.018	209		195	42	0.6

15-A6-I-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	15-A6-I-1-1	-0.332	2 225	1.00	1 550	675	1.9
	15-A6-I-1-2	-0.332	2 061	1.00	1 110	951	1.3
	15-A6-I-1-3	-0.324	2 377	1.00	1 110	1 267	1.0
Armature 2	15-A6-I-2-4	-0.318	2 025	1.00	1 010	1 015	1.3
	15-A6-I-2-5	-0.317	1 897	1.00	947	950	1.3
Armature 3	15-A6-I-2-6	-0.308	2 112	1.00	1 230	882	1.4
	15-A6-I-3-7	-0.313	2 540	0.99	1 500	1 040	1.2
	15-A6-I-3-8	-0.304	2 155	1.00	1 170	985	1.3
Dallette	15-A6-I-3-9	-0.305	1 948	0.99	1 080	868	1.5
	moyenne	-0.317	2 149		1 190	959	1.4
	écart-type	0.011	206		207	158	0.2

15-A6-I-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	15-A6-I-1-1	-0.262	2 673	1.00	1 580	1 093	1.2
	15-A6-I-1-2	-0.251	2 145	1.00	1 120	1 025	1.2
	15-A6-I-1-3	-0.252	2 404	1.00	1 190	1 214	1.0
Armature 2	15-A6-I-2-4	-0.250	2 160	1.00	1 080	1 080	1.2
	15-A6-I-2-5	-0.240	1 856	1.00	926	930	1.4
Armature 3	15-A6-I-2-6	-0.240	2 156	1.00	1 360	796	1.6
	15-A6-I-3-7	-0.244	2 483	1.00	1 440	1 043	1.2
	15-A6-I-3-8	-0.235	1 962	1.00	1 110	852	1.5
Dallette	15-A6-I-3-9	-0.250	2 132	1.00	1 220	912	1.4
	moyenne	-0.247	2 219		1 225	994	1.3
	écart-type	0.008	257		202	132	0.2

15-A6-I-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	15-A6-I-1-1	-0.248	3 062	1.00	1 850	1 212	1.1
	15-A6-I-1-2	-0.234	2 326	1.00	1 230	1 096	1.2
	15-A6-I-1-3	-0.233	2 520	1.00	1 250	1 270	1.0
Armature 2	15-A6-I-2-4	-0.240	2 499	1.00	1 350	1 149	1.1
	15-A6-I-2-5	-0.239	2 222	1.00	1 190	1 032	1.2
	15-A6-I-2-6	-0.234	2 388	1.00	1 510	878	1.5
Armature 3	15-A6-I-3-7	-0.234	2 786	1.00	1 670	1 116	1.1
	15-A6-I-3-8	-0.241	2 330	1.00	1 370	960	1.3
	15-A6-I-3-9	-0.233	2 195	1.00	1 300	895	1.4
Dallette	moyenne	-0.237	2 481		1 413	1 068	1.2
	écart-type	0.005	282		222	137	0.2

15-A6-I-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	15-A6-I-1-1	-0.298	4 126	0.93	2 290	1 836	0.7
	15-A6-I-1-2	-0.287	3 331	0.99	1 710	1 621	0.8
	15-A6-I-1-3	-0.288	3 571	0.97	1 760	1 811	0.7
Armature 2	15-A6-I-2-4	-0.282	3 225	0.99	1 690	1 535	0.8
	15-A6-I-2-5	-0.279	2 993	0.99	1 610	1 383	0.9
	15-A6-I-2-6	-0.261	3 139	0.98	1 990	1 149	1.1
Armature 3	15-A6-I-3-7	-0.271	3 298	0.98	2 020	1 278	1.0
	15-A6-I-3-8	-0.265	2 962	0.99	1 720	1 242	1.0
	15-A6-I-3-9	-0.251	2 666	0.99	1 630	1 036	1.2
Dallette	moyenne	-0.276	3 257		1 824	1 432	0.9
	écart-type	0.015	415		227	285	0.2

17-A6-C-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	17-A6-C-1-1	-0.437	4 237	0.93	2 630	1 607	0.8
	17-A6-C-1-2	-0.424	4 348	0.93	3 120	1 228	1.0
	17-A6-C-1-3	-0.410	5 128	0.90	3 410	1 718	0.7
Armature 2	17-A6-C-2-4	-0.406	3 704	0.94	2 500	1 204	1.1
	17-A6-C-2-5	-0.384	3 597	0.94	2 440	1 157	1.1
	17-A6-C-2-6	-0.377	4 695	0.90	3 290	1 405	0.9
Armature 3	17-A6-C-3-7	-0.373	4 310	0.91	2 980	1 330	1.0
	17-A6-C-3-8	-0.363	4 237	0.90	3 060	1 177	1.1
	17-A6-C-3-9	-0.359	4 329	0.90	3 260	1 069	1.2
Dallette	moyenne	-0.393	4 287		2 966	1 322	1.0
	écart-type	0.028	461		358	218	0.1

17-A6-C-1NI (après-corrosion-accéléérées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	17-A6-C-1-1	-0.484	2 207	1.00	1 960	247	5.2
	17-A6-C-1-2	-0.503	2 667	1.00	2 330	337	3.8
	17-A6-C-1-3	-0.500	3 001	1.00	2 580	421	3.0
Armature 2	17-A6-C-2-4	-0.495	2 399	1.00	2 140	259	4.9
	17-A6-C-2-5	-0.508	2 307	1.00	1 980	327	3.9
	17-A6-C-2-6	-0.501	2 942	1.00	2 540	402	3.2
Armature 3	17-A6-C-3-7	-0.486	2 644	1.00	2 330	314	4.1
	17-A6-C-3-8	-0.502	2 905	1.00	2 530	375	3.4
	17-A6-C-3-9	-0.508	2 915	1.00	2 530	385	3.3
Dallette	moyenne	-0.499	2 665		2 324	341	3.9
	écart-type	0.009	300		245	61	0.8

17-A6-C-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	17-A6-C-1-1	-0.494	2 030	1.00	1 780	250	5.1
	17-A6-C-1-2	-0.495	1 747	0.99	1 600	147	8.7
	17-A6-C-1-3	-0.497	2 108	0.99	1 910	198	6.5
Armature 2	17-A6-C-2-4	-0.491	1 613	0.99	1 480	133	9.6
	17-A6-C-2-5	-0.495	1 434	1.00	1 280	154	8.3
	17-A6-C-2-6	-0.494	1 904	0.99	1 730	174	7.3
Armature 3	17-A6-C-3-7	-0.486	1 983	0.99	1 790	193	6.6
	17-A6-C-3-8	-0.491	1 852	0.99	1 660	192	6.7
	17-A6-C-3-9	-0.500	2 230	0.99	2 040	190	6.7
Dallette	moyenne	-0.494	1 878		1 697	181	7.3
	écart-type	0.004	249		227	35	1.4

17-A6-C-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	17-A6-C-1-1	-0.482	2 358	1.00	1 990	368	3.5
	17-A6-C-1-2	-0.479	2 274	1.00	2 010	264	4.8
	17-A6-C-1-3	-0.483	3 099	1.00	2 810	289	4.4
Armature 2	17-A6-C-2-4	-0.475	2 387	1.00	2 130	257	5.0
	17-A6-C-2-5	-0.471	2 002	1.00	1 820	182	7.0
	17-A6-C-2-6	-0.465	2 655	1.00	2 440	215	5.9
Armature 3	17-A6-C-3-7	-0.462	2 745	1.00	2 530	215	5.9
	17-A6-C-3-8	-0.463	2 655	1.00	2 390	265	4.8
	17-A6-C-3-9	-0.468	2 874	1.00	2 560	314	4.1
Dallette	moyenne	-0.472	2 561		2 298	263	5.0
	écart-type	0.008	336		326	56	1.1

17-A6-C-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	17-A6-C-1-1	-0.468	3 171	1.00	2 680	491	2.6
	17-A6-C-1-2	-0.475	3 411	1.00	2 750	661	1.9
	17-A6-C-1-3	-0.469	3 309	1.00	2 790	519	2.5
Armature 2	17-A6-C-2-4	-0.464	3 233	1.00	2 720	513	2.5
	17-A6-C-2-5	-0.462	2 504	1.00	2 110	394	3.2
	17-A6-C-2-6	-0.459	3 133	1.00	2 590	543	2.3
Armature 3	17-A6-C-3-7	-0.456	3 674	1.00	3 090	584	2.2
	17-A6-C-3-8	-0.455	3 257	1.00	2 720	537	2.4
	17-A6-C-3-9	-0.459	3 484	1.00	2 870	614	2.1
Dallette	moyenne	-0.463	3 242		2 702	540	2.4
	écart-type	0.007	324		263	77	0.4

18-A6-C-1NI (après-corrosion-accélérees)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	18-A6-C-1-1	-0.510	3 237	1.00	2 900	337	3.8
	18-A6-C-1-2	-0.524	3 163	1.00	2 860	303	4.2
	18-A6-C-1-3	-0.515	3 384	1.00	3 050	334	3.8
Armature 2	18-A6-C-2-4	-0.506	2 908	1.00	2 610	298	4.3
	18-A6-C-2-5	-0.520	2 478	1.00	2 240	238	5.3
	18-A6-C-2-6	-0.523	3 190	1.00	2 880	310	4.1
Armature 3	18-A6-C-3-7	-0.494	3 280	1.00	2 940	340	3.7
	18-A6-C-3-8	-0.508	3 315	1.00	2 960	355	3.6
	18-A6-C-3-9	-0.518	3 720	1.00	3 330	390	3.3
Dallette	moyenne	-0.513	3 186		2 863	323	4.0
	écart-type	0.009	341		300	43	0.6

17-A6-C-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	17-A6-C-1-1	-0.480	2 998	0.97	2 520	478	2.67
	17-A6-C-1-2	-0.471	3 629	0.96	3 030	599	2.13
	17-A6-C-1-3	-0.465	3 753	0.96	3 090	663	1.92
Armature 2	17-A6-C-2-4	-0.460	3 213	0.97	2 620	593	2.15
	17-A6-C-2-5	-0.456	2 908	0.97	2 380	528	2.41
	17-A6-C-2-6	-0.450	3 852	0.95	3 220	632	2.02
Armature 3	17-A6-C-3-7	-0.451	3 938	0.95	3 240	698	1.83
	17-A6-C-3-8	-0.447	3 986	0.95	3 320	666	1.91
	17-A6-C-3-9	-0.452	4 039	0.95	3 260	779	1.64
Dallette	moyenne	-0.459	3 591		2 964	626	2.07
	écart-type	0.011	438		359	90	0.31

18-A6-C-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	18-A6-C-1-1	-0.486	3 133	1.00	2 820	313	4.07
	18-A6-C-1-2	-0.495	2 325	1.00	2 080	245	5.19
	18-A6-C-1-3	-0.492	2 580	1.00	2 380	200	6.36
Armature 2	18-A6-C-2-4	-0.479	2 213	1.00	2 040	173	7.35
	18-A6-C-2-5	-0.486	1 713	1.00	1 600	113	11.33
	18-A6-C-2-6	-0.491	2 698	1.00	2 450	248	5.14
Armature 3	18-A6-C-3-7	-0.476	2 652	1.00	2 450	202	6.32
	18-A6-C-3-8	-0.483	2 686	1.00	2 490	178	7.25
	18-A6-C-3-9	-0.485	2 832	0.99	2 620	212	6.00
Dallette	moyenne	-0.486	2 535		2 326	209	6.56
	écart-type	0.006	408		364	56	2.07

18-A6-C-avant-corrosion-accélérees		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	18-A6-C-1-1	-0.456	5 682	0.80	3 660	2 022	0.6
	18-A6-C-1-2	-0.432	4 808	0.87	3 580	1 228	1.0
	18-A6-C-1-3	-0.421	5 319	0.87	4 010	1 309	1.0
Armature 2	18-A6-C-2-4	-0.413	4 717	0.88	3 700	1 017	1.3
	18-A6-C-2-5	-0.400	3 636	0.92	2 860	776	1.6
	18-A6-C-2-6	-0.393	4 926	0.86	3 910	1 016	1.3
Armature 3	18-A6-C-3-7	-0.384	5 682	0.82	4 500	1 182	1.1
	18-A6-C-3-8	-0.381	4 255	0.84	3 400	855	1.5
	18-A6-C-3-9	-0.381	5 076	0.77	3 980	1 096	1.2
Dallette	moyenne	-0.407	4 900		3 733	1 167	1.2
	écart-type	0.026	660		456	363	0.3

18-A6-C-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	18-A6-C-1-1	-0.464	3 429	0.99	2 820	609	2.09
	18-A6-C-1-2	-0.456	2 640	1.00	2 350	290	4.40
	18-A6-C-1-3	-0.440	3 278	0.99	2 960	318	4.01
Armature 2	18-A6-C-2-4	-0.442	2 579	0.99	2 370	209	6.11
	18-A6-C-2-5	-0.446	2 274	1.00	2 020	254	5.02
	18-A6-C-2-6	-0.436	3 019	0.99	2 760	259	4.92
Armature 3	18-A6-C-3-7	-0.434	3 294	0.99	2 930	364	3.50
	18-A6-C-3-8	-0.437	3 384	0.99	3 060	324	3.93
	18-A6-C-3-9	-0.436	3 542	0.99	3 150	392	3.25
Dallette	moyenne	-0.444	3 049		2 713	335	4.14
	écart-type	0.010	448		381	117	1.16

18-A6-C-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	18-A6-C-1-1	-0.461	4 041	1.00	3 510	531	2.40
	18-A6-C-1-2	-0.461	3 492	1.00	3 030	462	2.76
	18-A6-C-1-3	-0.450	4 058	1.00	3 650	408	3.12
Armature 2	18-A6-C-2-4	-0.457	3 382	1.00	2 900	482	2.64
	18-A6-C-2-5	-0.453	2 810	1.00	2 450	360	3.54
	18-A6-C-2-6	-0.451	3 500	1.00	3 060	440	2.90
Armature 3	18-A6-C-3-7	-0.445	3 735	1.00	3 260	475	2.69
	18-A6-C-3-8	-0.441	3 631	1.00	3 220	411	3.10
	18-A6-C-3-9	-0.453	4 600	0.99	3 880	720	1.77
Dallette	moyenne	-0.452	3 694		3 218	477	2.77
	écart-type	0.007	504		428	104	0.50

18-A6-C-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	18-A6-C-1-1	-0.461	4 581	0.96	3 700	881	1.45
	18-A6-C-1-2	-0.456	4 151	0.96	3 370	781	1.63
	18-A6-C-1-3	-0.448	4 844	0.95	4 160	684	1.86
Armature 2	18-A6-C-2-4	-0.446	3 478	0.98	2 950	528	2.41
	18-A6-C-2-5	-0.439	2 876	0.98	2 490	386	3.30
	18-A6-C-2-6	-0.439	4 034	0.96	3 430	604	2.11
Armature 3	18-A6-C-3-7	-0.426	3 879	0.96	3 410	469	2.72
	18-A6-C-3-8	-0.432	3 822	0.96	3 360	462	2.76
	18-A6-C-3-9	-0.435	4 926	0.95	4 100	826	1.54
Dallette	moyenne	-0.442	4 066		3 441	625	2.20
	écart-type	0.011	659		522	177	0.64

19-A6-C-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	19-A6-C-1-1	-0.442	5 405	0.88	3 700	1 705	0.7
	19-A6-C-1-2	-0.437	4 098	0.93	2 890	1 208	1.1
	19-A6-C-1-3	-0.432	4 348	0.92	3 110	1 238	1.0
Armature 2	19-A6-C-2-4	-0.410	4 348	0.92	3 220	1 128	1.1
	19-A6-C-2-5	-0.403	3 968	0.93	2 950	1 018	1.3
	19-A6-C-2-6	-0.402	3 876	0.94	2 900	976	1.3
Armature 3	19-A6-C-3-7	-0.388	5 587	0.87	4 030	1 557	0.8
	19-A6-C-3-8	-0.382	4 926	0.91	3 210	1 206	1.1
	19-A6-C-3-9	-0.387	4 367	0.92	3 210	1 157	1.1
Dallette	moyenne	-0.409	4 547		3 303	1 244	1.1
	écart-type	0.023	618		414	239	0.2

19-A6-C-NI (après-corrosion-accéléérées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	19-A6-C-1-1	-0.419	3 165	0.99	2 780	385	3.3
	19-A6-C-1-2	-0.408	2 673	0.99	2 310	363	3.5
	19-A6-C-1-3	-0.386	2 155	1.00	1 910	245	5.2
Armature 2	19-A6-C-2-4	-0.475	3 042	0.99	2 720	322	4.0
	19-A6-C-2-5	-0.461	2 698	0.99	2 430	268	4.8
	19-A6-C-2-6	-0.425	2 488	0.99	2 270	218	5.9
Armature 3	19-A6-C-3-7	-0.492	3 391	0.99	3 050	341	3.7
	19-A6-C-3-8	-0.475	3 167	0.99	2 840	327	3.9
	19-A6-C-3-9	-0.446	2 706	0.99	2 440	266	4.8
Dallette	moyenne	-0.443	2 832		2 528	304	4.3
	écart-type	0.036	390		351	57	0.9

19-A6-C-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	19-A6-C-1-1	-0.427	2 874	0.99	2 520	354	3.60
	19-A6-C-1-2	-0.421	1 983	1.00	1 790	193	6.61
	19-A6-C-1-3	-0.414	1 747	1.00	1 520	227	5.61
Armature 2	19-A6-C-2-4	-0.440	2 297	1.00	2 090	207	6.17
	19-A6-C-2-5	-0.431	1 757	1.00	1 620	137	9.28
	19-A6-C-2-6	-0.417	1 756	1.00	1 600	156	8.18
Armature 3	19-A6-C-3-7	-0.452	3 002	0.99	2 720	282	4.52
	19-A6-C-3-8	-0.442	2 520	0.99	2 320	200	6.38
	19-A6-C-3-9	-0.426	2 279	1.00	2 060	219	5.81
Dallette	moyenne	-0.430	2 246		2 027	219	6.24
	écart-type	0.012	480		429	65	1.72

19-A6-C-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	19-A6-C-1-1	-0.472	3 478	1.00	2 700	778	1.64
	19-A6-C-1-2	-0.462	2 490	0.99	2 080	410	3.11
	19-A6-C-1-3	-0.455	2 340	0.99	1 930	410	3.11
Armature 2	19-A6-C-2-4	-0.459	3 091	0.99	2 640	451	2.82
	19-A6-C-2-5	-0.453	2 718	0.99	2 360	358	3.56
	19-A6-C-2-6	-0.446	2 436	0.99	2 120	316	4.03
Armature 3	19-A6-C-3-7	-0.447	3 489	1.00	3 060	429	2.97
	19-A6-C-3-8	-0.439	3 051	1.00	2 690	361	3.53
	19-A6-C-3-9	-0.434	2 897	1.00	2 530	367	3.48
Dallette	moyenne	-0.452	2 888		2 457	431	3.14
	écart-type	0.012	428		364	137	0.67

19-A6-C-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	19-A6-C-1-1	-0.452	4 391	0.99	3 810	581	2.19
	19-A6-C-1-2	-0.457	3 770	0.99	3 110	660	1.93
	19-A6-C-1-3	-0.448	3 297	0.99	2 730	567	2.25
Armature 2	19-A6-C-2-4	-0.451	4 293	0.99	3 590	703	1.81
	19-A6-C-2-5	-0.443	3 463	0.99	2 930	533	2.39
	19-A6-C-2-6	-0.436	3 309	1.00	2 860	449	2.84
Armature 3	19-A6-C-3-7	-0.440	4 906	0.99	4 170	736	1.73
	19-A6-C-3-8	-0.434	4 217	1.00	3 510	707	1.80
	19-A6-C-3-9	-0.430	3 876	0.99	3 260	616	2.07
Dallette	moyenne	-0.443	3 947		3 330	617	2.11
	écart-type	0.009	549		478	94	0.35

19-A6-C-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	19-A6-C-1-1	-0.476	5 105	0.93	4 230	875	1.46
	19-A6-C-1-2	-0.472	3 638	0.97	3 020	618	2.06
	19-A6-C-1-3	-0.467	3 774	0.96	3 060	714	1.79
Armature 2	19-A6-C-2-4	-0.459	4 490	0.95	3 790	700	1.82
	19-A6-C-2-5	-0.458	3 885	0.96	3 290	595	2.14
	19-A6-C-2-6	-0.447	3 665	0.96	3 140	525	2.43
Armature 3	19-A6-C-3-7	-0.444	5 052	0.93	4 500	552	2.31
	19-A6-C-3-8	-0.444	4 328	0.95	3 740	588	2.17
	19-A6-C-3-9	-0.441	4 726	0.94	4 020	706	1.81
Dallette	moyenne	-0.456	4 296		3 643	652	2.00
	écart-type	0.013	583		543	108	0.30

21-A6-A-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	21-A6-A-1-1	-0.509	3 425	0.93	2 330	1 095	1.2
	21-A6-A-1-2	-0.500	3 155	0.95	2 310	845	1.5
	21-A6-A-1-3	-0.475	3 484	0.92	2 550	934	1.4
Armature 2	21-A6-A-2-4	-0.482	3 106	0.94	2 310	796	1.6
	21-A6-A-2-5	-0.464	3 650	0.90	2 760	890	1.4
	21-A6-A-2-6	-0.447	3 636	0.91	2 740	896	1.4
Armature 3	21-A6-A-3-7	-0.458	3 030	0.94	2 240	790	1.6
	21-A6-A-3-8	-0.446	3 165	0.93	2 420	745	1.7
	21-A6-A-3-9	-0.425	3 650	0.92	2 550	1 100	1.2
Dallette	moyenne	-0.467	3 367		2 468	899	1.4
	écart-type	0.027	254		192	127	0.2

21-A6-A-NI (après-corrosion-accéléérées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	21-A6-A-1-1	-0.527	2 480	0.99	2 250	230	5.5
	21-A6-A-1-2	-0.518	2 474	1.00	2 120	354	3.6
	21-A6-A-1-3	-0.482	2 646	0.99	2 310	336	3.8
Armature 2	21-A6-A-2-4	-0.538	2 521	1.00	2 220	301	4.2
	21-A6-A-2-5	-0.519	3 320	0.99	2 950	370	3.4
	21-A6-A-2-6	-0.496	3 074	0.99	2 780	294	4.3
Armature 3	21-A6-A-3-7	-0.545	2 401	1.00	2 140	261	4.9
	21-A6-A-3-8	-0.540	2 698	0.99	2 380	318	4.0
	21-A6-A-3-9	-0.523	2 888	0.99	2 530	358	3.6
Dallette	moyenne	-0.521	2 722		2 409	314	4.2
	écart-type	0.021	312		290	47	0.7

21-A6-A-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	21-A6-A-1-1	-0.513	1 614	1.00	1 240	374	3.4
	21-A6-A-1-2	-0.503	1 534	1.00	1 160	374	3.4
	21-A6-A-1-3	-0.468	1 768	1.00	1 350	418	3.1
Armature 2	21-A6-A-2-4	-0.491	1 470	1.00	1 160	310	4.1
	21-A6-A-2-5	-0.498	1 992	1.00	1 480	512	2.5
	21-A6-A-2-6	-0.456	1 861	1.00	1 490	371	3.4
Armature 3	21-A6-A-3-7	-0.476	1 517	1.00	1 200	317	4.0
	21-A6-A-3-8	-0.467	1 761	1.00	1 240	521	2.4
	21-A6-A-3-9	-0.453	1 949	1.00	1 460	489	2.6
Dallette	moyenne	-0.480	1 718		1 309	410	3.2
	écart-type	0.021	194		138	81	0.6

21-A6-A-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Armature 1	21-A6-A-1-1	-0.373	5 137	0.99	3 540	1 597	0.8
	21-A6-A-1-2	-0.360	5 895	0.98	4 040	1 855	0.7
	21-A6-A-1-3	-0.323	5 883	0.98	4 320	1 563	0.8
Armature 2	21-A6-A-2-4	-0.352	5 559	0.99	3 920	1 639	0.8
	21-A6-A-2-5	-0.326	5 344	0.98	4 180	1 164	1.1
	21-A6-A-2-6	-0.321	6 507	0.98	5 080	1 427	0.9
Armature 3	21-A6-A-3-7	-0.323	4 556	0.99	3 310	1 246	1.0
	21-A6-A-3-8	-0.313	6 179	0.98	5 050	1 129	1.1
	21-A6-A-3-9	-0.314	7 774	0.97	5 400	2 374	0.5
Dallette	moyenne	-0.334	5 871		4 316	1 555	0.9
	écart-type	0.022	920		721	390	0.2

21-A6-A-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	21-A6-A-1-1	-0.391	4 325	1.00	3 270	1 055	1.21
	21-A6-A-1-2	-0.394	4 321	1.00	3 090	1 231	1.03
	21-A6-A-1-3	-0.362	5 365	1.00	3 890	1 475	0.86
Armature 2	21-A6-A-2-4	-0.390	4 729	1.00	3 250	1 479	0.86
	21-A6-A-2-5	-0.347	4 893	1.00	3 640	1 253	1.02
	21-A6-A-2-6	-0.349	6 664	1.00	5 250	1 414	0.90
Armature 3	21-A6-A-3-7	-0.349	3 679	1.00	2 740	939	1.36
	21-A6-A-3-8	-0.340	5 286	1.00	4 020	1 266	1.01
	21-A6-A-3-9	-0.343	8 399	1.00	6 220	2 179	0.59
Dallette	moyenne	-0.363	5 296		3 930	1 366	0.98
	écart-type	0.022	1 436		1 124	355	0.22

22-A6-I-avant-corrosion-accelerées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	22-A6-I-1-1	-0.452	3 802	0.91	2 740	1 062	1.2
	22-A6-I-1-2	-0.439	3 205	0.94	2 360	825	1.5
	22-A6-I-1-3	-0.424	3 759	0.92	2 790	969	1.3
Armature 2	22-A6-I-2-4	-0.415	4 274	0.87	3 160	1 114	1.1
	22-A6-I-2-5	-0.405	3 509	0.89	2 710	799	1.6
	22-A6-I-2-6	-0.403	5 780	0.78	4 550	1 230	1.0
Armature 3	22-A6-I-3-7	-0.390	4 762	0.83	3 360	1 402	0.9
	22-A6-I-3-8	-0.389	3 817	0.88	2 980	837	1.5
	22-A6-I-3-9	-0.393	4 237	0.91	3 250	987	1.3
Dallette	moyenne	-0.412	4 127		3 102	1 025	1.3
	écart-type	0.022	770		623	201	0.2

22-A6-I-INI (après-corrosion-accelerées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	22-A6-I-1-1	-0.523	3 136	0.99	2 770	366	3.5
	22-A6-I-1-2	-0.511	2 644	1.00	2 340	304	4.2
	22-A6-I-1-3	-0.506	3 477	1.00	3 100	377	3.4
Armature 2	22-A6-I-2-4	-0.515	3 454	1.00	3 060	374	3.4
	22-A6-I-2-5	-0.516	2 878	1.00	2 540	338	3.8
	22-A6-I-2-6	-0.526	5 453	1.00	5 010	443	2.9
Armature 3	22-A6-I-3-7	-0.450	3 580	1.00	3 050	530	2.4
	22-A6-I-3-8	-0.479	3 843	1.00	3 380	463	2.8
	22-A6-I-3-9	-0.526	4 138	1.00	3 690	448	2.8
Dallette	moyenne	-0.506	3 623		3 218	405	3.2
	écart-type	0.025	827		787	71	0.6

22-A6-I-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	22-A6-I-1-1	-0.306	2 297	1.00	1 430	867	1.5
	22-A6-I-1-2	-0.343	2 040	1.00	1 090	950	1.3
	22-A6-I-1-3	-0.333	2 172	1.00	892	1 280	1.0
Armature 2	22-A6-I-2-4	-0.312	2 309	1.00	1 530	779	1.6
	22-A6-I-2-5	-0.307	2 131	1.00	1 230	901	1.4
	22-A6-I-2-6	-0.311	3 271	0.99	2 140	1 131	1.1
Armature 3	22-A6-I-3-7	-0.302	2 555	1.00	1 950	605	2.1
	22-A6-I-3-8	-0.306	2 463	1.00	1 670	793	1.6
	22-A6-I-3-9	-0.304	2 979	0.99	2 180	799	1.6
Dallette	moyenne	-0.314	2 469		1 568	901	1.5
	écart-type	0.014	411		458	202	0.3

22-A6-I-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	22-A6-I-1-1	-0.326	3 385	0.99	1 790	1 595	0.8
	22-A6-I-1-2	-0.314	2 869	0.99	1 500	1 369	0.9
	22-A6-I-1-3	-0.308	3 129	1.00	1 490	1 639	0.8
Armature 2	22-A6-I-2-4	-0.292	3 035	1.00	1 980	1 055	1.2
	22-A6-I-2-5	-0.279	2 828	1.00	1 830	998	1.3
	22-A6-I-2-6	-0.276	4 568	0.99	3 170	1 398	0.9
Armature 3	22-A6-I-3-7	-0.277	3 017	1.00	2 280	737	1.7
	22-A6-I-3-8	-0.281	3 054	1.00	2 130	924	1.4
	22-A6-I-3-9	-0.278	3 826	1.00	2 650	1 176	1.1
Dallette	moyenne	-0.292	3 301		2 091	1 210	1.1
	écart-type	0.019	563		547	310	0.3

22-A6-I-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	22-A6-I-1-1	-0.301	2 957	0.99	1 830	1 127	1.1
	22-A6-I-1-2	-0.300	2 736	1.00	1 580	1 156	1.1
	22-A6-I-1-3	-0.284	3 092	1.00	1 710	1 382	0.9
Armature 2	22-A6-I-2-4	-0.279	2 967	1.00	2 040	927	1.4
	22-A6-I-2-5	-0.270	2 878	1.00	1 930	946	1.3
	22-A6-I-2-6	-0.269	4 386	1.00	3 210	1 176	1.1
Armature 3	22-A6-I-3-7	-0.266	3 397	1.00	2 600	797	1.6
	22-A6-I-3-8	-0.264	3 223	1.00	2 330	893	1.4
	22-A6-I-3-9	-0.267	3 946	1.00	2 880	1 066	1.2
Dallette	moyenne	-0.278	3 287		2 234	1 052	1.2
	écart-type	0.014	546		560	180	0.2

22-A6-I-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	22-A6-I-1-1	-0.405	3 788	0.97	2 220	1 568	0.81
	22-A6-I-1-2	-0.394	3 242	0.98	1 840	1 402	0.91
	22-A6-I-1-3	-0.380	3 795	0.97	2 250	1 545	0.82
Armature 2	22-A6-I-2-4	-0.364	3 471	0.99	2 460	1 011	1.26
	22-A6-I-2-5	-0.352	3 459	0.98	2 410	1 049	1.22
Armature 3	22-A6-I-2-6	-0.342	5 288	0.94	3 790	1 498	0.85
	22-A6-I-3-7	-0.344	3 724	0.97	2 830	894	1.43
	22-A6-I-3-8	-0.343	3 566	0.99	2 540	1 026	1.24
Dallette	22-A6-I-3-9	-0.345	4 523	0.98	3 350	1 173	1.09
	moyenne écart-type	-0.363 0.024	3 873 641		2 632 605	1 241 263	1.07 0.23

25-A6-I-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	25-A6-I-1-1	-0.406	8 065	0.87	4 960	3 105	0.4
	25-A6-I-1-2	-0.406	6 250	0.91	4 170	2 080	0.6
	25-A6-I-1-3	-0.394	7 874	0.87	5 700	2 174	0.6
Armature 2	25-A6-I-2-4	-0.374	5 917	0.92	4 450	1 467	0.9
	25-A6-I-2-5	-0.377	4 566	0.94	3 810	756	1.7
Armature 3	25-A6-I-2-6	-0.383	5 435	0.92	4 360	1 075	1.2
	25-A6-I-3-7	-0.375	5 618	0.92	4 500	1 118	1.1
	25-A6-I-3-8	-0.380	5 051	0.93	4 290	761	1.7
Dallette	25-A6-I-3-9	-0.386	6 135	0.91	5 040	1 095	1.2
	moyenne écart-type	-0.387 0.013	6 101 1 183		4 587 562	1 514 787	1.0 0.5

23-A6-A-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	23-A6-A-1-1	-0.460	4 484	0.88	3 260	1 224	1.0
	23-A6-A-1-2	-0.452	3 546	0.92	2 800	746	1.7
	23-A6-A-1-3	-0.438	4 975	0.84	3 910	1 065	1.2
Armature 2	23-A6-A-2-4	-0.431	3 968	0.87	3 080	888	1.4
	23-A6-A-2-5	-0.423	2 976	0.93	2 350	626	2.0
Armature 3	23-A6-A-2-6	-0.415	3 584	0.91	2 740	844	1.5
	23-A6-A-3-7	-0.413	4 505	0.85	3 590	915	1.4
	23-A6-A-3-8	-0.413	4 132	0.87	3 210	922	1.4
Dallette	23-A6-A-3-9	-0.405	4 854	0.83	3 650	1 204	1.1
	moyenne écart-type	-0.428 0.019	4 114 661		3 177 495	937 198	1.4 0.3

25-A6-I-INI (après-corrosion-accéléérées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	25-A6-I-1-1	-0.472	4 158	1.00	3 890	268	4.8
	25-A6-I-1-2	-0.490	4 161	1.00	3 620	541	2.4
	25-A6-I-1-3	-0.486	4 729	1.00	4 250	479	2.7
Armature 2	25-A6-I-2-4	-0.486	3 963	1.00	3 430	533	2.4
	25-A6-I-2-5	-0.502	3 808	1.00	3 340	468	2.7
Armature 3	25-A6-I-2-6	-0.494	4 239	1.00	3 820	419	3.0
	25-A6-I-3-7	-0.498	3 957	1.00	3 580	377	3.4
	25-A6-I-3-8	-0.504	3 974	1.00	3 580	394	3.2
Dallette	25-A6-I-3-9	-0.493	4 517	1.00	4 060	457	2.8
	moyenne écart-type	-0.492 0.010	4 167 295		3 730 298	437 85	3.0 0.7

23-A6-A-INI (après-corrosion-accéléérées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	23-A6-A-1-1	-0.473	3 249	0.99	2 870	379	3.4
	23-A6-A-1-2	-0.484	2 771	0.99	2 400	371	3.4
	23-A6-A-1-3	-0.491	4 599	0.99	4 050	549	2.3
Armature 2	23-A6-A-2-4	-0.479	3 018	0.99	2 630	388	3.3
	23-A6-A-2-5	-0.460	2 460	1.00	2 130	330	3.9
Armature 3	23-A6-A-2-6	-0.464	2 641	1.00	2 330	311	4.1
	23-A6-A-3-7	-0.469	3 300	0.99	2 910	390	3.3
	23-A6-A-3-8	-0.425	3 036	0.99	2 670	366	3.5
Dallette	23-A6-A-3-9	-0.437	4 091	0.99	3 520	571	2.2
	moyenne écart-type	-0.465 0.022	3 241 694		2 834 609	406 91	3.3 0.6

26-A6-C-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	26-A6-C-1-1	-0.388	8 772	0.96	6 320	2 452	0.5
	26-A6-C-1-2	-0.374	8 264	0.97	5 690	2 574	0.5
	26-A6-C-1-3	-0.346	8 065	0.95	6 980	1 085	1.2
Armature 2	26-A6-C-2-4	-0.357	7 299	0.97	5 530	1 769	0.7
	26-A6-C-2-5	-0.352	6 897	0.97	5 300	1 597	0.8
Armature 3	26-A6-C-2-6	-0.347	7 874	0.96	6 500	1 374	0.9
	26-A6-C-3-7	-0.340	8 696	0.95	6 850	1 846	0.7
	26-A6-C-3-8	-0.343	8 065	0.96	6 680	1 385	0.9
Dallette	26-A6-C-3-9	-0.344	8 929	0.96	7 300	1 629	0.8
	moyenne écart-type	-0.355 0.016	8 095 677		6 350 698	1 745 492	0.8 0.2

26-A6-C-1NI (après-corrosion-accelerées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
26-A6-C-1-1		-0.443	5 436	0.99	5 140	296	4.3
Armature 1	26-A6-C-1-2	-0.438	5 338	1.00	4 870	468	2.7
	26-A6-C-1-3	-0.427	6 181	0.99	5 600	581	2.2
	26-A6-C-2-4	-0.436	7 034	0.99	6 190	844	1.5
Armature 2	26-A6-C-2-5	-0.428	5 670	1.00	5 250	420	3.0
	26-A6-C-2-6	-0.431	7 066	0.99	6 150	916	1.4
Armature 3	26-A6-C-3-7	-0.432	7 455	0.99	6 560	895	1.4
	26-A6-C-3-8	-0.427	7 121	0.99	6 570	551	2.3
	26-A6-C-3-9	-0.431	6 986	0.99	6 240	746	1.7
Dallette	moyenne	-0.432	6 476		5 841	635	2.3
	écart-type	0.005	822		639	224	1.0

26-A6-C-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
26-A6-C-1-1		-0.443	4 442	0.98	3 850	592	2.15
Armature 1	26-A6-C-1-2	-0.440	3 675	0.99	3 300	375	3.40
	26-A6-C-1-3	-0.433	4 090	0.98	3 680	410	3.11
	26-A6-C-2-4	-0.434	4 525	0.98	4 200	325	3.92
Armature 2	26-A6-C-2-5	-0.434	3 312	0.99	3 110	202	6.32
	26-A6-C-2-6	-0.430	4 413	0.98	4 070	343	3.72
Armature 3	26-A6-C-3-7	-0.429	5 344	0.97	5 000	344	3.70
	26-A6-C-3-8	-0.430	4 970	0.98	4 690	280	4.55
	26-A6-C-3-9	-0.424	5 120	0.99	4 670	450	2.83
Dallette	moyenne	-0.433	4 432		4 063	369	3.74
	écart-type	0.006	666		646	110	1.18

26-A6-C-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
26-A6-C-1-1		-0.447	6 052	0.97	5 020	1 032	1.24
Armature 1	26-A6-C-1-2	-0.441	5 040	0.98	4 460	580	2.20
	26-A6-C-1-3	-0.436	5 163	0.98	5 010	153	8.34
	26-A6-C-2-4	-0.437	5 688	0.98	5 470	218	5.86
Armature 2	26-A6-C-2-5	-0.437	4 801	0.98	4 660	141	9.04
	26-A6-C-2-6	-0.440	5 490	0.97	5 080	410	3.11
Armature 3	26-A6-C-3-7	-0.441	6 965	0.96	6 260	705	1.81
	26-A6-C-3-8	-0.438	6 313	0.96	5 710	603	2.11
	26-A6-C-3-9	-0.429	5 705	0.96	5 120	585	2.18
Dallette	moyenne	-0.438	5 691		5 199	492	3.99
	écart-type	0.005	678		546	293	2.98

26-A6-C-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
26-A6-C-1-1		-0.461	6 109	0.99	4 990	1 119	1.14
Armature 1	26-A6-C-1-2	-0.458	5 162	1.00	4 330	832	1.53
	26-A6-C-1-3	-0.452	6 019	0.99	5 080	939	1.36
	26-A6-C-2-4	-0.454	7 108	0.99	5 850	1 258	1.01
Armature 2	26-A6-C-2-5	-0.446	5 338	0.99	4 700	638	2.00
	26-A6-C-2-6	-0.444	6 124	0.99	5 260	864	1.48
Armature 3	26-A6-C-3-7	-0.443	7 769	0.98	6 760	1 009	1.26
	26-A6-C-3-8	-0.443	6 560	0.99	5 780	780	1.63
	26-A6-C-3-9	-0.436	6 542	1.00	5 640	902	1.41
Dallette	moyenne	-0.448	6 303		5 377	927	1.42
	écart-type	0.008	814		722	184	0.29

26-A6-C-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
26-A6-C-1-1		-0.431	7 201	0.88	5 920	1 281	1.00
Armature 1	26-A6-C-1-2	-0.422	6 387	0.90	5 300	1 087	1.17
	26-A6-C-1-3	-0.419	7 120	0.88	5 830	1 290	0.99
	26-A6-C-2-4	-0.421	7 838	0.84	6 750	1 088	1.17
Armature 2	26-A6-C-2-5	-0.409	6 397	0.90	5 930	467	2.73
	26-A6-C-2-6	-0.411	7 182	0.89	6 090	1 092	1.17
Armature 3	26-A6-C-3-7	-0.415	7 829	0.84	6 760	1 069	1.19
	26-A6-C-3-8	-0.412	7 212	0.86	6 320	892	1.43
	26-A6-C-3-9	-0.402	7 349	0.87	6 320	1 029	1.24
Dallette	moyenne	-0.416	7 168		6 136	1 033	1.34
	écart-type	0.009	516		463	245	0.54

27-A6-l-avant-corrosion-accelerées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
27-A6-l-1-1		-0.445	5 682	0.53	4 320	1 362	0.9
Armature 1	27-A6-l-1-2	-0.438	4 926	0.58	4 370	556	2.3
	27-A6-l-1-3	-0.435	6 098	0.74	4 790	1 308	1.0
	27-A6-l-2-4	-0.434	5 917	0.67	4 880	1 037	1.2
Armature 2	27-A6-l-2-5	-0.425	4 878	0.70	4 030	848	1.5
	27-A6-l-2-6	-0.423	5 128	0.69	4 100	1 028	1.2
Armature 3	27-A6-l-3-7	-0.429	6 711	0.64	4 850	1 861	0.7
	27-A6-l-3-8	-0.430	5 405	0.72	4 240	1 175	1.1
	27-A6-l-3-9	-0.433	5 988	0.67	4 810	1 168	1.1
Dallette	moyenne	-0.432	5 637		4 488	1 149	1.2
	écart-type	0.007	609		343	362	0.5

27-A6-I-1NI (après-corrosion-accéléérées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	27-A6-I-1-1	-0.480	4 928	1.00	4 640	288	4.3
	27-A6-I-1-2	-0.482	4 861	1.00	4 480	381	3.3
	27-A6-I-1-3	-0.496	5 171	1.00	4 550	621	2.1
Armature 2	27-A6-I-2-4	-0.502	5 218	1.00	4 600	618	2.1
	27-A6-I-2-5	-0.508	4 254	1.00	3 800	454	2.8
Armature 3	27-A6-I-2-6	-0.507	4 329	1.00	3 790	539	2.4
	27-A6-I-3-7	-0.491	4 979	0.99	4 470	509	2.5
	27-A6-I-3-8	-0.500	4 364	0.99	3 910	454	2.8
Dallette	27-A6-I-3-9	-0.494	4 414	0.99	3 990	424	3.0
	moyenne	-0.496	4 724		4 248	476	2.8
écart-type		0.010	383		365	108	0.7

27-A6-I-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	27-A6-I-1-1	-0.288	5 070	0.99	2 090	2 980	0.4
	27-A6-I-1-2	-0.251	4 051	1.00	2 460	1 591	0.8
	27-A6-I-1-3	-0.248	4 399	0.99	2 660	1 739	0.7
Armature 2	27-A6-I-2-4	-0.240	3 780	1.00	2 800	980	1.3
	27-A6-I-2-5	-0.240	3 155	1.00	1 870	1 285	1.0
Armature 3	27-A6-I-2-6	-0.250	3 537	1.00	1 960	1 577	0.8
	27-A6-I-3-7	-0.233	4 118	1.00	3 170	948	1.3
	27-A6-I-3-8	-0.231	3 263	1.00	2 340	923	1.4
Dallette	27-A6-I-3-9	-0.254	3 744	1.00	2 000	1 744	0.7
	moyenne	-0.248	3 902		2 372	1 530	0.9
écart-type		0.017	594		440	639	0.3

27-A6-I-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	27-A6-I-1-1	-0.220	5 111	0.98	1 650	3 461	0.4
	27-A6-I-1-2	-0.198	4 439	0.98	2 360	2 079	0.6
	27-A6-I-1-3	-0.198	4 885	0.97	2 410	2 475	0.8
Armature 2	27-A6-I-2-4	-0.204	4 898	0.97	3 290	1 608	0.8
	27-A6-I-2-5	-0.193	3 882	0.98	1 870	2 012	0.6
Armature 3	27-A6-I-2-6	-0.199	4 033	0.98	1 600	2 433	0.5
	27-A6-I-3-7	-0.190	4 661	0.97	3 480	1 181	1.1
	27-A6-I-3-8	-0.194	3 721	0.98	2 370	1 351	0.9
Dallette	27-A6-I-3-9	-0.200	3 930	0.99	1 220	2 710	0.5
	moyenne	-0.200	4 395		2 250	2 145	0.7
écart-type		0.009	518		761	717	0.2

27-A6-I-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	27-A6-I-1-1	-0.278	6 311	0.91	2 970	3 341	0.38
	27-A6-I-1-2	-0.238	5 005	0.95	3 120	1 885	0.68
	27-A6-I-1-3	-0.246	5 970	0.92	3 610	2 360	0.54
Armature 2	27-A6-I-2-4	-0.239	4 938	0.94	3 460	1 478	0.86
	27-A6-I-2-5	-0.236	3 957	0.97	2 580	1 377	0.93
Armature 3	27-A6-I-2-6	-0.252	4 977	0.95	2 920	2 057	0.62
	27-A6-I-3-7	-0.231	5 007	0.95	3 780	1 227	1.04
	27-A6-I-3-8	-0.229	4 155	0.96	2 840	1 315	0.97
Dallette	27-A6-I-3-9	-0.262	5 774	0.93	3 170	2 604	0.49
	moyenne	-0.246	5 122		3 161	1 960	0.72
écart-type		0.016	785		389	709	0.23

27-A6-I-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	27-A6-I-1-1	-0.237	5 939	0.98	2 300	3 639	0.4
	27-A6-I-1-2	-0.218	5 287	0.99	2 900	2 387	0.5
	27-A6-I-1-3	-0.219	5 692	0.99	3 170	2 522	0.5
Armature 2	27-A6-I-2-4	-0.214	4 865	0.99	3 390	1 475	0.9
	27-A6-I-2-5	-0.213	4 030	0.99	2 310	1 720	0.7
Armature 3	27-A6-I-2-6	-0.251	4 042	0.99	2 280	1 762	0.7
	27-A6-I-3-7	-0.210	4 635	0.99	3 510	1 125	1.1
	27-A6-I-3-8	-0.176	2 908	1.00	2 250	658	1.9
Dallette	27-A6-I-3-9	-0.234	4 095	0.99	2 020	2 075	0.6
	moyenne	-0.219	4 610		2 681	1 929	0.8
écart-type		0.021	954		564	869	0.5

28-A6-A-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	28-A6-A-1-1	-0.408	6 536	0.82	4 230	2 306	0.6
	28-A6-A-1-2	-0.398	5 952	0.83	4 190	1 762	0.7
	28-A6-A-1-3	-0.391	7 194	0.77	5 120	2 074	0.6
Armature 2	28-A6-A-2-4	-0.383	5 405	0.77	4 340	1 065	1.2
	28-A6-A-2-5	-0.377	5 814	0.85	4 390	1 424	0.9
Armature 3	28-A6-A-2-6	-0.373	6 024	0.83	4 760	1 264	1.0
	28-A6-A-3-7	-0.372	6 211	0.81	4 840	1 371	0.9
	28-A6-A-3-8	-0.367	6 250	0.81	4 750	1 500	0.8
Dallette	28-A6-A-3-9	-0.370	5 495	0.85	4 370	1 125	1.1
	moyenne	-0.382	6 098		4 554	1 544	0.9
écart-type		0.014	546		322	424	0.2

28-A6-A-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	28-A6-A-1-1	-0.438	4 527	0.98	4 140	387	3.3
	28-A6-A-1-2	-0.461	4 206	0.99	3 660	546	2.3
	28-A6-A-1-3	-0.453	5 060	0.98	4 470	590	2.2
Armature 2	28-A6-A-2-4	-0.453	4 702	0.98	4 380	322	4.0
	28-A6-A-2-5	-0.454	4 275	0.99	3 880	395	3.2
	28-A6-A-2-6	-0.451	4 660	0.98	4 180	480	2.7
Armature 3	28-A6-A-3-7	-0.458	4 669	0.99	4 190	479	2.7
	28-A6-A-3-8	-0.457	4 736	0.98	4 240	496	2.6
	28-A6-A-3-9	-0.457	4 183	0.99	3 620	563	2.3
Dallette	moyenne	-0.453	4 558		4 084	473	2.8
	écart-type	0.007	290		300	89	0.6

28-A6-A-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	28-A6-A-1-1	-0.376	11 207	1.00	8 440	2 767	0.46
	28-A6-A-1-2	-0.397	10 385	1.00	7 350	3 035	0.42
	28-A6-A-1-3	-0.403	11 852	1.00	8 190	3 662	0.35
Armature 2	28-A6-A-2-4	-0.361	8 980	1.00	6 550	2 430	0.52
	28-A6-A-2-5	-0.372	11 841	1.00	8 650	3 191	0.40
	28-A6-A-2-6	-0.372	7 854	1.00	5 900	1 954	0.65
Armature 3	28-A6-A-3-7	-0.331	9 792	1.00	7 360	2 432	0.52
	28-A6-A-3-8	-0.344	10 051	1.00	7 140	2 911	0.44
	28-A6-A-3-9	-0.354	7 899	1.00	5 540	2 359	0.54
Dallette	moyenne	-0.368	9 985		7 236	2 749	0.48
	écart-type	0.023	1 522		1 091	515	0.09

28-A6-A-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	28-A6-A-1-1	-0.359	5 083	1.00	3 310	1 773	0.7
	28-A6-A-1-2	-0.360	4 234	1.00	2 600	1 634	0.8
	28-A6-A-1-3	-0.356	4 331	1.00	2 790	1 541	0.8
Armature 2	28-A6-A-2-4	-0.322	3 704	1.00	2 630	1 074	1.2
	28-A6-A-2-5	-0.364	6 629	0.99	4 440	2 189	0.6
	28-A6-A-2-6	-0.321	3 306	1.00	2 420	886	1.4
Armature 3	28-A6-A-3-7	-0.304	4 163	0.99	3 010	1 153	1.1
	28-A6-A-3-8	-0.306	3 975	0.99	2 890	1 085	1.2
	28-A6-A-3-9	-0.312	3 610	1.00	2 380	1 230	1.0
Dallette	moyenne	-0.334	4 337		2 941	1 396	1.0
	écart-type	0.025	999		634	418	0.3

29-A6-C-avant-corrosion-accelerées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	29-A6-C-1-1	-0.340	9 709	0.48	7 800	1 909	0.7
	29-A6-C-1-2	-0.340	8 475	0.46	6 780	1 695	0.8
	29-A6-C-1-3	-0.331	10 560	0.39	7 760	2 800	0.5
Armature 2	29-A6-C-2-4	-0.335	8 130	0.52	7 540	590	2.2
	29-A6-C-2-5	-0.340	6 803	0.60	6 080	723	1.8
	29-A6-C-2-6	-0.335	8 264	0.54	6 720	1 544	0.8
Armature 3	29-A6-C-3-7	-0.346	8 772	0.48	7 680	1 092	1.2
	29-A6-C-3-8	-0.349	6 623	0.62	5 890	733	1.7
	29-A6-C-3-9	-0.360	7 576	0.51	6 510	1 066	1.2
Dallette	moyenne	-0.342	8 323		6 973	1 350	1.2
	écart-type	0.009	1 272		743	713	0.6

28-A6-A-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	28-A6-A-1-1	-0.347	10 430	0.93	7 350	3 080	0.4
	28-A6-A-1-2	-0.354	8 795	0.95	6 070	2 725	0.5
	28-A6-A-1-3	-0.355	10 918	0.94	7 440	3 478	0.4
Armature 2	28-A6-A-2-4	-0.323	9 522	0.92	6 880	2 642	0.5
	28-A6-A-2-5	-0.323	10 998	0.90	8 530	2 468	0.5
	28-A6-A-2-6	-0.328	7 748	0.96	5 920	1 828	0.7
Armature 3	28-A6-A-3-7	-0.290	9 940	0.94	7 410	2 530	0.5
	28-A6-A-3-8	-0.305	10 661	0.93	7 890	2 971	0.4
	28-A6-A-3-9	-0.306	8 272	0.94	6 040	2 232	0.6
Dallette	moyenne	-0.326	9 698		7 037	2 661	0.5
	écart-type	0.023	1 193		884	484	0.1

29-A6-C-INI (après-corrosion-accelerées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	29-A6-C-1-1	-0.443	9 225	0.99	8 500	725	1.8
	29-A6-C-1-2	-0.462	7 588	0.99	6 560	1 028	1.2
	29-A6-C-1-3	-0.464	7 620	0.99	6 750	870	1.5
Armature 2	29-A6-C-2-4	-0.447	6 821	0.99	6 460	361	3.5
	29-A6-C-2-5	-0.465	6 125	0.99	5 500	625	2.0
	29-A6-C-2-6	-0.473	6 872	0.99	6 220	652	2.0
Armature 3	29-A6-C-3-7	-0.469	6 201	0.99	5 600	601	2.1
	29-A6-C-3-8	-0.467	4 747	1.00	4 210	537	2.4
	29-A6-C-3-9	-0.477	6 168	0.99	5 490	678	1.9
Dallette	moyenne	-0.463	6 819		6 143	675	2.0
	écart-type	0.011	1 255		1 177	191	0.7

31-A6-A-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	31-A6-A-1-1	-0.499	2 688	0.99	2 300	388	3.3
	31-A6-A-1-2	-0.498	2 976	0.99	2 580	396	3.2
	31-A6-A-1-3	-0.500	2 793	0.99	2 450	343	3.7
Armature 2	31-A6-A-2-4	-0.523	2 653	0.99	2 280	373	3.4
	31-A6-A-2-5	-0.531	2 463	0.99	2 170	293	4.3
	31-A6-A-2-6	-0.511	2 660	0.99	2 350	310	4.1
Armature 3	31-A6-A-3-7	-0.572	2 481	0.99	2 090	391	3.3
	31-A6-A-3-8	-0.560	2 618	0.99	2 220	398	3.2
	31-A6-A-3-9	-0.534	3 012	0.99	2 550	462	2.8
Dallette	moyenne	-0.525	2 705		2 332	373	3.5
	écart-type	0.027	193		167	51	0.5

31-A6-A-INI (après-corrosion-accéléérées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	31-A6-A-1-1	-0.514	2 480	0.99	2 300	180	7.1
	31-A6-A-1-2	-0.524	2 869	0.96	2 570	299	4.3
	31-A6-A-1-3	-0.521	2 614	1.00	2 360	254	5.0
Armature 2	31-A6-A-2-4	-0.536	2 690	1.00	2 460	230	5.5
	31-A6-A-2-5	-0.546	2 598	1.00	2 330	268	4.7
	31-A6-A-2-6	-0.542	2 543	1.00	2 290	253	5.0
Armature 3	31-A6-A-3-7	-0.540	2 538	1.00	2 220	318	4.0
	31-A6-A-3-8	-0.551	2 809	1.00	2 450	359	3.5
	31-A6-A-3-9	-0.551	3 021	1.00	2 590	431	3.0
Dallette	moyenne	-0.536	2 685		2 397	288	4.7
	écart-type	0.013	180		128	75	1.2

31-A6-A-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	31-A6-A-1-1	-0.424	2 197	1.00	1 490	707	1.8
	31-A6-A-1-2	-0.396	1 840	1.00	1 240	600	2.1
	31-A6-A-1-3	-0.363	1 915	1.00	1 480	435	2.9
Armature 2	31-A6-A-2-4	-0.395	1 867	1.00	1 370	497	2.6
	31-A6-A-2-5	-0.419	2 873	1.00	1 940	933	1.4
	31-A6-A-2-6	-0.359	1 799	1.00	1 380	419	3.0
Armature 3	31-A6-A-3-7	-0.388	1 876	1.00	1 320	556	2.3
	31-A6-A-3-8	-0.379	1 794	1.00	1 350	444	2.9
	31-A6-A-3-9	-0.363	2 208	1.00	1 620	588	2.2
Dallette	moyenne	-0.387	2 041		1 466	576	2.4
	écart-type	0.024	350		210	164	0.6

31-A6-A-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	31-A6-A-1-1	-0.381	4 375	0.99	3 060	1 315	1.0
	31-A6-A-1-2	-0.373	3 649	0.99	2 440	1 209	1.1
	31-A6-A-1-3	-0.346	4 035	0.99	3 100	935	1.4
Armature 2	31-A6-A-2-4	-0.374	3 794	0.99	2 840	954	1.3
	31-A6-A-2-5	-0.354	3 091	0.99	2 310	781	1.6
	31-A6-A-2-6	-0.343	4 439	0.99	3 490	997	1.3
Armature 3	31-A6-A-3-7	-0.372	3 037	0.99	2 040	997	1.3
	31-A6-A-3-8	-0.364	3 574	0.99	2 720	854	1.5
	31-A6-A-3-9	-0.334	6 158	0.97	4 740	1 418	0.9
Dallette	moyenne	-0.361	4 017		2 971	1 046	1.3
	écart-type	0.018	941		798	217	0.2

31-A6-A-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	31-A6-A-1-1	-0.381	5 137	1.00	3 000	2 137	0.60
	31-A6-A-1-2	-0.370	4 011	1.00	2 480	1 531	0.83
	31-A6-A-1-3	-0.348	5 108	1.00	3 410	1 698	0.75
Armature 2	31-A6-A-2-4	-0.367	4 021	1.00	2 670	1 351	0.94
	31-A6-A-2-5	-0.354	3 169	1.00	2 090	1 079	1.18
	31-A6-A-2-6	-0.341	5 012	1.00	3 840	1 172	1.09
Armature 3	31-A6-A-3-7	-0.367	3 128	1.00	2 040	1 088	1.17
	31-A6-A-3-8	-0.355	3 508	1.00	2 590	918	1.39
	31-A6-A-3-9	-0.333	7 484	1.00	5 530	1 954	0.65
Dallette	moyenne	-0.357	4 509		3 072	1 437	0.96
	écart-type	0.015	1 371		1 091	423	0.27

32-A6-A-avant-corrosion-accéléérées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	32-A6-A-1-1	-0.458	3 195	0.90	2 290	905	1.4
	32-A6-A-1-2	-0.472	2 899	0.91	2 240	659	1.9
	32-A6-A-1-3	-0.484	3 401	0.88	2 700	701	1.8
Armature 2	32-A6-A-2-4	-0.469	2 841	0.90	2 180	661	1.9
	32-A6-A-2-5	-0.485	2 632	0.92	2 220	412	3.1
	32-A6-A-2-6	-0.497	2 825	0.91	2 320	505	2.5
Armature 3	32-A6-A-3-7	-0.461	3 322	0.89	2 600	722	1.8
	32-A6-A-3-8	-0.464	2 967	0.90	2 440	527	2.4
	32-A6-A-3-9	-0.468	3 205	0.89	2 600	605	2.1
Dallette	moyenne	-0.473	3 032		2 399	633	2.1
	écart-type	0.013	260		193	144	0.5

32-A6-A-1NI (après-corrosion-accelerées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	32-A6-A-1-1	-0.511	3 345	0.99	3 040	305	4.2
	32-A6-A-1-2	-0.535	3 603	0.99	3 140	463	2.8
	32-A6-A-1-3	-0.538	3 558	0.99	3 030	528	2.4
Armature 2	32-A6-A-2-4	-0.547	3 587	1.00	3 060	527	2.4
	32-A6-A-2-5	-0.548	3 229	1.00	2 820	409	3.1
Armature 3	32-A6-A-2-6	-0.557	2 901	1.00	2 440	461	2.8
	32-A6-A-3-7	-0.549	4 264	0.99	3 590	674	1.9
	32-A6-A-3-8	-0.557	3 335	0.99	2 850	485	2.6
Dallette	32-A6-A-3-9	-0.548	3 201	1.00	2 730	471	2.7
	moyenne écart-type	-0.543 0.014	3 447 380		2 967 317	480 99	2.8 0.6

32-A6-A-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	32-A6-A-1-1	-0.473	2 497	1.00	1 540	957	1.3
	32-A6-A-1-2	-0.478	2 625	1.00	1 660	965	1.3
	32-A6-A-1-3	-0.472	2 729	1.00	1 740	989	1.3
Armature 2	32-A6-A-2-4	-0.476	2 267	1.00	1 560	707	1.8
	32-A6-A-2-5	-0.494	3 902	0.99	2 570	1 332	1.0
Armature 3	32-A6-A-2-6	-0.469	2 188	1.00	1 610	578	2.2
	32-A6-A-3-7	-0.464	2 810	1.00	2 140	670	1.9
	32-A6-A-3-8	-0.465	2 459	1.00	1 750	709	1.8
Dallette	32-A6-A-3-9	-0.457	2 409	1.00	1 780	629	2.0
	moyenne écart-type	-0.472 0.010	2 654 510		1 817 334	837 242	1.6 0.4

32-A6-A-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	32-A6-A-1-1	-0.428	5 222	1.00	3 810	1 412	0.9
	32-A6-A-1-2	-0.428	6 282	0.98	4 840	1 442	0.9
	32-A6-A-1-3	-0.433	5 674	0.98	4 150	1 524	0.8
Armature 2	32-A6-A-2-4	-0.419	4 649	0.99	3 530	1 119	1.1
	32-A6-A-2-5	-0.410	6 416	0.98	4 750	1 666	0.8
Armature 3	32-A6-A-2-6	-0.410	4 872	0.99	3 770	1 102	1.2
	32-A6-A-3-7	-0.407	8 219	0.96	6 000	2 219	0.6
	32-A6-A-3-8	-0.396	5 228	0.99	3 890	1 338	1.0
Dallette	32-A6-A-3-9	-0.394	5 133	0.99	3 840	1 293	1.0
	moyenne écart-type	-0.414 0.014	5 744 1 104		4 287 783	1 457 338	0.9 0.2

32-A6-A-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	32-A6-A-1-1	-0.406	3 747	1.00	2 870	877	1.45
	32-A6-A-1-2	-0.410	4 503	1.00	3 450	1 053	1.21
	32-A6-A-1-3	-0.421	4 920	1.00	3 460	1 460	0.87
Armature 2	32-A6-A-2-4	-0.406	4 062	1.00	2 930	1 132	1.13
	32-A6-A-2-5	-0.395	4 926	1.00	3 710	1 216	1.05
Armature 3	32-A6-A-2-6	-0.404	4 733	1.00	3 440	1 293	0.99
	32-A6-A-3-7	-0.402	6 373	1.00	4 800	1 573	0.81
	32-A6-A-3-8	-0.395	4 607	1.00	3 370	1 237	1.03
Dallette	32-A6-A-3-9	-0.396	4 370	1.00	3 160	1 210	1.05
	moyenne écart-type	-0.404 0.008	4 693 739		3 466 568	1 228 206	1.07 0.19

33-A6-I-avant-corrosion-accelerées		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	33-A6-I-1-1	-0.542	2 525	0.99	2 070	455	2.8
	33-A6-I-1-2	-0.550	2 247	0.99	1 920	327	3.9
	33-A6-I-1-3	-0.565	2 381	1.00	2 010	371	3.4
Armature 2	33-A6-I-2-4	-0.566	2 494	1.00	2 130	364	3.5
	33-A6-I-2-5	-0.558	2 252	1.00	2 000	252	5.1
Armature 3	33-A6-I-2-6	-0.588	2 257	1.00	1 900	357	3.6
	33-A6-I-3-7	-0.574	2 506	0.99	2 220	286	4.5
	33-A6-I-3-8	-0.587	2 611	0.99	2 160	451	2.8
Dallette	33-A6-I-3-9	-0.599	2 558	0.99	2 080	478	2.7
	moyenne écart-type	-0.570 0.019	2 426 144		2 054 107	371 78	3.6 0.8

33-A6-I-1NI (après-corrosion-accelerées)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	33-A6-I-1-1	-0.493	2 144	1.00	1 920	224	5.7
	33-A6-I-1-2	-0.501	2 071	1.00	1 820	251	5.1
	33-A6-I-1-3	-0.481	2 108	1.00	1 890	218	5.8
Armature 2	33-A6-I-2-4	-0.512	2 267	1.00	2 040	227	5.6
	33-A6-I-2-5	-0.521	2 178	1.00	1 970	208	6.1
Armature 3	33-A6-I-2-6	-0.509	2 273	1.00	2 020	253	5.0
	33-A6-I-3-7	-0.519	3 523	0.99	3 150	373	3.4
	33-A6-I-3-8	-0.519	3 730	0.99	3 280	450	2.8
Dallette	33-A6-I-3-9	-0.516	3 785	0.99	3 340	445	2.9
	moyenne écart-type	-0.508 0.014	2 676 759		2 381 662	294 100	4.7 1.3

34-A6-A-avant-corrosion-accéléérées	Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
34-A6-A-1-1	-0.510	2 688	0.99	2 320	368	3.5
34-A6-A-1-2	-0.518	2 950	0.99	2 380	570	2.2
34-A6-A-1-3	-0.547	2 381	1.00	2 000	381	3.3
34-A6-A-2-4	-0.564	2 597	0.99	2 000	597	2.1
34-A6-A-2-5	-0.554	2 597	0.99	2 020	577	2.2
34-A6-A-2-6	-0.581	2 809	0.99	2 140	669	1.9
34-A6-A-3-7	-0.576	2 222	0.99	1 830	392	3.2
34-A6-A-3-8	-0.569	2 262	0.99	1 870	392	3.2
34-A6-A-3-9	-0.587	2 732	0.99	2 240	492	2.6
moyenne	-0.556	2 582		2 089	493	2.7
écart-type	0.027	248		193	114	0.6

34-A6-A-INI (après-corrosion-accéléérées)	Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
34-A6-A-1-1	-0.524	1 933	1.00	1 760	173	7.4
34-A6-A-1-2	-0.545	2 380	1.00	2 070	310	4.1
34-A6-A-1-3	-0.542	2 356	1.00	2 020	336	3.8
34-A6-A-2-4	-0.546	2 156	1.00	1 860	296	4.3
34-A6-A-2-5	-0.547	2 405	1.00	2 080	325	3.9
34-A6-A-2-6	-0.547	2 507	1.00	2 180	327	3.9
34-A6-A-3-7	-0.545	2 548	1.00	2 220	328	3.9
34-A6-A-3-8	-0.547	2 603	1.00	2 230	373	3.4
34-A6-A-3-9	-0.540	2 689	1.00	2 320	369	3.5
moyenne	-0.543	2 398		2 082	315	4.2
écart-type	0.007	234		182	59	1.2

35-A6-I-avant-corrosion-accéléérées	Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
35-A6-I-1-1	-0.517	2 268	0.99	1 940	328	3.9
35-A6-I-1-2	-0.496	2 890	0.99	2 380	510	2.5
35-A6-I-1-3	-0.486	3 333	0.98	2 770	563	2.3
35-A6-I-2-4	-0.539	2 304	0.99	2 000	304	4.2
35-A6-I-2-5	-0.527	2 128	0.99	1 890	238	5.4
35-A6-I-2-6	-0.549	2 088	0.99	1 750	338	3.8
35-A6-I-3-7	-0.547	2 825	0.99	2 430	395	3.2
35-A6-I-3-8	-0.560	2 119	1.00	1 810	309	4.1
35-A6-I-3-9	-0.564	2 247	1.00	1 920	327	3.9
moyenne	-0.532	2 467		2 099	368	3.7
écart-type	0.028	441		345	105	0.9

35-A6-I-INI (après-corrosion-accéléérées)	Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
35-A6-I-1-1	-0.507	1 714	1.00	1 530	184	6.9
35-A6-I-1-2	-0.508	1 832	1.00	1 590	242	5.3
35-A6-I-1-3	-0.502	2 149	1.00	1 900	249	5.1
35-A6-I-2-4	-0.509	1 654	1.00	1 470	184	6.9
35-A6-I-2-5	-0.509	1 497	1.00	1 370	127	10.0
35-A6-I-2-6	-0.508	1 619	1.00	1 460	159	8.0
35-A6-I-3-7	-0.501	1 799	1.00	1 650	149	8.6
35-A6-I-3-8	-0.514	1 699	1.00	1 550	149	8.6
35-A6-I-3-9	-0.511	1 778	1.00	1 590	188	6.8
moyenne	-0.508	1 749		1 568	181	7.4
écart-type	0.004	181		150	42	1.6

35-A6-I-21J	Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
35-A6-I-1-1	-0.425	1 393	1.00	799	594	2.1
35-A6-I-1-2	-0.410	1 400	1.00	889	511	2.5
35-A6-I-1-3	-0.412	1 674	1.00	1 080	594	2.1
35-A6-I-2-4	-0.408	1 296	1.00	891	405	3.1
35-A6-I-2-5	-0.417	1 561	1.00	1 160	401	3.2
35-A6-I-2-6	-0.418	1 157	1.00	491	666	1.9
35-A6-I-3-7	-0.415	1 736	1.00	1 090	646	2.0
35-A6-I-3-8	-0.414	1 295	1.00	708	587	2.2
35-A6-I-3-9	-0.417	1 420	1.00	756	664	1.9
moyenne	-0.415	1 437		874	563	2.3
écart-type	0.005	188		214	102	0.5

35-A6-I-03M	Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
35-A6-I-1-1	-0.428	2 117	1.00	1 150	967	1.3
35-A6-I-1-2	-0.399	1 631	1.00	1 040	591	2.2
35-A6-I-1-3	-0.390	2 080	1.00	1 330	750	1.7
35-A6-I-2-4	-0.391	1 659	1.00	1 090	569	2.2
35-A6-I-2-5	-0.381	1 491	1.00	1 050	441	2.9
35-A6-I-2-6	-0.389	1 556	1.00	846	710	1.8
35-A6-I-3-7	-0.386	2 126	1.00	1 410	716	1.8
35-A6-I-3-8	-0.387	1 754	1.00	1 070	684	1.9
35-A6-I-3-9	-0.377	1 876	1.00	1 110	766	1.7
moyenne	-0.392	1 810		1 122	688	1.9
écart-type	0.015	249		165	147	0.4

35-A6-I-06M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	35-A6-I-1-1	-0.414	2 523	0.99	1 690	833	1.5
	35-A6-I-1-2	-0.406	2 408	1.00	1 500	908	1.4
	35-A6-I-1-3	-0.388	2 774	1.00	1 770	1 004	1.3
Armature 2	35-A6-I-2-4	-0.394	2 434	1.00	1 590	844	1.5
	35-A6-I-2-5	-0.387	2 166	1.00	1 520	646	2.0
	35-A6-I-2-6	-0.385	2 014	1.00	1 180	834	1.5
Armature 3	35-A6-I-3-7	-0.377	2 691	1.00	1 830	861	1.5
	35-A6-I-3-8	-0.378	2 322	1.00	1 480	842	1.5
	35-A6-I-3-9	-0.378	2 523	1.00	1 580	943	1.4
Dallette	moyenne	-0.390	2 428		1 571	857	1.5
	écart-type	0.013	239		190	98	0.2

35-A6-I-12M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	35-A6-I-1-1	-0.473	1 878	1.00	1 190	688	1.85
	35-A6-I-1-2	-0.450	1 807	1.00	1 160	647	1.97
	35-A6-I-1-3	-0.431	2 270	0.99	1 430	840	1.52
Armature 2	35-A6-I-2-4	-0.435	1 715	1.00	1 140	575	2.22
	35-A6-I-2-5	-0.420	1 492	1.00	1 050	442	2.88
	35-A6-I-2-6	-0.423	1 684	0.99	1 010	674	1.89
Armature 3	35-A6-I-3-7	-0.413	2 175	0.99	1 550	625	2.04
	35-A6-I-3-8	-0.417	1 618	0.99	1 130	488	2.61
	35-A6-I-3-9	-0.411	1 816	0.99	1 250	566	2.25
Dallette	moyenne	-0.430	1 828		1 212	616	2.14
	écart-type	0.020	252		175	118	0.41

36-A6-A-avant-corrosion-accélérees		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	36-A6-A-1-1	-0.534	2 198	1.00	1 960	238	5.4
	36-A6-A-1-2	-0.515	2 625	0.99	2 480	145	8.8
	36-A6-A-1-3	-0.523	2 500	0.99	2 340	160	8.0
Armature 2	36-A6-A-2-4	-0.549	2 268	1.00	2 160	108	11.8
	36-A6-A-2-5	-0.540	2 618	0.99	2 430	188	6.8
	36-A6-A-2-6	-0.546	2 584	0.99	2 240	344	3.7
Armature 3	36-A6-A-3-7	-0.553	2 985	0.99	2 490	495	2.6
	36-A6-A-3-8	-0.571	2 941	0.99	2 570	371	3.4
	36-A6-A-3-9	-0.591	2 695	1.00	2 310	385	3.3
Dallette	moyenne	-0.547	2 601		2 331	270	6.0
	écart-type	0.023	264		190	133	3.1

36-A6-A-INI (après-corrosion-accélérees)		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	36-A6-A-1-1	-0.541	1 959	1.00	1 680	279	4.6
	36-A6-A-1-2	-0.542	2 229	1.00	1 990	239	5.3
	36-A6-A-1-3	-0.540	2 164	1.00	1 930	234	5.4
Armature 2	36-A6-A-2-4	-0.541	1 840	1.00	1 630	210	6.1
	36-A6-A-2-5	-0.541	1 907	1.00	1 700	207	6.2
	36-A6-A-2-6	-0.541	1 981	1.00	1 750	231	5.5
Armature 3	36-A6-A-3-7	-0.540	2 061	1.00	1 830	231	5.5
	36-A6-A-3-8	-0.543	1 977	1.00	1 700	277	4.6
	36-A6-A-3-9	-0.544	2 100	1.00	1 870	230	5.5
Dallette	moyenne	-0.541	2 024		1 787	237	5.4
	écart-type	0.001	125		124	25	0.5

36-A6-A-21J		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	36-A6-A-1-1	-0.478	1 721	1.00	1 230	491	2.6
	36-A6-A-1-2	-0.495	1 847	1.00	1 310	537	2.4
	36-A6-A-1-3	-0.482	1 830	1.00	1 310	520	2.5
Armature 2	36-A6-A-2-4	-0.458	1 476	1.00	1 120	356	3.6
	36-A6-A-2-5	-0.489	2 169	1.00	1 500	669	1.9
	36-A6-A-2-6	-0.473	1 584	1.00	1 160	424	3.0
Armature 3	36-A6-A-3-7	-0.479	1 877	1.00	1 350	527	2.4
	36-A6-A-3-8	-0.463	1 484	1.00	1 080	404	3.2
	36-A6-A-3-9	-0.468	1 462	1.00	1 020	442	2.9
Dallette	moyenne	-0.476	1 717		1 231	486	2.7
	écart-type	0.012	239		152	93	0.5

36-A6-A-03M		Ecorr (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jcorr (µA/cm ²)
Armature 1	36-A6-A-1-1	-0.401	2 643	1.00	2 050	593	2.1
	36-A6-A-1-2	-0.434	3 366	1.00	2 570	796	1.6
	36-A6-A-1-3	-0.432	2 459	0.99	1 750	709	1.8
Armature 2	36-A6-A-2-4	-0.394	2 363	0.99	1 790	573	2.2
	36-A6-A-2-5	-0.414	2 855	0.99	2 070	785	1.6
	36-A6-A-2-6	-0.424	2 139	1.00	1 590	549	2.3
Armature 3	36-A6-A-3-7	-0.402	3 126	0.99	2 420	706	1.8
	36-A6-A-3-8	-0.414	2 340	1.00	1 650	690	1.8
	36-A6-A-3-9	-0.406	2 012	1.00	1 300	712	1.8
Dallette	moyenne	-0.413	2 589		1 910	679	1.9
	écart-type	0.014	451		407	89	0.3

38-A6-A-06M							
	Eccor (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jccorr (µA/cm ²)	
Armature 1	36-A6-A-1-1	-0,473	2 909	1,00	1 950	959	1,33
	36-A6-A-1-2	-0,492	3 352	1,00	2 200	1 152	1,11
	36-A6-A-1-3	-0,483	2 607	1,00	1 750	857	1,49
Armature 2	36-A6-A-2-4	-0,451	2 349	1,00	1 700	649	1,96
	36-A6-A-2-5	-0,464	2 769	1,00	1 910	859	1,48
	36-A6-A-2-6	-0,458	1 985	1,00	1 490	495	2,57
Armature 3	36-A6-A-3-7	-0,448	2 593	1,00	1 880	713	1,79
	36-A6-A-3-8	-0,444	2 017	1,00	1 430	587	2,17
	36-A6-A-3-9	-0,452	2 025	1,00	1 350	675	1,89
Dallette	moyenne	-0,463	2 512		1 740	772	1,75
	écart-type	0,017	465		278	204	0,45

38-A6-S-03M							
	Eccor (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jccorr (µA/cm ²)	
Armature 1	38-A6-S-1-1	-0,179	70 580	0,28	1 900	68 680	0,02
	38-A6-S-1-2	-0,211	39 825	0,95	2 150	37 675	0,03
	38-A6-S-1-3	-0,199	38 921	0,65	1 760	37 161	0,03
Armature 2	38-A6-S-2-4	-0,186	40 214	0,59	2 000	38 214	0,03
	38-A6-S-2-5	-0,162	50 069	0,38	2 190	47 879	0,03
	38-A6-S-2-6	-0,172	50 062	0,38	1 810	48 252	0,03
Armature 3	38-A6-S-3-7	-0,182	51 945	0,37	1 960	49 985	0,03
	38-A6-S-3-8	-0,177	70 894	0,22	2 130	68 764	0,02
	38-A6-S-3-9	-0,187	65 836	0,29	1 660	64 176	0,02
Dallette	moyenne	-0,184	53 150		1 951	51 198	0,03
	écart-type	0,014	12 978		185	13 001	0,01

38-A6-S-1N1							
	Eccor (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jccorr (µA/cm ²)	
Armature 1	38-A6-S-1-1	-0,226	31 546	0,89	1 100	30 446	0,04
	38-A6-S-1-2	-0,197	35 971	0,86	1 090	34 881	0,04
	38-A6-S-1-3	-0,180	38 314	0,79	1 170	37 144	0,03
Armature 2	38-A6-S-2-4	-0,175	43 860	0,79	1 180	42 680	0,03
	38-A6-S-2-5	-0,168	48 077	0,72	1 260	46 817	0,03
	38-A6-S-2-6	-0,153	49 751	0,71	1 550	48 201	0,03
Armature 3	38-A6-S-3-7	-0,185	42 918	0,74	1 530	41 388	0,03
	38-A6-S-3-8	-0,168	50 000	0,67	1 600	48 400	0,03
	38-A6-S-3-9	-0,158	47 847	0,68	1 640	46 207	0,03
Dallette	moyenne	-0,179	43 143		1 347	41 796	0,03
	écart-type	0,022	6 586		229	6 408	0,01

38-A6-S-06M							
	Eccor (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jccorr (µA/cm ²)	
Armature 1	38-A6-S-1-1	-0,263	30 250	0,82	2 030	28 220	0,05
	38-A6-S-1-2	-0,256	52 340	0,69	2 430	49 910	0,03
	38-A6-S-1-3	-0,245	54 777	0,76	1 870	52 907	0,02
Armature 2	38-A6-S-2-4	-0,233	57 604	0,64	2 120	55 484	0,02
	38-A6-S-2-5	-0,217	59 115	0,67	2 570	56 545	0,02
	38-A6-S-2-6	-0,216	63 435	0,60	1 870	61 565	0,02
Armature 3	38-A6-S-3-7	-0,227	64 068	0,62	2 070	62 058	0,02
	38-A6-S-3-8	-0,226	76 514	0,52	2 140	74 374	0,02
	38-A6-S-3-9	-0,224	76 939	0,51	1 650	75 289	0,02
Dallette	moyenne	-0,234	59 449		2 077	57 372	0,02
	écart-type	0,017	13 977		285	14 051	0,01

38-A6-S-21J							
	Eccor (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jccorr (µA/cm ²)	
Armature 1	38-A6-S-1-1	-0,161	55 643	0,57	1 680	53 963	0,02
	38-A6-S-1-2	-0,150	54 620	0,58	1 660	52 960	0,02
	38-A6-S-1-3	-0,151	61 758	0,56	1 390	60 368	0,02
Armature 2	38-A6-S-2-4	-0,147	62 956	0,98	1 550	61 406	0,02
	38-A6-S-2-5	-0,130	66 896	0,48	1 560	65 336	0,02
	38-A6-S-2-6	-0,137	67 372	0,48	1 440	65 932	0,02
Armature 3	38-A6-S-3-7	-0,144	66 520	0,50	1 600	64 920	0,02
	38-A6-S-3-8	-0,135	67 874	0,50	1 660	66 214	0,02
	38-A6-S-3-9	-0,145	71 617	0,47	1 440	70 177	0,02
Dallette	moyenne	-0,145	63 917		1 553	62 364	0,02
	écart-type	0,010	5 734		108	5 786	0,00

38-A6-S-12M							
	Eccor (V)	1/PENTE (ohm)	R ²	Re (ohm)	Rp (ohm)	Jccorr (µA/cm ²)	
Armature 1	38-A6-S-1-1	-0,253	41 351	0,99	2 820	38 531	0,03
	38-A6-S-1-2	-0,235	48 380	0,98	3 640	44 740	0,03
	38-A6-S-1-3	-0,216	55 309	0,95	2 390	52 919	0,02
Armature 2	38-A6-S-2-4	-0,224	66 634	0,91	2 590	64 044	0,02
	38-A6-S-2-5	-0,208	61 023	0,95	3 490	57 533	0,02
	38-A6-S-2-6	-0,210	63 626	0,89	2 290	61 336	0,02
Armature 3	38-A6-S-3-7	-0,222	64 208	0,86	2 300	61 908	0,02
	38-A6-S-3-8	-0,218	65 399	0,93	2 640	62 759	0,02
	38-A6-S-3-9	-0,224	70 240	0,81	2 120	66 120	0,02
Dallette	moyenne	-0,223	59 574		2 698	56 877	0,02
	écart-type	0,014	9 441		536	9 731	0,00

