



HAL
open science

Etude de la corrosion des structures en béton armé et de leur réparation par traitements électrochimiques en vue d'une meilleure gestion des ouvrages d'art

Véronique Bouteiller

► To cite this version:

Véronique Bouteiller. Etude de la corrosion des structures en béton armé et de leur réparation par traitements électrochimiques en vue d'une meilleure gestion des ouvrages d'art. Matériaux. Université Paris-Est, 2016. tel-03307389v2

HAL Id: tel-03307389

<https://hal.science/tel-03307389v2>

Submitted on 3 Aug 2021

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.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Ecole doctorale : Sciences, ingénierie et environnement

Spécialité : Sciences des matériaux

Présentée par

Véronique BERNARDO BOUTEILLER

**Etude de la corrosion des structures en béton armé
et de leur réparation par traitements électrochimiques
en vue d'une meilleure gestion des ouvrages d'art**

Soutenue le 17 mai 2016 devant le jury composé de

Mme Myriam CARCASSES	Professeur, Université de Toulouse	Présidente et rapporteur
M. Ramon NOVOA	Professeur, Universidade Vigo, Espagne	Rapporteur
M. Karim AIT-MOKHTAR	Professeur, Université de La Rochelle	Rapporteur
M. Xavier BOURBON	Docteur, Ingénieur, ANDRA	Examineur
M. Thierry CHAUSSADENT	Directeur de recherche, Ifsttar	Examineur
Mme. Ginette ARLIGUIE	Professeur, Université Toulouse	Directrice de l'habilitation

Remerciements

Je tiens à commencer cette page de remerciements en associant toutes les personnes qui depuis une quinzaine d'années ont contribué à ce travail.

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Je remercie plus particulièrement Mme Myriam Carcasses, pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury, ainsi que MM. Ramon Novoa et Karim Aït-Mokhtar pour avoir accepté de rapporter ce travail et pour leurs remarques qui ont contribué à améliorer ce mémoire. Je remercie également mes examinateurs : MM. Xavier Bourbon et Thierry Chaussadent. Je remercie finalement Mme Ginette Arliguie d'avoir accepté de m'accompagner de ses conseils avisés durant cette habilitation.

Mes remerciements vont ensuite aux personnes qui m'ont fait confiance au sein du LCPC puis de l'Ifsttar pour développer cette thématique scientifique avec de l'électrochimie si particulière aux infrastructures en béton armé : Brigitte Mahut, Bruno Godart, Christian Cremona, Jean-François Seignol, François Toutlemonde et Jean-Michel Torrenti (désolée si j'en oublie).

Mes remerciements vont ensuite aux stagiaires, doctorants et post-doctorants que j'ai encadrés et qui par la qualité de leurs travaux ont contribué à ce mémoire (leurs noms figurent dans ce mémoire). Je remercie également les techniciens et techniciennes pour leurs implications dans ce travail scientifique au sein du LCPC puis de l'Ifsttar (leurs noms sont inscrits dans ce mémoire).

Mes activités de recherche dans ce domaine ont démarré suite à une formation à l'Ecole Centrale sous la bienveillance et l'expertise de M. Francois Wenger que je remercie très sincèrement.

Un travail aussi conséquent repose également sur des collaborations fortes que j'ai menées : LRPC puis Cerema, LRMH, CEA, EDF, CEBTP, Ugitech, Freyssinet, Renofors, ANDRA, Sixense-Concrete, les Université de Paris 6, Nantes, Toulouse, La Rochelle, IETcc, CSTC, etc.

Le travail avec les associations Cefracor, Rilem et AFGC m'a également apporté un soutien en termes de réseaux et de questions technologiques et scientifiques.

Ce travail est également issu des nombreux échanges avec la profession et les maitres d'ouvrages car les résultats scientifiques démontrés dans les laboratoires visent également à apporter un éclairage sur les structures "dans la vraie vie".

Enfin, je tiens à terminer cette page, en remerciant le soutien inébranlable de ma famille (et oui, pendant mes vacances il m'arrive de photographier des ponts !) et de mes amis.

La passion cela se partage !

Sommaire général

PREMIERE PARTIE : NOTICE PERSONNELLE Page 5

DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE Page 31

Première partie : Notice personnelle

SOMMAIRE

SOMMAIRE GENERAL	4
PREMIERE PARTIE : NOTICE PERSONNELLE	5
1 CURRICULUM VITAE	7
2 LABORATOIRE ET CARRIERE	8
2.1 HISTORIQUE DU LABORATOIRE	8
2.2 CARRIERE.....	8
2.3 POSITION ACTUELLE	9
3 ACTIVITES DE RECHERCHES	10
3.1 RECHERCHES IMPULSEES AU SEIN DE L'ORGANISME	11
3.2 RECHERCHES ISSUES DE CONTRATS ET REPONSES A APPEL D'OFFRES	13
3.3 COOPERATIONS EUROPEENNES ET INTERNATIONALES	17
3.4 ENCADREMENT DE JEUNES CHERCHEURS	18
3.4.1 <i>Encadrement de Post-doctorants</i>	18
3.4.2 <i>Encadrement de doctorants</i>	18
3.4.3 <i>Encadrement de stagiaires</i>	20
4 ANIMATION ET ORGANISATION DE LA RECHERCHE	21
4.1 RESPONSABILITES DE FORMATION, D'ENCADREMENT ET D'ANIMATION	21
4.2 JURYS DE DOCTORAT	21
4.3 RELECTRICE POUR JOURNAUX INTERNATIONAUX ET ORGANISMES	22
4.4 ORGANISATION D'EVENEMENTS SCIENTIFIQUES	22
4.5 PARTICIPATION A DES COMITES	22
5 ACTIVITES SUR OUVRAGES, CONTRATS D'EXPERTISE OU D'ETUDE	22
5.1 TRAVAUX SUR OUVRAGES [12]	23
5.2 EXPERTISES SUR OUVRAGES [2]	23
5.3 CONTRATS D'ETUDE	23
6 ACTIVITES DE NORMALISATION	24
7 ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET DE FORMATION CONTINUE	24
7.1 ENSEIGNEMENT	24
7.2 FORMATION CONTINUE	24
8 LISTE DES PUBLICATIONS ET VALORISATIONS	25
8.1 CONTRIBUTION A DES LIVRES (04)	25
8.2 ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE (2+10+2)	25
8.3 ARTICLES DANS DES REVUES SANS COMITE DE LECTURE (2)	26
8.4 CONFERENCES AVEC COMITE DE LECTURE ET AVEC ACTES (22 DONT 2 INVITEES)	26
8.5 CONFERENCES AVEC ACTES (24 DONT 1 INVITEE).....	27
8.6 CONFERENCES SANS ACTE (5)	28
8.7 ARTICLES DANS DES REVUES TECHNICO-PROFESSIONNELLES (6).....	29
8.8 PRINCIPAUX RAPPORTS DE RECHERCHES	29

1 CURRICULUM VITAE

Etat civil

BOUTEILLER BERNARDO Véronique

Née le 21 juin 1968 (47 ans) à Dugny (93) ; mariée ; 1 fils.

Coordonnées professionnelles

Ifsttar, Cité Descartes – Bâtiment Bienvenue, Département MAST/Laboratoire SDOA

14-20 boulevard Newton – 77447 Champs-sur-Marne - Marne-la-Vallée Cedex 2, France

Téléphone : 01 81 66 81 13 ; Mail : veronique.bouteiller@ifsttar.fr

Fonctions occupées¹⁾

- Depuis le 1^{er} janvier-2002 Chargée de Recherches 1^{ère} classe
Thématique : La corrosion des armatures dans les structures en béton armé
Depuis 2013 : Ifsttar **Champs sur Marne** – Département Matériaux et Structures (MAST) – Laboratoire Sécurité et Durabilité des Ouvrages d'Art (SDOA)
De 2011 à 2012 : LCPC **Paris** – Département Structures et Ouvrages d'Art (SOA) – Unité Sécurité et Durabilité des Ouvrages d'Art (DOA)
De 2002 à 2011 : LCPC **Paris** - Division Fonctionnement et Durabilité des Ouvrages d'Art (FDOA) – Section Durabilité des Ouvrages d'Art (SDOA)
- 2001-2002 Chargée de Recherches 2^{ème} classe,
ré-intégration LCPC **Paris** - Division Fonctionnement et Durabilité des Ouvrages d'Art (FDOA) – section Durabilité des Ouvrages d'Art (SDOA)
Formation d'électrochimie à l'Ecole Centrale Paris (Chatenay-Malabry)
Thématique : La corrosion des armatures dans le béton
- 1999-2001 Ingénieur de recherches (en détachement)
Saint-Gobain – Matériaux de Construction International (siège La Défense, puis laboratoire SGR en Seine Saint-Denis)
Thématique : Les matériaux polymères pour la construction (bardeaux asphaltés pour toiture, plaques en PVC ou dalles de béton pour terrasse, caisses à eau en PE, ...)
- 1996-1999 Chargée de Recherches 2^{ème} classe
LCPC Paris - Service Physico-Chimie des Matériaux
Thématique : La protection des bétons à l'aide de revêtements
- 1995-1996 Post-doctorante
Elf Atochem (site de Levallois, 92, France)
Thématique : Les polymères fluorés pour des applications de revêtements hydrophobes

Formation

- 1992-1995 **Doctorat** de l'Université Pierre et Marie Curie Paris 6, Spécialité Chimie et Physico-chimie des polymères. Synthèse et caractérisation de nouveaux polystyrènes porteurs de chaînes latérales fluorées. Soutenue le 18 décembre 1995. Directrice de thèse : S. Boileau. Laboratoire de chimie du Collège de France. Financement Elf Atochem.
- Juin 1992 **Diplôme d'Etudes Approfondies** "Chimie et physico-chimie des polymères" de l'Université Pierre et Marie Curie Paris 6. Mention Assez Bien. Classement 12/54.

Affiliations (sociétés savantes)

Membre du CEntre FRançais AntiCORrosion (**CEFRACOR**), de l'Association Française de Génie Civil (**AFGC**) et de la Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (**RILEM**).

¹⁾ J'ai travaillé à temps partiel 80% de 2002 à 2010, puis à temps partiel 90% de 2011 à 2013 et j'ai repris le temps plein en janvier 2014.

2 LABORATOIRE ET CARRIERE

2.1 Historique du laboratoire

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a été créé en 1831. Par le décret n°98-423 du 29 mai 1998, il devient un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), placé sous la tutelle conjointe du Ministère de l'équipement, du logement et des transports et du Ministère chargé de la Recherche. Réparti entre quatre implantations (Paris, Nantes, Marne-la-vallée, Satory-Versailles), le laboratoire effectue 25% de la recherche nationale dans les domaines liés au génie civil et aux infrastructures, en particulier la sécurité routière, la valorisation des infrastructures existantes et leur insertion dans leur environnement, et le développement des outils et méthodes du génie civil. Le LCPC est également "tête" du réseau scientifique et technique (RST) constitué des 17 laboratoires régionaux répartis en France et avec lesquels il travaille en étroite collaboration.

Parmi les nombreux changements qui ont lieu depuis 1998, il faut citer en particulier :

- mai 2010 : le LCPC (environ 600 personnes sur les sites de Paris - IdF et Nantes) alors composé de 15 divisions de recherche se restructure en 5 départements,
- 1^{er} janvier 2011 : Le LCPC et l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS) fusionnent pour donner naissance à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) ; L'Ifsttar compte environ 1200 personnes déployées sur 6 sites en France. L'Ifsttar est un établissement public à caractère scientifique et technologique, placé sous la tutelle conjointe du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) et du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (MESR). L'organigramme général de l'Ifsttar est présenté en annexe 1.
- décembre 2012 : l'implantation parisienne déménage dans le nouveau bâtiment Bienvenue sur le site de la Cité Descartes à Champs sur Marne (77). Certains travaux sont encore en cours en 2015.

Il s'ensuit que les missions des personnels Ifsttar ont été affectées par ces changements en "interne" mais aussi par les changements qui se sont opérés en parallèle dans le Réseau Scientifique et Technique lesquels ont abouti en janvier 2014 à la création du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema).

2.2 Carrière

Ma formation est essentiellement scientifique. Après un Baccalauréat S, j'ai poursuivi mes études à l'Université Pierre et Marie Paris 6 au sein de laquelle j'ai obtenu mon titre de DEA (en 1992) et mon diplôme de Docteur en Chimie et Physico-Chimie des Polymères (en 1995). Mon doctorat intitulé "Synthèse et caractérisation de nouveaux polystyrènes porteurs de chaînes latérales fluorées" était financé par la société Elf-Atochem. Cette dernière m'a ensuite engagée en contrat post-doctoral sur le site de Levallois afin de poursuivre les études sur la thématique des polymères fluorés pour des applications de moquettes non salissantes

En 1996, j'ai appris que le Ministère de l'équipement, des transports et du logement ouvrait, pour la première fois, un concours afin de recruter des chargés de recherches et j'ai postulé sur la thématique "protection des bétons" pour un poste au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris. J'ai été reçue au concours et j'ai démarré des activités de recherches et de certification de 1996 à 1999 dans le Service Physique-Chimie des Matériaux (Yves Mouton et Daniel André).

En 1999, j'ai demandé un détachement afin de travailler en tant qu'ingénieure de recherches pour Saint-Gobain (Gaël Cadoret), avec comme missions, d'une part, la création d'un laboratoire de recherches destiné aux Matériaux de Construction et, d'autre part, le lancement de sujets de recherches avec les Etats-Unis (shingles, PVC, etc...). J'ai d'abord travaillé au siège de Saint-Gobain à la Défense puis dans le laboratoire créé dans le centre de recherche de SGR en Seine Saint-Denis avec des missions aux Etats-Unis.

En 2001, j'ai ré-intégré le LCPC dans le département Structure des Ouvrages d'Art (Bruno Godart) dans la section Durabilité des Ouvrages d'Art (Brigitte Mahut) pour une nouvelle mission. Je devais créer un laboratoire afin d'étudier la corrosion des armatures dans les structures en béton armé et les traitements électrochimiques de réparation. Cette thématique sur la corrosion et sur les mesures électrochimiques étant totalement nouvelle pour moi, j'ai débuté mes activités avec un stage de formation à l'Ecole

Centrale Paris dans le laboratoire d'électrochimie dirigé par Jacques Galland et sous la supervision de François Wenger.

En 2001-2002, j'ai créé le laboratoire électrochimie au LCPC Paris (plans des locaux, aménagements, achats des matériels, sécurité chimique, informatique) avec l'aide de deux techniciens que je formais par compagnonnage et avec l'aide financière d'un contrat obtenu auprès de la DRAST (Direction des Recherches des Affaires Scientifique et Technique du Ministère de l'Equipeement).

Cette notice personnelle porte exclusivement sur la thématique de recherche concernant la corrosion des armatures des structures en béton et les traitements électrochimiques de réparation que j'ai réalisée depuis 2001 jusque 2015. Sur cette période, j'ai travaillé à temps partiel de 80% de 2002 à 2010, puis à temps partiel de 90% de 2011 à 2013 et j'ai repris le temps plein en janvier 2014.

2.3 Position actuelle

Je suis chargée de recherches CR1 (8^{ème} échelon) au sein de l'Ifsttar sur le site de Champs sur Marne (77) (Annexe 1), dans le Département Matériaux et Structures (MAST) (Annexe 2) et plus précisément je travaille dans le Laboratoire Sécurité et Durabilité des Ouvrages d'Art (SDOA) (Annexe 3).

Je suis responsable de l'équipe électrochimie et j'encadre une technicienne et quatre doctorants².

Je suis responsable du "laboratoire d'électrochimie" de 90m² qui comporte des matériels d'électrochimie (de type potentiostats, diverses alimentations électriques, des centrales d'acquisition,...), du matériel de chimie (titrateur de chlorures, pH-mètre, sorbonnes, armoires de sécurité, ...) et un pont roulant de 2,5 tonnes (Photo 1). Je suis également responsable d'un autre laboratoire "vieillessement climatique" de 90m² qui comporte des étuves et des enceintes climatiques (régulées en température et en humidité dont une de grand volume (1500 L)), ces matériels étant mutualisés entre différents laboratoires de l'Ifsttar et gérés par la technicienne.



Photo 1 : Laboratoire d'électrochimie (salle BJ20) à Ifsttar Champs sur Marne.

Mes activités en tant que chargée de recherches à l'Ifsttar ont pour finalité une meilleure gestion des ouvrages d'art existants (connaissance des pathologies, diagnostic des dégradations et réparations) ce qui constitue une recherche plutôt appliquée avec des composantes d'expertise et de normalisation.

² La composition de l'équipe électrochimie et le nombre de personnes sont très variables dans le temps avec notamment un turn-over important des techniciens (§4.14.1) et un recrutement de doctorants et de post-doctorants qui dépend des contrats obtenus.

Ces activités peuvent être différentes de celles d'une chargée de recherche travaillant dans des organismes de recherche du monde académique. Je vais donc les illustrer sur la base des missions suivantes :

- Recherches (projets, contrats et appels d'offres, encadrements),
- Animation et organisation de la recherche,
- Interventions sur le terrain, études et expertises,
- Normalisation,
- Enseignement et formation,
- Publications et valorisations (depuis 2001).

Au sein de l'Ifsttar, et dans le département MAST, je travaille en particulier avec :

- T. Chaussadent, Directeur de Recherches, HDR du site de Champs sur Marne, qui étudie la corrosion des métaux dans des composés cimentaires (à l'échelle du matériau), et
- L. Gaillet, Directeur de Recherches, HDR du site de Nantes, qui étudie la corrosion des câbles de précontrainte et des structures métalliques.

De plus, je tiens à insister sur le fait que je travaille toujours en étroite collaboration avec les collègues du Réseau Scientifique et Technique du Ministère et notamment le Cerema. Je citerai en particulier les Directions Territoriales de l'Ouest et de l'île de France. En effet, le Cerema apporte la composante du terrain que je considère comme très importante dans mes activités de recherches.

3 ACTIVITES DE RECHERCHES

Dans ce document, je décris mes recherches à partir de 2001, période qui correspond à mon retour au LCPC avec la prise en main et le développement d'une nouvelle thématique de recherches dans ma carrière : la dégradation des structures en béton armé par corrosion et leur réparation par des traitements électrochimiques (§2.2). Il s'agissait de venir renforcer les travaux d'André Raharinaivo (qui ne réalisait pas d'essais expérimentaux au LCPC Paris et qui allait partir à la retraite), de Thierry Chaussadent (Service Physico-Chimie des Matériaux à Paris) qui travaillait sur la corrosion des métaux dans les matrices cimentaires (à l'échelle du matériau) et de Laurent Gaillet (Section Câbles à Nantes) qui s'intéressait plus particulièrement à la corrosion des câbles de précontrainte.

Mes activités de recherches dans la thématique de la corrosion des armatures dans les structures en béton armé sont multiples et couvrent l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage depuis sa conception, en passant par sa vie en service et sa dégradation puis sa maintenance, sa réparation (pour les ouvrages d'art) ou sa réhabilitation (pour les monuments historiques).

- Dans l'étape de la conception d'un ouvrage, il faut notamment s'intéresser à la capacité de la formulation de béton à retarder le phénomène de la corrosion. Cet aspect a notamment fait l'objet d'un sujet dans l'opération de recherches du LCPC "Durabilité du béton" dans lequel j'ai étudié des formulations à base de ciments différents et plus particulièrement un ciment aux laitiers de hauts fourneaux qui pourrait offrir un gain environnemental certain (diminution de la production de CO₂ par rapport à la fabrication d'un ciment Portland) en plus de l'amélioration de certaines propriétés de durabilité.
- Dans l'étape de l'ouvrage en service, il est important de bien décrire qualitativement et quantitativement le diagnostic de corrosion de l'ouvrage. J'ai contribué dans divers projets tels que le Benchmark des poutres de la Rance à l'amélioration de la compréhension des mesures et de la méthodologie du diagnostic sur éléments structurels et à sa pertinence par rapport aux résultats de durabilité attendus. J'ai également contribué à la comparaison de résultats de diagnostic de corrosion en utilisant différents appareils de mesure dans le cadre d'une collaboration internationale. Enfin, dans le projet ANR APPLLET, je me suis focalisée sur l'étude de la phase de propagation de la corrosion des armatures dans les bétons et de la phase de fissuration. Pour cela, j'ai étudié des corps d'épreuve en béton armé, sains ou pollués

(carbonatation ou ions chlorure) soumis à des conditions de température et d'humidité contrôlées ou en conditions naturelles extérieures.

- Dans l'étape de maintenance ou de réparation de l'ouvrage dégradé, j'ai étudié des traitements électrochimiques tels que la déchloruration, la réalcalinisation et la protection cathodique par courant imposé ou par anodes sacrificielles. Ces traitements électrochimiques semblent prometteurs comparativement au traitement de ragréage classique qui a démontré une durabilité insuffisante (problème de compatibilité entre ancien et nouveau béton) en raison de corrosions qui apparaissent assez rapidement sur les zones non réparées (effet de piles).

L'ensemble de ces recherches ont pour objectif final de mieux appréhender le processus cinétique de la corrosion des armatures dans le béton afin de prédire de manière plus fiable et plus précise la durabilité des structures en béton armé. Je participe également à la mise en valeur de mes recherches dans l'utilisation de leurs résultats par les modélisateurs et les maîtres d'ouvrages. Pour les premiers, il s'agit de pouvoir leur fournir des données d'entrée pour les simulations et les calculs numériques. Pour les seconds, il s'agit de leur proposer des outils et une méthodologie de diagnostic de la corrosion qui leur permettra de mieux gérer le parc existant d'ouvrages en béton armé dans leurs actions de maintenance et de réparation en cherchant le meilleur compromis entre l'utilisation en toute sécurité de l'ouvrage par les usagers, le gain de durabilité de l'ouvrage et le coût financier.

Ci-après, je vais illustrer mes activités de recherche sur le plan national, qu'elles soient impulsées par le LCPC (Opérations de recherches) puis l'Ifsttar (Opérations de Recherche Stratégique et Incitative (ORSI)) ou bien obtenues dans des contrats et/ou des réponses à appel d'offre. Dans une troisième partie je décrirai les actions de recherche sur le plan international. J'insisterai sur le mode de participation (animatrice ou partenaire), les collaborations, les financements et les valorisations. Enfin, mon implication dans l'encadrement de jeunes chercheurs (pos-doctorant, doctorants et stagiaires) fera l'objet d'une quatrième partie.

Mes activités de recherches représentent entre 70 à 80 % de mon temps de travail.

3.1 Recherches impulsées au sein de l'organisme

2001

Signature d'une convention entre le LCPC et l'Ecole Centrale de Paris pour ma **formation intensive en techniques électrochimiques appliquées au béton armé** (maître de stage F. Wenger).

2002

J'ai créé le Laboratoire Electrochimie dans le département Structures et Ouvrages d'Art du LCPC : aménagement des locaux, mise en sécurité chimique, achats des matériels et appareils, formation de l'équipe technique (3 personnes).

2003 – 2005

- **Groupe de réflexion sur "Méthodes d'Etude de la Corrosion dans le Béton" du CEFRACOR.**

En 2003, au sein du centre français de l'Anticorrosion (CEFRACOR), dans la commission "Construction-Bâtiment", **j'ai créé et animé** une nouvelle sous-commission sur les méthodes d'étude de la corrosion des armatures dans les matériaux cimentaires. Les réunions comptaient une vingtaine de personnes d'organismes nationaux. L'animation de ce groupe m'a permis de tisser des liens solides en particulier avec Le Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques, l'Université de Toulouse, le CEA de Saclay, EDF, le LERM, etc... Enfin, ce groupe a été l'incubateur d'une des thématiques qui sera retenue dans le projet ANR APPLLET en 2007.

- **Opération de recherches "Durabilité du béton armé et de ses constituants" (11B021) pilotée par V. Baroghel-Bouny (LCPC).**

J'étais animatrice du sujet portant sur le traitement électrochimique de déchloration (§3.2).

- **Opération de recherches "Comportement des câbles" (11H031) pilotée par A. Raharinaivo (LCPC)**

J'étais animatrice du sujet portant sur l'étude de la corrosion de câbles de pré-contrainte dans différents milieux simulant les bétons.

- **Tentative de montage d'une Opération de recherches sur la corrosion mais ré-orientation au profit du montage du projet ANR APPLET (animatrice).**

2006 – 2011

- **Opération de recherches "Approche performantielle et probabiliste de la durée de vie des ouvrages en béton armé " (11N061) pilotée par V. Baroghel-Bouny et C. Cremona (LCPC).**

J'étais animatrice du sujet 2 "Etude de la corrosion" et du sujet 3 "Traitement électrochimique des ouvrages en béton".

La corrosion d'armatures dans des bétons formulés à base de ciment Portland ou bien de ciments aux laitiers a été étudiée en fonction du temps et a donné lieu à une publication [AL6].

Dans cette opération de recherches, c'est le traitement électrochimique de réalcalinisation du béton armé qui a été étudié (§3.2).

2012 – 2015

- **Opération de Recherche Stratégique et Incitative "Auscultation pour des Ouvrages Sûrs" (APOS), pilotée par G. Villain & L. Gaillet (Ifsttar Nantes) et B. Thauvin (Cerema DTer Ouest)**

Je suis co-animatrice avec B. Thauvin (Cerema, DTer Ouest, DLRB Saint-Brieuc) du sujet 2 "Durabilité des câbles et des armatures dans le béton".

Ce sujet met en complémentarité les résultats de l'analyse de durabilité et celui des analyses de corrosion (dans la phase de pénétration des polluants et le début de l'initiation). En ce qui me concerne, ce projet a pour but d'étudier la corrosion de dalles en béton armé (treillis) à l'aide, d'une part, de capteurs noyés et, d'autre part, de mesures réalisées sur le parement. Les corps d'épreuve sont des dalles en béton armé (dimensions 70*90*13cm, deux formulations à base de CEM I et de CEM III)) instrumentées ou non. La corrosion est provoquée par des ions chlorure par imbibition.

Je **co-encadre deux thèses** (§3.2 et §3.4.2) intitulées "Etude de la solution aciers inoxydables pour les structures en béton armé polluées par les ions chlorure" (A. Oumarou) et "Diagnostic de corrosion sur ouvrage – Fiabilité et aide à la décision" (L. Bourreau).

- **Opération de Recherche Stratégique et Incitative "Maîtrise du cycle de vie" (MCV) pilotée par A. Orcesi (Ifsttar MLV) et A. Houel (Cerema DTer Lyon)**

Je suis co-animatrice avec L. Adelaïde du sujet 3 "Diagnostic structural et aide à la maintenance".

Dans le cadre de ce sujet, nous poursuivons l'étude sur la corrosion de prismes en béton armé soumis à des environnements de température et d'humidité différents (suite du projet APPLLET GT3) et l'étude sur la fissuration liée au gonflement des produits de corrosion à l'interface acier/béton.

Depuis 2014, **je co-encadre deux thèses** (§3.2 et §3.4.2) dont les intitulés sont "Etude in-situ des produits de corrosion et des traitements électrochimiques" (Y. Tissier) et "Etude expérimentale et numérique de la dégradation par corrosion d'éléments structurels en béton armé" (O. Loukil).

Je suis co-animatrice avec R-P. Martin (Ifsttar), d'une étude en vieillissement naturel sur le long terme avec la fabrication de poutrelles (dimensions 100x25x10 cm) qui sont entreposées à Guerville depuis 2012 (site rural pour la carbonatation) et à la Rochelle depuis 2013 (site maritime, zone de marnage) pour le suivi de la corrosion en conditions réelles.

3.2 Recherches issues de contrats et réponses à appel d'offres

2003

J'étais animatrice du **Contrat DRAST sur la déchloruration du béton armé par des méthodes électrochimiques** (n°02 DST 03 (2003-2005)).

Le travail visait à étudier l'efficacité du traitement électrochimique de déchloruration par courant imposé (i) d'éprouvettes cylindriques en microbéton armé (après pénétration des ions chlorure), (ii) de dalles en béton armé gâchées avec des ions chlorure (dimensions 30x30x5 cm, 3 armatures) et (iii) d'une poutrelle de la Rance vieillie en milieu marin depuis 40 ans (dimensions 250x20x20 cm).

Collaborations : Ifremer Brest (Poutre de la Rance P012).

Financement (H.T.) : DRAST (66 890 €).

Valorisations : Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport [R3], de conférences nationales [CLA1], [CLA2], [CLA7] et d'un article [AL3].

2005

J'étais partenaire du **Contrat RGCU – Benchmark des poutres de la Rance** piloté par EDF, CEA et CEBTP.

J'ai participé à la tâche "Caractérisation des corps d'épreuve et de l'état de corrosion (selon le programme expérimental) par des méthodes "non destructives" en utilisant un potentiostat de laboratoire (Parstat 2263). L'objectif était de comparer les résultats du diagnostic de corrosion sur un corpus d'éprouvettes identiques avec des matériels de mesures (de chantier et de laboratoire) différents pour identifier les écarts et les expliquer.

Collaborations : EDF, CEA, CEBTP, LREP, LMDC, LERM, SP Institute (Suède).

Financement (H.T.) : RGCU (42 500 €).

Valorisations : Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport [R1] et d'un article [AL4].

2006

➤ **Thèse "La réalcalinisation du béton armé dégradé par carbonatation" (Y.Y. Tong).**

J'ai été co-encadrante de cette thèse sur le traitement de réalcalinisation du béton armé dégradé par carbonatation (avec E. Marie-Victoire (LRMH)). La réalcalinisation a été étudiée selon les deux procédés commercialisés : courant imposé (avec la participation de la société RENOFORS) et anode sacrificielle (avec la participation de la société FREYSSINET). Les objectifs étaient premièrement d'évaluer l'efficacité du traitement (à l'aide de mesures analytiques et électrochimiques pour aider au diagnostic) et deuxièmement, d'évaluer la durabilité du traitement (jusqu'à 2.5 années après traitement). De plus, le

traitement de réalcalinisation a été étudié en tant que réparation - maintenance sur des dalles dont les armatures étaient faiblement corrodées et en tant que réparation - réhabilitation sur des dalles dont les armatures étaient fortement corrodées. Enfin, le suivi de la réhabilitation par réalcalinisation d'un des premiers ponts en béton armé de France (le pont Camille de Hogues à Châtellerauld) a fait l'objet d'un chapitre de la thèse.

Collaborations : Ministère de la Culture - LRMH, LISE, Renofors, Freyssinet.

Financement (H.T.) : Ifsttar (50 000 €) et LRMH (72 000 €). Nous n'avons pas souhaité que les industriels financent ces travaux mais nous leur avons demandé leur soutien pour la mise en œuvre des traitements selon les règles de l'art.

Valorisations : Ces travaux ont fait l'objet de rapports de recherches (licence, maîtrise, thèse (dont [R4], [R5]), de nombreuses publications dans des congrès internationaux [CLA4], [CLA6], [CLA8], [CLA10], **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et nationaux [CA10], [CA11] (obtention du 3ème prix de la F NTP lors de la journée du Réseau Génie Civil et Urbain en 2009), d'un rapport de recherche ERLPC (OA n°66) [L2] et d'un article [AL12].

➤ **Projet ANR APLET (Durée de vie des ouvrages : Approche Prédictive, PerformantiELLE et probabiliste).**

En tant qu'**animatrice** du groupe de travail du CEFRACOR sur la corrosion dans les milieux cimentaires, j'ai été **à l'origine** du groupe de travail n°3 du Projet ANR APLET piloté par C. Cremona (LCPC). De plus, mes relations privilégiées avec le CSTC en Belgique et l'IETcc en Espagne les ont incités à nous rejoindre sur fonds propres. Cette action a vraisemblablement contribué à la réponse positive de l'ANR.

Le projet était divisé en 5 groupes de travail (GT) dont la coordination et le fonctionnement étaient assurés par un comité de pilotage (CP) et un comité exécutif (CE) :

Groupe de travail GT0 : Etat de l'art et besoins

Groupe de travail GT1 : Altération du béton – étude de l'interaction béton/environnement

Groupe de travail GT2 : Comportement des structures dégradées par corrosion

Groupe de travail GT3 : Diagnostic électrochimique des ouvrages dégradés

Groupe de travail des utilisateurs Finaux (GTf).

Je me suis très fortement impliquée dans ce projet, tant sur son montage (échec en 2006, acceptation en 2007) que sur sa réalisation comme en témoignent les points suivants :

J'ai participé au montage du dossier déposé auprès de l'ANR et j'étais responsable de la thématique de la corrosion

J'étais membre du comité de pilotage

J'étais membre du comité exécutif

J'étais partenaire du GT0

J'étais partenaire du GT2 et responsable du sujet 3 "Etude du vieillissement et des comportements différés sur l'adhérence acier/béton"

J'étais co-animatrice à 80% du GT3 " Diagnostic électrochimique des ouvrages dégradés " avec V. L'Hostis (CEA, 20%). Ce groupe de travail était constitué de plusieurs organismes français ((LRMH, CEA, LERM, LMDC, LREP Melun, LR Lille) et européens (l'IETcc espagnol et le CSTC belge) qui avaient souhaité être associés sur fonds propres. Les objectifs étaient liés à l'efficacité de la gestion technique des ouvrages en béton armé selon les cinq sujets suivants :

GT3-1 : Etude bibliographique et documentaire (participation)

GT3-2 : Fabrication des corps d'épreuves et vieillissements (responsable)

GT3-3 : Amélioration de la connaissance des techniques de mesures des vitesses de corrosion (participation)

GT3-4 : Etude de l'influence des conditions environnementales (température et hygrométrie) sur les mesures de corrosion (responsable)

GT3-5 : Validation des mesures de vitesse de corrosion – Exemples d'application (participation)

J'étais membre du GTf (groupe des utilisateurs finaux)

Collaborations : Vinci Construction France, EDF, Oxand, LERM, Syrokko, LMDC Toulouse, ENS Cachan, PolytechLille, Université de Bordeaux, Université de la Rochelle, IETcc (Espagne), CERIB, CEA, LCPC, LRMH, IRSN, CSTC (Belgique), LREP, LRPC Lille.

Financement ANR (H.T.) : global : 675 802 € ; pour LCPC GT3 : 142 712 €.

Valorisations : L'ensemble des travaux de l'ANR APLET ont fait l'objet de nombreux livrables [R7], [R8], [R9], [R10], [R11], de publications dans des congrès internationaux [CLA5], [CLA15], [CLA12], [CLA17], [CLA18], [CLA19] et nationaux [CA9], [CA12], [CA20], [C1], [C2], [C5], d'articles [AL7], [AL8], [AL9], [AL10], [AL11] et d'un ouvrage édité par le CERIB et l'Ifsttar [L4].

2009

➤ **Contrat de post-doctorat sur la performance de la réalcalinisation à long terme (M. Sahal)**

En 2009, en collaboration avec E. Marie-Victoire du LRMH j'ai monté un contrat post-doctoral de 18 mois (M. Sahal) afin de compléter les résultats obtenus lors de la thèse sur le même sujet, en prenant en compte l'efficacité du traitement sur le plus long terme (5 ans) et en vérifiant les paramètres du traitement (durée du traitement, intensité de densité de courant de traitement,...).

Collaborations : Ministère de la Culture - LRMH, LISE

Financement (H.T.) : Ifsttar (57 500 €) et LRMH (57 500 €).

Valorisations : Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport [R6] et d'une conférence internationale [CLA16].

2012

➤ **Thèse sur l'utilisation des aciers inoxydables dans les structures en béton soumises à des teneurs en ions chlorure importantes (A. Oumarou)**

En 2012, je suis sollicitée par Ugitech et par mes collègues Ifsttar pour co-encadrer une thèse sur les aciers inoxydables.

Direction de thèse : T. Chaussadent (Ifsttar)

Collaborations : Ugitech

Financement (H.T.) : CIFRE Ugitech salaire du thésard + contrat d'accompagnement (70 000 €).

2013

➤ **DIM-OxiMORE → réponse négative**

Demande d'une allocation de thèse (**partenaire**).

➤ **DIM-OxiMORE → acceptée**

Demande d'investissement de capteurs de corrosion noyés et centrale d'acquisition (**partenaire**).

Ce projet (dont le porteur est le LRMH) va permettre d'étudier la corrosion des armatures dans un béton soumis à de la carbonatation (deux formulations à base de CEM I et de CEM III), d'une part, à l'aide de capteurs noyés et, d'autre part, à l'aide de mesures non destructives en parement. Ce sujet est parallèle à celui mené dans APOS qui concerne le milieu chloruré.

Financement (H.T.) : 20 077 €

2014

➤ **DIM-OxiMORE → réponse négative**

Demande d'investissement d'un potentiostat multivoies (**animatrice**).

➤ **Thèse sur l'étude des produits de corrosion in-situ (Y. Tissier) → acceptée**

Je suis co-animatrice de cette thèse avec E. Marie-Victoire (LRMH).

Direction de thèse : S. Joiret (LISE) et T. Chaussadent (Ifsttar)

Collaborations : LRMH, LISE

Financement (H.T.) : Ifsttar (50 000 €) + LRMH (75 000 €)

➤ **Thèse "Etude couplée expérimentale et numérique de la corrosion d'éléments structurels en béton armé" (O. Loukil) → acceptée**

Je suis co-animatrice de cette thèse avec Lucas Adelaïde et Marc Quiertant (Ifsttar).

Direction de thèse : F. Ragueneau (ENS Cachan) et T. Chaussadent (Ifsttar)

Collaborations : Andra

Financement (H.T.) : Salaire du doctorant Ifsttar + contrat d'accompagnement Andra (80 000 €)

➤ **Thèse sur le diagnostic de corrosion sur ouvrage (Pont de l'île de Ré) – Fiabilité et Aide à la décision (L. Bourreau) → acceptée**

Je suis à l'origine du montage de cette thèse (voir année 2015).

Direction de thèse : L. Gaillet (Ifsttar) et F. Schoefs (Université de Nantes)

Collaborations : Université de Nantes, Cerema (DTecITM IdF et DTer Ouest), Concrete et Département de Charente Maritime.

Financement (H.T.) : CIFRE Concrete salaire du doctorant + contrat d'accompagnement (90 000 €) + département de Charente-Maritime en tant que maître d'ouvrage du pont de l'île de Ré (625 000 €).

➤ **ANR MODEVIE → proposition acceptée.**

Je suis **partenaire** de cette ANR pilotée par le LMDC Toulouse (M. Carcassès).

Collaborations : Université de Toulouse – Paul Sabatier Toulouse 3, Vinci Construction France, CERIB, Lafarge Centre de Recherche, Eurovia Management, Université de la Rochelle, Ecole Centrale de Nantes, Cerema Direction Territoriale Ouest

Financement (H.T.) : ANR 76 752 € (pour un budget global de 700 000 €).

➤ **PN PERFDUB → proposition acceptée**

J'ai **participé** aux études d'opportunité puis de faisabilité et de montage → accepté fin 2014

Collaborations : Vinci Construction France, Cerema DTer Ouest, GEM, LMDC, Ifsttar, CERIB, Bouygues Construction, Vinci Construction Grands Projets, SNBPE, ATILH, Sigma Béton, Holcim. LaSie.

Financement (H.T.) : fabrications et diagnostics de corrosion (350 000 €).

➤ **PN GEDI → pas encore accepté.**

J'ai **participé** aux études d'opportunité puis de faisabilité et de montage.

2015

➤ **Convention de recherches DéCoF-Ré**

Je suis à l'origine du montage du projet de recherches DéCoF-Ré qui a nécessité trois années de négociations et de discussions. Ce projet, que **j'anime**, s'articule autour du pont de l'île de Ré. Il implique six organismes (publics et privés) soit une vingtaine de personnes. Le budget avoisine un million d'euros sur une durée de trois ans. Il intègre la thèse de L. Bourreau. Il comporte également un volet durabilité dont les résultats seront discutés en parallèle des résultats du PN PERFDUB.

3.3 Coopérations européennes et internationales

2003

J'étais partenaire du programme européen COST 534 "New Materials and Systems for Prestressed Concrete Structures". J'ai participé au group project "applications of electrochemical treatments to prestressed concrete structures" avec l'étude du comportement de câbles de précontrainte dans des solutions simulant un béton chloruré. Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport [R2].

2007

J'étais partenaire avec l'IETcc (Espagne), le LRMH et le LREP de Melun dans un travail de comparaison de matériels de mesures de corrosion. Ces travaux ont fait l'objet d'un article [AL5].

J'ai collaboré avec le CSTC (Belgique) et l'IETcc (Espagne) dans le cadre du projet ANR APLET (§3.2).

2009

Dans le cadre d'une **collaboration espagnole** avec l'Université polytechnique de Madrid (J. Planas) et l'IETcc (C. Andrade), j'ai accueilli et formé une doctorante espagnole (B. Sanz Merino) aux mesures de caractérisations électrochimiques pendant 3 mois. Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport [R12].

2014

➤ **Programme européen JPI Heritage → désistement**

J'ai participé à l'élaboration du projet Redmonest, mais je me suis désistée car le délai de la soumission était trop serré en regard de mes autres projets en cours.

➤ **Programme européen H2020 → désistement**

Dans le cadre de l'appel européen H2020, **j'ai participé** à la réponse de l'appel d'offre du projet MG.8.1-2014. Smarter design, construction and maintenance, Sujet OptIR-Bridge- Optimized innovative rejuvenation techniques for smart and durable bridges in transport infrastructures en tant que partenaire dans le WP7 Electrochemical treatments.

Etant donné les nombreux succès dans mes projets en 2014 (3 thèses acceptées) et le départ d'un des techniciens de l'équipe, j'ai été forcée de me désister (avant la soumission du projet).

3.4 Encadrement de jeunes chercheurs

Depuis 2001, j'ai encadré ou co-encadré des travaux de recherche réalisés par un post-doctorant, des doctorants et des étudiants stagiaires. Dans les tableaux suivants sont précisés la liste des personnes, leur niveau, leur laboratoire, le taux d'encadrement (%), l'année, le titre, les collaborations et les financements éventuels. J'ai également formé et encadré 12 techniciens (§3.4.1).

3.4.1 Encadrement de Post-doctorants

Mohamed Sahal	2009-2011, Post-Doc 18 mois	LCPC-LRMH-LISE	Encadrement 80%
---------------	--------------------------------	----------------	-----------------

Titre : Etude de la durabilité de traitements électrochimiques contre la corrosion dans des bétons carbonatés

Collaborations : Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques, Ministère de la Culture (E. Marie-Victoire) / Laboratoire des Interfaces et des Systèmes Electrochimiques, Université Pierre et Marie Curie Paris 6 (S. Joiret)

Financement : LCPC et LRMH (75 000 €)

3.4.2 Encadrement de doctorants

Elise Duroudier-Blactot	Soutenance 08/04/2008	LCPC	Encadrement 10%
-------------------------	-----------------------	------	-----------------

Titre : Etude des paramètres de durabilité des aciers de précontrainte dans les coulis de ciment ségrégés

Direction : T. Chaussadent (LCPC Paris) et E. Sutter (Université Pierre et Marie Curie Paris 6)

Collaborations : Ifsttar Paris (T. Chaussadent et V. Bouteiller), Université de Paris 6 (E. Sutter)

Financement : LCPC

Situation actuelle du diplômé : Technip France

Yun Yun Tong	Soutenance 21/09/2009	LCPC-LRMH-LISE	Encadrement 80%
--------------	-----------------------	----------------	-----------------

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

Direction (ED 388 Université Pierre et Marie Curie) : S. Joiret (Université Pierre et Marie Curie Paris 6)

Collaborations: Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques, Ministère de la Culture (E. Marie-Victoire)/Laboratoire des Interfaces et des Systèmes Electrochimiques, Université Paris 6 (S. Joiret)/société Renofors (C. Redon)/société Freyssinet (J. Orellan, N. Berramdane et C. Tourneur)

Financement : LCPC et LRMH

Situation actuelle du diplômé : Maître de conférences à l'Université de Zhejiang, Hangzhou, Chine

Florian AUDER	2010-2013 Abandon en 3 ^{ème} année	Ifsttar Nantes	Encadrement 5%
---------------	--	----------------	----------------

Titre : Critères d'emploi d'un système de protection/réhabilitation électrochimique en présence d'armatures de précontrainte

Direction (ED SPIGA Université de Nantes) : L. Gaillet (Ifsttar)

Comité de suivi de thèse : Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Constructions, Université de Toulouse (J-P. Balayssac)

Financement : Ifsttar

Situation actuelle du diplômé : -

Vincent Garcia	Soutenance 10/12/2013	LMDC	Comité de suivi
----------------	-----------------------	------	-----------------

Titre : Contribution à l'étude du taux de chlorures pour l'amorçage de la corrosion des armatures du béton armé

Direction : M. Carcassès et R. François (Université de Toulouse)

Comité de suivi de thèse : Bouygues (Ph. Gegout), Vinci (F. Cussigh), Freyssinet (X. Hallopeau), Ginger (G. Taché), Soletanche (S. Darson), CEA (V. L'Hostis)

Financement : FNTP

Situation actuelle du diplômé : -

Adam Oumarou	2012-2016	Ifsttar - Ugitech	Encadrement 80%
--------------	-----------	-------------------	-----------------

Titre : Etude de la solution aciers inoxydables pour les structures en béton armé polluées par les ions chlorure.

Direction (ED SIE Université Marne La Vallée) : T. Chaussadent (Ifsttar)

Collaborations : Ifsttar (T. Chaussadent et L. Gaillet)/Ugitech (T. Mezquita, E. Chauveau et M. Mantel)

Financement : CIFRE Ugitech salaire du thésard + contrat d'accompagnement (70 000 €)

Yolaine TISSIER	2014-2017	Ifsttar - LRMH	Encadrement 50%
-----------------	-----------	----------------	-----------------

Titre : Etude in-situ de la corrosion du béton armé et des traitements électrochimiques.

Direction (ED SIE Université Marne La Vallée) : T. Chaussadent (Ifsttar) et S. Joiret (Université Pierre et Marie Curie Paris 6)

Collaborations: Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques, Ministère de la Culture (E. Marie-Victoire)/Laboratoire des Interfaces et des Systèmes Electrochimiques, Université Paris 6 (S. Joiret)

Financement : Ifsttar (50 000 €) + LRMH (75 000 €) + Contrat d'accompagnement (20 000 €)

Lucas BOURREAU	2014-2017	Ifsttar - Concrete	Encadrement 50%
----------------	-----------	--------------------	-----------------

Titre : Diagnostic de corrosion sur ouvrage – Fiabilité et aide à la décision

Direction (ED 498, SPIGA, Université Nantes) : L. Gaillet (Ifsttar) et F. Schoefs (Université de Nantes)

Collaborations : Concrete (M. Brouxel, S. Naar), Département de la Charente-Maritime (A. Audouin-Dubreuil), Université de Nantes (F. Schoefs), Cerema DTer IDF et DTer Ouest et DTech ITM (B. Thauvin, A. Pavoine, C. Cremona).

Financement : CIFRE Concrete salaire du doctorant + contrat d'accompagnement (90 000 €) + département de Charente-Maritime en tant que maître d'ouvrage du pont de l'île de Ré (625 000 €).

Olfa LOUKIL	2014-2017	Ifsttar - Andra	Encadrement 40%
-------------	-----------	-----------------	-----------------

Titre : Etude expérimentale et numérique de la dégradation par corrosion d'éléments structurels en béton armé

Direction (ED SIE Université Marne La Vallée) : T. Chaussadent (Ifsttar) et F. Ragueneau (ENS Cachan)

Collaborations: Ifsttar (L. Adelaïde, V. Bouteiller, M. Quiertant, T. Chaussadent), ENS Cachan (F. Ragueneau), Andra (X. Bourbon et L. Trenty)

Financement : Salaire du doctorant Ifsttar + contrat d'accompagnement Andra (80 000 €).

3.4.3 Encadrement de stagiaires

Yun Yun Tong	2005 – Maîtrise, 6 mois	Université de Cergy Pontoise	Encadrement 80%
--------------	----------------------------	------------------------------	--------------------

Collaboration avec E. Marie-Victoire (LRMH), RENOFORS et FREYSSINET

Rapports : Traitement électrochimique de réalcalinisation du béton armé, 2005, 56p. ; Traitement électrochimique de réalcalinisation du béton armé par courant imposé (RENOFORS), 2005, 33p. ; Traitement électrochimique de réalcalinisation du béton armé par courant galvanique (FREYSSINET), 2005, 38p.

Yun Yun Tong	2006 – M2, 6 mois	ENS Cachan (Y. Berthaud)	Encadrement 80%
--------------	----------------------	-----------------------------	--------------------

Collaboration avec le LRMH (E. Marie-Victoire), RENOFORS et FREYSSINET

Rapport : Réalcalinisation du béton armé, 2006, 36p.

Julien Cambillard	2008 – IUT, 10 semaines	IUT d'Orsay (K. Loudjani)	Encadrement 100%
-------------------	----------------------------	------------------------------	---------------------

Rapport : Caractérisations électrochimiques d'un acier enrobé dans du béton : Optimisation de la méthode d'acquisition avec le potentiostat VMP2Z et le logiciel EC-Lab, 2008, 43p.

Beatriz Sanz Merino	2009 – Doctorante, 3 mois	Université polytechnique de Madrid (J. Planas) et l'IETcc (C. Andrade)	Encadrement 100%
---------------------	------------------------------	--	---------------------

Rapport : Electrochemical measures – application to slabs with accelerated corrosion and to slabs with realkalisation treatment, 2009, 43p.

Su Lin	2011 – M1, 6 mois	Université Paris-Est Créteil, Ecole Supérieure d'Informatique Appliquée à la Gestion (ESIAG, N. Caspard)	Encadrement 40%
--------	----------------------	---	--------------------

Collaboration avec B. Koubi (Ifsttar)

Rapport : Conception et Réalisation d'un traitement automatisé de données électrochimiques, 2011, 105p.

Umair Iftikhar	2011-2012 – M1 Pro, 12 mois, CDD alternance	Université Paris Sud (T. Minea) et le CNAM	Encadrement 100%
----------------	---	---	---------------------

Rapport : Etude paramétrique sur la corrosion du béton armé, 2012, 69p.

Johanne Montout	2012 – M2, 6 mois	Université Paris Est Créteil, (MATériaux du Patrimoine bâti et culturel dans l'Environnement (MAPE, A. Chabas),	Encadrement 90%
-----------------	----------------------	---	--------------------

Collaboration avec E. Marie-Victoire (LRMH)

Rapport : Diagnostic de corrosion de bétons armés, 2012, 50p.

Su Lin	2012 – M2, 6 mois	Université Paris-Est Créteil, Ecole Supérieure	Encadrement 50%
--------	----------------------	---	--------------------

		d'Informatique Appliquée à la Gestion (ESIAG, N. Caspard)	
--	--	---	--

Collaboration avec B. Koubi (Ifsttar)

Rapport : Conception et réalisation d'un cluster de calcul et d'un traitement automatisé de données électrochimiques, 2012, 44p.

Umair Iftikhar	2012-2013 – M2 Pro, 12 mois, CDD alternance	CNAM (S. Dubent), Université Paris Sud et l'ESIEE	Encadrement 80%
----------------	---	---	-----------------

Collaboration avec M. Quiertant (Ifsttar)

Rapport : Corrosion des armatures en acier dans le béton : étude de solutions avec armatures en matériaux composites, 2013, 47p.

Nina Coulaty-Chin	2012-2013 – PFE, 12 mois, en alternance	Ecole Nationale des Techniciens de l'Equipement (ENTE Aix, C. Caillet)	Encadrement 100%
-------------------	---	--	------------------

Rapport : Diagnostic de corrosion et protection cathodique par courant imposé d'un ouvrage en béton armé, 2013, 47p.

4 ANIMATION ET ORGANISATION DE LA RECHERCHE

4.1 Responsabilités de formation, d'encadrement et d'animation

Depuis 2001, j'anime une "équipe électrochimie" constituée de 2 à 5 personnes (entre personnel permanent et étudiants) selon les années. J'ai encadré et formé "par compagnonnage" douze personnes sur une période de 14 années (voir tableau ci-après). Ce nombre élevé s'explique par un turn-over important des techniciens dans leur corps vis-à-vis de leur carrière (mouvement tous les 3 ans) et le départ à la retraite ou la réussite aux concours de certains d'entre eux.

Nom	Qualification	Période
Gaël Renard	Expert technique	2001 – 2002
André Laplaud	Personnel non titulaire	2001 – 2004 (retraite)
Aurélié Maloula	Technicienne supérieure sur titre	2001 - 2004
René-Stéphane Morelle	Expert technique	2003 - 2005
Matthieu Morin	Technicien supérieur	2004 - 2006
Béatrice Duchesne	Technicienne supérieure	2004 - 2006
Alexandre Deman	Technicien supérieur	2006 - 2009
Jean Dauthuille	Expert technique	2007 – 2009 (retraite)
Jean-François Cherrier	Technicien supérieur	2009 – 2011
Nina Coulaty-Chin	Technicienne supérieure principale	2012 – (congés maternité en nov 2014)
Patrick Boujard	Expert technique	2013 – 2014 (réussite au concours TSPDD externe juin 2014)
William Traverst	Technicien (CDD à 50% Ifsttar Nantes et 50% Ifsttar Champs sur Marne)	2014

J'ai participé à l'animation de la section Durabilité des Ouvrages d'Art de 2010 à 2011 pendant l'absence d'un chef de section.

4.2 Jurys de doctorat

En plus de la participation au jury de thèse de la doctorante que j'ai encadré et qui a soutenu en 2009, j'ai été invitée à évaluer en tant qu'examinatrice les travaux d'un doctorant de l'Université de Toulouse. Les détails sont donnés ci-dessous.

Seifallah BEN HADJ HASSINE, Electro-décontamination des matériaux cimentaires, Direction M.Carcassès de l'Université de Toulouse, soutenue le 21 novembre 2012.

4.3 Relectrice pour journaux internationaux et organismes

Je réalise des évaluations d'articles pour des revues internationales telles que Corrosion Science, European Journal of Environmental and Civil Engineering et Construction and Building Materials.

Je suis également sollicitée par des organismes tels que la FIB, le CETMEF, le Cerema, pour relire des documents.

4.4 Organisation d'évènements scientifiques

J'ai participé à différentes actions dans le cadre de l'organisation d'évènements scientifiques :

- Participation à l'école d'été du CNRS THEMA'COR 2007 sur "Anticorrosion et durabilité dans le Bâtiment, le Génie Civil et les Ouvrages Industriels" à Hauteville.
- Relecture des résumés et des articles pour le congrès CONSEC 2007 à Tours qui était co-organisé par l'Ifsttar (F. Toutlemonde).
- Montage et participation au Workshop sur les anodes galvaniques au Congrès EUROCORR 2009 à Nice avec G. Taché du CEFRACOR.
- Montage et participation à différentes "journées de Rencontre CEFRACOR" :
 - o N°7 "Techniques électrochimiques appliquées à la protection et la réparation du béton armé", Paris, le 18 octobre 2005 (66 participants),
 - o N°13 " Le diagnostic des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion", Paris, le 24 juin 2010 (116 participants);
 - o N°14 "La Protection Cathodique pour la maîtrise de la corrosion des armatures des constructions en béton - Courant imposé et Anodes galvaniques", Paris, le 23 mars 2012 (127 participants)
 - o N°15 "Electrochimie et Protection Cathodique - La théorie au service de la pratique", Université La Rochelle, le 13 avril 2012 (63 participants).
- Chairlady dans différents congrès (Eurocorr 2009 et ICDC 2014)

4.5 Participation à des comités

De 2009 à 2010, j'étais membre du comité scientifique (CS) du LCPC en tant que représentante du personnel.

De 2007 à 2013 j'étais membre du comité d'évaluation des chercheurs (CEVAL) du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) en tant que représentante du personnel.

5 ACTIVITES SUR OUVRAGES, CONTRATS D'EXPERTISE OU D'ETUDE

En complément de mes activités de recherches, je réalise certaines études de suivi de travaux sur ouvrages réels, des expertises et des contrats d'étude. Ces activités correspondent à environ 10%-30% de mon temps de travail.

Bien que ces activités à l'échelle réelle me demandent un investissement logistique plus important qu'au laboratoire, j'ai décidé d'appliquer les résultats de mes travaux de recherches aux ouvrages dans un souci d'utilité et également d'aide aux maître d'ouvrage dans leur gestion du patrimoine vieillissant. De plus, ces activités me permettent de côtoyer une autre communauté que celle exclusivement scientifique, ce qui constitue un enrichissement de plus.

5.1 Travaux sur ouvrages [12]

J'ai participé avec différents degrés d'implications aux travaux sur certains ouvrages que j'ai listés ci-après.

- [1] Pont sur le Loup (M. Givry, LR Nice), 2005, Aide à la rédaction du DCE sur la réparation par traitements électrochimiques.
- [2] Lavoir de charbon de Binche en Belgique (Mme Elisabeth Marie-Victoire du LRMH et M. Loutrel, Société Renofors), 2006, Suivi du traitement de réalcalinisation. Rapport.
- [3] Pont d'Aquitaine (M. Cochet, LR Bordeaux), 2007, Conseils sur la protection cathodique par projection de Zinc et diagnostic de corrosion.
- [4] Appontement Port Autonome du Havre, 2006-08 (M. Gauthier, Port du Havre)
- [5] BPR de Cattenom, 2008, Dosage de chlorures.
- [6] Pont de Vinça (M. Many, CG66), 2009, Conseils sur un problème de pollution par chlorures.
- [7] Pont Camille de Hogues à Chatelleraut (CG86) avec la société RENOFORS et le LR d'Angers – Suivi du chantier de réalcalinisation, rapport de recherche E. Marie-Victoire et V. Bouteiller, août 2009, 28 p., chapitre VI de la thèse de Y.Y. Tong, 2009.
- [8] Tunnel du Vieux Port à Marseille, 2009, Conseils pour le CETU sur la protection cathodique
- [9] Viaduc de Saint-Cloud, 2010-2015, expertise sur la Protection Cathodique par Courant Imposé avec anodes sacrificielles (G. Damien, DRIEA IF, DIRIF)
- [10] Eglise Notre Dame de Royan (LRMH, projet APPLLET)
- [11] Anneau de Linas-Montléry, 2014 (Cerema, DTeclTM idF, V. Martinet), conseils sur la réparation par réalcalinisation de l'ouvrage.
- [12] Pont de l'île de Ré (Anne Audouin-Dubreuil, Département de la Charente-Maritime), projet DéCoF-Ré et thèse de L. Bourreau.

5.2 Expertises sur ouvrages [2]

J'ai participé à deux expertises sur ouvrages. Ces missions sont extrêmement valorisantes car elles me permettent, d'une part, de mettre en œuvre sur des ouvrages réels les fruits de mes recherches et d'autre part, elles nécessitent de s'impliquer dans une communauté autre que scientifique constituée de maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, bureaux de contrôles, etc. Dans la gestion des ouvrages, les choix reposent non seulement sur des critères scientifiques et techniques mais également sur des critères opérationnels (contraintes de chantiers), budgétaires, sociétaux et politiques.

- [1] Appontement Port Autonome du Havre, 2006-08, expertise sur la protection cathodique par anodes sacrificielles, Rapport d'expertise, V. Bouteiller et B. Godart, juillet 2008, 13 p.
- [2] Viaduc de Saint-Cloud, 2010-2015 : Je suis membre du comité d'expert sur la mise en protection cathodique de l'ouvrage. J'ai co-animé le chantier pilote de protection cathodique par courant imposé à l'aide d'anodes forcées de 2012-13 (avec présentation des résultats le 25 juillet 2013 au Comité Technique Général du Viaduc de Saint-Cloud) ; j'ai aidé à la rédaction du CCTG en 2014 ; En tant qu'expert, je participe au suivi de la réparation générale en 2015.

5.3 Contrats d'étude

Sur demande de RTE, j'ai proposé d'étudier au laboratoire l'incidence du courant alternatif sur les risques de corrosion des structures en béton armé. Cette étude a conduit à des expérimentations dont les résultats sont rassemblés dans les rapports suivants :

- [1] Partie 1 : Fabrication des corps d'épreuve, octobre 2008, 8p.
- [2] Partie 2 : Faisabilité des caractérisations électrochimiques après injection de courant alternatif, juillet 2009, 8p.
- [3] Partie 3A : Caractérisations électrochimiques initiales des 40 dalles en béton armé (avant injection du courant alternatif), octobre 2010, 23p.

- [4] Partie 4 : Caractérisation des dalles (5 saines et 10 chlorurées) après 5 ans, août 2014, 11p. et 12p.

6 ACTIVITES DE NORMALISATION

En complément de ces activités de recherches, d'expertises et de formation, je mène des activités de normalisation via le groupe miroir du CEFACOR pour l'AFNOR. Ces activités correspondent à environ 5% de mon temps de travail en fonction des années. J'ai en particulier contribué aux travaux suivants :

- [1] Norme NF EN 12696 sur la protection cathodique : participation au groupe du travail miroir pour faire remonter les commentaires français, puis traduction en français
- [2] Spécification 14038-2 sur la déchloruration : traduction en français
- [3] Spécification 14038-1 sur la réalcalinisation : participation au groupe du travail miroir pour faire remonter les commentaires français, puis traduction en français
- [4] Fascicule 65

7 ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET DE FORMATION CONTINUE

Je me suis rendue compte que la communication avec les différents acteurs du monde du génie civil (en poste ou encore en formation initiale) était importante non seulement pour faire connaître la problématique de la corrosion des structures en béton, leur diagnostic et leurs réparations mais également pour échanger sur des propositions de solutions qui mettent en avant d'autres arguments que ceux strictement techniques (sociaux, financiers, de réalisation, etc...).

7.1 Enseignement

L'Ifsttar encourage ses chercheurs à effectuer des missions d'enseignement.

Lorsque j'ai ré-intégré le laboratoire en 2001, sur une thématique nouvelle "la corrosion du béton armé", je ne me sentais pas encore compétente pour donner des cours dans ma thématique de recherches. En 2008, le Prof. Y. Berthaud de l'ENS Cachan – Paris 6 m'a proposé d'effectuer une dizaine d'heures d'enseignement sur la corrosion du béton armé. J'ai bien sûr accepté la proposition mais il s'est avéré que l'Université ne pouvait pas payer un personnel qui travaillait à temps partiel (80%) et je n'ai donc pas enseigné.

C'est en 2013, et sur proposition de J-M. Torrenti, que j'ai réalisé ma première mission d'enseignement auprès d'une trentaine d'élèves de 3^{ème} année de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées dans le cadre du module DURBE avec un cours de 3 heures sur la durabilité du béton armé vis-à-vis de la corrosion.

En 2014 j'ai répété cette expérience intéressante et j'ai également fait cours (1h30) à des étudiants en thèse en tant que vacataire pour l'Ecole Doctorale SIE à l'Université Paris Est.

7.2 Formation continue

Dans le cadre de la formation continue, j'ai présenté des conférences sur la meilleure connaissance de la corrosion du béton armé, le diagnostic de corrosion et les traitements de réparation, essentiellement auprès des agents du LCPC puis Ifsttar et du Réseau Scientifique et Technique.

J'ai également participé à une école thématique du CNRS sur la corrosion en 2007 (voir publications).

- [1] V. Bouteiller, Traitements électrochimiques pour la réhabilitation du béton armé, Journée d'information Club CDOA, 15 décembre 2005, Nice

- [2] V. Bouteiller, V. L'Hostis, Présentation du programme ANR APPLLET GT3 : Diagnostic de la corrosion du béton armé, CEFRACOR, 1^{er} avril 2008, Paris
- [3] V. Bouteiller, Caractérisations électrochimiques des bétons armés, Club Ouvrage d'Art, 9 Juillet 2008, Châtelleraut (communication invitée)
- [4] V. Bouteiller, La corrosion du béton armé, Séminaire du département Structures et Ouvrages d'Art; 10 juin 2011, Paris
- [5] V. Bouteiller, L. Gaillot, V. Perrier, T. Chaussadent, Corrosion des armatures et des câbles, Stratégie scientifique, séminaires connaissance - réciproque, Ifsttar, 26-27 mai 2011, Lyon

8 LISTE DES PUBLICATIONS ET VALORISATIONS

Dans cette partie du document, je recense l'ensemble des valorisations de mes travaux de recherches essentiellement produits après 2001 car ils correspondent à un tournant thématique dans ma carrière.

8.1 Contribution à des livres (04)

- [L1] **V. Bouteiller**, Chapitre 18. Les traitements électrochimiques pour la réhabilitation du béton armé dégradé. S. Audisio et G. Béranger, Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2010.
- [L2] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire and S. Joiret, Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation, ERLPC n° OA 66, 2010.
- [L3] G. Taché, G. Arliguie, N. Berramdane, **V. Bouteiller**, M. Brouxel et all, Anodes galvaniques pour le traitement de la corrosion des armatures des constructions en béton, CEFRACOR, Documents Scientifiques et Techniques, 2011.
- [L4] C. Cremona, P. Rougeaud, J.M. Torrenti, S. Poyet, L. Adelaide, Y. Berthaud, **V. Bouteiller**, V. L'Hostis, Durée de vie des ouvrages en béton armé - Approche prédictive, performantielle et probabiliste - Recommandations du projet ANR-APPLLET, Ifsttar - CERIB, 2012.

8.2 Articles dans des revues internationales à comité de lecture (2+10+2)

- [AL1] *JM. Leleu, **V. Bernardo**, A. Polton, M. Tardi, P. Sigwalt, About the various types of transfer-reactions in the cationic polymerization of isobutyl vinyl ether, *Polymer International*, 37(3), (1995) 219-30.*
- [AL2] ***V. Bouteiller**, AM. Garnault, D. Teyssie, S. Boileau, M. Moller, Synthesis, thermal and surface characterization of fluorinated polystyrenes, *Polymer International*, 48(9), (1999) 765-72.*
- [AL3] ***V. Bouteiller**, A. Laplaud, A. Maloula, R.S. Morelle, B. Duchesne, M. Morin, Electrochemical chloride extraction of a beam polluted by chlorides after 40 years in the sea, *Journal De Physique Iv*, 136 (2006) 331-340.*
- [AL4] *O. Poupard, V. L'Hostis, **V. Bouteiller**, B. Capra, S. Catinaud, D. Francois, J.-L. Garciaz, S. Laurens, T. Luping, G. Olivier, G. Tache, Corrosion diagnosis of reinforced concrete beams after 40 years exposure in marine environment by non destructive tools, *Revue Européenne de Génie Civil*, 11 (2007) 35-54.*
- [AL5] *I. Martinez, C. Andrade, N. Rebolledo, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, G. Olivier, Corrosion characterization of reinforced concrete slabs with different devices, *Corrosion*, 64 (2008) 107-123.*
- [AL6] ***V. Bouteiller**, C. Cremona, V. Baroghel-Bouny, A. Maloula, Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time, *Cement and Concrete Research*, 42 (2012) 1456-1467.*
- [AL7] ***V. Bouteiller**, C. Toque, A. Cury, J.-F. Cherrier, E. Diday, C. Cremona, Non destructive electrochemical characterizations of reinforced concrete corrosion: basic and symbolic data analysis, *Corrosion Reviews*, 30 (2012) 47-62.*
- [AL8] *B. Richard, M. Quiertant, **V. Bouteiller**, L. Adelaide, J.-L. Tailhan, C. Cremona, Influence of accelerated corrosion on the reinforced cover concrete cracking behavior: experimental and numerical study, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (2012) 450-459.*

- [AL9] **V. Bouteiller**, J.-F. Cherrier, V. L'Hostis, N. Rebolledo, C. Andrade, E. Marie-Victoire, Influence of humidity and temperature on the corrosion of reinforced concrete prisms, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (2012) 471-480.
- [AL10] V. L'Hostis, E. Marie-Victoire, **V. Bouteiller**, J.L. Garciaz, E. Amblard, C. Emtaz, J.F. Cherrier, F. Marzin, Study of the active/passive corrosion behaviour of reinforced concrete slabs using different devices, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (2012) 481-490.
- [AL11] E. Marie-Victoire, **V. Bouteiller**, J.L. Garciaz, J.F. Cherrier, J. Dauthuille, F. Marzin, J. Schneider, On-site instantaneous corrosion rate measurements on a historical building, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (2012) 505-523.
- [AL12] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete — Part 1: Sacrificial anode process, *Cement and Concrete Research*, 42 (2012) 84-94.
- [AL13] B. Richard, M. Quiertant, **V. Bouteiller**, A. Delaplace, L. Adelaide, F. Ragueneau and C. Cremona, *Experimental and numerical analysis of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete sample*, *Computers and Concrete*, soumission 2013
- [AL14] **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, C. Cremona, *Mathematical law for corrosion of reinforced concrete contaminated by chlorides*, *Construction and Building Materials*, soumission 2015.

8.3 Articles dans des revues sans comité de lecture (2)

- [A1] F. Toutlemonde, **V. Bouteiller**, G. Platret, M. Carcasses, M. Lion, Field demonstration of UHPFRC durability, *Concrete International*, Nov 2010, 39-45.
- [A2] G. Tache, **V. Bouteiller**, M. Brouxel, Le diagnostic des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion, *Matériaux et Techniques*, 3 (2010) 186-189.

8.4 Conférences avec comité de lecture et avec actes (22 dont 2 invitées)

- [CLA1] **V. Bouteiller**, Electrochemical chloride extraction efficiency on different reinforced concrete specimens, EUROCORR'05, September 4 - 8, 2005, Lisbon, Portugal (**Keynote**).
- [CLA2] **V. Bouteiller**, Electrochemical chloride extraction of a beam polluted by chlorides after 40 years in the sea, Nucperf, March 27 – 30, 2006, Cadarache, France.
- [CLA3] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, et S. Joiret, Durability evaluation of a realkalisation treatment using sacrificial anodes, EUROCORR'07, September 9-13, 2007, Freiburg, Germany.
- [CLA4] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Durability evaluation of a realkalisation treatment using impressed current, 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, May 11-14, 2008, Istanbul, Turkey.
- [CLA5] V. L'Hostis, S. Charles, **V. Bouteiller**, C. Brunet, D. Dauffer, Non destructive identification of rebar corrosion in reinforced concrete structures, Workshop de l'OCDE/AEN/CSNI, October 1-3, 2008, Prague, Czech Republic.
- [CLA6] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Durability of realkalisation treatment using impressed current or galvanic anodes for the rehabilitation of reinforced concrete structures, International Conference on Durability of Concrete Structures, DBMC XI, November 26-27, 2008, Hangzhou, China.
- [CLA7] **V. Bouteiller**, Y.Y. Tong, Electrochemical chloride extraction of a beam polluted by chlorides after 40 years in the sea, International Conference on Durability of Concrete Structures, DBMC XI, November 26-27, 2008, Hangzhou, China.
- [CLA8] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, S. Joiret, M-C. Bernard, Modifications of corrosion products during galvanic treatment of reinforced carbonated concrete, EUROCORR'09, September 06-10, 2009, Nice, France.
- [CLA9] **V. Bouteiller**, Y.Y. Tong, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Maintenance and rehabilitation of reinforced concrete slabs using realkalisation treatment, EUROCORR'09, September 06-10, 2009, Nice, France.
- [CLA10] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Electrochemical realkalisation of carbonated reinforced concrete using impressed current or sacrificial anodes – 2.5 years durability, EUROCORR'09, September 06-10, 2009, Nice, France.

- [CLA11] **V. Bouteiller**, G. Taché, Galvanic anodes for reinforced concrete repair – French experience, EUROCORR'09, September 06-10, 2009, Nice, France, (**Keynote**).
- [CLA12] B. Richard, M. Quiertant, **V. Bouteiller**, L. Adélaïde, M. Perrais, J-L. Tailhan, C. Cremona, Experimental and numerical analysis of corrosion-induced cracking in reinforced concrete beam, EUROCORR'10, September 13-17, 2010, Moscow, Russia.
- [CLA13] F. Toutlemonde, **V. Bouteiller**, G. Platret, M. Carcasses, M. Lion, Retour d'expérience sur la durabilité in-situ d'un BFUP dans un aéroréfrigérant, La technique française du béton, aéroréfrigérant/Field experience of UHPFRC durability in an air cooling tower, in La technique française du Béton, 3ème congrès international de la fib, May 29 – June 2, 2010, Washington, USA.
- [CLA14] F. Toutlemonde, **V. Bouteiller**, A. Deman, G. Platret, A. Pavoine, B. Duchesne, L. Lauvin, M. Carcasses, M. Lion, Field experience of UHPFRC durability in an air cooling tower, CONSEC'10, June 7-9, 2010, Merida, Mexico.
- [CLA15] C. Cremona, L. Adélaïde, Y. Berthaud, **V. Bouteiller**, V. L'Hostis, S. Poyet, J.-M. Torrenti, Probabilistic and predictive performance-based approach for assessing reinforced concrete structures lifetime: The applet project , AMP 2010 – International Workshop on Ageing Management of Nuclear Power Plants and Waste Disposal Structures (EFC Event 334), Toronto, Ontario, CANADA, November 7-10, 2010, V.L'Hostis, K.Philipose, R.Gens and C.Gallé (Eds.), EPJ Web of Conferences, Vol. 12 (2011), DOI: 10.1051/epjconf/20111201004.
- [CLA16] M. Sahal, Y.Y. Tong, B. Sanz Merino, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Durability of impressed current realkalization treatment applied on reinforced concrete slabs after 5 Years, International Conference on Durability of Building Materials and Components, DBMC XII, April 12-15, 2011, Porto, Portugal.
- [CLA17] E. Marie-Victoire, **V. Bouteiller**, J. Montout, J-L. Garciaz and E. Cailleux, Parameters affecting on site corrosion rate evaluation, ICDS12 - International Conference Durable Structures: from construction to rehabilitation, May 31 – June 1, 2012, Lisbon, Portugal (Poster).
- [CLA18] E. Marie-Victoire, **V. Bouteiller**, J-L. Garciaz, J-F. Cherrier, B. Doms and E. Cailleux, Comparative study of on site electrochemical measurements, ICDC2012 – International Congress on Durability of Concrete, June 18-21, 2012, Trondheim, Norway.
- [CLA19] **V. Bouteiller**, J-F. Cherrier, B. Koubi, U. Iftikhar, V. L'Hostis, E. Marie-Victoire, J. Schneider, N. Rebolledo and C. Andrade, Evolution of reinforced concrete prism corrosion with time depending on degradation types and exposition conditions, ICDCS2012 - 3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures, September, 17-19, 2012, Queen's University Belfast, Ireland.
- [CLA20] F. Auder, L. Gaillet, T. Chaussadent, **V. Bouteiller**, J-P. Balayssac, Risk of hydrogen embrittlement for prestressed steel due to electrochemical protection, EUROCORR'12, September 9 – 13, 2012, Istanbul, Turkey.
- [CLA21] E. Marie-Victoire, M. Bouychou, **V. Bouteiller**, Y.Y. Tong, Realkalisation of a late 19th century bridge, Concrete Solutions, September 1-3, 2014, Belfast, United Kingdom.
- [CLA22] **V. Bouteiller**, V. L'Hostis, E. Marie-Victoire, F. Boinski, J. Schneider, C. Cremona, Kinetics of corrosion propagation in reinforced concrete polluted by chlorides, International Congress of Durability of Concrete, December 4-6, 2014, New Delhi, India.

8.5 Conférences avec actes (24 dont 1 invitée)

- [CA1] **V. Bouteiller**, Techniques électrochimiques appliquées à la protection et à la réparation du béton armé, CEFACOR Rencontre N°7, 18 octobre 2005, Paris.
- [CA2] **V. Bouteiller**, Application du traitement électrochimique de déchloration sur différentes éprouvettes en béton armé, Durabilité, 15 au 16 mai 2006, Paris.
- [CA3] **V. Bouteiller**, B. Duchesne et M. Morin, Déchloration d'une poutre de la Rance : caractérisations physico-chimique et électrochimique, Journées des chimistes du réseau, 17 et 18 mai 2006, Autun.
- [CA4] M. Quiertant, V. Baroghel-Bouny, **V. Bouteiller**, S. Caré, T. Chaussadent et F. Toutlemonde, Une revue de certaines techniques de vieillissement accéléré mises en œuvre au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Compte rendu des Journées Annuelles de la SF2M, 30 mai au 1er juin 2007, Ecole des Mines de St Etienne, (Keynote).
- [CA5] **V. Bouteiller**, Procédés électrochimiques, THEMACORR 2007, Anticorrosion et Durabilité dans le Bâtiment, le Génie Civil et les Ouvrages Industriels, du 30 septembre au 05 octobre 2007, Hauteville-sur-mer.

- [CA6] A. Deman, J. Dauthuille et **V. Bouteiller**, Traitement électrochimique – étude de cas, Journées Ouvrages d'Art, 28 – 29 mai 2008, Bordeaux.
- [CA7] **V. Bouteiller**, Y.Y. Tong, J. Dauthuille et A. Deman, Traitement électrochimique de réhabilitation des bétons armés dégradés par corrosion, Journées Ouvrages d'Art, 28 – 29 mai 2008, Bordeaux.
- [CA8] **V. Bouteiller**, Traitements électrochimiques de réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion, Association Française de Génie Civil, Journées Techniques de Génie Civil, 18 - 19 mars 2009, Cachan.
- [CA9] **V. Bouteiller**, V. L'Hostis, APPLET- Groupe de travail N°3 : Diagnostic électrochimique des ouvrages en béton armé dégradés, Association Française de Génie Civil, Journées Techniques de Génie Civil, 18 - 19 mars 2009, Cachan (Poster).
- [CA10] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation, XXVIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil et Développement Durable (Association Universitaire de Génie Civil), 3 au 5 juin 2009, Saint-Malo.
- [CA11] Y.Y. Tong, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation, Réseau Génie Civil et Urbain, 23 juin 2009, Paris (Poster) (→ 3ème prix ex æquo de la FNTF).
- [CA12] B. Richard, F. Ragueneau, L. Adelaide, C. Cremona, J.L. Tailhan, M. Quiertant, **V. Bouteiller**, J. Dauthuille, Comportement mécanique de l'interface acier/béton en présence de corrosion, 19ème Congrès Français de Mécanique, 24-28 août 2009, Marseille.
- [CA13] **V. Bouteiller**, Y.Y. Tong, E. Marie-Victoire et S. Joiret, Réalcalinisation de béton armé, Journées Physico-chimie des Matériaux, 2-3 décembre 2009, Lyon.
- [CA14] **V. Bouteiller**, Y.Y. Tong, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Efficacité et durabilité de la réalcalinisation pour une réparation de type "réhabilitation" du béton armé carbonaté, Journées Ouvrages d'Art, 16-17 juin 2010, Lille.
- [CA15] **V. Bouteiller**, V. L'Hostis, E. Marie-Victoire et S. Laurens, Le diagnostic des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion, CEFRACOR Rencontre n°13, 24 juin 2010, Paris.
- [CA16] F. Auder, L. Gaillet, T. Chaussadent, **V. Bouteiller**, J-P. Balayssac, Protection électrochimique appliquée en présence d'armatures de précontrainte, Protection cathodique et revêtements associés, 21-23 juin 2011, Aix-en-Provence.
- [CA17] **V. Bouteiller** et G. Taché, Anodes galvaniques pour la protection et la réparation du béton armé, Protection cathodique et revêtements associés, 21-23 juin 2011, Aix-en-Provence.
- [CA18] **V. Bouteiller**, Le guide sur la Protection Cathodique pour la maîtrise de la corrosion des armatures des constructions en béton, Courant imposé et Anodes galvaniques, Rencontre CEFRACOR n° 14, 23 mars 2012, Paris.
- [CA19] **V. Bouteiller**, Electrochimie et Protection Cathodique : La théorie au service de la pratique, Rencontre CEFRACOR N°15, 13 avril 2012, La Rochelle.
- [CA20] E. Marie-Victoire, **V. Bouteiller**, J. Schneider, C. Andrade, Influence des conditions de mesure et de la contamination initiale du béton, sur les valeurs de résistance de polarisation mesurées avec un Gecor6, Congrès Diagnobéton, 19 et 20 mars 2014, Toulouse.
- [CA21] **V. Bouteiller**, G. Damien, A. Jacquel, J. Schneider, C. Michaux, J. Crouzillac et Al, Protection Cathodique par Courant Imposé du Viaduc de Saint-Cloud - Chantier pilote (anodes forées), Journées Ouvrage d'Art, 11-13 juin 2014, Marne La Vallée.
- [CA22] **V. Bouteiller**, N. Coulaty-Chin, U. Iftikhar et P. Boujard, Etude de la cinétique de corrosion sur des prismes en béton armé, Journées Ouvrage d'Art, 11-13 juin 2014, Marne La Vallée.
- [CA23] JF. Barthélémy, **V. Bouteiller**, A. Pavoine, E. Lozinguez, Modélisation de la protection cathodique de l'acier dans le béton, Journées Ouvrage d'Art, 20-22 mai 2015, Nantes
- [CA24] B. Thauvin, R. Quéguiner, A. Ihamouten, F. Bosc, **V. Bouteiller**, G. Villain, L. Gaillet, X. Dérobert, E. Marie-Victoire, M. Bouichou, Évaluation du processus de corrosion des structures en béton armé (1er résultats), Journées Ouvrage d'Art, 20-22 mai 2015, Nantes

8.6 Conférences sans acte (5)

- [C1] **V. Bouteiller**, V. L'Hostis, GT3 - Diagnostic de la corrosion, APPLET – Assemblée Générale, 03 juin 2008, Paris.
- [C2] V. L'Hostis, **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire, J-L. Garciaz, Bilan d'une année de mesures – comparaison des résultats entre appareils de chantier et de laboratoire, APPLET – Assemblée Générale, 26 mai 2009, Cachan.

- [C3] **V. Bouteiller**, E. Marie-Victoire et C. Redon, Traitement électrochimique de réalcalinisation par courant imposé du Pont Camille de Hogues, Colloque le Pont, 20-21 octobre 2009, Toulouse.
- [C4] **V. Bouteiller**, J-F. Cherrier, V. L'Hostis, E. Marie-Victoire, N. Rebolledo et C. Andrade, GT3 - Diagnostic de la corrosion ; GT3-4 Etude de l'influence des conditions de température et d'humidité, APPLLET – Assemblée Générale, 21 mai 2010, Cachan.
- [C5] **V. Bouteiller**, V. L'Hostis, et tous les partenaires du GT3, Diagnostic de la corrosion des bétons armés – Bilan du programme ANR APPLLET GT3, APPLLET séminaire final, 24 novembre 2010, Saclay.

8.7 Articles dans des revues technico-professionnelles (6)

- [AT1] **V. Bouteiller**, Bétons armés corrodés : première caractérisation du traitement par réalcalinisation, Rapport d'activité LCPC, 2007.
- [AT2] **V. Bouteiller** et B. Godart, Traitement électrochimique de déchloruration, Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de Travaux de Réparation et de Renforcement des Structures, STRRES, Bull N°6, 2008.
- [AT3] **V. Bouteiller**, Traitements électrochimiques de réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion ; Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, N°4, 2009.
- [AT4] **V. Bouteiller**, Efficacité et durabilité du traitement électrochimique de réalcalinisation appliqué au béton armé carbonaté, Rapport d'activité LCPC, 2009.
- [AT5] E. Marie-Victoire, **V. Bouteiller**, J. Schneider, C. Andrade, Influence des conditions de mesure et de la contamination initiale du béton, sur les valeurs de résistance de polarisation mesurées avec un Gecor6®, Annales du Bâtiment et des Travaux Janvier-Mars 2014.
- [AT6] **V. Bouteiller**, A. Jacquiel, G. Damien, F. Boinski, J. Schneider, C. Michaux, Protection Cathodique par Courant Imposé à l'aide d'anodes forcées - chantier pilote du Viaduc de Saint-Cloud, Bulletin des Ouvrages d'Art, soumission 2015.

8.8 Principaux rapports de recherches

- **Contrat RGPU – Benchmark des poutres de la Rance,**
[R1] Caractérisations électrochimiques des poutres de la Rance, V. Bouteiller, 2004, 16p.

- **Opération de recherches LCPC 11H031,**
[R2] Comportement sous polarisation d'un acier dans des solutions simulant des bétons en présence de chlorures, V. Bouteiller, 2005, 45p.

- **Contrat DRAST n°02 DST 03,**
[R3] Traitement électrochimique de déchloruration du béton armé, V. Bouteiller, 2005, 79p.

- **Contrat avec le Ministère de la Culture - Thèse sur la réalcalinisation**
[R4] Méthodes de mesure de pH pour un matériau cimentaire, YunYun Tong, 2008, 19p.
[R5] Efficacité du traitement de réalcalinisation par courant imposé des dalles en béton armé avec six aciers, YunYun Tong, 2008, 85p.

- **Contrat avec le Ministère de la Culture - Post-Doc sur la réalcalinisation**
[R6] Traitements électrochimiques de réalcalinisation de béton armé dégradé par carbonatation : durabilité à 5 ans", M. Sahal, 2011, 45p. + annexes

- **Contrat ANR APPLLET**
[R7] L3-0 Référentiel de connaissances du Groupe de Travail N°3 "Diagnostic de la corrosion", V. Bouteiller, 2007, 17p.
[R8] L3-1/1 Etude bibliographique sur l'influence des conditions de température et d'humidité sur les mesures de corrosion, V. Bouteiller, 2010, 17p.
[R9] L3-2/1 Programmation de la fabrication, du vieillissement et de la répartition des corps d'épreuve, V. Bouteiller, 2007, 26p.

- [R10] L3-4/1 Rapport de synthèse des contrôles sous environnements différents – Prismes, V. Bouteiller, 2010, 71p.
[R11] L3-4/2 Analyse de données symboliques des résultats des prismes, V. Bouteiller, 2010, 47p.

– **Collaboration avec l'IETcc et avec L'Université Polytechnique de Madrid**

- [R12] Electrochemical measures, Application to slabs with accelerated corrosion and to slabs with realkalisation treatment, B. Sanz-Merino, 2009, 50p.

– **ORSI Ifsttar Maitrise Cycle de Vie**

- [R13] Cinétique de corrosion de prismes en béton armé, N. Coulaty-Chin et V. Bouteiller, 2014, 182p.

Deuxième partie : Présentation des travaux de recherche

Résumés

Les structures en béton armé représentent une part majoritaire du patrimoine dans le domaine des infrastructures de transport, de l'énergie ou de l'hydraulique mais aussi dans celui des bâtiments et des monuments historiques. La première cause de dégradation des structures en béton armé est la corrosion des armatures en acier carbone qui peut survenir lorsque le béton d'enrobage est totalement carbonaté ou bien lorsque les ions chlorure ont atteint les armatures ou bien encore lorsque les deux contaminations sont présentes.

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches retrace les recherches réalisées pour mieux connaître la pathologie de la corrosion, établir un diagnostic de corrosion fiable, prédire l'évolution de la corrosion et proposer des solutions de réparations électrochimiques (protection cathodique, réalcalinisation et extraction des ions chlorure). Le dernier chapitre poursuit une stratégie de recherche sur le moyen et le long terme avec notamment l'apport de la modélisation numérique pour expliquer la fissuration et l'utilisation de capteurs noyés pour suivre la corrosion en fonction du temps (donnée qui nécessite plusieurs dizaines d'années). Quelques réflexions sur la recherche scientifique et la gestion des infrastructures visant à aider les maîtres d'ouvrages viennent terminer ce mémoire.

Reinforced concrete structures represent the main part of the heritage in the field of transport infrastructure, energy or hydraulics but also in that of buildings and historical monuments. The first cause of degradation of reinforced concrete structures is the corrosion of carbon steel reinforcements which can occur when the concrete cover is completely carbonated or when the chloride ions have reached the reinforcements or when both contaminations are present.

This habilitation thesis presents the research carried out to better understand the pathology of corrosion, establish a reliable corrosion diagnosis, predict the evolution of corrosion and propose electrochemical repair solutions (cathodic protection, realkalisation and chloride extraction). The last chapter pursues a research strategy on the medium and long term with in particular the contribution of numerical modeling for cracking and the use of embedded sensors for a corrosion health monitoring as a function of time (data that requires several decades). Some reflections on scientific research and infrastructure management to help managers conclude this habilitation thesis.

SOMMAIRE

DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE	31
CHAPITRE I CONTEXTE ET RECHERCHES	34
I.1 CONTEXTE SOCIÉTAL	35
I.2 CONTEXTE SCIENTIFIQUE	36
I.3 MES MISSIONS A L'IFSTTAR ET LA RECHERCHE EN PARTICULIER.....	37
I.4 REFERENCES	40
CHAPITRE II DIAGNOSTIC DE CORROSION DU BETON ARME ET FIABILITE.....	41
II.1 LES MESURES ELECTROCHIMIQUES.....	42
II.1.1 <i>Les mesures au laboratoire</i>	<i>42</i>
II.1.2 <i>Les mesures sur site.....</i>	<i>43</i>
II.2 PARAMETRES INFLUENÇANT LES RESULTATS ELECTROCHIMIQUES - ETAT HYDRIQUE	43
II.2.1 <i>Répétabilité des mesures sur une journée.....</i>	<i>44</i>
II.2.2 <i>Fiabilité des mesures</i>	<i>45</i>
II.3 UTILISATION DE DIFFERENTS APPAREILS DE MESURE ET RESULTATS	47
II.3.1 <i>Caractérisations comparatives sur des dallettes au laboratoire</i>	<i>47</i>
II.3.2 <i>Benchmark des poutres de la Rance.....</i>	<i>49</i>
II.3.3 <i>Caractérisations comparatives avec une surface d'armature contrôlée – dallettes APLET</i>	<i>50</i>
II.3.4 <i>Caractérisations comparatives sur ouvrages</i>	<i>52</i>
II.4 SIMULATION NUMERIQUE DES LIGNES DE COURANT	54
II.5 CONCLUSIONS	55
II.6 REFERENCES	56
CHAPITRE III EVOLUTION DE LA CORROSION ET CINETIQUE	58
III.1 PENETRATION DES AGENTS POLLUANTS ET INITIATION DE LA CORROSION	58
III.1.1 <i>L'utilisation de nouveaux ciments pour résister à la corrosion</i>	<i>59</i>
III.1.2 <i>Initiation de la corrosion et teneur en ions chlorure : quels critères ?.....</i>	<i>63</i>
III.2 PROPAGATION DE LA CORROSION	64
III.2.1 <i>Etats du béton et caractérisations électrochimiques</i>	<i>65</i>
III.2.2 <i>Loi de comportement de la corrosion en fonction des conditions environnementales</i>	<i>67</i>
III.2.3 <i>Corrélation entre caractérisations électrochimiques</i>	<i>70</i>
III.2.4 <i>Loi mathématique de la corrosion en fonction du temps.....</i>	<i>70</i>
III.2.5 <i>Prédiction de la durabilité du béton armé.....</i>	<i>73</i>
III.2.6 <i>Comparaison des résultats en conditions naturelles (île de France) ou en conditions environnementales contrôlées</i>	<i>75</i>
III.3 FISSURATIONS DUES A LA CORROSION ET SIMULATION NUMERIQUE.....	75
III.4 CONCLUSIONS	76
III.5 REFERENCES	77
CHAPITRE IV TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES POUR LA REPARATION DU BETON ARME.....	79
IV.1 TRAITEMENT ELECTROCHIMIQUE DE DECHLORURATION.....	81
IV.1.1 <i>Déchloruration d'éprouvettes cylindriques en mortier armé à l'échelle du laboratoire.....</i>	<i>82</i>
IV.1.2 <i>Déchloruration d'un élément structurel en béton armé vieilli naturellement en zone de marnage</i>	<i>86</i>
IV.1.3 <i>Conclusions sur la déchloruration</i>	<i>89</i>
IV.2 TRAITEMENT ELECTROCHIMIQUE DE REALCALINISATION	89
IV.2.1 <i>Traitement de réalcalinisation de dallettes en béton armé carbonaté.....</i>	<i>90</i>
IV.2.2 <i>Traitement de réalcalinisation par courant imposé du pont Camille de Hogues</i>	<i>94</i>
IV.2.3 <i>Conclusions sur la réalcalinisation.....</i>	<i>99</i>
IV.3 PROTECTION CATHODIQUE	99
IV.3.1 <i>Protection cathodique par courant galvanique.....</i>	<i>99</i>
IV.3.2 <i>Protection cathodique par courant imposé.....</i>	<i>100</i>
IV.3.3 <i>Conclusions sur la protection cathodique.....</i>	<i>104</i>
IV.4 CONCLUSIONS SUR LES TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES.....	105
IV.5 REFERENCES	106
CHAPITRE V MON PROJET DE RECHERCHE	110
V.1 RECHERCHES A COURT TERME.....	112
V.1.1 <i>Impact des courants alternatifs sur la corrosion des structures en béton armé</i>	<i>112</i>
V.1.2 <i>Fiabilité du diagnostic de corrosion en regard des matériels de mesure utilisés</i>	<i>112</i>

V.1.3	<i>Aciers inoxydables : une solution pour les milieux fortement chlorurés ?</i>	113
V.2	RECHERCHES A MOYEN TERME (3-4 ANS)	113
V.2.1	<i>Corrosion du béton armé à l'échelle micro et évolution des oxydes</i>	113
V.2.2	<i>Corrosion des armatures dans le béton à l'échelle macro et cinétique</i>	114
V.2.3	<i>Corrosion du béton armé à l'échelle réelle et fiabilisation du diagnostic</i>	114
V.2.4	<i>Modélisation de l'interface acier/béton en vue de prédire la fissuration et la cartographie d'endommagement</i>	116
V.3	RECHERCHES A LONG TERME (10 ANS)	116
V.3.1	<i>Suivi de la corrosion du béton armé sur le long terme</i>	116
V.3.2	<i>Traitements électrochimiques pour la réparation du béton armé</i>	119
V.3.3	<i>Gestion des ouvrages et analyse des risques</i>	120
V.3.4	<i>Dissémination des connaissances</i>	123
V.4	REFERENCES	123

CHAPITRE I CONTEXTE ET RECHERCHES

Le béton armé est utilisé dans le monde entier en tant que matériau de construction de structures telles que les bâtiments, les ponts, les tunnels, les quais des ports, les centrales nucléaires et les monuments historiques. Les chiffres de la Fédération Industrielle du Béton (FIB) de 2011 indiquent une répartition de 62% pour le bâtiment et de 38% pour les travaux publics (Figure I-1). La répartition du béton par consommation par type d'ouvrages est indiquée sur la Figure I-2.

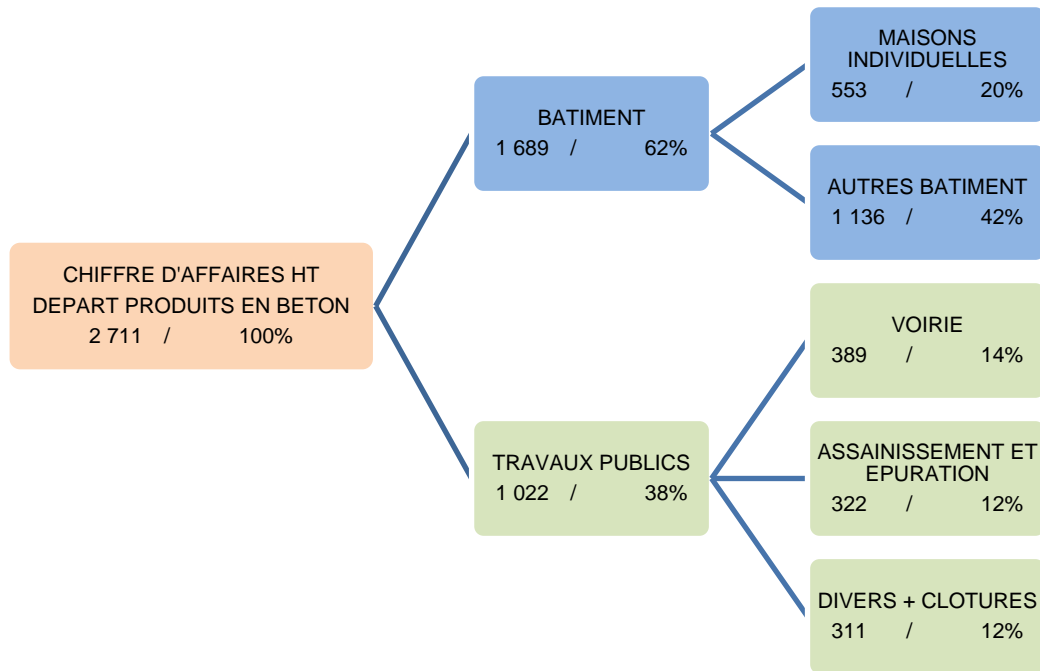


Figure I-1 : Destination des produits béton en chiffre d'affaires (millions d'euros HT) et en pourcentage (FIB 2011).

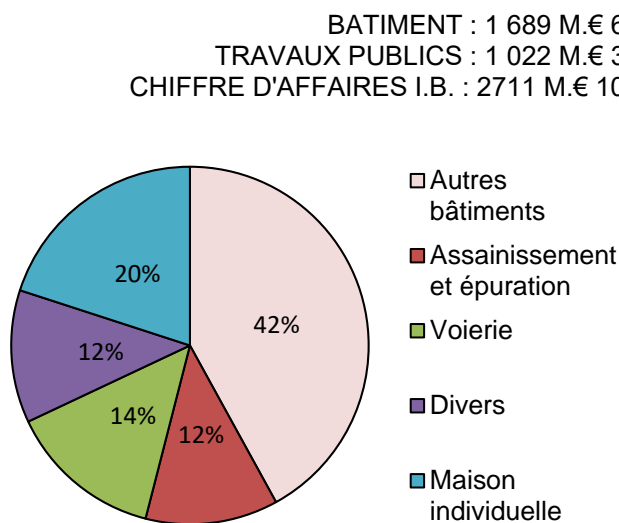


Figure I-2 : Consommations de béton par type d'ouvrages (FIB 2011).

En France, dans le domaine du génie civil, le patrimoine de ponts sur le Réseau Routier National compte 16 000 ponts dont 6 000 sur le réseau concédé. En termes de surface, 75% d'entre eux sont en béton armé ou précontraint. La Figure I-3 indique la surface d'ouvrages par période de construction. D'après l'IQOA (Image Qualité Ouvrage d'Art), il s'avère que 70% des ouvrages d'art se trouve dans un état "moyen". Néanmoins, ce patrimoine est vieillissant avec un âge moyen de 35 années.

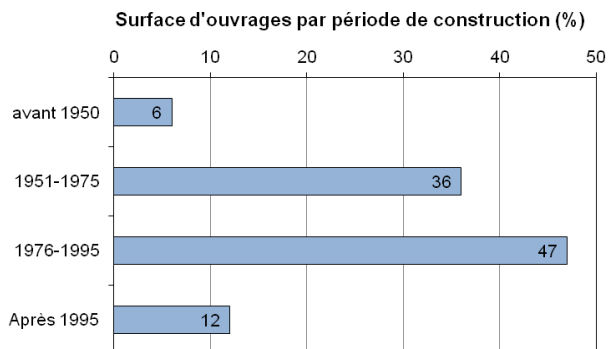


Figure I-3 : Surface d'ouvrages par période de construction (%) [1]

Différents projets de recherches, listés ci-dessous, ont apporté leurs contributions dans une meilleure connaissance de la durabilité des ouvrages, dans l'utilisation et la fiabilité des contrôles non destructifs, dans la proposition de solutions de réparations et dans un souci de modélisation. La liste n'est pas exhaustive.

- Projet APPLET - ANR (2007-2010) : Durée de vie des ouvrages : Approche Prédictive, Performantielle et probabiliste
- Projet Européen duratiNET (2009-2011) : Durable Transport Infrastructures in Atlantic Area – Network
- Projet MAREO – FUI (2009-2011) : MAintenance et REparations d'Ouvrages littoraux et fluviaux en béton
- Projet EVADEOS – ANR (2011-2015) : Evaluation non destructive pour la prédiction de la Dégradation des structures et l'Optimisation de leur Suivi

Néanmoins, l'effort de recherche doit être poursuivi car la plupart des travaux se sont souvent limités à l'étude de la durabilité (pénétration des agents agressifs), à l'élaboration de modèles et de critères préventifs ou prédictifs de la perte de durabilité, et à l'utilisation de contrôles non destructifs décrivant le béton d'enrobage (sans prendre en compte les armatures). Pour répondre à la problématique de la corrosion¹⁾ des ouvrages vieillissants, il s'avère donc primordial d'étudier avec des techniques électrochimiques non destructives l'évolution du béton armé à l'échelle du laboratoire jusqu'à l'échelle des ouvrages de manière à pouvoir apporter un diagnostic fiable et de pouvoir contribuer à l'aide à la décision du maître d'ouvrage dans la gestion de ces ouvrages (prévention ("bilan de santé"), maintenance, réparation).

I.1 Contexte sociétal

Souple d'utilisation et économique, le béton est le composant principal du secteur de la construction et représente 8% de l'émission mondiale de CO₂ et 53% en volume des déchets générés par la démolition. Dans ce contexte, la maîtrise de la durabilité, l'exigence de performance en lien avec l'exposition à l'environnement, l'évaluation fiable de la durée de vie résiduelle constituent des enjeux techniques et économiques majeurs, participant à développer ou à gérer des constructions durables, que l'on s'intéresse à la gestion des structures existantes ou à la conception de structures nouvelles. Parmi le patrimoine d'ouvrages, celui des structures en béton est le plus grand en nombre et en qualité, puisqu'il

¹ Le GT3 du projet ANR APPLET avait œuvré en ce sens.

recouvre entre-autres des ouvrages aussi divers que des tuyaux de réseaux d'assainissement, des pylônes, des silos, des bâtiments, des ponts, des barrages ou des monuments historiques...

La maîtrise du vieillissement de ces ouvrages, tant du point de vue du matériau que de celui de la mécanique des structures, est un enjeu économique majeur au moment où leur âge moyen va imposer de faire des choix importants concernant leur maintenance, le prolongement de leur durée de vie ou leur remplacement. Ceci est d'autant plus important que les constructions neuves se font rares étant donné les budgets restreints. Si la problématique des maîtres d'ouvrages vis-à-vis de l'intégrité de leurs structures est différente en termes de durée de vie et de risques (bâtiments, édifices classés, ouvrages d'arts, ouvrages de stockage de déchets nucléaires, barrages, ponts routiers ou ponts rails, ports...), le domaine de l'évaluation de la performance des ouvrages est un dénominateur commun qui doit être approché par une démarche globale et cohérente des différents acteurs concernés.

Aujourd'hui, il est reconnu que la corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation des structures en béton armé.

Il m'apparaît donc très important, en tant que chercheur, de pouvoir proposer aux gestionnaires d'ouvrages :

- une meilleure connaissance des causes de la corrosion des armatures dans les bétons,
- des mesures et des moyens d'interprétations de la corrosion des structures en béton armé en termes de diagnostic,
- des solutions de type prévention, maintenance, réparation, réhabilitation adéquates et qualifiées,
- des lois de comportement afin de prédire la durée de vie des ouvrages, et enfin
- des outils de modélisations.

I.2 Contexte scientifique

Le béton armé est un matériau composite dans lequel le béton reprend les efforts en compression et l'acier reprend les efforts en traction. A la conception, le béton armé est un matériau durable dans le temps car les armatures en acier sont passivées dans la solution interstitielle du béton très fortement alcaline (pH voisin de 13). Néanmoins, avec le temps, il est courant d'observer une corrosion des armatures sur des structures en béton armé [2-6]. Cette dégradation peut résulter d'une mauvaise conception, d'une erreur de mise en œuvre, ou bien de transformations physico-chimiques du matériau (carbonatation du béton d'enrobage ou pénétration d'ions chlorure jusqu'aux aciers).

- La carbonatation est un phénomène inéluctable du béton. La réaction du dioxyde de carbone atmosphérique avec la portlandite du béton conduit à une diminution du pH du béton d'enrobage. Lorsque le front de carbonatation atteint le niveau des armatures, l'environnement de ces dernières correspond alors à un pH voisin de 9. Pour cette valeur de pH, les armatures en acier au carbone ne sont plus protégées et elles peuvent donc se corroder de manière généralisée.
- Les ions chlorure peuvent être d'origine interne (introduits au gâchage en raison d'une utilisation d'eau de mer, ou bien d'une utilisation d'accélérateurs de prises tels que CaCl_2) ou externe (eau de mer et embruns en milieu maritime, sels de déverglaçage en milieux de montagne et urbains). Lorsque les ions chlorure se retrouvent en quantité suffisante au niveau de l'armature, ils vont attaquer le film passif et une corrosion localisée va pouvoir démarrer.

Du point de vue physico-chimique, l'oxydation des armatures conduit à des oxydes de fer plus volumineux que le fer métal, ce qui induit une fissuration du béton (depuis l'armature vers le parement béton) (Figure I-4). Les signes visuels de corrosion peuvent être des taches de rouilles, des coulures, des fissures, des épaufrures, voire des délaminations.

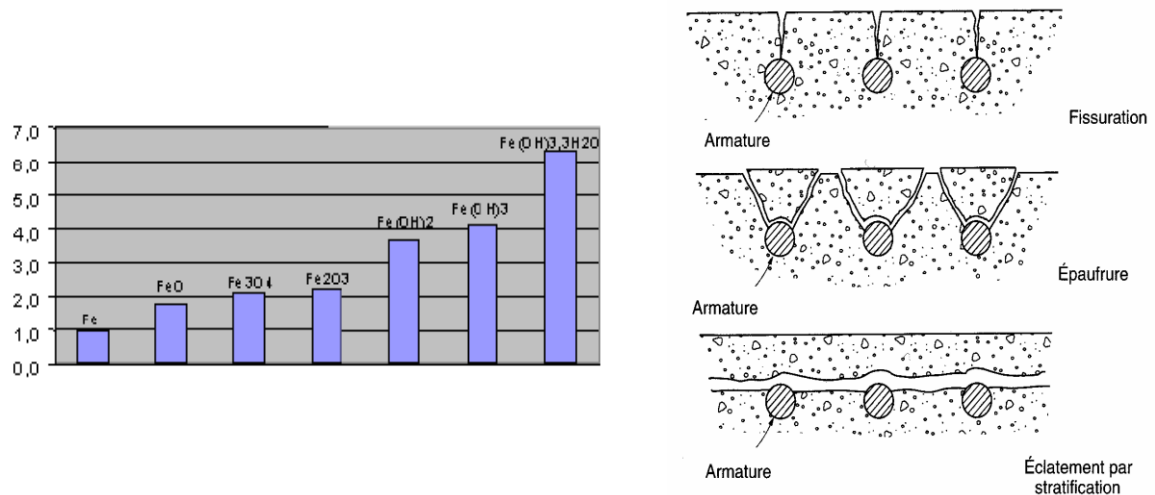


Figure I-4 : Volume des oxydes de fer par rapport au fer métallique et schéma de dégradation [7].

Du point de vue mécanique, la corrosion des armatures entraîne une perte de section, et une rupture de l'interface acier/béton qui peuvent conduire à la diminution de la capacité portante de l'ouvrage voire à sa ruine. Outre ce risque structurel, le risque à l'usager doit également être pris en compte (lors de chute d'épaufrures de béton sur une voiture en circulation sous un pont par exemple).

La corrosion du béton armé peut s'étudier avec différentes approches scientifiques complémentaires :

- la durabilité du matériau (avec la prise en compte des transferts par exemple),
- l'électrochimie (la dissolution du fer est un phénomène électrochimique et les traitements de protection/réparation cathodiques également),
- la mécanique des structures (avec des essais sur éléments structurels dégradés/non dégradés, ...), et
- la modélisation (maillage d'interfaces acier/béton,...).

A un niveau scientifique différent, la corrosion des constructions en béton armé peut également être évaluée selon des approches d'analyse de cycles de vie, d'analyses performantielles, etc...

I.3 Mes missions à l'Ifsttar et la recherche en particulier

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la recherche au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) puis de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (ifsttar), il est utile de se référer à ma notice personnelle qui décrit les faits marquants concernant, d'une part, l'évolution du Laboratoire et d'autre part, l'évolution de ma carrière (Première partie – Chapitre 2).

L'Ifsttar est un organisme de recherche avec un statut d'établissement public à caractère scientifique et technologique qui est placé sous la tutelle conjointe du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) et du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (MESR). Dans le document Stratégie scientifique de l'Ifsttar - Les grandes orientations de la recherche à 10 ans publié en 2012, il est mentionné que "L'Ifsttar a pour mission de réaliser, piloter, faire effectuer et évaluer des recherches, des développements et des innovations dans les domaines du génie urbain, du génie civil et des matériaux de construction, des risques naturels, de la mobilité des personnes et des biens, des systèmes et des moyens de transports et de leur sécurité, des infrastructures, de leurs usages et de leurs impacts, considérés des points de vue de leurs performances techniques, économiques, sociales, énergétiques, sanitaires et environnementale. Ces missions s'exercent, en particulier, au profit des services des ministères de tutelle, des autres administrations et organismes qui

leur sont rattachés, des collectivités territoriales, des institutions européennes et internationales, des associations professionnelles, des entreprises et des associations d'utilisateurs. "

De plus, l'Ifsttar a décliné ses implications de recherche dans 4 défis sociétaux : (1) Inventer la mobilité durable, (2) Adapter les infrastructures, (3) Maîtriser les risques naturels et nos impacts environnementaux et (4) Penser et aménager les villes et territoires.

Les travaux de recherche que j'ai menés au LCPC puis à l'Ifsttar, de 2001 à 2015, sont complètement en accord avec les grandes orientations de l'Ifsttar et viennent s'intégrer aux défis 2 et 3.

J'ai créé le laboratoire d'électrochimie en 2001 et effectué des recherches essentiellement expérimentales portant, d'une part, sur l'investigation des mécanismes de la corrosion en fonction de divers paramètres (formulations du béton, causes de la corrosion, environnements climatiques, outils de mesure, etc...) et, d'autre part, sur les traitements électrochimiques de réparation des structures en béton armé dégradées (déchloration, réalcalinisation, protection cathodique par courant imposé ou par anodes sacrificielles) (Figure I-5).

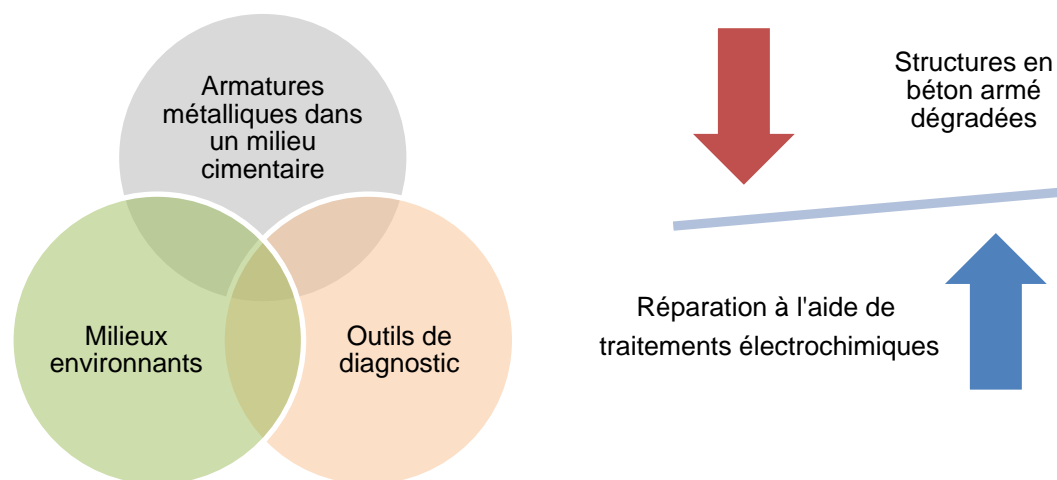


Figure I-5 : Meilleure connaissance de la corrosion et réparation des ouvrages.

Mes recherches prennent en compte :

- Des tailles et des masses de corps d'épreuve très larges depuis le laboratoire (centimétrique à métrique et de quelques grammes à des centaines de kilogrammes) jusqu'au site réel (pont par exemple),
- Des matrices cimentaires diverses,
- Des vieillissement accélérés ou naturels,
- Des mesures non destructives (techniques électrochimiques) et destructives (autopsies par ex),
- Des mesures qualitatives et/ou quantitatives,
- Des aspects cinétiques avec le suivi temporel de la corrosion.
- Des simulations ou des modélisations numériques.

Ces recherches font appel à différentes disciplines : la physico-chimie, l'électrochimie, la mécanique, le numérique, etc.

Mes résultats de recherches reposent sur mes activités mais également sur le travail de diverses personnes, qu'il s'agisse de techniciens, de stagiaires, de doctorants, de post-doctorants, ... dont j'ai assuré en totalité ou partiellement la formation, le suivi et l'encadrement. Ils sont également issus de collaborations nationales et internationales. Enfin, ces résultats ont été valorisés sous diverses formes : articles, congrès, expertise, normalisation, enseignement. A ce jour, je suis 1^{er} auteur ou co-auteur de 4 parties de livres, d'une dizaine de publications dans des revues internationales avec comité de lecture et de 6 articles dans des revues plus orientées vers le milieu technico-professionnel. Mes travaux ont

également donné lieu à une vingtaine de conférences internationales et à une vingtaine de conférences nationales. De plus, les différentes connaissances que j'ai acquises m'ont permis d'apporter une contribution pertinente dans le domaine de la normalisation. Enfin mon rayonnement scientifique, mon expertise dans le domaine de la corrosion des structures en béton armé et de leur réparation par traitement électrochimique sont reconnus par le réseau scientifique et technique et par la profession comme en témoignent mes activités de conseil pour la réparation des ouvrages d'art (ponts essentiellement) et mon implication notamment dans le suivi de la réparation par Protection Cathodique du Viaduc de Saint-Cloud en région parisienne. En complément, je me suis également investie dans l'enseignement depuis 2013 en dispensant un cours de 3h sur la durabilité des structures en béton armé vis-à-vis de la corrosion pour des élèves ingénieurs en 3^{ème} année de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Dans cette seconde partie de mon mémoire de HDR, je vais présenter mes travaux de recherche selon 3 grands axes.

1. Le premier axe de recherche concerne le diagnostic de corrosion du béton armé et la fiabilité des résultats obtenus dans un objectif d'aide à la décision.

Le diagnostic de la corrosion d'une armature dans le béton repose essentiellement sur des caractérisations électrochimiques non destructives qui permettent de mesurer le potentiel libre, la résistance de polarisation linéaire, la résistance de l'électrolyte et de l'enrobage. Ensuite à partir de ces résultats, une densité de courant de corrosion peut être calculée.

Pour que le diagnostic de corrosion soit fiable, il m'est apparu important d'étudier plusieurs points en interne à Ifsttar ou bien dans le cadre de collaborations. J'ai cherché à optimiser les conditions de réalisation des mesures en regard de l'observable à mesurer et en prenant en compte l'environnement (enceinte climatique, milieu extérieur naturel). J'ai recherché les biais de mesure sur le résultat (pré-conditionnement hydrique avant mesure par ex). J'ai comparé différents appareils de mesures (de type laboratoire ou de type chantier) et j'ai tenté d'expliquer les écarts de mesures obtenus. Enfin, j'ai contribué à la mise à disposition de résultats expérimentaux concernant la répétabilité et la reproductibilité de la mesure, et sa fiabilité.

Ces différentes études permettaient d'exploiter les résultats du diagnostic de corrosion de manière à effectivement donner au maître d'ouvrage, les éléments nécessaires pour sa prise de décision quant à la prévention, la maintenance ou la réparation d'un ouvrage.

2. Le second axe de mon travail concerne l'évolution de la corrosion avec le temps dans le but de proposer des lois mathématiques qui pourront aider à prédire la durée de vie d'un ouvrage.

Il m'est apparu judicieux de présenter mes activités de recherche suivant une logique qui reflète la vie d'une structure en béton armé depuis la conception jusque la dégradation de l'ouvrage. Pour aborder les différentes phases de la corrosion, je ciblerai l'initiation, puis la propagation et enfin la fissuration.

Ces travaux de recherche ont pour objectifs :

- De mieux connaître les mécanismes de corrosion selon :
 - ✓ les formulations de béton (utilisation de nouveaux ciments par ex)
 - ✓ les états du béton (sain, carbonaté, avec présence d'ions chlorure)
 - ✓ les environnements (température, humidité, oxygène, précipitations,...),
- D'évaluer le passage d'un résultat qualitatif vers un résultat quantitatif,
- D'étudier les cinétiques de corrosion sur une échelle de temps représentative.
- De modéliser les dégradations par fissuration du béton armé.

3. Le troisième axe de mon travail de recherche porte sur la réparation des structures en béton armé dégradé, avec en particulier l'utilisation des traitements électrochimiques.

Lorsque le béton armé est dégradé, il faut pouvoir proposer des solutions de réparation pertinentes non seulement du point de vue de la pathologie mais également du point de vue de l'application du traitement, sa durée de vie et son coût.

Pour réparer des dégradations de corrosion des réparations traditionnelles de type patch (enlèvement du béton pollué et reconstitution d'un béton) sont très utilisées. Néanmoins, cette technique de réparation s'est révélée insatisfaisante du point de vue de sa pérennité comme le met en évidence le rapport d'une étude européenne CONREPNET [8].

J'ai donc effectué des recherches sur d'autres techniques de réparation du béton armé dégradé reposant sur des traitements électrochimiques tels que la déchloration, la réalcalinisation, la protection cathodique, la protection par anodes sacrificielles. Je voulais non seulement vérifier l'efficacité de ce type de réparation à court terme (en regardant également les possibles effets secondaires sur la matrice cimentaire) mais aussi évaluer cette efficacité sur le moyen et le long terme.

Les axes de recherche explicités ci-dessus feront l'objet des chapitres II, III et IV de ce mémoire.

Le chapitre V présentera mon projet de recherche à venir et viendra clore ce document.

I.4 Références

[1] Kretz T. Gestion préventive des ouvrages d'art - application des méthodes de CND du béton. Projet de Recherche EVADEOS2015.

[2] Bentur A, Diamond S, Berke NS. Steel corrosion in concrete - Fundamentals and civil engineering practice. London, United Kingdom: E&FN SPON; 1997.

[3] Broomfield JP. Corrosion of steel in concrete - Understanding, investigation and repair. London: E&FN SPN; 1997.

[4] Raharinaivo A, Arliguie G, Chaussadent T, Grimaldi G, Pollet V, Tache G. La corrosion et la protection des aciers dans le béton. Paris: Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées; 1998.

[5] Bertolini L, Elsener B, Pedferri P, Polder R. Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. Weinheim: Wiley Vch Verlagsgesellschaft MbH; 2004.

[6] Audisio S, Béranger G, Bouteiller V. Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels ; Chapitre 18 Les traitements électrochimiques pour la réhabilitation du béton armé dégradé. . Presses Polytechniques et Universitaires Romandes ed2010.

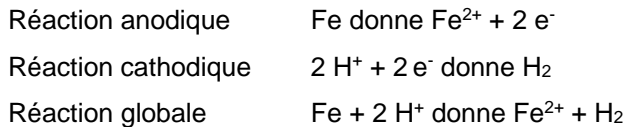
[7] Bhargava K, Ghosh AK, Mori Y, Ramanujam S. Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. Cement and Concrete Research. 2005;35(11):2203-18.

[8] Tilly GP, Jacobs J. CONREPNET - Concrete repairs - Performance in service and current practice. United Kingdom: IHS BRE Press; 2007.

CHAPITRE II DIAGNOSTIC DE CORROSION DU BETON ARME ET FIABILITE

"La corrosion est une réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement" [1]. Cette définition a l'avantage d'inclure non seulement l'oxydation du métal dans son environnement mais également l'absorption de l'hydrogène par l'acier (par exemple).

Une "réaction électrochimique est une transformation chimique qui implique un transfert de charges à l'interface entre un conducteur électronique, appelé électrode, et un conducteur ionique, appelé électrolyte".



Lors d'une expérience d'électrochimie, il y a toujours trois grandeurs importantes : le courant, la tension et le temps. Des mesures de chronoampérométrie, de voltampérométrie et d'impédancemétrie sont décrites dans la littérature [2].

Dans les années 1938, Pourbaix réalise des diagrammes potentiels/pH de différents éléments métalliques en solutions aqueuses et notamment celui du fer (Figure II-1). Un "Atlas d'équilibres électrochimiques" est publié en 1963 [3]. Dans ces diagrammes qui dépendent de la température, les espèces présentes sont décrites à l'aide de données thermodynamiques. Il s'ensuit que ces diagrammes ne peuvent fournir aucune information quant à la vitesse de corrosion.

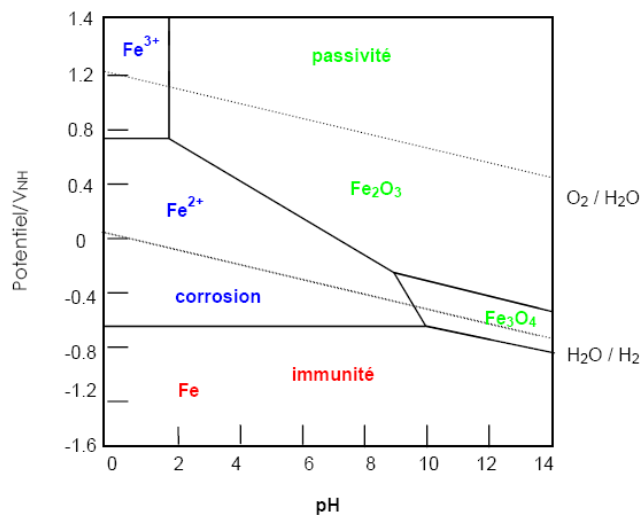


Figure II-1 : Diagramme de Pourbaix du fer [3].

En 1957, Stern et Geary proposent une relation entre la résistance de polarisation et la vitesse de corrosion [4].

$$I = B/R_p \quad \text{avec } B \text{ une constante et } R_p \text{ la résistance de polarisation} \quad (\text{Eq. 1})$$

Historiquement, la manière d'étudier la corrosion d'une armature dans un béton a été évolutive tant du point de vue de l'échelle de l'observation que du point de vue de la technologie. Un "électrochimiste" étudie la corrosion en observant un métal dans un milieu aqueux. Dans les débuts de l'électrochimie appliquée au génie civil, il était donc normal d'observer une armature plongée dans des solutions dites

"modèles" qui simulaient le béton. Les résultats de ces études offraient un atout majeur, celui de pouvoir observer visuellement l'état de corrosion du métal mais étaient critiqués vis-à-vis de leur pertinence par rapport à la réalité. Pour s'approcher de la réalité, en s'affranchissant des granulats (de grande taille), des éprouvettes de pâte de ciment armé, puis de mortier armé (sable ou granulats fins) ont été réalisées. La géométrie de l'éprouvette était cylindrique car c'est celle qui est la plus pertinente pour des lignes de courants réparties en axial et pour prendre en compte l'intégralité de la surface de l'armature. Ces éprouvettes étaient appelées "lolly-pops". Afin de prendre en compte la présence d'un squelette granulaire et la géométrie du voile en béton armé, les éprouvettes ont évolué de cylindrique à prismatique. Finalement, le diagnostic de corrosion sur ouvrage, avec des corps d'épreuve de type voiles incluant des treillis d'armatures de longueur conséquentes, a nécessité le développement de nouveaux appareils de mesure qui comportent un anneau de garde.

Il résulte que l'interprétation d'un diagnostic électrochimique peut s'avérer difficile car les résultats dépendent de plusieurs paramètres :

- la cellule électrochimique et les effets d'échelle : acier dans une solution (simulant le béton), acier noyé dans une matrice cimentaire (de type lolly-pop, à géométrie cylindrique), acier dans un prisme béton (géométrie prismatique), armature dans une poutre en béton (élément structurel) et finalement ouvrage en béton armé,
- les matériels utilisés (de laboratoire ou de chantier (qui sont plus "boite noire")),
- la méthodologie,
- les conditions de dégradations du béton,
- les conditions environnementales,
- etc.

Dans ce deuxième chapitre je vais tout d'abord présenter les mesures électrochimiques réalisées au laboratoire et celles obtenues sur site. Ensuite, j'insisterai sur la nécessité d'une méthodologie avant d'effectuer les mesures pour que ces dernières soient répétables et fiables (thèse de YY. Tong que j'ai encadrée). De plus, j'exposerai les résultats d'études de type benchmark, auxquelles j'ai participé, pour lesquelles des mesures croisées ont été effectuées en utilisant différents appareils soit au laboratoire soit sur site. Enfin, j'indiquerai quelques éléments de simulation numérique des lignes de courants des appareils de mesure (Projet ANR APPLLET-GT3 que je co-animai).

II.1 Les mesures électrochimiques

II.1.1 Les mesures au laboratoire

Au laboratoire, d'importantes études sur la corrosion de l'acier dans le béton ont été entreprises dès les années 1980 [5-10]. Du point de vue des mesures électrochimiques appliquées au béton armé, il est primordial d'utiliser des contrôles non destructifs de l'interface acier/béton car la fabrication, la cure (28 jours pour du ciment portland ou 90 jours pour les ciments aux laitiers par ex) et le vieillissement (par des ions chlorure ou par carbonatation) des corps d'épreuve peuvent nécessiter des temps importants allant de 30 jours à plusieurs mois voire une année (carbonatation complète d'un enrobage béton de plusieurs centimètres).

Les essais potentiodynamiques sur un domaine large de potentiels permettent de juger de la passivité/corrosion de l'acier dans son environnement mais ces essais "hors équilibre" perturbent l'interface acier/béton et conduisent donc à la destruction du corps d'épreuve.

Pour étudier la corrosion des armatures dans le béton de manière non destructive, les scientifiques s'accordent à dire que les mesures à réaliser sont : le potentiel libre, la résistance de polarisation linéaire et la chute ohmique à l'aide de spectroscopie par impédance (par exemple). La mesure de potentiel libre est extrêmement répandue car elle est très facile à mettre en œuvre mais elle ne donne qu'une information qualitative sur la probabilité de corrosion de l'armature dans son enrobage et en aucun cas

une idée de la vitesse de corrosion. La résistance de polarisation linéaire (LPR²⁾) permet de calculer la densité de courant de corrosion en supposant que la résistance de chute ohmique est négligeable. Toutefois, il est plus satisfaisant de déterminer la composante de chute ohmique (à l'aide de l'impédance par ex) et de la soustraire au résultat de la LPR pour calculer une valeur de densité de corrosion plus exacte. Pour les bétons chlorurés la chute ohmique peut se révéler négligeable (à vérifier) mais pour les bétons carbonatés la valeur de la chute ohmique est très grande. Connaissant la valeur de la densité de courant de corrosion et en utilisant la loi de Faraday, la perte de masse de métal consommé peut être calculée et/ou la perte de section qui est une grandeur plus utile pour les ingénieurs du génie civil.

Pour les mesures, une cellule électrochimique comporte trois électrodes :

- l'électrode de travail = l'armature
- l'électrode de référence = électrode de calomel saturé KCl (ECS) par ex
- la contre électrode = grille de titane platiné par ex (matériau inerte, ré-utilisable)

Le corps d'épreuve en béton armé doit pouvoir conduire le courant aussi est-il soit immergé dans une solution aqueuse, soit une éponge mouillée est posée sur le parement.

Dans l'Annexe 5, je décris les trois principales mesures que j'ai utilisées, j'explique leurs conditions d'acquisition et j'illustre par des exemples les résultats expérimentaux obtenus sur des dalles en béton armé du projet ANR APPLLET (CEM I ; e/c = 0,7 ; sain (T), chloruré au gâchage (G), chloruré par immersion/séchage (I) et carbonaté (C)).

II.1.2 Les mesures sur site

Lorsqu'il s'agit de réaliser des diagnostics sur ouvrages réels, des appareils spécifiques ont été développés. Les appareils qui mesurent la vitesse de corrosion disposent d'un anneau de confinement qui va aider à prendre en compte des surfaces d'armatures non contrôlées dans des voiles béton (treillis, armatures cylindriques ou étriers plats (monument historique), continuité électrique à vérifier).

- Cartographie de potentiel : CANIN à barre et à roue (Proceq) par ex
- Cartographie de résistivités : RESIPOD (Proceq) par ex
- Vitesses de corrosion : GECOR (Geocisa, ND James Instruments), Galvapulse (Germann Instruments), RapiCor (Linkoping University) par ex

Des recommandations issues d'un groupe de travail RILEM ont été publiées dans les années 2000. Ces recommandations insistent sur la nécessité de travailler sur des cartographies de mesure de potentiels [11] et des cartographies de résistivités [12] afin de prendre en considération la corrosion de l'armature qui relève, d'une part, des paramètres de pollution du béton (ions chlorure ou carbonatation), et, d'autre part, des paramètres environnementaux (température, humidité relative, oxygène,...). Une recommandation sur les mesures de vitesse de corrosion³⁾ a également été publiée [13].

Dans un ouvrage publié en 2004, Bertolini et al [14] reprennent les éléments importants d'un diagnostic de corrosion.

II.2 Paramètres influençant les résultats électrochimiques - Etat hydrique

Afin de proposer un protocole de mesures conduisant à des résultats répétables et fiables, l'influence du vécu hydrique du corps d'épreuve sur les résultats des mesures électrochimiques a été étudiée dans les travaux de thèse de YY. Tong que j'ai co-encadrée et qui portait sur la réalcalinisation du béton armé dégradé par carbonatation [15].

²⁾ Résistance de polarisation linéaire ou Linear Polarisation Resistance, LPR.

³⁾ Mesures essentiellement réalisées avec le matériel Gecor.

II.2.1 Répétabilité des mesures sur une journée

La caractérisation complète d'une dalle en béton armé (dimensions 30x30x5 cm, treillis armé) nécessitait une journée d'acquisition (9 cellules électrochimiques). La répétabilité des résultats sur cette durée a été vérifiée sur une dalle en considérant seulement les cellules repérées 3, 8 et 5 car elles sont susceptibles de 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 ont été répétées trois fois par jour, à savoir le matin, le midi et l'après-midi (Figure II-2).

Cellule	3	5	8
Matin	09h00	09h45	10h30
Midi	11h45	12h30	13h15
Après-midi	14h30	15h15	16h00

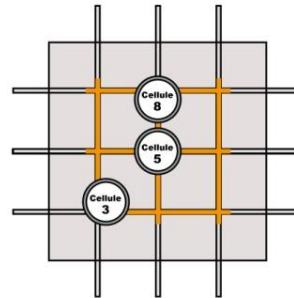


Figure II-2 : Echéances de mesures électrochimiques sur les cellules 3, 5 et 8 [15].

Les résultats des mesures en terme de potentiel libre (E_{corr}), de résistance de polarisation linéaire ($1/pente$), de résistance de l'enrobage (R_e) et de densité de courant de corrosion (J_{corr}) sont indiqués respectivement dans la Figure II-3. 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.

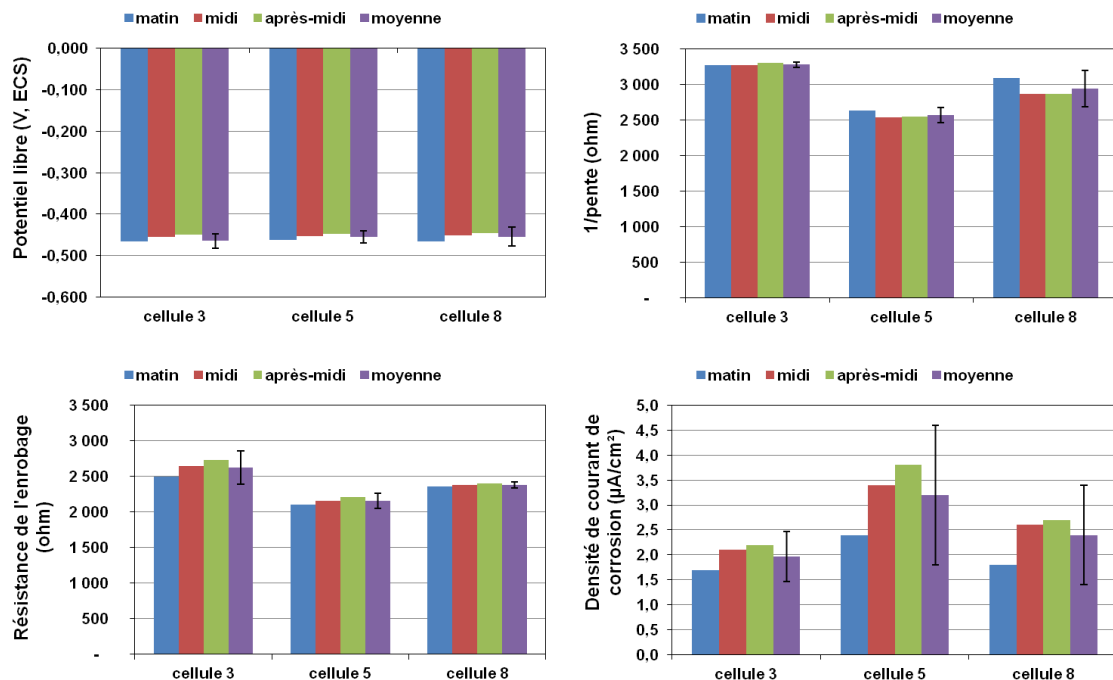


Figure II-3 : Mesures électrochimiques des cellules 3, 8 et 5 de la dalle retenue sur une journée, [15].

Ces résultats montrent que la répétabilité des mesures est satisfaisante à l'échelle d'une journée (il n'y a pas de séchage marqué de la dalle car les valeurs de la résistance restent similaires). La dispersion de 15 à 22% des valeurs de densités de courants de corrosion n'est pas négligeable mais néanmoins

cette dispersion ne conduit pas à un changement de niveau de corrosion d'après les seuils indiqués dans les recommandations de la RILEM [13]. Le protocole de caractérisation de la corrosion de ces dalles en béton armé a donc été validé.

II.2.2 Fiabilité des mesures

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 des travaux de thèse de YY. Tong portant sur des corps d'épreuve en béton armé carbonaté, 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 pendant plusieurs mois). Aussi une pré-étape de mise en humidité a été étudiée. Deux protocoles de conditionnement hydrique différents de par leur durée de séchage entre les mesures (1 et 2 semaine(s) respectivement pour les protocoles que nous avons notés 1 et 2) ont été réalisés. Dans ces deux protocoles, 4 mesures sont effectuées. La première mesure ("X" semaines) est réalisée sur la dalle entreposée dans un laboratoire climatisé depuis un certain temps. Les deuxième, troisième et quatrième mesures sont réalisées avec 1 semaine d'intervalle (pour le protocole 1)⁴.

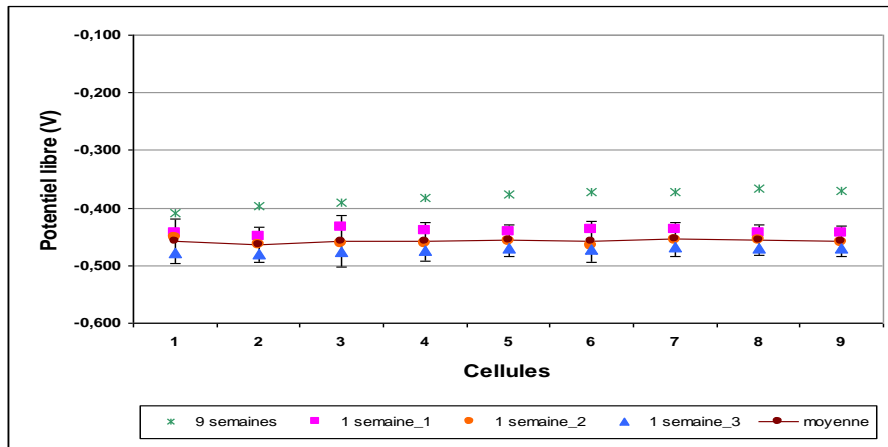
Les résultats obtenus en utilisant le protocole 1 sont représentés dans les Figure II-4a, b et c. respectivement pour le potentiel libre, la résistance de l'enrobage et la densité de courant de corrosion. Dans ces graphiques, les valeurs des moyennes et des barres d'erreur (égales à 2 fois l'écart type) représentées sont celles des 3 dernières mesures. Il s'avère que 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 $\mu A/cm^2$ et de 0.3 $\mu A/cm^2$ (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 $J_{corr} \approx 1$ $\mu A/cm^2$) qui ne sont d'ailleurs pas contenus dans l'écart-type.

En conclusion, pour obtenir des résultats électrochimiques répétables et fiables sur une dalle carbonatée, il est nécessaire, de la tremper dans l'eau pendant 24h, 1 semaine avant, puis 12h avant, de faire les mesures d'acquisition.

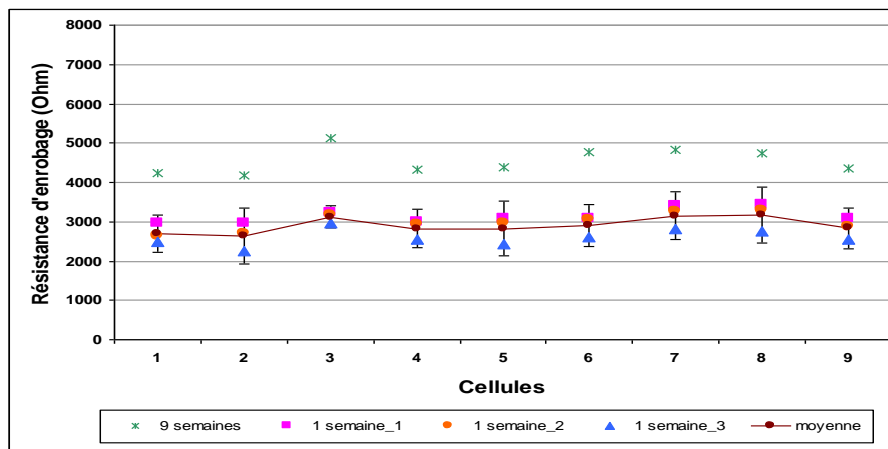
Afin de vérifier que le protocole 1 permet également de réaliser des mesures correctes sur des armatures passives, une dalle témoin en béton sain a été étudiée et les résultats se sont montrés concluants.

Les résultats obtenus à l'aide du protocole 2 (avec deux semaines de séchage entre les mesures au lieu d'une), sont similaires à ceux obtenus avec le protocole 1 et permettent également d'avoir une bonne répétabilité des mesures. Nous avons également vérifié que les résultats des mesures électrochimiques en immergeant les dalles complètement dans l'eau ne semble pas apporter une meilleure répétabilité par rapport à la mesure réalisée à l'air. C'est finalement, le protocole 1 qui a été retenu comme pré conditionnement hydrique des dalles en béton armé car il nécessite une durée plus courte (d'une semaine) ce qui est appréciable dans le cadre d'une thèse ou d'une campagne d'essais.

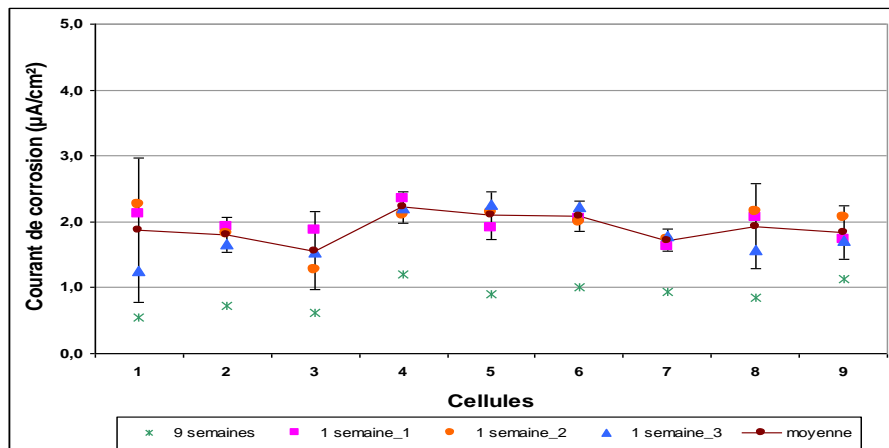
⁴) L'étape dite de "séchage" est constituée par un temps d'entreposage dans un laboratoire climatisé en température ($21^\circ C \pm 2^\circ C$) et en humidité relative ($60\% \pm 10\%$). L'étape dite "d'immersion 24 heures" correspond à une dalle totalement immergée dans un bain d'eau du robinet.



a) Ecorr



b) Re



c) Jcorr

Figure II-4 : Mesures électrochimiques d'une dalle en béton armé carbonaté suivant le protocole 1, [15].

II.3 Utilisation de différents appareils de mesure et résultats

Les similitudes et différences de diagnostic de corrosion obtenues avec différents appareils de mesures (Tableau II-1) ont été étudiées sur la base de travaux réalisés sur des corps d'épreuves variés : des dalles de laboratoire, des poutres de la Rance, des dalles du projet ANR APLET à surface d'armatures contrôlées (que nous nommerons par la suite dalles APLET) et des ouvrages étudiés dans le cadre du projet ANR APLET.

Tableau II-1 : Quelques appareils de mesure utilisés pour déterminer la vitesse de corrosion ([16, 17]).

<p>Potentiostats de laboratoire</p>	 <p>Parstat 2263®</p>	 <p>Gamry 600®</p>	
<p>Appareils de chantier</p>	 <p>GECOR06®</p>	 <p>GECOR08®</p>	 <p>GalvaPulse® Rapicor®</p>

II.3.1 Caractérisations comparatives sur des dalles au laboratoire

L'étude sur les dalles [16] s'inscrivait dans une opération de recherches plus globale du LCPC qui s'intitulait "Durabilité du béton armé et de ses constituants/maîtrise et approche performantielle". Pour les diagnostics de corrosion, les partenaires (LCPC, LRMH, LREP et IETcc (partenaire espagnol)) avaient utilisé des matériels tels que différents modèles de GECOR (05, 06 (LREP, LRMH et IETcc) et 08) et j'avais utilisé le Parstat 2263. Les dalles en béton étaient saines ou polluées (par des ions chlorure et/ou par carbonatation) et comportaient 3 armatures parallèles. Les mesures électrochimiques étaient réalisées au laboratoire ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; $60\% \text{ RH} \pm 10\%$). Le calcul de R_p était réalisé selon trois méthodes : le pulse galvanostatique, le pulse potentiostatique et le balayage en rampe de potentiel.

Dans des conditions de laboratoire, les résultats de l'étude sur dalles (Figure II-5) ont montré que :

- Les appareils indiquent des valeurs de E_{corr} , de R_e et de I_{corr} avec une répétabilité satisfaisante. Néanmoins, la dispersion des valeurs de I_{corr} entre appareils est plus forte lorsque la corrosion est plus importante.
- Pour les appareils de type Gecor qui ont un anneau de garde, la dispersion des mesures est similaire entre les modèles (05, 06 et 08) et varie entre $0,03$ et $1,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

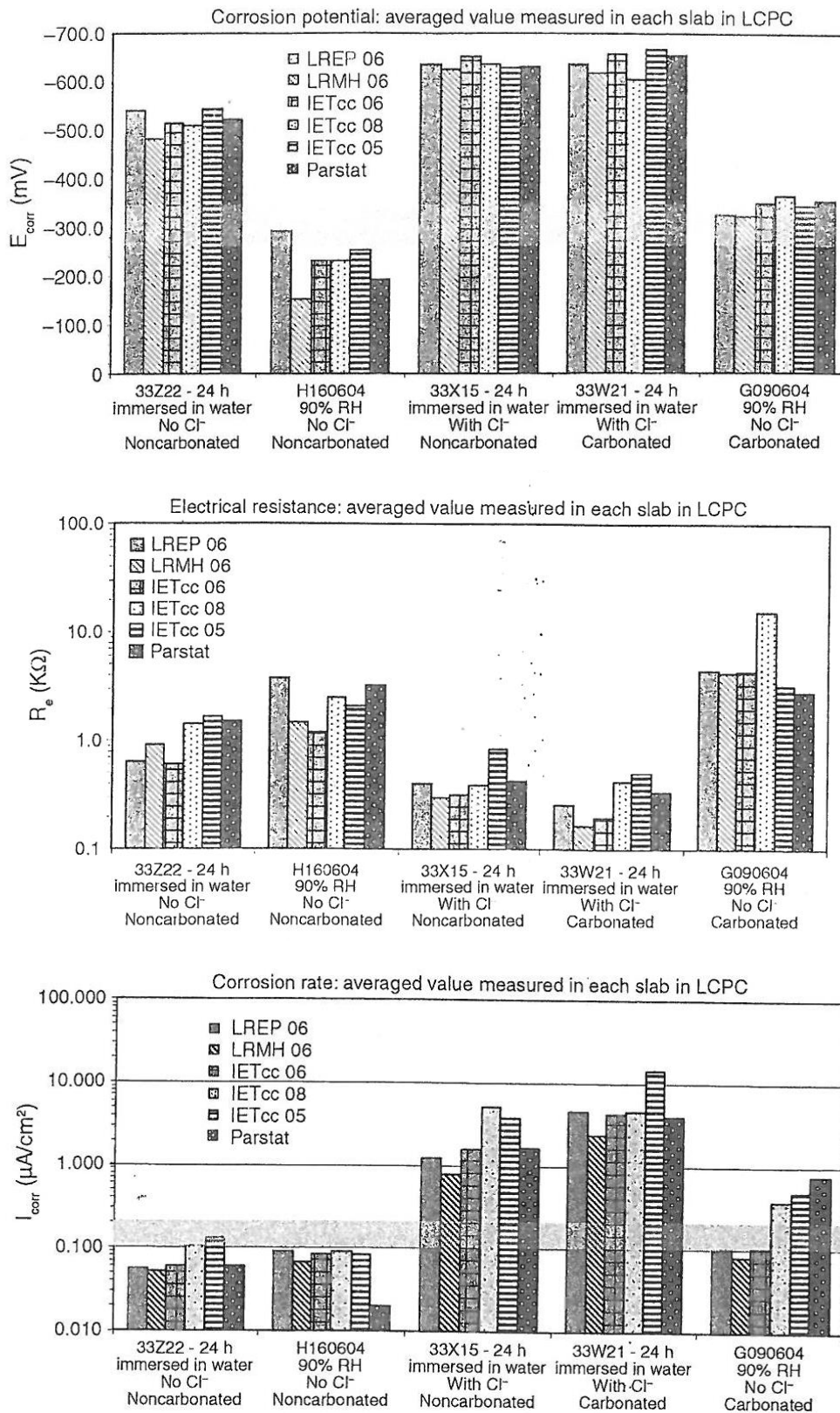


Figure II-5 : Potentiel libre, résistance et courant de corrosion obtenus à l'aide de différents appareils sur des dallettes en béton armé [16].

II.3.2 Benchmark des poutres de la Rance

Dans le Benchmark des Poutres de la Rance [17] financé par le RGPU (Réseau Génie Civil et Urbain), l'objectif principal était de valider l'utilisation des modèles de vieillissement reliant les données accessibles par les techniques d'auscultation in situ à la perte de fonction des éléments d'ouvrage en béton soumis à la corrosion des aciers. Le projet était animé par EDF et le CEA et comportait comme autres partenaires le CEBTP, le LCPC et le LMDC. Dans ce projet, j'ai participé à l'étude des contrôles non destructifs (CND) de corrosion (avec le CEA, EDF, LCPC, LREP, Oxand, LERM, SP institute) et également aux caractérisations destructives des bétons avec le dosage des ions chlorure.

Le Contrôle Non Destructif de corrosion consistait à mesurer, à analyser et à comparer les caractérisations électrochimiques de corrosion obtenues sur différentes poutrelles de la Rance. Il s'agissait de mettre à la disposition de la communauté scientifique des données d'essai correspondant au retour d'expérience sur des poutrelles en béton armé, pour certaines précontraintes, fabriquées lors du coulage du barrage EDF de la Rance, et ayant subi 40 ans d'exposition à l'environnement marin (zone de marnage). Les mesures électrochimiques étaient réalisées avec différents matériels (Tableau II-1, Gecor 6, Gamry, Parstat, Rapicor et Galvapulse) à des positions définies sur les poutres et pour des conditions environnementales identiques (sous tente).

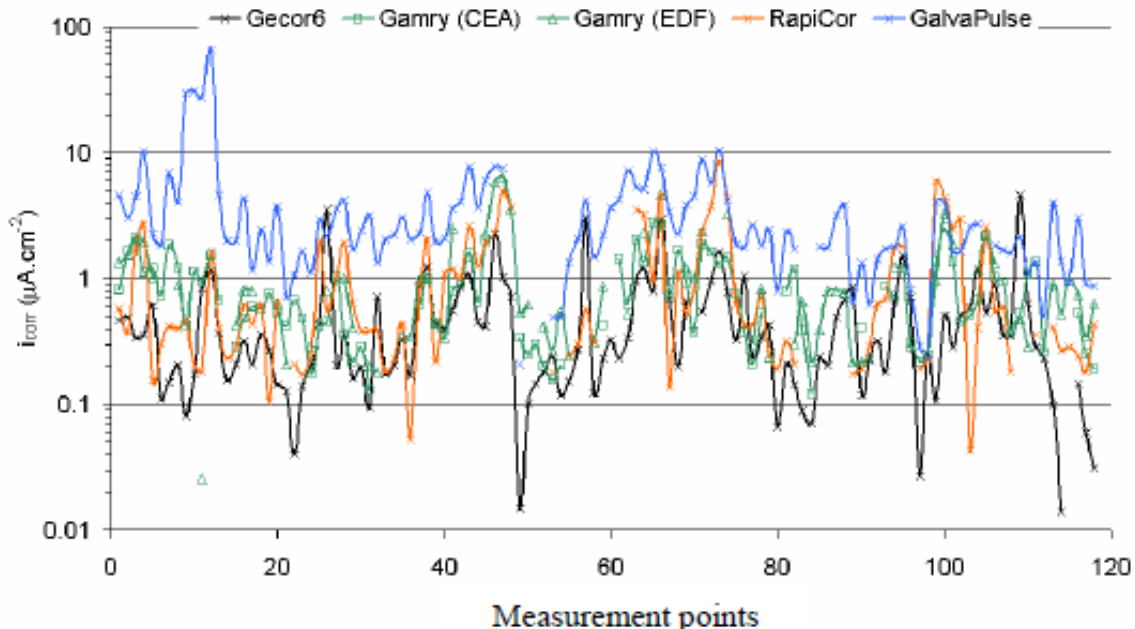


Figure II-6 : Courant de corrosion déterminés à l'aide de cinq appareils de mesure sur les poutres de la Rance [17].

Les résultats de ces travaux (Figure II-6) ont permis de voir que :

- les densités de courant de corrosion relevées par les appareils de terrain tels que le GECOR06® étaient supérieures à celles du Galvapulse (parfois avec 2 ordres de grandeur d'écart !),
- les résultats obtenus à partir d'appareils de laboratoire (Gamry et Parstat) étaient intermédiaires à ceux des appareils de chantier,
- les tendances avec le temps étaient similaires quel que soit l'appareil utilisé.

Ces résultats montrent qu'il faut accompagner les résultats d'un diagnostic de corrosion d'une explication "d'expert" et notamment bien évoquer avec un maître d'ouvrage que les valeurs de vitesse de corrosion dépendent fortement de l'appareil utilisé (en raison de la méthode de mesure utilisée et de la surface d'armature réellement polarisée). Enfin, il faut insister sur le fait que la vitesse de corrosion ainsi déterminée est une valeur instantanée.

II.3.3 Caractérisations comparatives avec une surface d'armature contrôlée – dallettes APPLET

Dans le projet ANR APPLET, et plus précisément dans le GT3 que je co-animai, il s'agissait de fabriquer des dallettes en béton armé réalisées à façon (Figure II-7), c'est-à-dire avec des surfaces d'armatures bien connues (diamètre 6mm et longueurs variables), afin de répondre plus précisément à la question de la surface d'acier réellement polarisée lors du diagnostic de corrosion en utilisant différents appareils de mesure. Les dallettes étaient entreposées en conditions extérieures naturelles.

Ce travail de recherche a été mené en collaboration avec le CEA, le LRMH et le LREP.

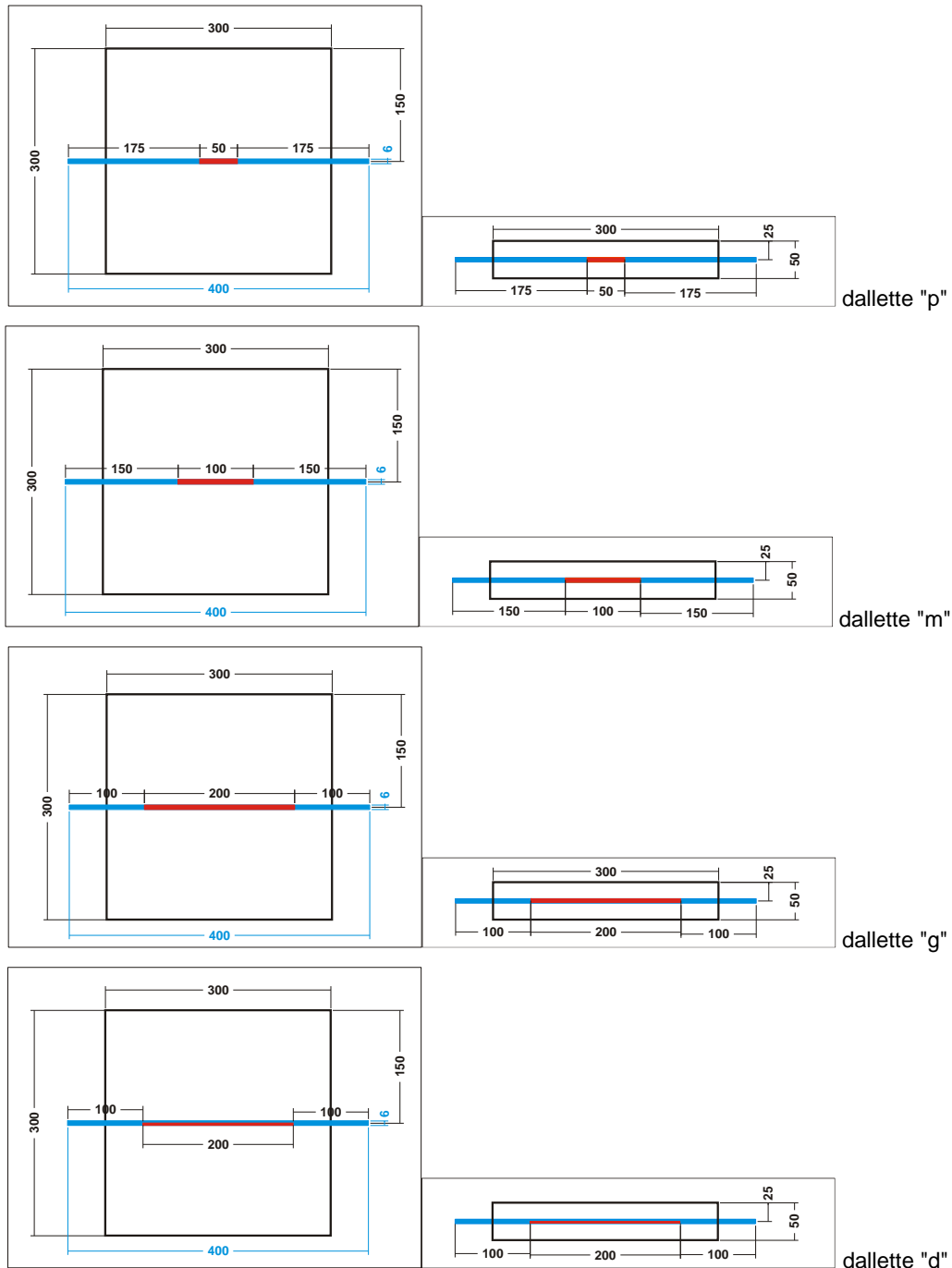


Figure II-7 : Les vues du dessus et de profil des différentes dallettes du projet de recherche ANR APPLET GT3 (en rouge la surface d'armature étudiée ; le diamètre de l'armature est égal à 6mm ; les dallettes "p", "m" et "g" ont respectivement une longueur d'armature de 5, 10 et 20 mm ; les dallettes "d" offrent une surface d'étude avec seulement une demie circonférence pour une longueur de 20mm) [18].

Majoritairement les résultats montraient que les densités de courant de corrosion étaient effectivement proportionnelles à la surface d'acier polarisé dans le cas des dalles carbonatées (Figure II-8 a). Cela restait vrai pour les dalles chlorurées à l'exception des dalles "d" avec une demi-circonférence (Figure II-8 b). Dans ce dernier cas, une corrosion sous la cataphorèse avait été observée et aurait pu expliquer la différence de comportement.

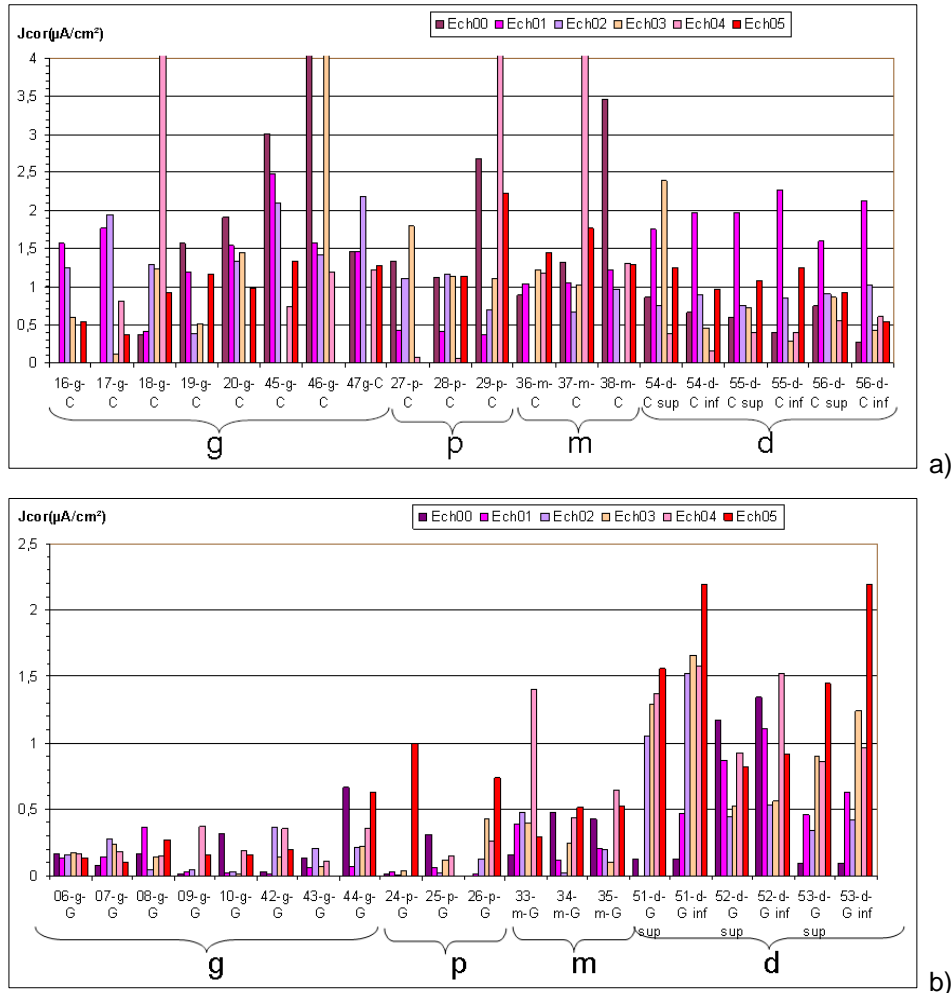


Figure II-8 : Densité de courant de corrosion en fonction des surfaces d'armatures pour les dalles carbonatées (a) et pour les dalles chlorurées (b) Potentiostat Gamry [18].

Les conclusions de l'étude comparative avec les trois appareils de mesure, Gamry, Gecor et Galvapulse, (Figure II-9) pour la détermination des densités de courants de corrosion (en ayant tenu compte de la chute ohmique) étaient les suivantes :

- Pour les bétons armés chlorurés, les densités de courant déterminées à l'aide des différents appareils de mesure montraient des niveaux de corrosion cohérents ce qui n'était pas le cas lorsque le béton était carbonaté.
- Les trois appareils permettaient de voir le passage entre la corrosion passive et la corrosion active mais à des échelles de valeurs très différentes

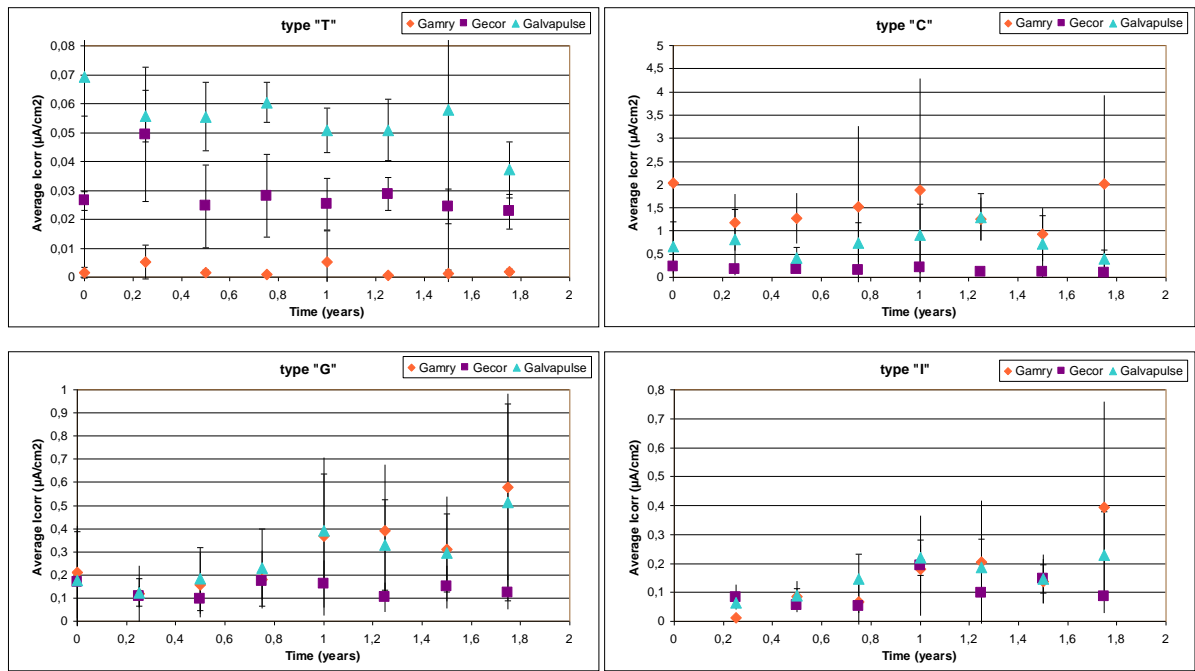


Figure II-9 : Evolution des densités de courant de corrosion (valeur moyenne et écart-type) de différentes dalles en béton armé (T : sain, G : ions chlorure au gâchage, I : ions chlorure par immersion/séchage et C : carbonatation) en fonction du temps en utilisant divers appareils de mesure [18].

II.3.4 Caractérisations comparatives sur ouvrages

Différentes études, et notamment le "Benchmark des poutres de la Rance" ont révélé de notables écarts de résultats de mesures de vitesse de corrosion, suivant les appareils utilisés [17].

L'objectif du travail du GT3-5-4 du projet ANR APPLLET était donc de tenter de mieux comprendre ces écarts de mesures en se fondant sur les résultats des différents autres groupes de travail du GT3, et en procédant à des essais croisés sur sites. Les deux types de pollutions, soit carbonatation soit présence d'ions chlorure ont été considérées. Plusieurs ouvrages ou éléments structurels en béton armé ont été étudiés : le bâtiment n°462 du CEA de Saclay (département 91), l'église Notre-Dame de Royan (département 17) et une poutre de l'Epi porte-avion n°4 de l'arsenal de Brest (essais réalisés à Saint-Brieuc (département 22)). La démarche du diagnostic de corrosion employé sur site est illustrée sur la Figure II-10.

Ce travail est issu d'une collaboration avec 5 autres laboratoires, le LCPC, le LERM, le LREP, le LRMH et le LRPC de Saint-Brieuc. L'accès aux différents sites a été rendu possible grâce au CEA, au LRPC de Saint-Brieuc et à la Mairie de Royan (avec ses équipes techniques pour les accès).

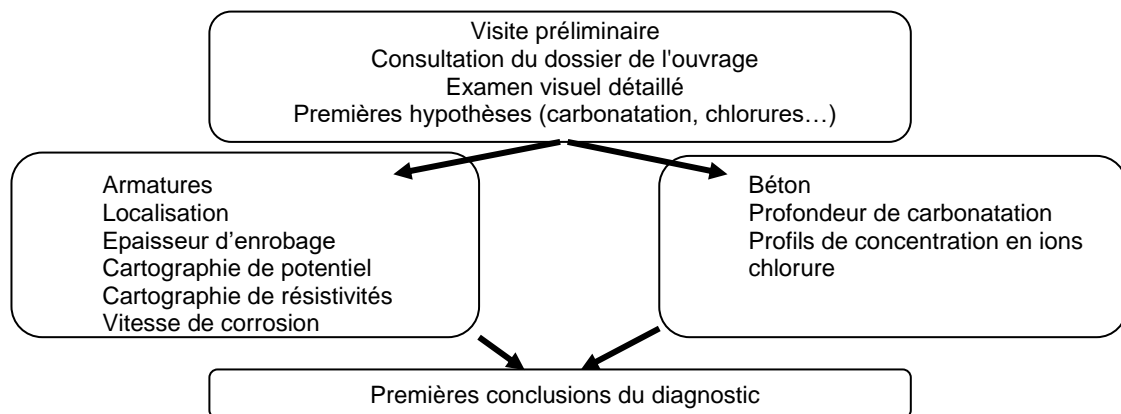


Figure II-10 : Méthodologie de diagnostic de corrosion des armatures dans du béton utilisée sur site.

Le site de l'église Notre-Dame de Royan (Figure II-11) a fait l'objet de plusieurs campagnes de mesures avec différents appareils de terrain, à différentes périodes de l'année, dans le but, d'une part, de comparer les résultats de deux appareils de chantier (Gecor6® et Galvapulse® en juillet 2009) [19] et, d'autre part, d'étudier l'influence des saisons sur les mesures réalisées avec le Gecor6® (effectuées en janvier, juillet et octobre 2009) [19] (non présenté ici). J'ai participé à ces campagnes de mesures.



Figure II-11 : Eglise Notre Dame de Royan ; vue générale (a) ; la chapelle (b) ; le mur d'entrée (c).

Les niveaux de corrosion de élevé à négligeable dépendent des seuils de courant de corrosion en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ déterminés par chaque producteur d'appareil (Tableau II-2).

Tableau II-2: Niveaux de corrosion respectifs pour le Galvapulse®, le Gecor6® et les recommandations de la RILEM.

Niveau de corrosion	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) Galvapulse® (Klinghoffer, 2000)	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) Galvapulse® (Klinghoffer, 2003)	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) Gecor6® (Rodriguez, 1995)	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) RILEM (RILEM, 2004)
Elevé	Icorr >27	Icorr >15	Icorr > 1	Icorr > 1
Modéré	2,7 < Icorr < 27	5 < Icorr < 15	0,5 < Icorr < 1	0,5 < Icorr < 1
Faible	0,5 < Icorr < 2,7	1 < Icorr < 5	0,2 < Icorr < 0,5	0,1 < Icorr < 0,5
Négligeable	Icorr < 0,5	Icorr < 1	Icorr < 0,2	Icorr < 0,1

Les valeurs des vitesses de corrosion mesurées sur la Chapelle (Figure II-12) montrent que les armatures sont passives quel que soit l'appareil utilisé (Tableau II-2).

En revanche, les mesures sur le mur d'entrée (Figure II-12) sont discordantes : les valeurs du Galvapulse sont de 11 à 200 fois plus grandes que celles du Gecor. Les valeurs du Galvapulse, analysées avec les seuils du Tableau II-1 (Klinghoffer 2003) indiquent un niveau de corrosion faible. Les valeurs du Gecor, analysées avec les seuils du Tableau II-2 (Rodriguez, 1995) indiquent un niveau de corrosion allant de négligeable (V2 et V4) à faible (V3) jusque modéré (V1). Il peut donc arriver que sur une même zone géométrique une mesure avec un appareil indique un niveau de corrosion élevé (Galvapulse) ou bien un niveau de corrosion faible (Gecor).

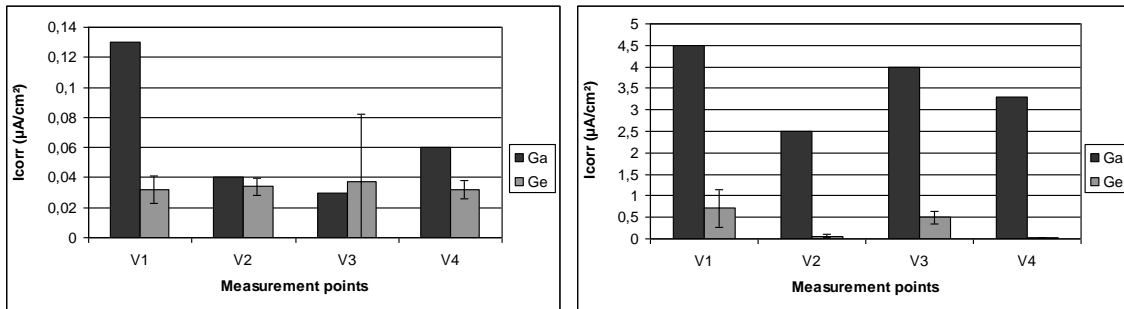


Figure II-12 : Vitesses de corrosion déterminées à l'aide d'un Gecor6® (Ge) et d'un Galvapulse® (Ga) sur la chapelle (à g) et le mur d'entrée (à d) en juillet 2009 [19].

Cette étude continue de montrer des incohérences entre les valeurs mesurées et les seuils de valeurs attribués aux différents niveaux de corrosion [19]. Ceci fait que l'aide à la décision se révèle problématique. Différentes hypothèses ont été proposées pour expliquer ces écarts :

- la carbonatation du béton (les écarts sont moins discordants pour du béton armé chloruré),
- le temps de polarisation pour réaliser la mesure (100 sec pour le Galvapulse contre 10 sec pour le Gecor6),
- le réseau d'armatures qui peut se révéler très peu constant (en géométrie et en continuité électrique) dans les monuments historiques et qui entraîne une non-adéquation entre les longueurs d'armatures et la dimension des capteurs (la longueur polarisée est estimée à 105mm pour le Gecor6 et à 70mm pour le Galvapulse).

A partir des résultats de ces travaux collaboratifs, nous avons rédigé des recommandations concernant le diagnostic de corrosion sur ouvrages [20].

II.4 Simulation numérique des lignes de courant

Toujours dans le cadre du projet ANR APPLLET, le travail de recherche mené en collaboration avec le CEA, le LRMH, le LREP, le LERM et l'IETcc pour l'aspect expérimental et avec le LMDC pour l'aspect numérique [21] visait à répondre aux objectifs suivants :

- simuler les mesures et comprendre la façon dont s'établissent les champs de potentiel et de courant en fonction de paramètres variables (géométrie des capteurs, épaisseurs d'enrobage, résistivité électrique du béton...)
- répondre plus précisément à la question de la surface d'acier réellement polarisée, et
- rechercher les biais de mesures.

Cette étude a tout d'abord montré qu'il existe peu d'articles sur cette question de modélisation.

A titre d'exemples, la modélisation des lignes de courant et la distribution longitudinale de la densité de courant de corrosion par rapport à la position du capteur sur l'armature sont illustrées sur les Figure II-13 et Figure II-14.

Ensuite, il a été démontré que la mesure de la résistance de polarisation linéaire doit être considérée comme un problème 3D et pas seulement 2D. En effet, il semble que l'anneau de garde de certains

appareils de chantier crée une sur-évaluation ou bien une sous-évaluation de la polarisation de l'armature. La fiabilité du résultat avec le potentiostat de laboratoire s'avère la plus satisfaisante. Pour argumenter encore sur la difficulté du diagnostic de corrosion, il faut rappeler que, la simulation réalisée ne prenait pas en compte la chute ohmique et cela limite fortement le résultat pour une application sur du béton armé et plus particulièrement pour le béton carbonaté. Des efforts restent donc à fournir sur cette thématique particulière.

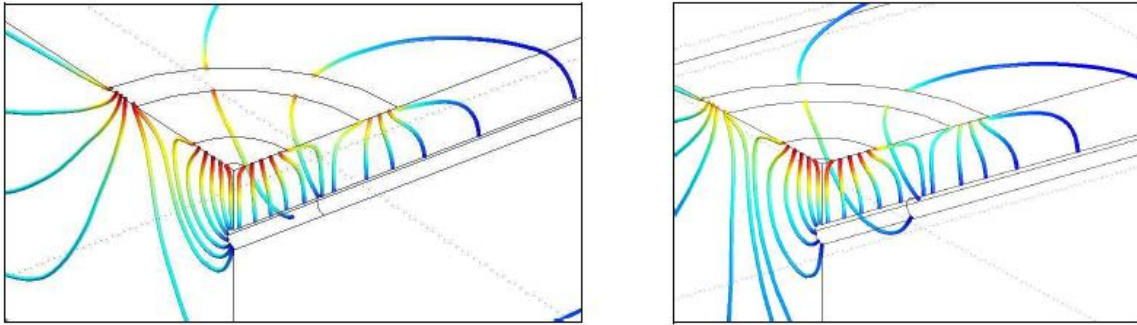


Figure II-13 : Lignes de courant lorsque le capteur est parallèle (à g) ou perpendiculaire (à d) par rapport à l'armature [21].

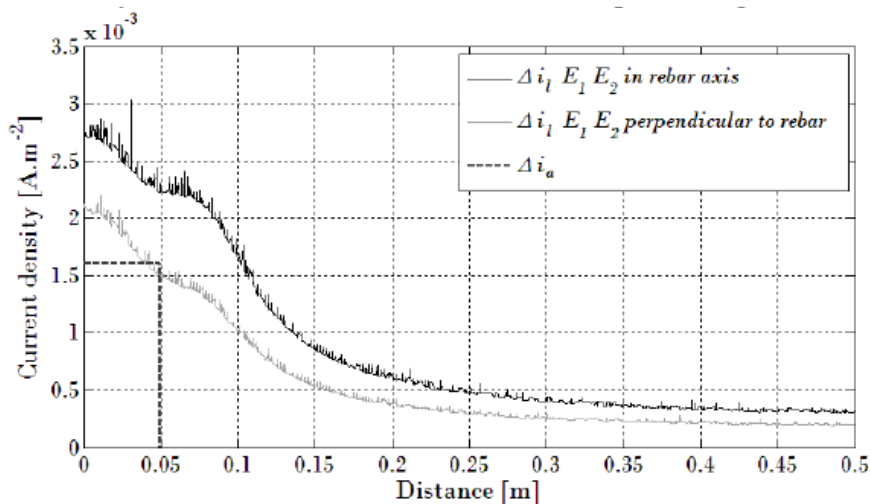


Figure II-14 : Distribution longitudinale de la densité du courant polarisant la fibre supérieure de l'armature en fonction de la position du capteur sur l'armature [21].

II.5 Conclusions

Dans ce chapitre, j'ai présenté des résultats expérimentaux sur la corrosion du béton armé obtenus en laboratoire et sur site qui pourront venir en appui à des supports pédagogiques du domaine de l'électrochimie et qui pourront ainsi être utiles aux futurs chercheurs.

Les résultats issus des différents projets que j'ai encadrés ou bien co-encadrés, ont démontré qu'il est possible de vérifier l'état passif ou actif en corrosion d'une armature dans du béton en ayant pris soin de :

- vérifier que les protocoles de mesures de la corrosion d'armature dans le béton sont répétables et fiables,
- prendre en compte de nombreux paramètres tels que l'humidité du béton, l'agression du béton (carbonatation ou ions chlorure) dans l'interprétation et l'exploitation des mesures,

- tenir compte des appareils de mesure utilisés (de laboratoire et/ou de terrain) et des seuils mis en regard par les fournisseurs,
- se montrer vigilant quant à l'utilisation des résultats pour aider le maître d'ouvrage dans la bonne gestion de ses ouvrages (prévention, maintenance et réparation).

Il s'avère donc que la corrosion des armatures dans le béton est une affaire d'expert du domaine.

De plus, j'insiste sur le fait que bien maîtriser un diagnostic de corrosion de béton armé au laboratoire ne suffit pas à extrapoler le diagnostic de corrosion sur ouvrage en environnement réel car il faut intégrer d'une part, l'utilisation d'appareils de chantier et, d'autre part, tenir compte des variations climatiques.

Finalement, la simulation numérique et les modélisations sont des approches complémentaires aux essais expérimentaux qu'il conviendrait d'étudier tout particulièrement. Des travaux couplés essais expérimentaux et essais numériques viendraient augmenter la connaissance scientifique des processus et des matériels de mesure et par conséquent rendraient les résultats plus fiables et plus utiles à la prise de décision pour le maître d'ouvrage.

II.6 Références

- [1] Landolt D. Traité des matériaux - 12 - Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes; 1993.
- [2] Lefrou C, Fabry P, J-C. P. Electrochimie - Concepts fondamentaux illustrés: EDP Sciences; 2013.
- [3] Pourbaix M. Atlas d'équilibres électrochimiques. Paris: Gauthier-Villars; 1963.
- [4] Stern M, Geary AL. Electrochemical polarization. I - A theoretical analysis of the shape of polarization curves. Journal of Electrochemical Society. 1957;104:56-65.
- [5] Andrade C, González JA. Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. Werkstoffe und Korrosion. 1978;29:515-9.
- [6] Feliu S, Gonzalez JA, Andrade C, Feliu V. The determination of the corrosion rate of steel in concrete by a non-stationary method. Corrosion Science. 1986;26(11):961-5, 7-70.
- [7] Wenger F. Etude de la corrosion de l'acier doux dans le béton par des méthodes électrochimiques. Orsay, France: Doctorial Thesis, Université Paris Sud; 1986.
- [8] Feliu S, González JA, Andrade MC, Feliu V. Determining polarization resistance in reinforced concrete slabs. Corrosion Science. 1989;29(1):105-13.
- [9] Keddou M. Principes et applications des techniques électrochimiques en corrosion. Matériaux et Techniques. 1994(1-2):39-45.
- [10] Tuutti K. Corrosion of steel in concrete, Thesis: Stockholm; 1982.
- [11] Elsener B. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion - Recommendations - Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures. Materials and Structures. 2003;36:461-71.
- [12] Polder R. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion - Recommendations - Test methods for on-site measurements of resistivity of concrete. Materials and Structures. 2000;33:603-11.
- [13] Andrade C, Alonso C. 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;37:623-43.
- [14] Bertolini L, Elsener B, Pedersen P, Polder R. Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. Weinheim: Wiley Vch Verlagsgesellschaft MbH; 2004.
- [15] Tong YY. Thèse, Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé carbonaté Paris 6, France: Université Pierre et Marie Curie; 2009.

- [16] Martinez I, Andrade C, Rebolledo N, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Olivier G. Corrosion characterization of reinforced concrete slabs with different devices. *Corrosion*. 2008;64(2):107-23.
- [17] Poupard O, L'Hostis V, Bouteiller V, Capra B, Catinaud S, Francois D, et al. Corrosion diagnosis of reinforced concrete beams after 40 years exposure in marine environment by non destructive tools. *Revue Européenne de Génie Civil*. 2007;11(1-2):35-54.
- [18] L'Hostis V, Marie-Victoire E, Bouteiller V, Garciaz JL, Amblard E, Emptaz C, et al. Study of the active/passive corrosion behaviour of reinforced concrete slabs using different devices. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2012;16(3-4):481-90.
- [19] Marie-Victoire E, Bouteiller V, Garciaz JL, Cherrier JF, Dauthuille J, Marzin F, et al. On-site instantaneous corrosion rate measurements on a historical building. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2012;16(3-4):505-23.
- [20] Cremona C, Rougeaud P, Torrenti JM, Poyet S, Adelaide L, Berthaud Y, et al. Durée de vie des ouvrages en béton armé - Approche prédictive, performantielle et probabiliste - Recommandations du projet ANR-APPLET: IFSTTAR - CERIB; 2012.
- [21] Clement A, Laurens S, Arliguie G, Deby F. Numerical study of the linear polarization resistance technique applied to reinforced concrete for corrosion assessment. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2012.

CHAPITRE III EVOLUTION DE LA CORROSION ET CINETIQUE

En 1982, Tuutti propose un diagramme conceptuel de la dégradation du béton en fonction du temps comportant deux phases [1], l'incubation et la propagation. D'autres modèles ont depuis été proposés [2-5].

Je vais considérer un diagramme avec 4 étapes (Figure III-1) afin d'illustrer la vie d'un ouvrage depuis sa construction en passant par ses dégradations successives et enfin sa ruine. Ces étapes de vie et la corrosion des armatures associée peuvent être décrites comme suit :

- dans la première étape, les agents polluants pénètrent l'enrobage béton ; la corrosion des armatures est nulle,
- dans la seconde étape, les armatures commencent à se corroder avec une vitesse faible ; c'est l'initiation de la corrosion,
- dans la troisième étape, la vitesse de corrosion augmente, la corrosion est en phase de propagation,
- enfin, dans la quatrième étape, des fissurations apparaissent et lorsqu'elles deviennent très importantes, des épaufrures voire des délaminations peuvent survenir. Les mesures de corrosion ne sont alors plus réalisables si l'interface acier/béton est rompue. Du point de vue structural la ruine de l'ouvrage peut survenir.

Entre chaque étape, les temps t_i (initiation), t_p (propagation) et t_f (fissuration) ne sont pas connus. Les densités de courants de corrosion entre les différentes étapes sont elles aussi inconnues.

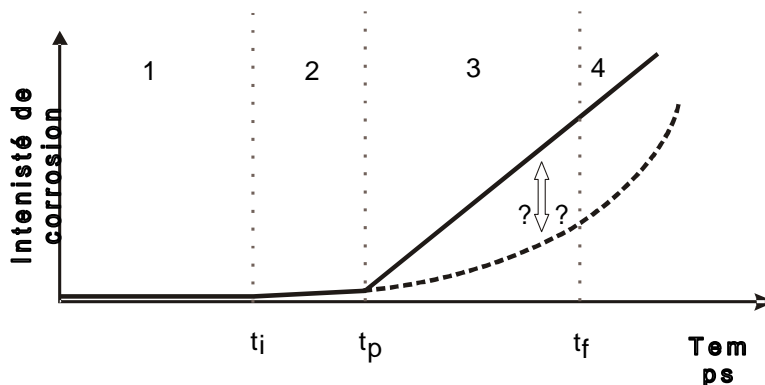


Figure III-1 : Diagramme conceptuel de la corrosion en fonction du temps [Cours V. Bouteiller, ENPC].

Le troisième chapitre de ce document présente des études que j'ai réalisées ou co-réalisées et qui viennent illustrer chacune de ces étapes :

- 1) La première étude porte sur la pénétration d'agents agressifs et l'initiation de la corrosion pour quatre formulations de mortier armé (étapes 1 et 2 du diagramme),
- 2) La seconde étude rend compte du suivi de la propagation de la corrosion (étape 3 du diagramme) afin de proposer des lois mathématiques, du courant de corrosion et/ ou de l'épaisseur de fer perdu en fonction du temps,
- 3) La troisième étude intègre une prise en compte de la fissuration du béton armé (étape 4 du diagramme) dans le cadre de résultats couplés "expérimental et numérique".

III.1 Pénétration des agents polluants et initiation de la corrosion

La prise en compte des paramètres de préservation de l'énergie et de diminution du gaz carbonique conduit l'industrie cimentière à proposer des produits alternatifs au ciment 100% Portland tels que les ciments aux laitiers de hauts fourneaux par exemple [6]. De plus, certains produits d'hydratation (C-S-H) ont la particularité de piéger les ions chlorure et par conséquent ils pourraient contribuer à une augmentation de la durabilité de l'ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion.

Pour ces raisons, et dans le cadre de l'opération de recherche "Durabilité du béton armé et de ses constituants/maîtrise et approche performantielle" (2001-2005), j'ai entrepris d'étudier l'évolution de la corrosion d'éprouvettes cylindriques en mortier armé en fonction du temps en prenant en compte deux paramètres : la nature du ciment (CEM I 100% Portland ou CEM III/B avec 70% de laitiers) et le rapport eau/ciment (0,65 ou 0,45). Le squelette granulaire était composé de granulats de Palvadeau (tranches granulométriques : 0-0,315 ; 0,315-1 ; 0,5-1 ; 1-4 ; 2-4 mm). Les ions chlorure étaient apportés par des cycles d'immersion (5 jours)/séchage (2 jours) des éprouvettes dans une solution saline (NaCl à 30g/L).

Dans une première phase, l'étude consistait, d'une part, à mesurer la pénétration des ions chlorure totaux et libres dans l'enrobage mortier (destructif) et, d'autre part, à déterminer les caractéristiques électrochimiques de l'armature dans un mortier selon le ciment utilisé (non destructif) Une validation visuelle de l'état des armatures venait compléter et valider les résultats.

Dans une deuxième phase, les résultats de caractérisation électrochimique de la corrosion étaient discutés en fonction de la teneur en ions chlorure avec l'idée de déterminer la concentration critique en ions chlorure responsables de l'initiation de la corrosion.

Ces résultats ont été obtenus avec l'aide des techniciens de l'équipe et valorisés dans des conférences et une revue [7].

III.1.1 L'utilisation de nouveaux ciments pour résister à la corrosion

Le suivi de la pénétration des ions chlorure dans le mortier sur une durée de deux ans (Figure III-2 et Figure III-3) a permis de mettre en évidence plusieurs points :

- les ions chlorure pénètrent plus rapidement dans le mortier lorsque le rapport eau/ciment est grand (résultat attendu) ;
- les ions chlorure pénètrent plus facilement (temps plus court) dans le mortier à base de ciment CEM I que de ciment CEM III/B ;
- pour les éprouvettes en CEM I, la concentration critique en ions chlorure libres (0,4% en poids par rapport au ciment de l'EN206) au niveau de l'armature est obtenue après environ 7 à 14 semaines pour le rapport eau/ciment égal à 0,65 et après environ 28 à 42 semaines pour le rapport eau/ciment égal à 0,45.
- pour les éprouvettes en CEM III/B, étant donné la présence d'ions chlorure dans le ciment, la teneur initiale en ion chlorure libres du mortier est déjà égale à 0,4% par rapport au poids de ciment. Au niveau de l'armature, cette teneur reste constante avec le temps malgré les cycles d'immersion/séchage. Ceci signifie que même après deux années les ions chlorure n'ont pas pénétré jusqu'à la profondeur de 2 à 3 cm. Pour le rapport eau/ciment de 0,65, une pénétration des ions chlorure est observée après environ 7 semaines à une profondeur de 0-1 cm et environ de 35 semaines pour une profondeur de 1-2 cm. Pour le rapport eau/ciment de 0,45 aucune pénétration d'ions chlorure dans l'enrobage béton n'est décelée même après deux années ;

La différence de comportement entre les deux ciments, a tout d'abord été attribuée à un piégeage des ions chlorure par le ciment CEM III/B comme cité dans la littérature [8-10] mais les résultats exprimés sous la forme de chlorures totaux en fonction des chlorures libres ne corroboraient pas cette hypothèse. Finalement, nous avons émis l'hypothèse que ce comportement particulier provenait vraisemblablement d'une plus grande tortuosité de la microstructure des éprouvettes en CEM III/B par rapport au CEM I (cette hypothèse reste à confirmer expérimentalement).

Deuxième partie : Présentation des travaux de recherche
Chapitre III Evolution de la corrosion et cinétique

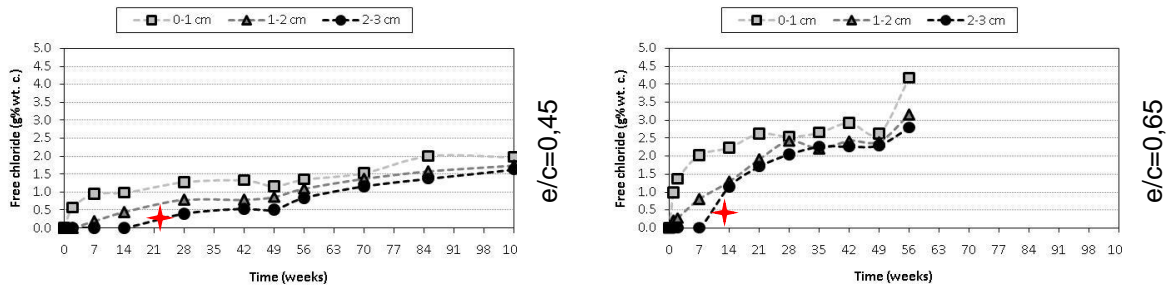


Figure III-2: Evolution des profils en ions chlorure avec le temps pour le ciment CEM I (lors des cycles d'immersion/séchage) [7].

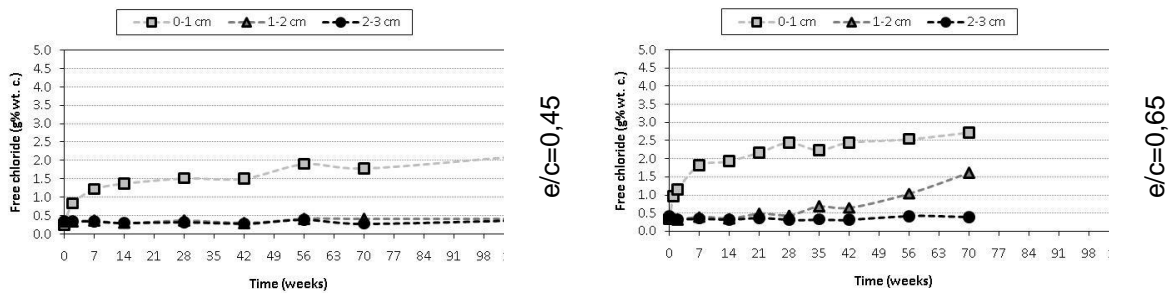


Figure III-3: Evolution des profils en ions chlorure avec le temps pour le ciment CEM III/B (lors des cycles d'immersion/séchage) [7].

Les caractérisations électrochimiques de potentiel libre et de densité de courant de corrosion ont permis de démontrer que :

- les armatures des éprouvettes en CEM I (Figure III-4 et Figure III-5) se corrodent (diminution du potentiel et augmentation du courant de corrosion) pour des durées qui correspondent à l'arrivée des ions chlorure au niveau de l'armature (résultats précédents). Cette observation est particulièrement flagrante pour le rapport eau/ciment égal à 0,65 ;
- les armatures des éprouvettes en CEM III/B ont un comportement particulier (Figure III-6 et Figure III-7). Initialement, les potentiels sont extrêmement électronégatifs et les densités de courant de corrosion très importantes. Ceci devrait indiquer une corrosion importante de l'armature mais qui n'est pas corrélée avec l'arrivée des ions chlorure. Avec le temps, les valeurs augmentent pour le potentiel et tendent à diminuer légèrement pour la densité de courant de corrosion ce qui est assez inattendu. L'explication est que les courants observés pour les mortiers armés aux laitiers proviennent des réactions d'oxydo-réduction des ions sulfures présents [11, 12] et ne sont pas indicatifs de la corrosion de l'armature en acier.

Deuxième partie : Présentation des travaux de recherche
Chapitre III Evolution de la corrosion et cinétique

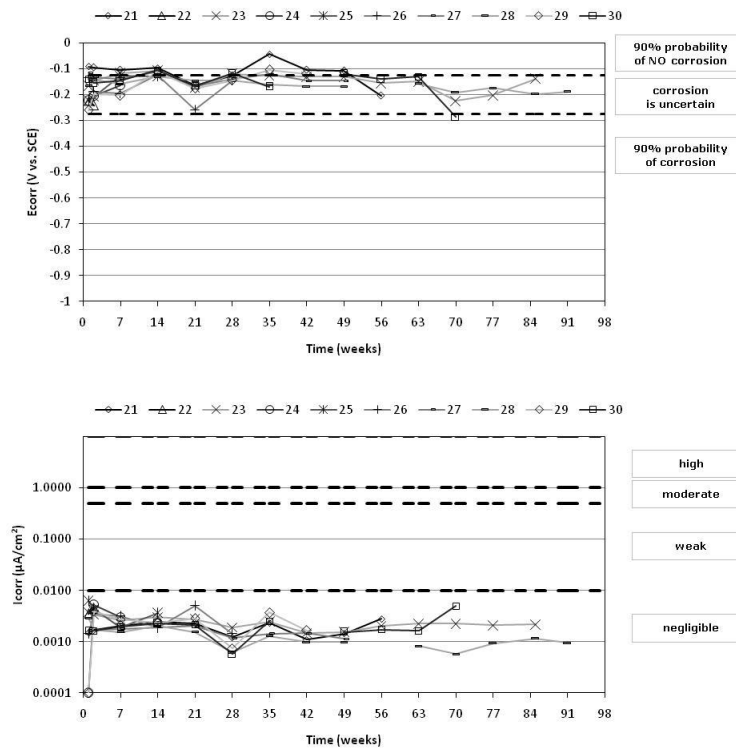


Figure III-4: Evolution du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion en fonction du temps (cycles d'immersion/séchage) pour les éprouvettes CEM I avec un rapport $e/c = 0,45$ [7].

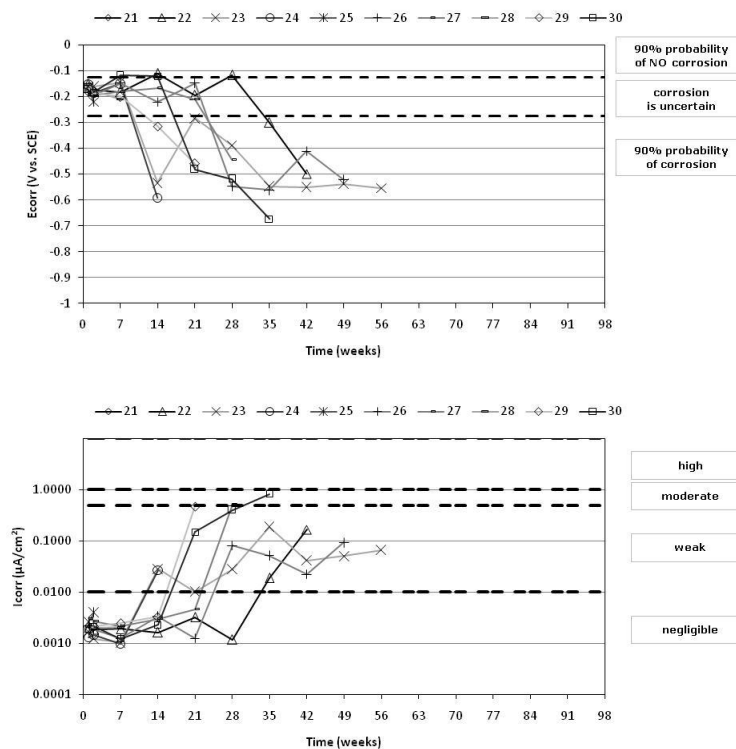


Figure III-5: Evolution du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion en fonction du temps (cycles d'immersion/séchage) pour les éprouvettes CEM I avec un rapport $e/c = 0,65$ [7].

Deuxième partie : Présentation des travaux de recherche
Chapitre III Evolution de la corrosion et cinétique

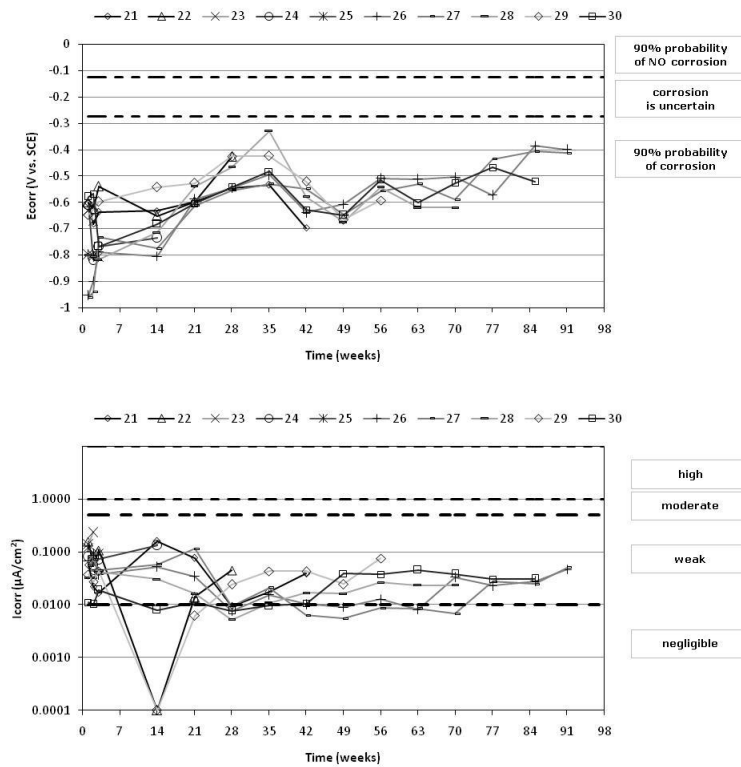


Figure III-6: Evolution du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion en fonction du temps (cycles d'immersion/séchage) pour les éprouvettes CEM III/B avec un rapport $e/c = 0,45$ [7].

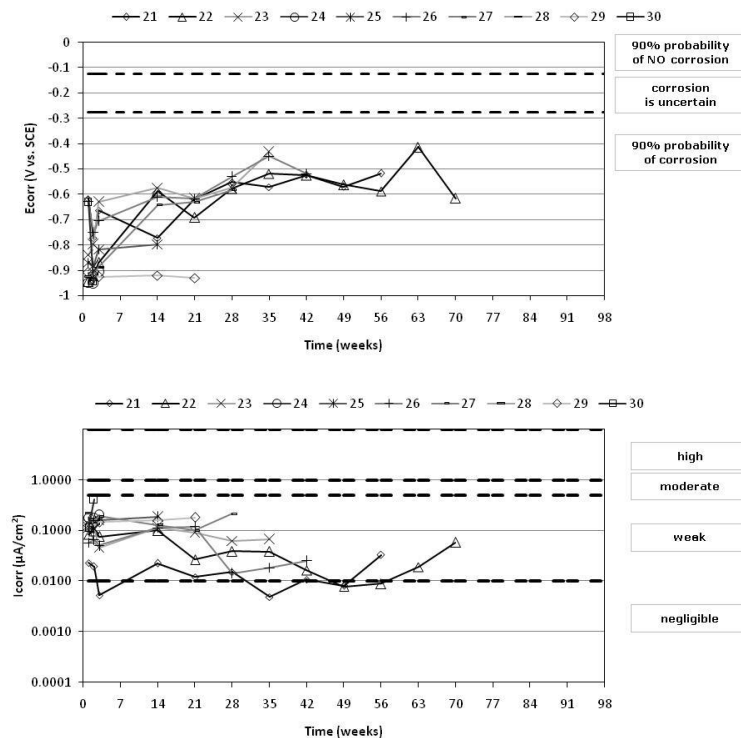


Figure III-7: Evolution du potentiel libre et de la densité de courant de corrosion en fonction du temps (cycles d'immersion/séchage) pour les éprouvettes CEM III/B avec un rapport $e/c = 0,65$ [7].

Enfin, les résultats des autopsies avec observation visuelle des aciers (Figure III-8) ont permis d'une part, de confirmer l'état de corrosion des armatures des éprouvettes en CEM I et, d'autre part, de vérifier l'état de non corrosion des armatures des éprouvettes en CEM III/B.



Figure III-8: Observation visuelle de l'état de corrosion de l'acier après 56 semaines [7]

En conclusion, cette étude sur deux formulations de mortier à base de CEM I (100% Portland) et de CEM III/B (70% de laitiers), a permis de montrer la plus grande résistance à la pénétration des ions chlorure du ciment aux laitiers et par conséquent une durabilité accrue. Toutefois, ce résultat doit être contrebalancé avec le fait que la carbonatation des mortiers aux laitiers est plus rapide que celle du ciment Portland et qu'alors, leur résistance à la pénétration des ions chlorure serait à vérifier. De premiers résultats non encore publiés montrent que lorsque le mortier est carbonaté, la pénétration des ions chlorure dans les deux mortiers est similaire (Figure III-9).

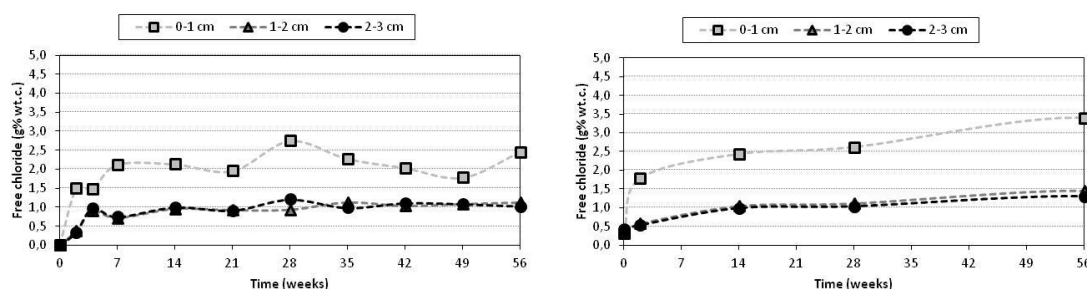


Figure III-9 : Evolution des profils en ions chlorure avec le temps (lors des cycles d'immersion/séchage) pour des mortiers carbonatés ($e/c=0,65$) en fonction du ciment CEM I (à gauche) et CEM III/B (à droite) [résultats à publier]

Cette étude a également permis de mettre en évidence que les résultats des caractérisations électrochimiques classiques (potentiel libre, résistance de polarisation linéaire, impédance et densité de courant de corrosion) qui s'appliquent habituellement pour le ciment Portland devaient être interprétés avec précaution dans le cas de ciment avec laitiers [13]⁵⁾. De plus les résultats des contrôles non destructifs doivent être confirmés par des autopsies.

III.1.2 Initiation de la corrosion et teneur en ions chlorure : quels critères ?

Dans la thématique de la durabilité d'une structure en béton armé, la question de la quantité critique d'ions chlorure qui va déclencher l'initiation de la corrosion [14] est toujours d'actualité. Encore faudrait-

⁵⁾ Dans sa thèse, V. Garcia a étudié les caractérisations électrochimiques de mortiers armés à base de laitiers en fonction de la proportion de laitiers.

il pour déterminer cette concentration "critique", se mettre d'accord sur la mesure ou la grandeur à lui associer.

Dans l'étude de la pénétration des ions chlorure dans les mortiers à base de CEM I, l'utilisation des grandeurs électrochimiques telles que la mesure du potentiel libre (qui est la plus communément utilisée) [15, 16] et la densité de courant de corrosion [17] nous ont permis d'apporter des données complémentaires à celles de la littérature. Pour des valeurs de potentiel libre plus négatives que -276mV (ECS) la teneur en ions chlorure libre est de 0,3% (en g pour 100g de ciment) (Figure III-10a). Pour des valeurs de densité de courant de corrosion supérieures à 0,01 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, la teneur en ions chlorure libre est de 0,7% (en g pour 100g de ciment) (Figure III-10b).

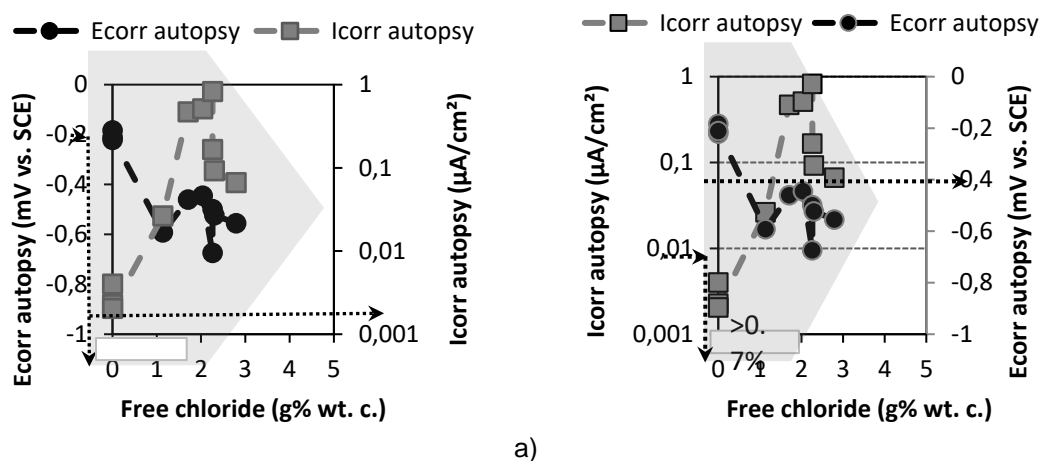


Figure III-10: Potentiels libres (CND) en fonction de la teneur en ions chlorure libres au niveau de l'acier (autopsie) (a) et densité de courant de corrosion (CND) en fonction de la teneur en ions chlorure libres au niveau de l'acier (autopsie) (b) pour les éprouvettes en CEM I rapport e/c = 0,65 [7].

Ces données issues de mon travail viennent compléter celles de la littérature [14]. La question de teneur en ions chlorure pour initier la corrosion dans le béton armé reste ouverte dans le Technical Committee 235 de la RILEM intitulé "Corrosion initiating chloride threshold concentrations in concrete".

III.2 Propagation de la corrosion

Le développement de stratégies rationnelles et efficaces pour réparer et réhabiliter les ouvrages en béton armé, nécessite l'acquisition de données fiables sur l'étendue des dégradations et leur vitesse d'évolution. Ces dégradations concernent principalement la corrosion des armatures. Ainsi, si le risque de corrosion est détecté et localisé suffisamment tôt, l'extension des dégradations peut être évitée, les réparations sont moins coûteuses. Ainsi, la durée de vie résiduelle peut être affinée ou actualisée. La propagation de la corrosion est par conséquent une thématique incontournable pour permettre un meilleur diagnostic sur un parc d'ouvrages en béton armé vieillissant qui nécessite une gestion plus optimisée.

J'ai entrepris des recherches dans cette thématique, dans le cadre du projet ANR APPLLET "Durée de vie des ouvrages : Approche prédictive, performantielle et probabiliste" (2007 et 2010) [18, 19], dans le groupe de travail n°3 "Diagnostic électrochimique des ouvrages dégradés" que je co-animais et plus précisément dans le sujet 4 dont j'étais responsable et qui s'intitulait "Etude de l'influence des conditions environnementales (température et hygrométrie) sur les mesures de corrosion". L'Ifsttar, le CEA, le LRMH et le LREP Melun conservait les corps d'épreuve dans des conditions de température et d'humidité relative contrôlées ou non. J'ai poursuivi ces recherches, de 2010 à 2014 (et ce malgré le déménagement), sur fonds propres dans le cadre de l'ORSI Ifsttar intitulée "Maîtrise du Cycle de Vie", avec le soutien du LRMH (pour les conservations en conditions de température et d'humidité contrôlées).

Le diagnostic de corrosion d'acier dans le béton dépend de plusieurs paramètres et notamment de l'état du béton, des conditions environnementales (température et humidité relative) et du temps.

Dans les paragraphes suivants, je vais tenter de répondre aux questions suivantes :

- 1) L'état de dégradation du béton peut-il être déterminé uniquement à l'aide de caractérisations électrochimiques non destructives ?
- 2) Existe-t-il une loi de comportement entre la corrosion des armatures et la température et/ou l'humidité relative ?
- 3) Existe-t-il une corrélation entre les caractérisations électrochimiques ?
- 4) Existe-t-il une loi mathématique de la corrosion en fonction du temps ?
- 5) Quelle est la fiabilité d'un diagnostic de corrosion pour prédire la durabilité du béton armé ?
- 6) Les résultats obtenus en conditions naturelles ou en conditions contrôlées sont-ils comparables ?

Les résultats de ces travaux ont donné lieu à plusieurs articles dans des conférences [20-22] et des publications dans des revues [23-25]. Ils ont également permis de proposer une loi mathématique pour la propagation de la corrosion de bétons armés pollués par des ions chlorure (Rapport dans le cadre de l'ORSI "Maîtrise du Cycle de Vie" et un article soumis [26]).

III.2.1 Etats du béton et caractérisations électrochimiques

Dans cette étude, quatre bétons différents de part leur état (sain ou dégradé) ont été suivis par des mesures électrochimiques (potentiel libre, impédance, résistance de polarisation, puis calcul de la densité de courant de corrosion) selon une fréquence trimestrielle et ce, sur plusieurs années. La formulation du béton est indiquée dans le Tableau III-1 et les états des bétons sont explicités dans le Tableau III-2.

Tableau III-1 : Formulation du béton.

	Quantité (kg/m ³)
Palvadeau 0/0,315	149
Palvadeau 0,315/1	277
Palvadeau 0,5/1	180
Palvadeau 1/4	170
Palvadeau 2/4	57
Palvadeau 4/8	324
Palvadeau 8/12	265
Palvadeau 12,5/16	473
CEM I 52.5 N CE CP2 NF (de l'Usine de Dannes)	275
Eau	192,5
NaCl (uniquement pour béton G)	13,75

Tableau III-2 : Description des états des bétons.

Etat	du béton	Observations
T	Témoin	L'armature est dans un béton sain (non dégradé).
G	Chloruré	L'armature est dans un environnement béton chloruré. Les ions chlorure ont été introduits lors du gâchage (NaCl 5% par rapport au poids de ciment).
I	Chloruré	L'armature est dans un environnement béton chloruré. Les ions chlorure ont été apportés par des cycles d'immersion/séchage et imbibition jusqu'à atteindre au niveau de l'armature une teneur en ions chlorure libres au moins égale à 0.4% par rapport au poids de ciment.
C	Carbonaté	L'armature est dans un environnement béton dont le pH est voisin de 9. La carbonatation du béton a été obtenue après un séchage d'un mois à 40°C. Puis les corps d'épreuves ont été entreposés dans une chambre climatique à 20°C, 60%HR et 50% CO ₂ . Enfin, une corrosion a été provoquée par un courant de 100µA/cm ² pendant 24h.

L'un des objectifs était de vérifier si les caractérisations électrochimiques non destructives permettaient à elles-seules de déterminer l'état sain ou dégradé du béton [24].

Les valeurs de potentiel libre (Figure III-11) permettent de différencier un béton sain (+200, -100 mV, SCS) d'un béton chloruré (-100 ; -600 mV, SCS). En revanche, le béton carbonaté offre un spectre très large de valeurs de potentiel (+250, -400 mV, SCS) qui recouvre, à la fois, les valeurs trouvées pour un béton sain et celles trouvées pour les bétons chlorurés. Par conséquent, les valeurs de potentiels ne permettent pas à elles seules d'identifier l'état du béton.

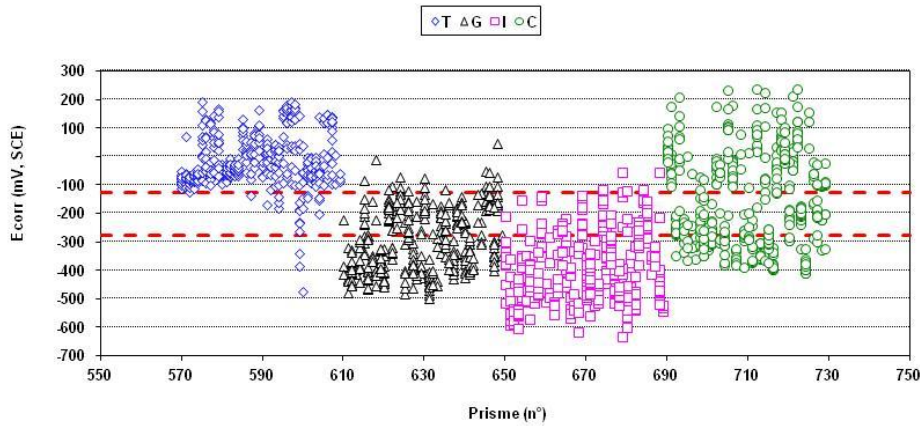


Figure III-11 : Valeurs des potentiels libres en fonction de l'état du béton [24].

Les valeurs de densité de courant de corrosion (Figure III-12) permettent de différencier le béton sain (valeurs inférieures à $0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) des bétons dégradés mais elles ne permettent pas d'identifier l'agression ions chlorure versus carbonatation.

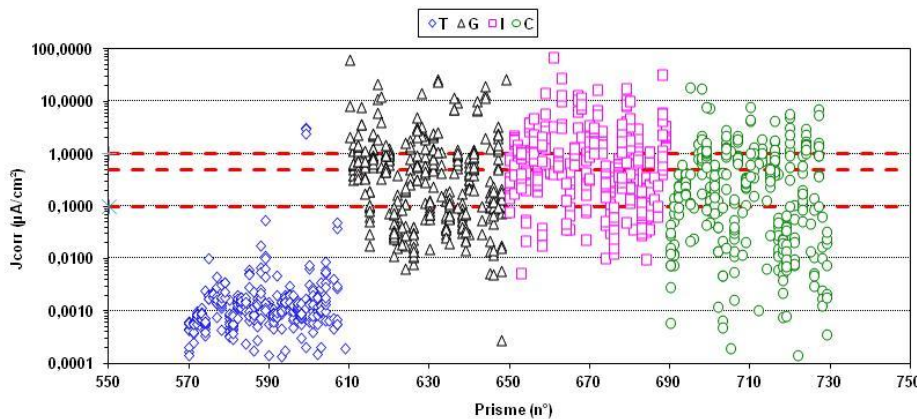


Figure III-12 : Valeurs des densités de courant de corrosion en fonction de l'état du béton [24].

En prenant en compte les deux résultats (Figure III-13), il s'avère que la correspondance entre probabilité de corrosion élevée (potentiel très électronégatif) et densité de courant de corrosion élevée est vérifiée pour les éprouvettes témoins T et les éprouvettes chlorurées I, n'est pas toujours vérifiée pour les éprouvettes chlorurées G et peut se révéler inexacte pour les éprouvettes carbonatées C

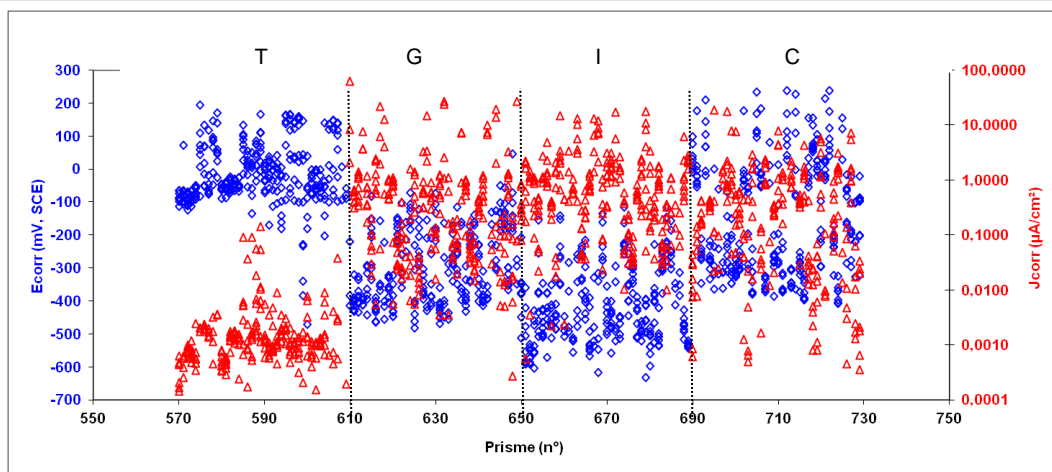


Figure III-13 : Valeurs des potentiels libres et des densités de courant de corrosion en fonction de l'état du béton [24].

III.2.2 Loi de comportement de la corrosion en fonction des conditions environnementales

Sept conditions environnementales ont été étudiées : 6 étaient "contrôlées" à partir de deux températures (20 et 45°C) et de trois humidités relatives (60, 80 et 92%) et la dernière était naturelle en extérieur (TeHe). Les résultats des caractérisations électrochimiques et des observations visuelles en fonction du temps m'ont permis de constituer une importante base de données (Tableau III-3).

Tableau III-3: Deux extraits de la base de données (en haut le suivi d'un prisme en fonction du temps ; en bas : les résultats pour une échéance donnée sur l'ensemble des prismes présents).

Measurement date yyyy/mm/dd	Prism n°	Concrete state	Environmental condition	Term points (months)	Ecorr mV, SCE	Re+Rp=1/slope Ohm	Linear regression	Re Nyquist Ohm	Icorr µA/cm²	Comment
2008/12/17	679	I	45°C, 92%HR	3	-496	5 008	1.00	167	0.29	-
2009/04/17	679	I	45°C, 92%HR	6	-412	17 695	0.99	-	-	-
2009/06/25	679	I	45°C, 92%HR	9	-397	27 958	0.99	229	0.05	-
2009/09/18	679	I	45°C, 92%HR	12	-634	2 220	1.00	166	0.67	-
2010/01/13	679	I	45°C, 92%HR	15	-460	789	1.00	440	3.95	-
2010/04/08	679	I	45°C, 92%HR	18	-458	532	1.00	365	8.29	-
2010/06/08	679	I	45°C, 92%HR	21	-414	479	1.00	349	10.63	rust spots
2010/09/21	679	I	45°C, 92%HR	24	-395	523	1.00	443	17.42	rust spots
2011/01/26	679	I	45°C, 92%HR	27	-248	778	1.00	616	8.53	cracks
2011/06/22	679	I	45°C, 92%HR	30	-140	1 671	1.00	975	1.99	cracks
2011/09/28	679	I	45°C, 92%HR	33	-126	1 017	1.00	670	3.99	cracks
2011/12/13	679	I	45°C, 92%HR	36	-55	2 604	1.00	1 427	1.17	cracks
				etc						
2009/09/18	662	I	45°C, 92%HR	12	-523	2 770	1.00	229	0.54	-
2009/09/18	673	I	45°C, 92%HR	12	-452	1 656	1.00	331	1.04	-
2009/09/18	679	I	45°C, 92%HR	12	-634	2 220	1.00	166	0.67	-
2009/09/18	680	I	45°C, 92%HR	12	-539	10 404	0.99	181	0.13	-
2009/09/18	688	I	45°C, 92%HR	12	-518	2 336	0.99	142	0.63	-

Deuxième partie : Présentation des travaux de recherche
 Chapitre III Evolution de la corrosion et cinétique

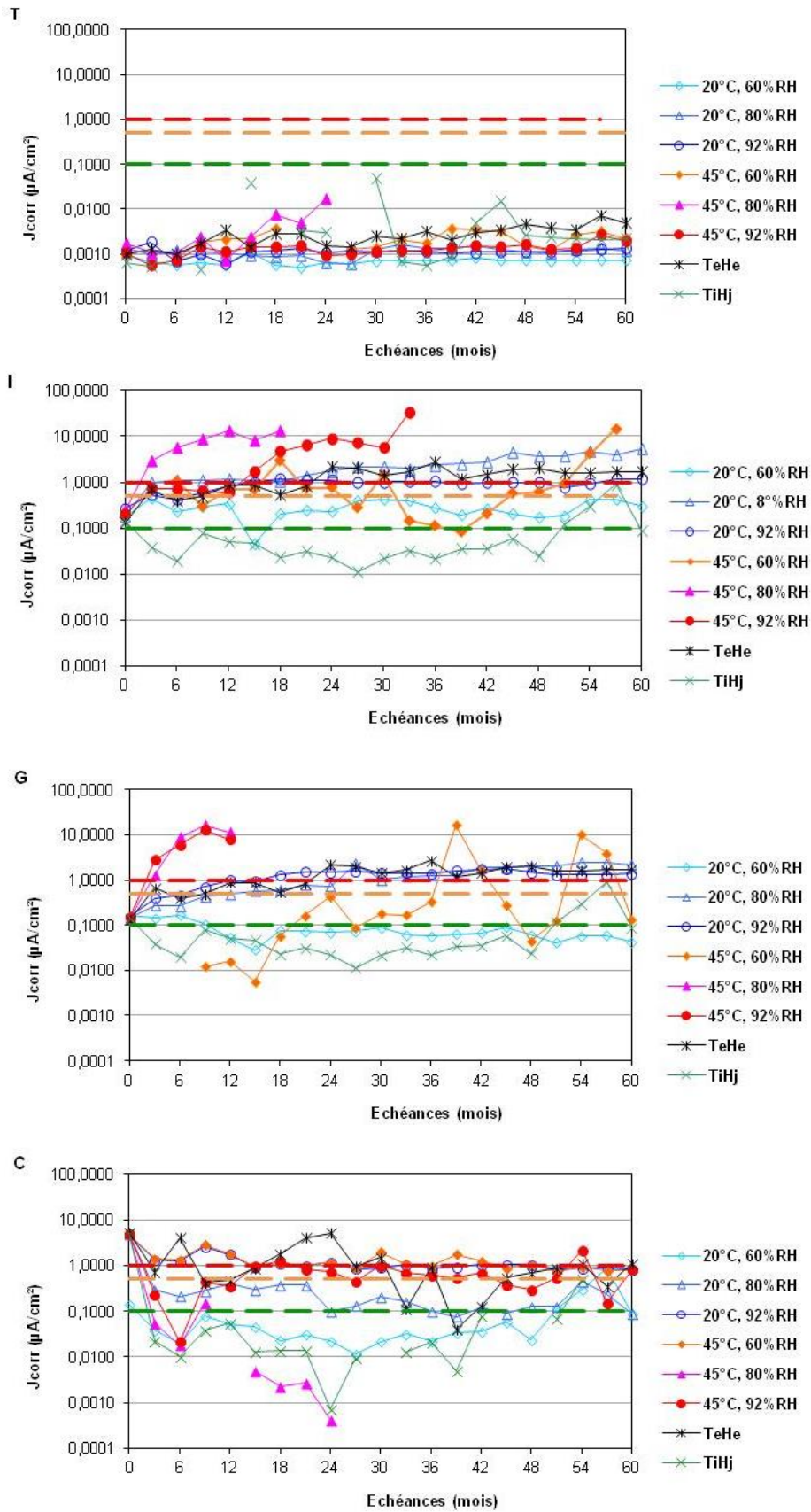


Figure III-14 : Densité de courant de corrosion pour chaque échéance de mesure en fonction des conditions environnementales. [MCV Rapport Coulaty - Bouteiller].

Les résultats illustrés sur la Figure III-14 ont permis de détecter les conditions environnementales les plus sévères pour accélérer la corrosion : 45°C et 80%HR pour les bétons I et G ; TeHe ou bien 45°C et 60%HR pour le béton C.

Les résultats (par exemple Figure III-15) ont également permis de classer les bétons par ordre de corrosion lorsqu'ils sont exposés dans une condition environnementale donnée. Par exemple à 20°C et 80%HR le classement est I>G>>C (les témoins restent passifs).

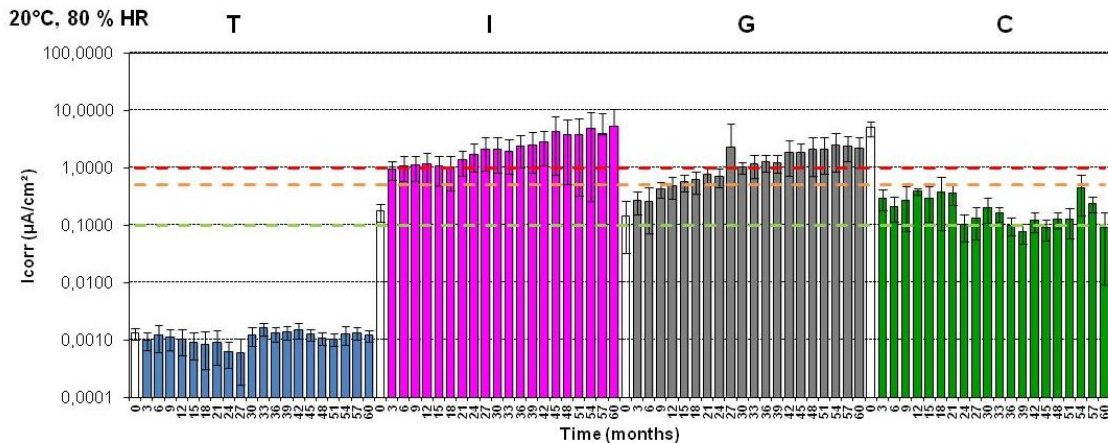


Figure III-15 : Densité de courant de corrosion à 20°C et 80%HR, pour chaque échéance de mesure en fonction des bétons. [MCV Rapport Coulaty - Bouteiller].

Le suivi des observations visuelle en fonction du temps ont permis de déterminer la durée d'entreposage dans une condition environnementale qui conduit à la rupture de l'interface acier/béton. A titre d'exemple le suivi d'un béton chloruré I (Figure III-16) :

- à 21 mois, une tâche de rouille apparait sur le béton,
- à 24 mois, une tâche de rouille apparait sur un coté scié du prisme,
- à 27 mois, une fissure longitudinale apparait sur cette même face sciée,
- entre 27 mois et 36 mois, la fissure s'agrandit,
- à 39 mois, l'armature est désolidarisée du béton.

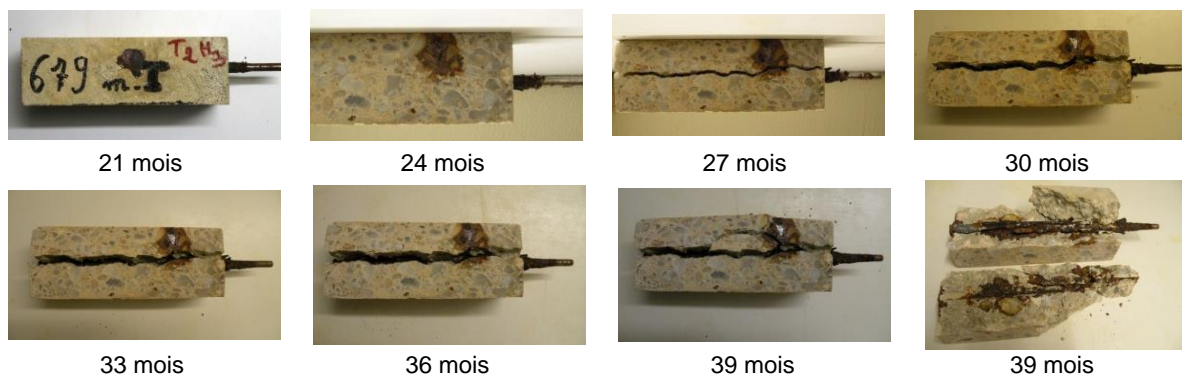


Figure III-16 : Evolution des signes de corrosion d'un prisme chloruré (I) entreposé à 45°C et 92 % HR en fonction du temps.

En revanche, l'objectif de trouver une loi de comportement des caractérisations électrochimiques en fonction soit de la température soit de l'humidité n'a pas été atteint car ces deux paramètres interagissent l'un avec l'autre [24, 25].

III.2.3 Corrélation entre caractérisations électrochimiques

En analysant les résultats obtenus dans le cadre du projet APPLET (2007-2010), GT3 que je co-animai, j'ai cherché une corrélation entre les grandeurs électrochimiques.

Lorsque j'ai comparé la vitesse de corrosion et la résistance de l'enrobage (Figure III-17), j'ai trouvé une corrélation pour le béton armé carbonaté (Figure III-18) [25].

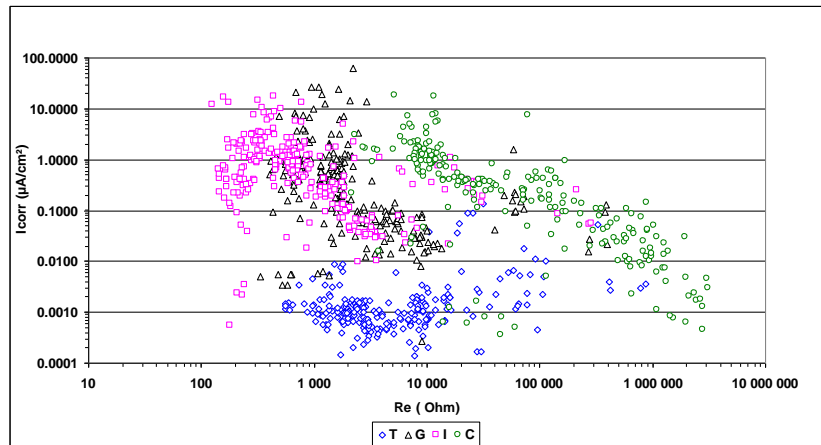


Figure III-17 : Recherche de corrélation entre la vitesse de corrosion et la résistance de l'enrobage des prismes du projet ANR APPLET [25].

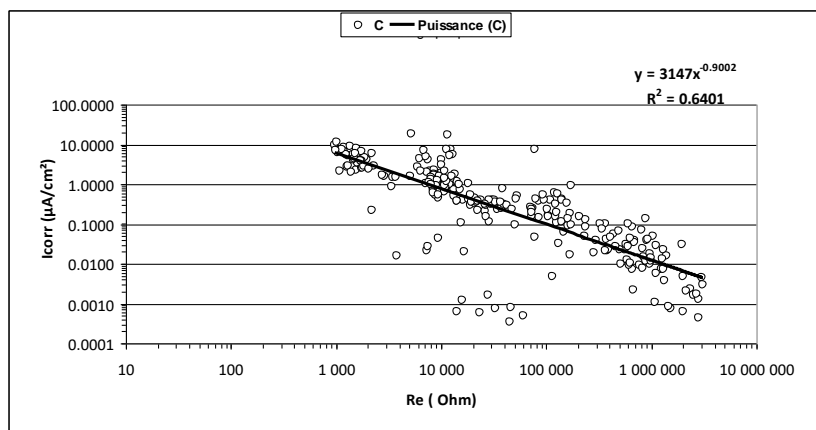


Figure III-18 : Corrélation entre densité de courant de corrosion et résistance de l'enrobage dans le cas du béton armé carbonaté [25].

III.2.4 Loi mathématique de la corrosion en fonction du temps

En analysant les résultats obtenus dans le cadre du projet APPLET (2007-2010) et en poursuivant cette étude sur fonds propres (Ifsttar et LRMH) les années suivantes (jusque 2014), j'avais plusieurs objectifs :

- étudier la vitesse de corrosion dans l'étape de propagation (étapes 3 et 4 de la Figure III-1) et proposer une loi mathématique du courant de corrosion en fonction du temps, de type linéaire ou d'un autre type,
- proposer une loi mathématique de la perte d'épaisseur de fer en fonction du temps,
- estimer l'erreur commise quand une valeur unique de densité de courant de corrosion et une hypothèse linéaire sont considérées et contribuer à une meilleure fiabilité de la prédiction,
- voir si la perte de fer de l'armature obtenue en situation réelle (conditions environnementales extérieures) peut se rapprocher de celle obtenue dans des conditions contrôlées.

Une publication a été soumise [26].

III.2.4.1 Loi mathématique de la densité de courant de corrosion en fonction du temps

Dans la littérature, un état de l'art sur la modélisation de la propagation de la corrosion dans des structures en béton armé a été rédigé par Otieno [27]. Les conclusions de son article soulignent la nécessité de travailler sur des programmes expérimentaux bien cadrés dans lesquels les conditions sont bien maîtrisées et dans lesquels il faut privilégier le suivi de la corrosion dans des conditions non accélérées.

C'est pourquoi, tout d'abord dans le cadre du projet APPLLET puis dans l'ORSI MCV d'Ifsttar, j'ai recherché une loi mathématique de la corrosion dans l'étape de la propagation, de prismes en béton armé entreposés dans différentes conditions environnementales en fonction du temps (durée de 5 ans).

La Figure III-19 représente les densités de courant de corrosion en fonction des échéances de mesures (4 fois par an pendant plus de cinq ans) pour chaque état du béton pour des conditions environnementales extérieures naturelles. Les valeurs diffèrent en fonction de l'échéance de mesure et cette différence provient de l'évolution de la corrosion de l'armature mais également et pour une grande part des fluctuations de la température, de l'humidité relative et des précipitations extérieures. Le béton carbonaté est le plus fortement impacté par ces changements (les valeurs de résistance de l'enrobage et d'électrolyte le montrent, résultat non présenté ici). Les bétons chlorurés sont moins sensibles vraisemblablement parce que les ions chlorure étant hygroscopiques, l'humidité de béton est maintenue.

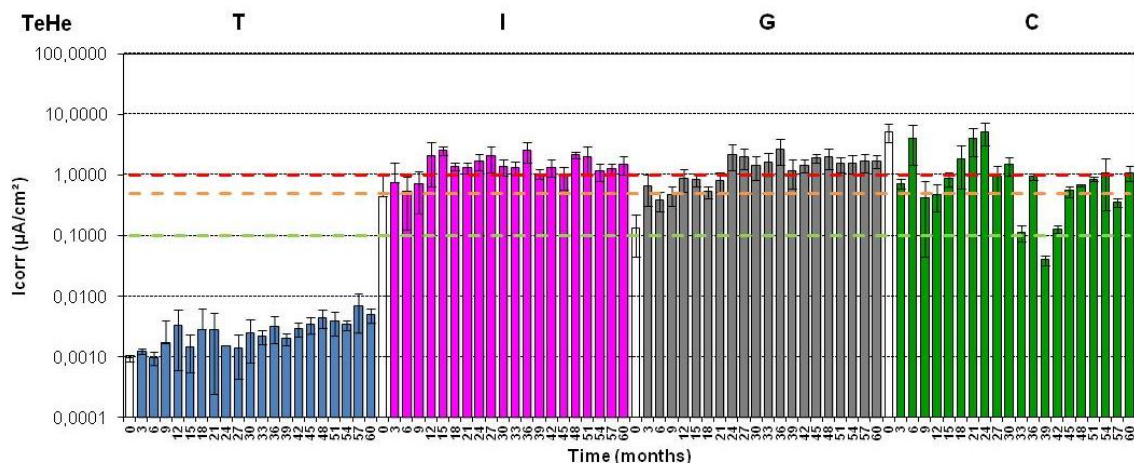


Figure III-19 : Densité de courant de corrosion des bétons armés (T : témoin ; I : béton chloruré par immersion/séchage ; G : béton chloruré au gâchage et C : béton carbonaté) pour chacune des échéances de mesure [26].

A partir de ces valeurs de densité de courant de corrosion qui sont des valeurs instantanées, ma proposition est de calculer le courant de corrosion en fonction du temps. Pour cela, entre deux intervalles de mesures, t_i et t_{i+j} , le temps t est calculé en jours et la valeur de i_{corr} associée est égale à la somme de i_{corr_i} et $i_{corr_{i+j}}$ divisée par deux. Cela revient à considérer i_{corr} constante sur une période voisine de 120 jours. Ensuite les valeurs de i_{corr} sont cumulées en fonction du temps. La Figure III-20 illustre le résultat obtenu pour les quatre états de béton entreposés en extérieur pendant 5,5 années. Les résultats montrent que le courant de corrosion des bétons témoins est pratiquement nul alors que pour les bétons dégradés en phase de propagation de corrosion, le courant est croissant en fonction du temps. En ce qui concerne le béton carbonaté C, la courbe singulière obtenue résulte de l'impact des conditions climatiques qui influencent beaucoup la valeur de la résistivité du béton.

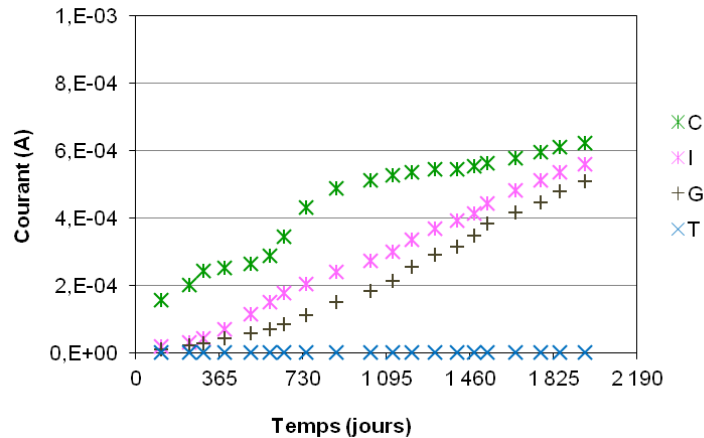


Figure III-20 : Courant de corrosion en fonction du temps en conditions extérieures (T : témoin ; I : béton chloruré par immersion/séchage ; G : béton chloruré au gâchage et C : béton carbonaté).

Deux lois de type linéaire et puissance ont été testées pour fitter les résultats expérimentaux de la Figure III-20 et les résultats montrent que la loi de type puissance est la plus satisfaisante (Tableau III-4).

Il semble donc, d'après ces résultats d'essais, que la loi mathématique de la densité de courant de corrosion en fonction du temps soit de type puissance.

Tableau III-4 : Lois mathématiques du courant en fonction du temps, de type linéaire et puissance (équation et régression linéaire).

		Linéaire	Puissance
T	Eq	4,49E-10 t	1,16E-10 t ^{1,18}
	R ²	0,95	0,99
I	Eq	2,81E-7 t	4,39E-8 t ^{1,26}
	R ²	0,99	0,99
G	Eq	2,30E-7 t	0,71E-8 t ^{1,47}
	R ²	0,93	0,99
C	Eq	3,15E-7 t+9,86E-5	1,13E-5 t ^{0,54}
	R ²	0,89	0,96

III.2.4.2 Loi mathématique de la perte d'épaisseur de fer en fonction du temps

Le courant de corrosion est une grandeur plus utile aux ingénieurs de la corrosion qu'aux ingénieurs de génie civil. Ces derniers préfèrent utiliser la perte de section d'une armature pour re-calculer une capacité portante d'ouvrage par exemple.

Connaissant la densité de courant de corrosion il est possible de calculer la masse de fer perdue en utilisant la loi de Faraday puis de calculer la perte d'épaisseur du fer :

- Calcul de la masse de fer perdue (en g) selon la loi de Faraday :

$$m = (M/F.z).I_{corr}.t \quad (\text{Eq. 1})$$

avec m = masse de metal corrodée (g), I_{corr} = courant (A), t = durée (s), F = constante de Faraday (96500 C.mol⁻¹), M = masse atomique du métal (55.8 g/mol for Fe) and z = charge ionique du métal (z=2; Fe→Fe²⁺ + 2e⁻).

- Calcul de la perte d'épaisseur de fer (en m)

$$m = \rho \cdot \pi \cdot R_i^2 \cdot L - \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot L$$

$$\text{Steel thickness loss} = R_i - \sqrt{R_i^2 - \frac{m}{\pi \cdot \rho \cdot L}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{Steel thickness loss} = \frac{m}{2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot \rho \cdot L} \quad (\text{Eq. 3})$$

avec m = masse de métal corrodé (kg), ρ = densité du métal (7874 kg/m³ pour l'acier) R_i et R_t les rayons (initial et au temps t) de l'armature (m) et L = la longueur de l'armature prise en compte dans l'analyse gravimétrique (m).

La Figure III-21 illustre les courbes expérimentales de perte d'épaisseur de fer en fonction du temps pour les quatre états de béton entreposés en extérieur pendant 5,5 ans. Le Tableau III-5 compile les lois mathématiques de type puissance qui fittent les données expérimentales de manière satisfaisante (équation et coefficient de régression linéaire).

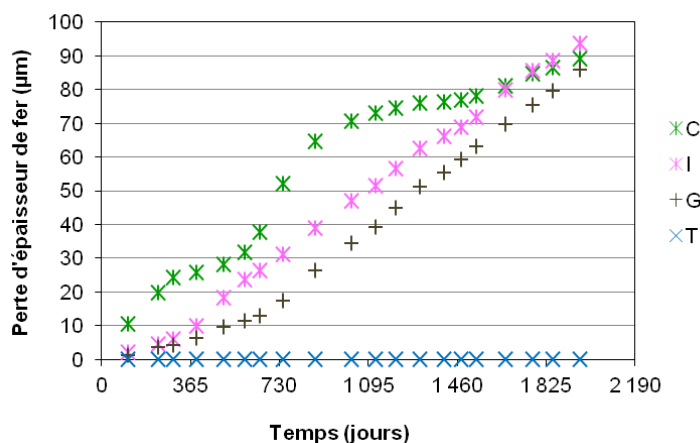


Figure III-21 : Perte d'épaisseur de fer en fonction du temps pour des bétons (T : témoin ; I : béton chloruré par immersion/séchage ; G : béton chloruré au gâchage et C : béton carbonaté) entreposés en conditions naturelles extérieures

Tableau III-5 : Lois mathématiques de la perte d'épaisseur de fer en fonction du temps, de type puissance (équation et régression linéaire).

Béton	Loi puissance	R ²	Béton	Loi puissance	R ²
T	7,28E-6 t ^{1,31}	0,99	G	8,22E-4 t ^{1,53}	0,99
I	3,00E-3 t ^{1,38}	0,99	C	0,28 t ^{0,78}	0,97

III.2.5 Prédiction de la durabilité du béton armé

Lors d'une demande de diagnostic de corrosion d'une structure en béton armé, les maîtres d'ouvrage veulent connaître l'état de dégradation de leur structure et sa durabilité ou vie résiduelle. Ils attendent également que les résultats du diagnostic puissent les aider à décider des suites à donner : ne rien faire, maintenir, réparer, renforcer, remplacer, etc...

Aujourd'hui, et pour des raisons essentiellement budgétaires, un diagnostic de corrosion n'est réalisé qu'une seule fois et en conséquence ne conduit qu'à un seul résultat de vitesse de corrosion (qui peut être plus ou moins difficile à obtenir (voir § diagnostic)). Puis, afin de prédire une durée de vie de

l'ouvrage sur plusieurs dizaines d'années, une hypothèse forte est considérée : la linéarité de la vitesse de corrosion avec le temps.

Cette manière de faire quoi que compréhensible est critiquable scientifiquement à deux niveaux : premièrement, une vitesse de corrosion étant une mesure instantanée, il n'est pas correct de penser qu'elle ne va pas évoluer avec le temps, avec l'état du béton, avec les conditions environnementales, etc.... Deuxièmement, l'hypothèse de la linéarité de la vitesse de corrosion avec le temps n'a pas été démontrée.

D'après l'ensemble des résultats décrits précédemment, la prédiction de la perte d'épaisseur de fer en fonction du temps a été évaluée selon les quatre scénarii suivants :

- 1) La valeur de densité de courant de corrosion est considérée égale à la valeur maximum ($i_{corr} = 2,7 \mu A/cm^2$ à 36 mois) trouvée sur l'ensemble de la période des 5,5 ans et la loi de corrosion est linéaire sur 5,5 ans (G min)
- 2) La valeur de densité de courant de corrosion est considérée égale à la valeur minimum ($i_{corr} = 0,4 \mu A/cm^2$ à 6 mois) trouvée sur l'ensemble de la période des 5,5 ans et la loi de corrosion est linéaire sur 5,5 ans (G max)
- 3) L'ensemble des valeurs de densité de courant de corrosion ont été prises en compte et la linéarité s'applique sur chacune des périodes voisines de 3 mois (G 3 mois)
- 4) La loi de type puissance a été utilisée (G loi puissance)

A titre d'illustration, la Figure III-22 montre la perte d'épaisseur du fer en fonction du temps pour le béton chloruré par immersion/séchage entreposé en conditions naturelles extérieures selon les quatre cas.

- Après 5 ans, l'épaisseur de fer perdu varie de 20 μm à 160 μm en considérant respectivement les valeurs minimum et maximum de la densité de courant de corrosion. La dispersion peut donc être très importante (facteur 8 !). En considérant l'ensemble des valeurs de densité de courant de corrosion (scenarii n°3) ce qui est plus proche de la réalité, l'épaisseur de fer perdu est voisine de 80 μm .
- Après 10 ans, les épaisseurs de fer perdu deviennent 47, 316 et 232 μm respectivement en considérant les valeurs minimum et maximum de la densité de courant de corrosion et loi de type puissance.

Ces résultats expérimentaux validés numériquement montrent que le fait d'utiliser une seule valeur de densité de courant de corrosion peut conduire à des prédictions de perte d'épaisseur de fer sous-évaluées ou au contraire sur-évaluées.

Dans un objectif de prédire avec plus de fiabilité la durabilité du béton armé, il apparait donc nécessaire de suivre l'évolution de la densité de courant de corrosion avec le temps avec des fréquences rapprochées. Dans un premier temps, une loi de comportement "cinétique" en fonction du temps pourrait être obtenue. Dans un second temps, une loi de calage numérique pourrait être recherchée.

Dans le cadre de ce travail, les mesures se poursuivent afin de valider que les lois mathématiques en puissance trouvées restent valables pour des durées encore plus longues.

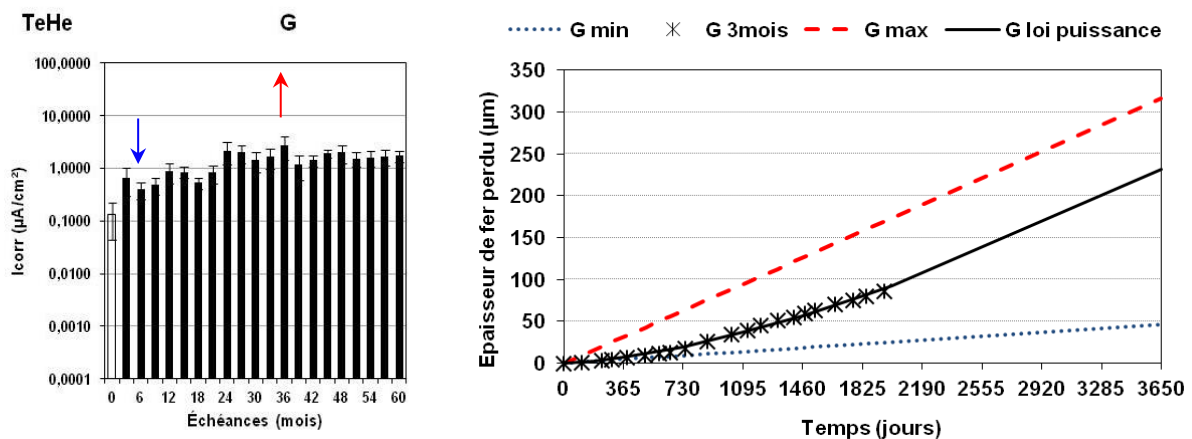


Figure III-22 : Prédiction à 10 ans de l'épaisseur de fer perdu en fonction du temps pour le béton armé I (chloruré par immersion/séchage) entreposé en conditions naturelles extérieures [26].

III.2.6 Comparaison des résultats en conditions naturelles (île de France) ou en conditions environnementales contrôlées

Les résultats de la corrosion en phase de propagation issus de bétons armés entreposés dans des conditions naturelles (présentés dans les paragraphes précédents) ont été comparés à ceux de bétons armés identiques mais entreposés en conditions environnementales contrôlées plus faciles à mettre en œuvre et à suivre.

Cette comparaison montre que le comportement obtenu en conditions réelles extérieures (de la région d'île de France) est très similaire aux conditions contrôlées de 20°C et 92%RH pour les bétons armés chlorurés au gâchage (Figure III-23) et, de 20°C et 80%RH pour les bétons armés chlorurés par immersion/séchage (graphique non présenté ici).

Il semble donc, que dans certains cas, les essais de laboratoire peuvent correctement décrire la réalité même si l'explication n'est pas implicite.

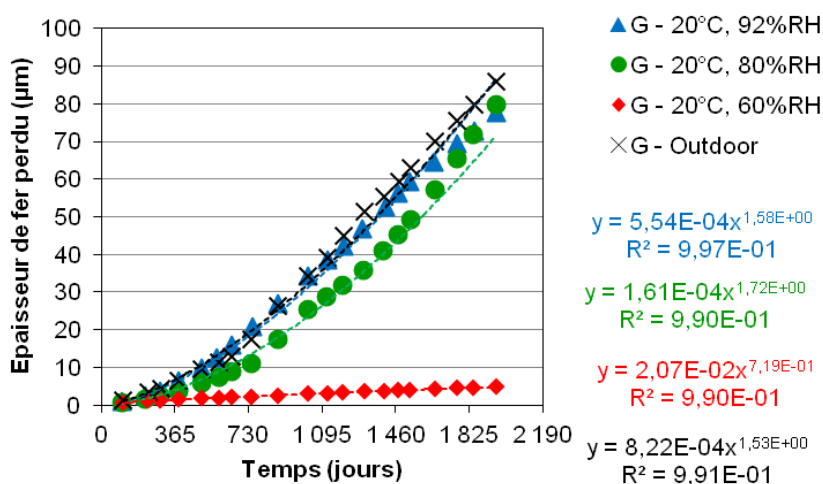


Figure III-23 : Comparaison du comportement de corrosion dans des conditions environnementales contrôlées et naturelles d'île de France (température de 20°C).

III.3 Fissurations dues à la corrosion et simulation numérique

La fissuration est un paramètre de suivi visuel très important dans le diagnostic d'un ouvrage. Le maître d'ouvrage est alerté de dégradation d'un ouvrage en béton armé lorsque des fissures apparaissent sur le parement béton. Lorsque les fissures sont trop nombreuses et/ou très ouvertes, la seule décision possible est une réparation lourde alors que si la fissuration était suivie préalablement, une action corrective modérée aurait pu se révéler suffisante.

Dans le cadre du programme ANR APPLETT, au sein du groupe de travail n°2 "Comportement des structures dégradées par corrosion" et dans le sujet 3 "Etude du vieillissement et des comportements différés sur l'adhérence acier/béton", j'ai apporté mon savoir-faire sur la corrosion du béton armé (réalisation des essais de corrosion anodique et caractérisations électrochimiques).

Il s'agissait d'étudier de manière complémentaire la fissuration du béton provoquée par de la corrosion accélérée anodique et de modéliser l'interface acier/béton selon un modèle Eléments Finis (avec Castem) développé au LCPC par B. Richard [28]. L'innovation dans cette modélisation était la prise en

compte du gonflement des produits de corrosion. Des résultats très encourageants ont été obtenus (Figure III-24).

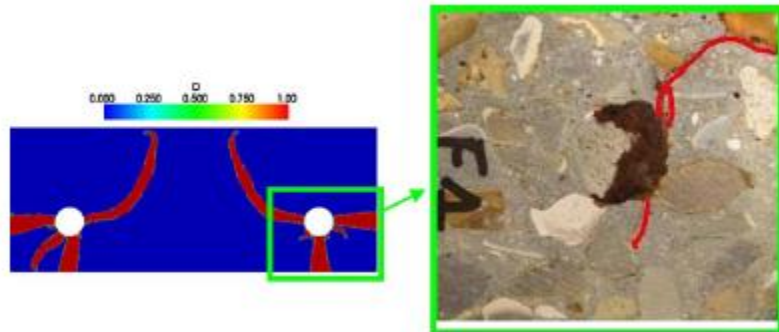


Figure III-24 : Endommagement numérique et faciès de fissuration expérimental (obtenu par corrosion anodique [29]).

A l'issue de ces travaux obtenus en collaboration avec mes collègues numériques et mécaniciens, les résultats ont été présentés dans une conférence internationale [30] et dans un article [31]. Un autre article est soumis [29].

III.4 Conclusions

Les résultats de recherches que j'ai présentés dans ce chapitre constituent une avancée dans la connaissance de la corrosion du béton armé selon trois axes : (i) classifier des ciments par rapport à une pénétration d'ions chlorure et donc un risque de corrosion ; (ii) proposer des lois de corrosion temporelles pour la phase de propagation et (iii) modéliser les fissurations dues à la corrosion.

Premièrement, l'étude comparative entre ciment Portland (CEM I) et ciment aux laitiers de hauts fourneaux (CEM III/B), que j'ai réalisée, a permis de démontrer le caractère plus résistant à la pénétration des ions chlorure dans l'enrobage béton du ciment CEM III/B utilisé. Ceci a pour conséquence que le phénomène de corrosion sera retardé (tant que l'enrobage n'est pas carbonaté). De plus, il s'est avéré que les raisonnements sur la probabilité de la corrosion et les niveaux de corrosion habituellement utilisés pour qualifier les bétons armés à base de ciment Portland ne pouvaient pas s'appliquer aux bétons formulés avec des laitiers. Une nouvelle piste de recherche est donc avancée. Enfin, l'étude a démontré (encore une fois) que la discussion entre détection de corrosion et teneur en ions chlorure qui va initier la corrosion reste ouverte (groupe RILEM TC235).

Deuxièmement, le suivi de la corrosion des armatures dans des prismes de béton, de dégradations différentes, entreposés dans des conditions environnementales différentes (contrôlées ou naturelle) sur une période de plus de cinq années m'a permis de constituer une base conséquente de données électrochimiques et de proposer une loi mathématique de la corrosion. Les différentes équations trouvées (en courant de corrosion et en épaisseur de fer perdu) pour décrire l'étape de la propagation de la corrosion en fonction du temps sont de type puissance. Ce travail apporte un complément de connaissance sur la cinétique de corrosion du béton armé, qui vient compléter les rares résultats publiés dans la littérature. Les résultats de ce travail pourront également servir de départ pour simuler le devenir d'une structure en béton armé en fonction du changement climatique par ex. Je vais poursuivre cette étude afin de vérifier que les lois proposées restent valables pour des durées de temps plus longues dans le cadre du projet ANR-MODEVIE. Ces données pourront être utilisées par les modélisateurs partenaires.

Troisièmement, les premiers résultats numériques de la fissuration du béton armé (en prenant en compte le phénomène de gonflement des oxydes de fer) montrent un accord satisfaisant avec les résultats expérimentaux de la corrosion provoquée au laboratoire de manière anodique. Cette étude sera complétée par les résultats de la thèse d'O. Loukil que je co-encadre.

III.5 Références

- [1] Tuutti K. Corrosion of steel in concrete, Thesis: Stockholm; 1982.
- [2] Liu Y, Weyers RE. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures. *ACI Mat J.* 1998;95(6):675-81.
- [3] Francois R, Arliguie G. Effect of microcracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research.* 1999;51(2):143-50.
- [4] Yalçyn H, Ergun M. The prediction of corrosion rates of reinforcing steels in concrete. *Cement and Concrete Research.* 1996;26(10):1593-9.
- [5] Melchers RE, Li CQ. Reinforcement corrosion initiation and activation times in concrete structures exposed to severe marine environments. *Cement and Concrete Research.* 2009;39(11):1068-76.
- [6] AFNOR. NF EN 197-1 Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. 2012 avril.
- [7] Bouteiller V, Cremona C, Baroghel-Bouny V, Maloula A. Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time. *Cement and Concrete Research.* 2012;42(11):1456-67.
- [8] Yuan Q, Shi C, De Schutter G, Audenaert K, Deng D. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment - A review. *Construction and Building Materials.* 2009;23(1):1-13.
- [9] Tang L, Nilson L-O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. *Cement and Concrete Research.* 1993;23:247-53.
- [10] Dhir RK, Jones MR, McCarthy MJ. Binder content influences on chloride ingress in concrete. *Cement and Concrete Research.* 1996;26(12):1761-6.
- [11] Jarrah NR, Baghabra Al-Amoudi OS, Maslehuddin M, Ashiru OA, Al-Mana AI. Electrochemical behaviour of steel in plain or blended cement concretes in sulphate and/or chloride environments. *Construction and Building Materials.* 1995;9(2):97-103.
- [12] Macphee DE, Cao HT. Theoretical description of impact of blast furnace slag (BFS) on steel passivation in concrete. *Magazine of Concrete Research.* 1993;45(162):63-9.
- [13] Garcia V. Contribution à l'étude du taux de chlorures pour l'amorçage de la corrosion des armatures du béton armé: Doctorat de l'Université de Toulouse; 2013.
- [14] Angst U, Elsener B, Larsen CK, Vennesland Ø. Critical chloride content in reinforced concrete - A review. *Cement and Concrete Research.* 2009;39(12):1122-38.
- [15] ASTM. C 876-09, Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM; 2009.
- [16] Elsener B. RILEM TC 154-EMC:Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion - Recommendations - Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures.* 2003;36:461-71.
- [17] Andrade C, Alonso C. 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;37:623-43.
- [18] Cremona C, Adélaïde L, Berthaud Y, Bouteiller V, L'Hostis V, Poyet S, et al. Probabilistic and predictive performance-based approach for assessing reinforced concrete structures lifetime: The applet project. In: V.L'Hostis KP, R.Gens and C.Gallé (Eds.), editor. AMP 2010 – International Workshop on Ageing Management of Nuclear Power Plants and Waste Disposal Structures (EFC Event 334). Toronto, Ontario, Canada: EPJ Web of Conferences; 2011.
- [19] Cremona C, Rougeaud P, Torrenti JM, Poyet S, Adélaïde L, Berthaud Y, et al. Durée de vie des ouvrages en béton armé - Approche prédictive, performantielle et probabiliste - Recommandations du projet ANR-APPLET: IFSTTAR - CERIB; 2012.

- [20] Bouteiller V, Cherrier JF, Koubi B, Iftikhar U, L'Hostis V, Marie-Victoire E, et al. Evolution of reinforced concrete prism corrosion with time depending on degradation types and exposition conditions. ICDCS. Belfast, United Kingdom 2012.
- [21] Bouteiller V, L'Hostis V, Marie-Victoire E, Schneider J, Boinski F, Cremona C. Kinetics of corrosion propagation in reinforced concrete contaminated with chlorides. . ICDC. New Delhi, India 2014.
- [22] Bouteiller V, Coulaty N, Boujard P, Iftikhar U. Etude de la cinétique de corrosion sur des prismes en béton armé. . Journées techniques Ouvrages d'Art. Champs sur Marne, France 2014.
- [23] L'Hostis V, Marie-Victoire E, Bouteiller V, Garciaz JL, Amblard E, Emptaz C, et al. Study of the active/passive corrosion behaviour of reinforced concrete slabs using different devices. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2012;16(3-4):481-90.
- [24] Bouteiller V, Toque C, Cury A, Cherrier J-F, Diday E, Cremona C. Non destructive electrochemical characterizations of reinforced concrete corrosion: basic and symbolic data analysis. Corrosion Reviews. 2012;30(1-2):47-62.
- [25] Bouteiller V, Cherrier J-F, L'Hostis V, Rebolledo N, Andrade C, Marie-Victoire E. Influence of humidity and temperature on the corrosion of reinforced concrete prisms. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2012;16(3-4):471-80.
- [26] Bouteiller V, Marie-Victoire E, Cremona C. Mathematical law for steel thickness loss versus time applied to reinforced concrete contaminated by chlorides. Construction and Building Materials. submitted 2015.
- [27] Otieno MB, Beushausen HD, Alexander MG. Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures – A critical review. Cement and Concrete Composites. 2011;33(2):240-5.
- [28] Richard B. Thèse Modélisation d'éléments de structure en béton armé dégradés par corrosion : la problématique de l'interface acier/béton en présence de corrosion: Université Paris Est; 2010.
- [29] Richard B, Quiertant M, Bouteiller V, Delaplace A, Adelaide L, Ragueneau F, et al. Experimental and numerical analysis of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete sample. . Computer and Concrete. Soumis 2015.
- [30] Richard B, Quiertant M, Bouteiller V, Adelaide L, Perrais M, Tailhan J-L, et al. Experimental and numerical analysis of corrosion-induced cracking in reinforced concrete beam EUROCORR. Moscow, Russia 2011.
- [31] Richard B, Quiertant M, Bouteiller V, Adelaide L, Tailhan J-L, Cremona C. Influence of accelerated corrosion on the reinforced cover concrete cracking behavior: experimental and numerical study. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2012;16(3-4):450-9.

CHAPITRE IV TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES POUR LA REPARATION DU BETON ARME

En France, la gestion du patrimoine des ouvrages d'art débute en 1979, avec la mise en place par le service d'Etude sur les Transports, les Routes et les Aménagements (SETRA) de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA). La révision de l'ITSEOA en 1995 introduit la méthodologie IQOA (image qualité des ouvrages d'art) qui est une méthode de surveillance et d'évaluation des ouvrages tels que les ponts, les murs et les tranchées couvertes et tunnels. La dernière version de l'ITSEOA date de décembre 2010.

L'ouvrage est visité tous les trois ans et il lui est attribué une note ou cotation en fonction de son état (Figure IV-1). Les valeurs des cotations du patrimoine des ponts en France de 2012 sont présentées sur la Figure IV-2.

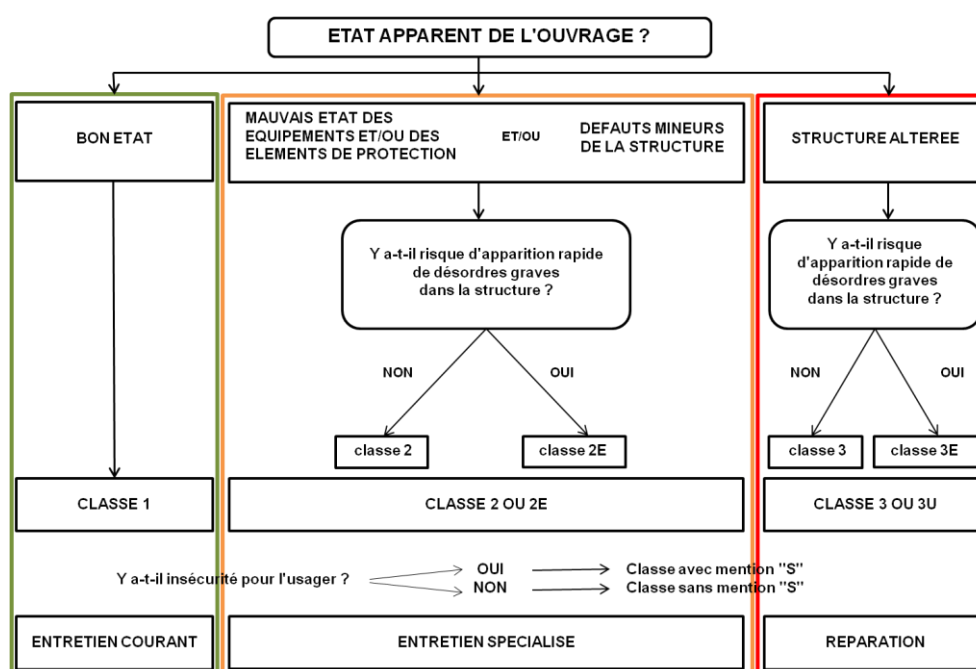


Figure IV-1 : Cotation d'un ouvrage [ITSEOA DT383]

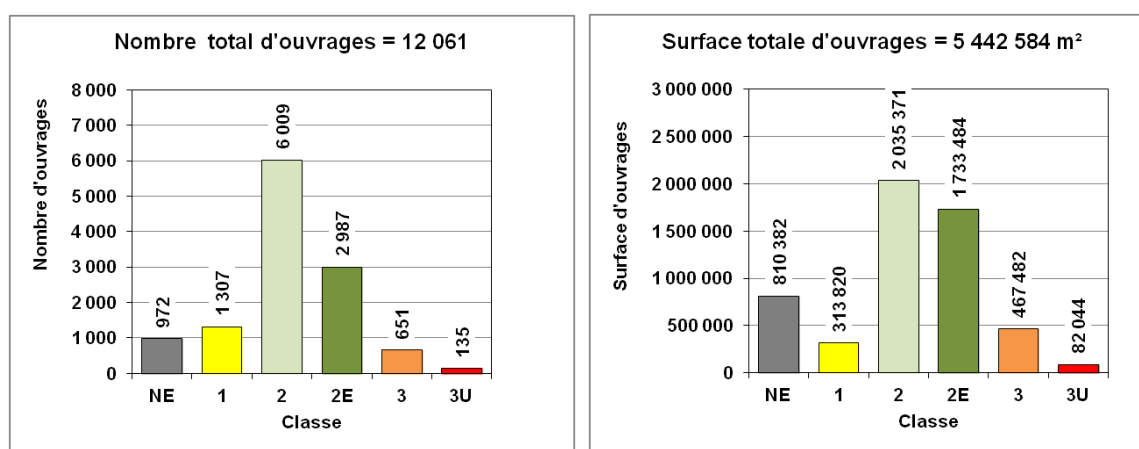


Figure IV-2 : Cotation des ouvrages de type ponts en France (campagne IQOA de 2012) [extrait de la présentation de JM. Tarrieu, Cotita 2013]

Il est constaté que la cause principale de dégradation des structures en béton armé est la corrosion. Une étude similaire conduite en Amérique du Nord a conduit aux mêmes conclusions. Il est donc primordial de proposer des solutions de réparation de ces ouvrages avant qu'il ne soit trop tard.

Lorsque les structures en béton armé sont dégradées par corrosion, la réparation "traditionnelle" consiste en une purge du béton pollué et du béton non adhérent aux armatures, puis en une reconstitution du béton (en général par projection).

Dans les années 2007, les résultats du projet européen CONREPNET [1] ont montré que ce type de réparation pratiquée depuis plusieurs décennies n'était pas pérenne et cela essentiellement pour deux raisons :

- L'incompatibilité des nouveaux bétons avec les anciens qui pouvait conduire à des décollements entre bétons après environ 2 ans, et
- L'existence de zones réparées et de zones non réparées qui suite à "l'effet de piles" pouvait engendrer une corrosion des zones "frontières", 5 à 10 ans après la réparation.

Etant donné que les réparations traditionnelles ne donnaient pas entièrement satisfaction et que la corrosion des armatures dans le béton est un phénomène de nature électrochimique, des réparations de type électrochimiques ont été étudiées depuis les années 1990 dans le but de les appliquer à des structures en béton armé dégradées [2]. Ces réparations ont toutes un caractère cathodique : l'objectif est de protéger l'armature soit en extrayant les polluants du béton, soit en modifiant l'environnement de l'armature de façon à ce qu'elle se retrouve dans des conditions de moindre corrosion voire de non corrosion.

Les réparations électrochimiques répondent toutes au principe schématique de la Figure IV-3.

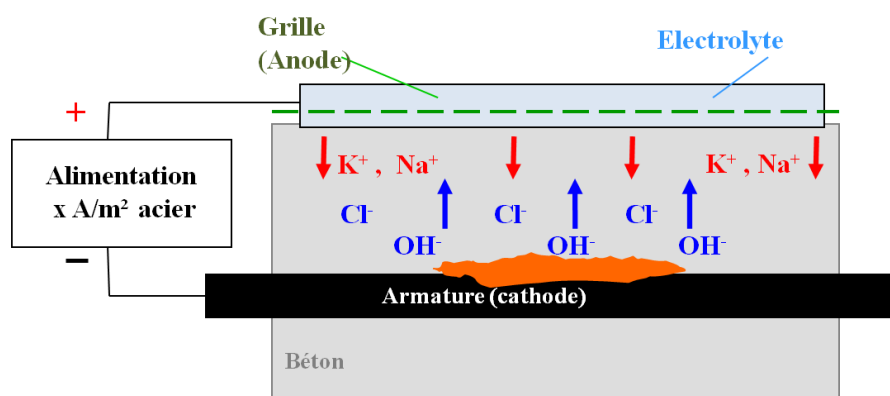
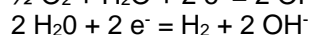
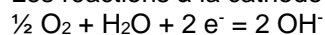
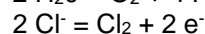
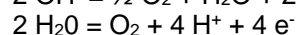
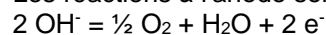


Figure IV-3 : Schéma des traitements électrochimiques (avec alimentation pour le procédé par courant imposé ; sans alimentation pour le procédé courant galvanique).

Les réactions à la cathode sont :



Les réactions à l'anode sont :



Les traitements électrochimiques peuvent être appliqués selon deux procédés :

- 1) Procédé par courant imposé : l'armature et l'anode sont connectées à une alimentation électrique qui débite un courant choisi et contrôlé.
- 2) Procédé par courant galvanique : l'armature est directement connectée à l'anode, et le courant résultant (qui n'est pas contrôlé) dépend du couple métallique et des conditions du milieu.

Mon implication dans la recherche sur les traitements électrochimiques pour la réparation des structures en béton armé dégradées est pertinente car leur utilisation en France est récente et tous les paramètres ne sont pas encore totalement maîtrisés.

Je me suis particulièrement intéressée à étudier :

- l'efficacité et les limites du traitement électrochimique, avec la mise en place de méthodologies et d'essais quantitatifs,
- la longévité de l'efficacité du traitement électrochimique, à court, moyen et également long terme (plusieurs années).

De plus, dans ces différentes recherches, j'ai toujours tenu à appréhender la réparation :

- pour différentes échelles, celle du matériau (essentiellement au laboratoire) et, celle de l'élément structurel voire de l'ouvrage réel, et
- pour différents temps dans la vie de l'ouvrage, en distinguant par exemple la maintenance (la dégradation n'est pas encore trop importante) et la réhabilitation (la dégradation est visible à l'œil nu lors des inspections visuelles par ex).

Enfin, dans le but de développer l'utilisation de ces traitements, il est également primordial de discuter entre communautés différentes, ce que je me suis appliquée à faire auprès des maîtres d'ouvrages, des entreprises, des bureaux d'étude et des organismes de recherches.

Outre la recherche, je me suis également impliquée dans l'aspect normalisation et recommandations de ces traitements électrochimiques. En particulier, en tant que membre du CEFRACOR, j'ai participé au sein d'un groupe miroir pour l'AFNOR, à la mise à jour de la norme sur la protection cathodique (Protection cathodique de l'acier dans le béton [3] et à la transformation de la spécification technique portant sur la réalcalinisation en norme (AFNOR. FD CEN-TS 14038-1, Electrochemical realkalisation and chloride extraction treatments for reinforced concrete Part 1: Realkalisation [4]). Toujours au sein du CEFRACOR, j'ai également travaillé activement à la rédaction des recommandations du guide technique intitulé "Anodes galvaniques pour le traitement de la corrosion des armatures des constructions en béton" [5]. J'ai également publié un article dans une revue technico-professionnelle [6].

Enfin, étant donné mes activités de recherches sur la réparation des ouvrages corrodés, j'ai été consultée dans le cadre de différentes études et expertises et notamment celle du Viaduc de Saint-Cloud.

Afin de mettre en lumière mes implications par rapport à l'utilisation des techniques électrochimiques pour la réparation des structures en béton armé dégradées par corrosion, le quatrième chapitre de ce document comporte trois parties. Dans une première partie, je présente des éléments concernant le traitement électrochimique de déchloration par courant imposé pour les bétons armés dont l'enrobage béton comporte des ions chlorure (Contrat DRAST). Dans la seconde partie, concernant le traitement électrochimique de réalcalinisation pour les bétons armés dégradés par carbonatation, j'expose les résultats des travaux de la thèse de YY. Tong que j'ai co-encadrée. Les deux processus, courant imposé et courant galvanique ont été étudiés. J'ajoute les résultats d'une étude de cas de réalcalinisation d'un ouvrage. Dans la troisième partie, je décris les résultats que j'ai obtenu lors du chantier pilote de traitement de protection cathodique par courant imposé avec anodes forées sur le Viaduc de Saint-Cloud.

IV.1 Traitement électrochimique de déchloration

Le traitement électrochimique de déchloration du béton armé est basé sur le brevet Norcure. Les recherches, notamment de la Strategic Highway Research Program (SHRP) aux Etats-Unis et du Transport Research Laboratory (TRL) en Europe, font l'objet de différents rapports dans les années 1993 à 2002 [7-10]. Depuis, se sont ajoutés à ces rapports, des articles scientifiques portant, d'une part, sur des aspects expérimentaux [11-29] et de modélisation [30-35] et d'autre part, de normalisation [36].

Dans les années 2001 à 2005, dans le cadre d'un contrat avec la mission de génie civil de la Direction de la Recherche des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) du Ministère de l'Equipement, j'ai entrepris des recherches sur le traitement électrochimique de déchloration afin de réparer les structures en béton armé dégradées par les ions chlorure. Je voulais démontrer l'efficacité du traitement

de déchloration sur des éprouvettes de laboratoire dans une première phase, puis, dans une seconde phase, appliquer le traitement de déchloration sur des éléments structurels. Ce contrat s'inscrivait dans une opération de recherche du LCPC plus large sur la "Durabilité du béton armé et de ses constituants/maîtrise et approche performantielle", pilotée par V. Baroghel-Bouny.

J'ai réalisé ces travaux avec l'aide de l'équipe technique que j'encadrai (2 à 3 techniciens). Les résultats ont fait l'objet d'un rapport pour la DRAST, de différentes conférences nationales et internationales [37-39] et d'une publication [20].

IV.1.1 Déchloration d'éprouvettes cylindriques en mortier armé à l'échelle du laboratoire

Dans la première phase de l'étude DRAST, l'objectif était de déterminer l'efficacité du traitement électrochimique de déchloration des bétons armés et d'en indiquer certaines limites d'emploi. Pour cela des éprouvettes de géométrie cylindrique (hauteur 10 cm et diamètre 7 cm) en microbéton équivalent (diamètre maximum de granulats = 4 mm) avec une armature centrale (de surface polie utile à la corrosion de 10cm²) et une épaisseur d'enrobage de 3 cm, ont été fabriquées. Les ions chlorure étaient apportés au gâchage.

L'étude a été réalisée en prenant en compte, d'une part, la nature du ciment et, d'autre part, le rapport eau sur ciment. Pour une formulation complémentaire, les ions chlorure étaient apportés par des cycles d'immersion/séchage dans une solution saline. Les différents corps d'épreuves sont décrits dans le Tableau IV-1.

Le traitement de déchloration est temporaire et dans cette étude des durées de 0, 2, 4, 6 et 8 semaines ont été considérées et appliquées simultanément sur trois éprouvettes (Figure IV-4). Le suivi du traitement reposait, d'une part, sur les dosages quantitatifs des ions chlorure dans les mortiers (analyse destructive) et dans la solution de borate et, d'autre part, sur les caractérisations électrochimiques des armatures (contrôle non destructif).

Tableau IV-1 : Formulation des éprouvettes cylindriques en microbéton armé.

Béton	GJ	GN	GM	GP	GO
Ciment	CEM I,	CEM I	CEM I	CEM III/B	CEM III/B
% de laitiers	0%	0%	0%	68%	68%
e/c	0,65	0,65	0,45	0,65	0,45
Ions chlorure	immersion/séchage	gâchage *	gâchage *	gâchage *	gâchage *

(* = 5% de NaCl en poids par rapport au poids de ciment)



Figure IV-4 : Déchloration de mortiers armés en fonction de la durée du traitement (les couleurs jaune, rouge, vert, magenta et bleu correspondent respectivement à 0 (témoin), 2, 4, 6 et 8 semaines). [Rapport DRAST, 2005].

IV.1.1.1 Efficacité du traitement de déchloration en fonction de la durée du traitement

Les résultats des teneurs en ions chlorure (totaux et libres) en fonction de la durée de traitement électrochimique de déchloration sont illustrées sur la Figure IV-5 pour le béton chloruré par immersion/séchage (GJ) et sur la Figure IV-6 pour les bétons chlorurés au gâchage (GM, GN, GO et GP).

Les résultats montrent que plus la durée du traitement est longue et plus les ions chlorure présents au niveau de l'armature (-a) sont extraits. Néanmoins, il faut noter que pour certaines formulations, la teneur en ions chlorure libres après huit semaines de traitement n'est pas forcément inférieure au seuil critique de 0,4% d'ions chlorure en poids par rapport au ciment.

Concernant les ions chlorure se trouvant dans l'enrobage intermédiaire (-b) ou au niveau du parement (-c), il est utile de remarquer que le gain d'extraction est réalisé au démarrage de la déchloration. Ceci pourrait s'expliquer par le sens de la migration des ions chlorure depuis l'armature vers l'extérieur (pour être piégés dans l'électrolyte) qui conduit à une accumulation.

Les résultats montrent également que pour les bétons formulés avec le ciment aux laitiers, l'extraction des ions chlorure conduit à une accumulation des ions dans l'enrobage intermédiaire.

Ces résultats sur des bétons chlorurés au gâchage sont à rapprocher de ceux obtenus par Orellan [17, 18, 22] et Fajardo [19, 21] respectivement sur des bétons chlorurés par diffusion dans une solution saline et des éprouvettes cylindriques chlorurées lors de cycles d'immersion/séchage dans une solution "d'eau de mer".

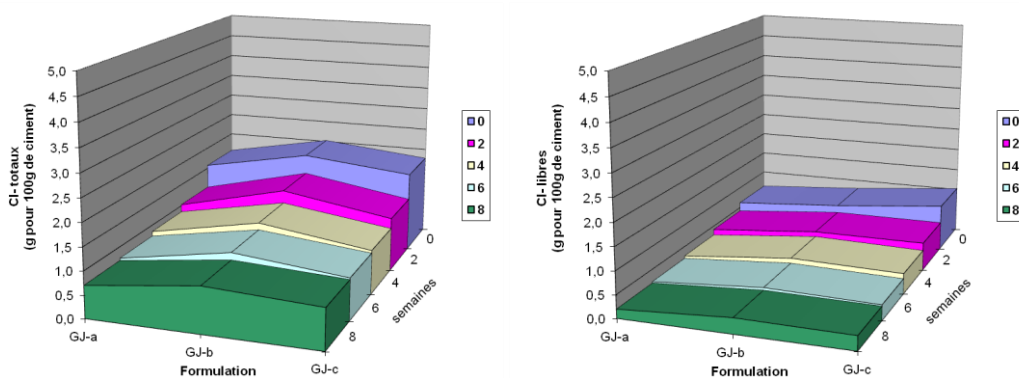


Figure IV-5 : Teneurs en ions chlorure totaux (à gauche) et libre (à droite) en fonction de la durée de la déchloration en semaines pour le béton chloruré par immersion/séchage GJ. (-a : 2-3 cm soit au niveau de l'acier ; -b : 1-2 cm zone intermédiaire ; -c : 0-1 cm soit le parement) [étude DRAST, 2005, non publié].

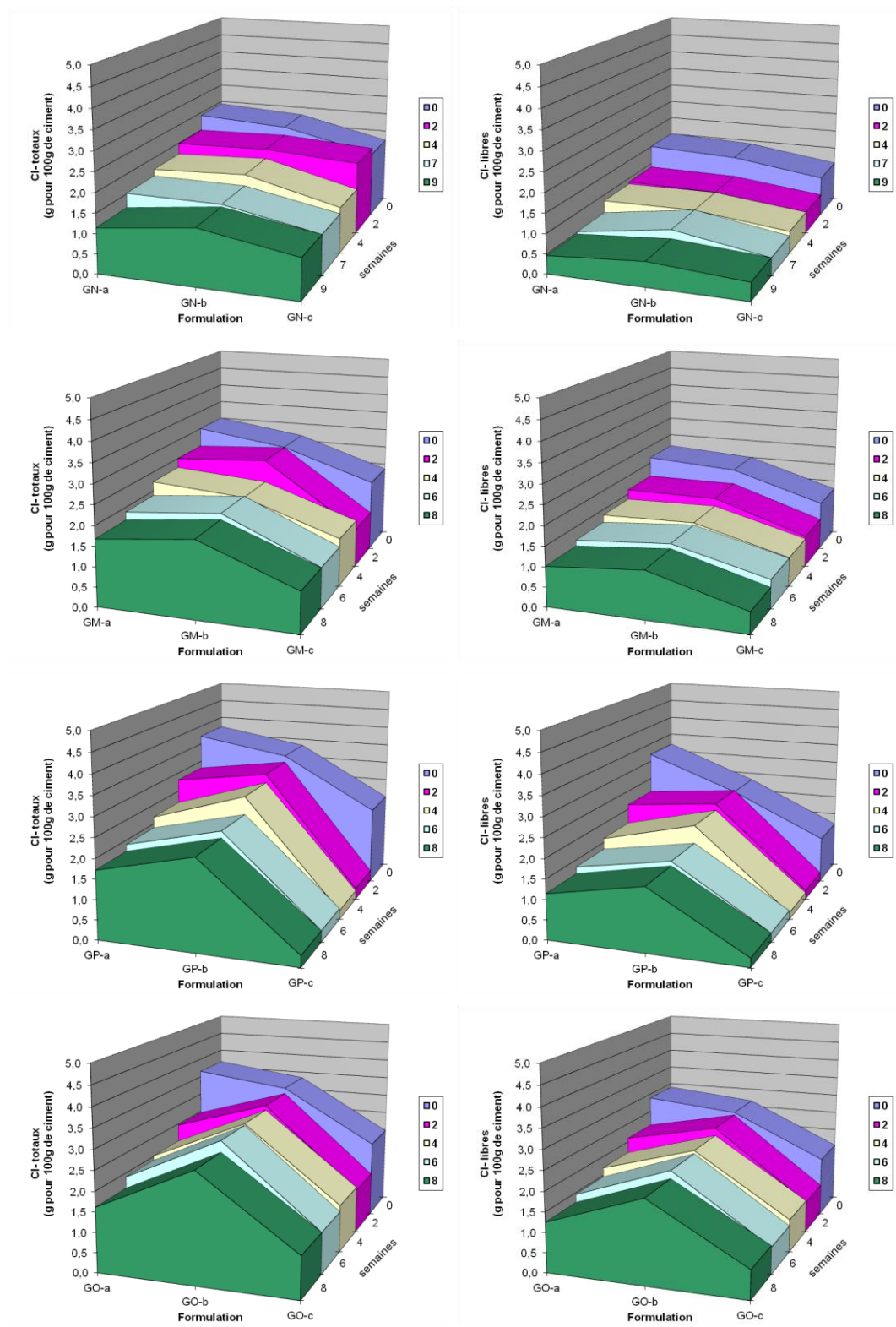


Figure IV-6 : Teneurs en ions chlorure totaux (à gauche) et libre (à droite) en fonction de la durée de la déchloration en semaines pour les bétons chlorurés au gâchage, GN, GM, GP et GO. (-a : 2-3 cm soit au niveau de l'acier ; -b : 1-2 cm zone intermédiaire ; -c : 0-1 cm soit le parement) [étude DRAST, 2005, non publié].

IV.1.1.2 Efficacité du traitement de déchloration en fonction de la formulation

L'efficacité du traitement de déchloration dépend du rapport eau/ciment du béton : plus celui-ci est élevé (porosité accrue), plus le pourcentage d'extraction en ions chlorure est important (Tableau IV-2).

Tableau IV-2 : Efficacité d'extraction des ions chlorure (%) après 8 semaines de traitement [Rapport DRAST, 2005].

Profondeur d'enrobage	GJ	GN	GM	GP	GO
	CEM I, e/c=0,65	CEM I, e/c=0,65	CEM I, e/c=0,45	CEM III/B, e/c=0,65	CEM III/B, e/c=0,45
-a [2-3cm] acier	69	70	53	64	57
-b [1-2cm] intermédiaire	57	55	39	31	21
-c [0-1cm] parement	70	57	58	81	53

En comparant des éprouvettes de même rapport eau/ciment, l'efficacité de l'extraction des ions chlorure au niveau de l'armature (Figure IV-7) est légèrement plus grande lorsque le béton est à base de ciment Portland (CEM I) (éprouvettes GN) plutôt que de ciment aux laitiers (CEM III/B) (éprouvettes GP). Au niveau du parement il se produit une accumulation d'ions chlorure lorsque le ciment utilisé est le CEM III/B.

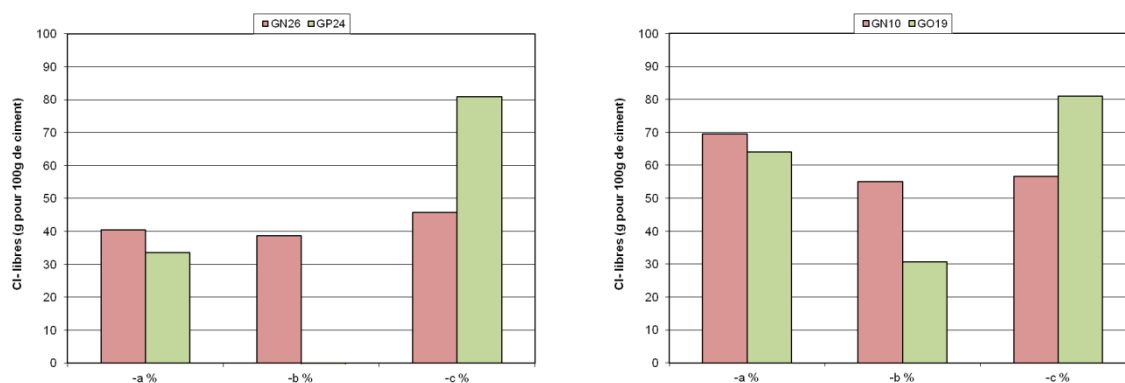


Figure IV-7 : Efficacité d'extraction des ions chlorure selon le ciment utilisé en fonction de la durée du traitement ; à gauche 2 semaines et à droite 8 semaines ; (-a : 2-3 cm soit au niveau de l'acier ; -b : 1-2 cm zone intermédiaire ; -c : 0-1 cm soit le parement) [étude DRAST, 2005, non publié].

IV.1.1.3 Efficacité du traitement de déchloration en fonction du mode de pollution

Pour des formulations à base de ciment CEM I Portland (Figure IV-8) et pour des durées de déchloration de 2 semaines, les ions chlorure extraits sont plus importants lorsque le mode de pollution est le gâchage (efficacité 40-45% pour les éprouvettes GN) comparativement à celui de l'immersion/séchage (30 ; 20 et 40% pour les éprouvettes GJ).

En augmentant la durée du traitement jusqu'à huit semaines, l'efficacité du traitement de déchloration augmente et ne dépend plus de manière sensible du mode de pollution en ions chlorure.

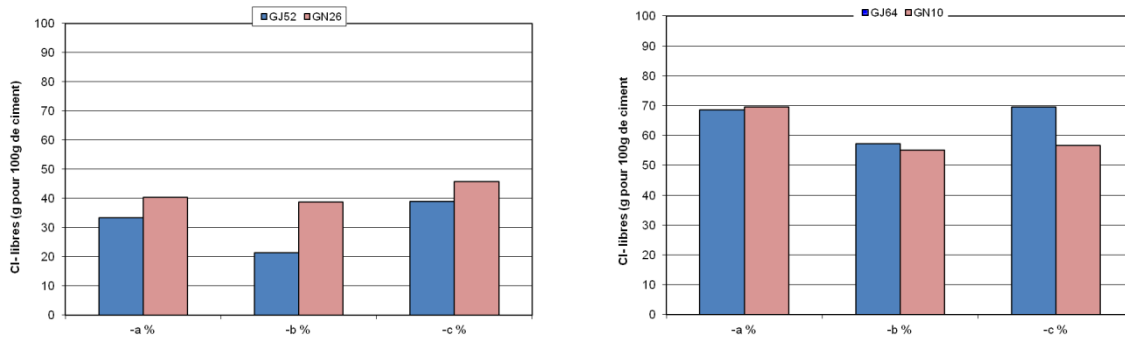


Figure IV-8 : Efficacité d'extraction des ions chlorure selon le mode de pollution des bétons en ions chlorure (introduits au gâchage GN ou lors de cycles d'immersion/séchage GJ) en fonction de la durée du traitement ; à gauche 2 semaines et à droite 8 semaines ; (-a : 2-3 cm soit au niveau de l'acier ; -b : 1-2 cm zone intermédiaire ; -c : 0-1 cm soit le parement) [étude DRAST, 2005, non publié].

IV.1.2 Déchloruration d'un élément structurel en béton armé vieilli naturellement en zone de marnage

Dans la deuxième phase du contrat DRAST, le traitement électrochimique de déchloruration é été appliqué sur une poutrelle de la Rance (Figure IV-9)⁶⁾ qui est un élément structurel en béton armé vieilli naturellement depuis 40 ans en zone de marnage. Dans cette étude, il s'agissait de répondre à trois objectifs. Le premier objectif était de valider qu'un traitement électrochimique de déchloruration appliqué avec un courant de 1A/m² d'acier et une durée de 8 semaines permettait de réduire la quantité des ions chlorure présents au niveau de l'armature, sous le seuil des 0,4% en ions chlorure libres par rapport au poids de ciment. Le second objectif visait à démontrer que la corrosion des armatures était stoppée. Le troisième objectif était de vérifier qu'il n'y aurait pas de re-distribution des ions chlorure vers l'armature une fois le traitement terminé et donc de vérifier la pérennité du traitement.



Figure IV-9 : Poutrelle de la Rance 012 (vue générale à gauche et schéma en coupe à droite) [20].

La poutrelle de la Rance 012 (Figure IV-9) a une section carrée de 0,20 m x 0,20 m, et une longueur de 2,50 m. Les armatures sont constituées par des fils Φ 6 mm et des cadres de Φ 6 mm disposés tous les 0,15 m. Les faces A et C comptent 5 aciers chacune et un enrobage de 1,5 cm environ. Les faces B et D comptent 4 aciers chacune avec un enrobage voisin de 4 cm. Le béton de la poutrelle a été réalisé avec un dosage en ciment de 400 kg/m³ (CPAL 210/325), des granulats de Seine et un rapport eau/ciment de 0,53.

⁶⁾ Ifremer Brest a généreusement fourni la poutrelle 012.

Le traitement électrochimique de déchloration a été appliqué sur la moitié de la face B de la poutre 012 qui était la plus corrodée (Figure IV-10) avec une intensité de courant imposé égale à 1 A/m² d'acier et pendant une durée de 8 semaines. L'électrolyte borate utilisé a permis de piéger correctement les ions chlorure extraits (pas d'odeur de chlore).

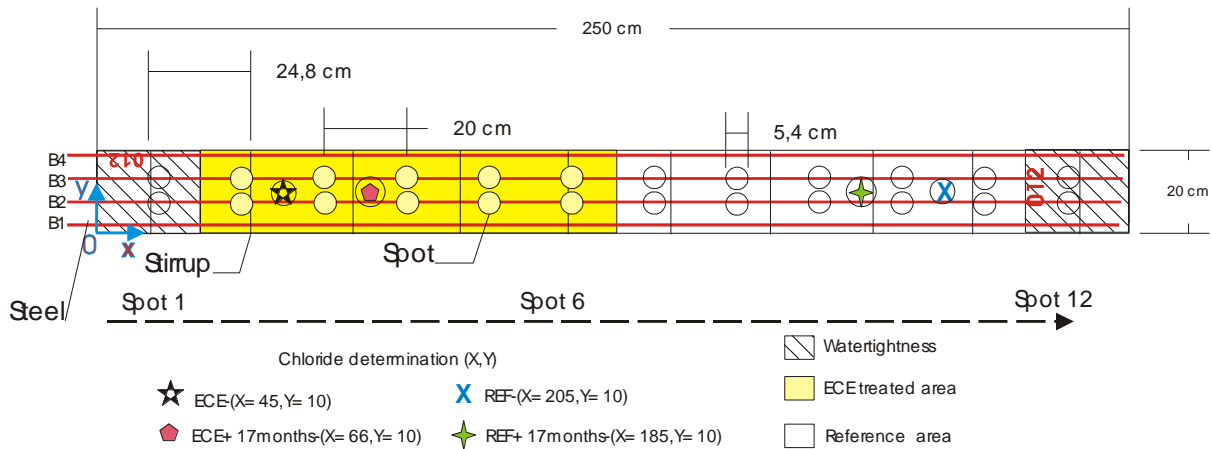


Figure IV-10 : Plan des zones traitées et non traitées et de la localisation des prélèvements pour la détermination des profils en ions chlorure. – face B de la poutre de la Rance n°012 [20].

IV.1.2.1 Efficacité du traitement électrochimique de déchloration

Les résultats (Figure IV-11) ont montré que le traitement électrochimique de déchloration permet de diminuer significativement la teneur en ions chlorure libres : 42% d'extraction en moyenne sur l'ensemble du béton d'enrobage et 71% d'extraction au niveau des armatures. Après traitement, les armatures se retrouvent dans un béton dont la teneur en ions chlorure libre est inférieure au seuil critique d'initiation de la corrosion. Pour les ions chlorure totaux, cette efficacité varie entre 10 et 54 %.

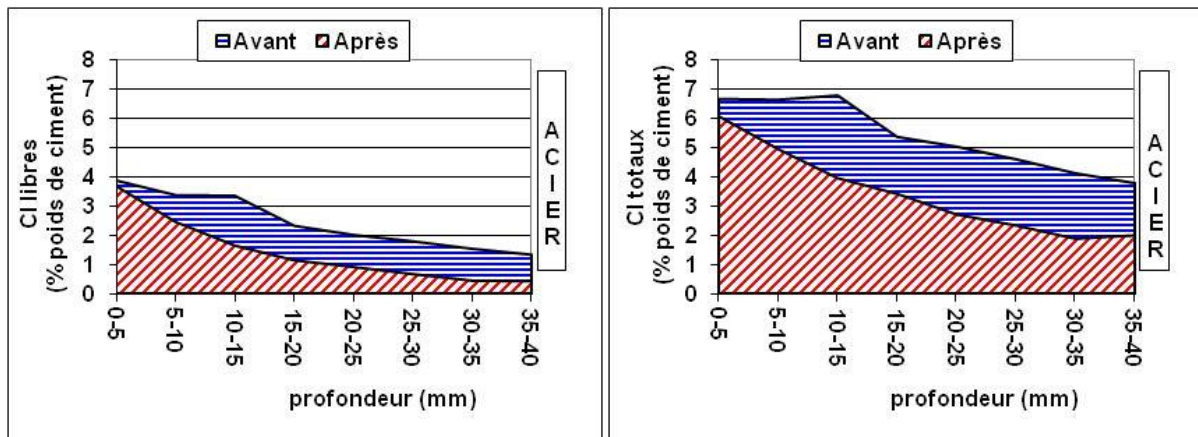


Figure IV-11 : Profils en ions chlorure totaux et libres avant et après 8 semaines de déchloration (les armatures sont à une profondeur de 4 cm) [20].

IV.1.2.2 Retour à la passivation des armatures

Le contrôle non destructif de suivi de la corrosion des armatures avant, juste après la fin du traitement et deux mois après le traitement ont indiqué des éléments de suivi de chantier importants :

- La polarisation mesurée juste après la fin du traitement permet de justifier que le traitement a été réalisé,
- La durée de dépolarisation des armatures est supérieure à 2 mois.

En revanche, les résultats de diagnostic électrochimique n'ont pas permis de démontrer la re-passivation des armatures dans un enrobage béton dont la teneur en ions chlorure est inférieure au seuil critique.

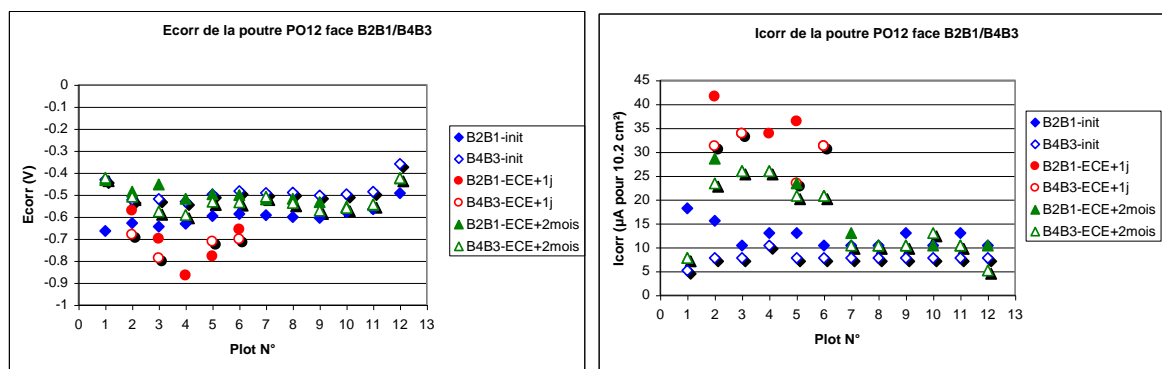


Figure IV-12 : Potentiels libres et courants de corrosion avant ECE, après ECE et 2 mois après ECE (B2B1 et B3B4 constituent un ensemble de deux aciers) [20].

IV.1.2.3 Pérennité du traitement de déchloration

Pour évaluer la pérennité du traitement de déchloration, la poutre 012 a été immergée dans de l'eau salée pendant 17 mois. Les résultats (Figure IV-13) montrent qu'un très léger enrichissement en ions chlorure s'est produit pour des profondeurs de 15 à 40 mm dans les deux zones (non traitée et traitée). La différence se situe sur le comportement des 10 premiers mm de peau du béton sur lesquels une diminution significative est constatée sur la zone traitée (comme si la déchloration se poursuivait ou alors limitait la pénétration des ions chlorure) alors que sur la zone non traitée une augmentation est observée. Ces différents résultats tendent à montrer que le traitement de déchloration reste efficace après 17 mois en eau salée. C'est une information importante car peu de résultats sont reportés dans la littérature sur l'efficacité des traitements électrochimiques sur le moyen voire long terme.

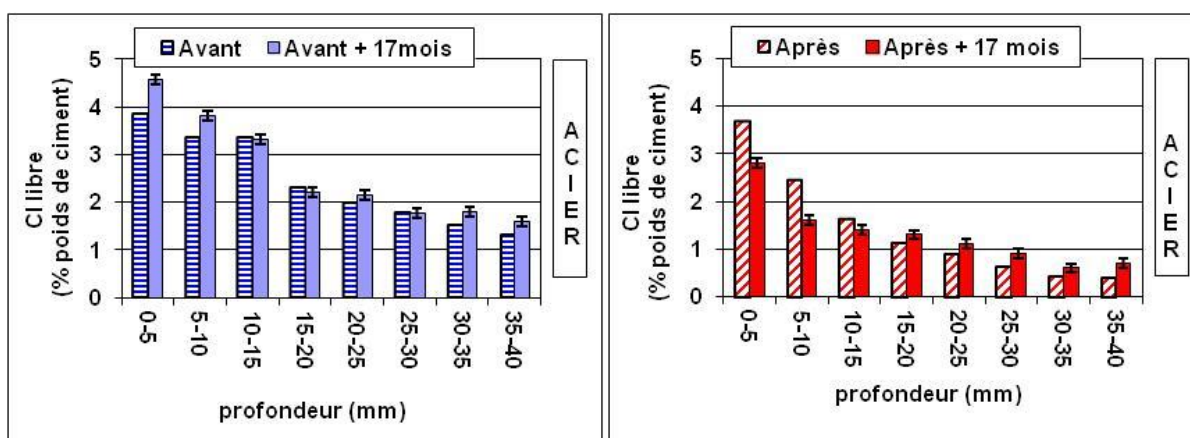


Figure IV-13 : Profils en ions chlorure libre dans la zone non traitée (en bleu) et dans la zone traitée (en rouge) après 17 mois en eau salée [20].

IV.1.3 Conclusions sur la déchloration

Les recherches que j'ai effectuées sur le traitement électrochimique de déchloration permettent de montrer que :

- La teneur en ions chlorure extraits augmente avec la durée du traitement (ici la durée maximale a été choisie égale à 2 mois comme mentionné dans la spécification technique),
- La teneur en ions chlorure extraits augmente avec le rapport e/c ,
- L'extraction des ions chlorure ne semble pas dépendre de la manière dont les ions chlorure ont été introduits (gâchage ou immersion/séchage),
- Les caractérisations électrochimiques non destructives n'ont pas permis de vérifier le retour à la passivation des armatures après déchloration,
- Les teneurs en ion chlorure n'évoluent pas de manière significative lorsque le traitement est arrêté et que la poutre est remise en eau salée pendant 17 mois. Ceci démontre l'efficacité du traitement sur le moyen terme.

Les résultats de ces recherches m'ont également permis de travailler à la transformation de la spécification technique sur la déchloration (CEN TS 14038 Partie 2) en norme via le groupe miroir du CEFRAFOR (qui intervient auprès de l'AFNOR). De plus, le Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures (STRRES) m'a demandé de rédiger un article pour leur revue technico-professionnelle [6].

Dans le cadre de la déchloration d'un ouvrage en béton armé, l'optimisation de l'extraction des ions chlorure est une finalité importante mais qu'il convient de mettre en regard du coût du traitement.

IV.2 Traitement électrochimique de réalcalinisation

Le traitement électrochimique de réalcalinisation a été proposé aux Etats-Unis en 1976 [40] et a été utilisé en Europe en Norvège à partir de 1987 [41].

Les objectifs du traitement de réalcalinisation sont d'une part d'augmenter l'alcalinité du béton autour des armatures et d'autre part de faire pénétrer des ions alcalins (qui sont introduits dans l'électrolyte) dans l'enrobage béton. Il existe une spécification technique sur ce traitement [4] qui est en cours de normalisation.

En 2005, j'ai entrepris des recherches sur le traitement électrochimique de réalcalinisation afin de réparer des structures en béton armé dégradées par carbonatation car s'il existe plusieurs publications mettant en évidence que le pH du béton autour des armatures augmente, peu démontrent que le processus de corrosion est ralenti ou stoppé et aucune n'a traité de la pérennité du traitement. La carbonatation qui affecte les structures du génie civil tels que les ponts est également la pathologie principale pour les monuments historiques. Cette recherche est donc le fruit d'une collaboration avec le Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques (LRMH) du Ministère de la Culture et le Laboratoire des Interfaces et Systèmes Electrochimiques (LISE) de l'Université Paris 6. Les partenaires industriels étaient la société RENOFORS pour le procédé par courant imposé et la société FREYSSINET pour le procédé par courant galvanique.

Ces travaux ont notamment fait l'objet d'une thèse intitulée "Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation" soutenue par Melle YunYun Tong en 2009 [42], d'un livre dans la collection Etude et Recherches du Laboratoire des Ponts et Chaussées [43] et de plusieurs publications dans des congrès [44-50] ou dans des journaux scientifiques [51]. Ces travaux ont ensuite été poursuivis dans un travail post-doctoral réalisé par M. Mohamed Sahal et les résultats ont donné lieu à une communication à un congrès [52].

Le traitement de réalcalinisation a été étudié selon les deux processus, courant imposé et courant galvanique. Au laboratoire le traitement de réalcalinisation a été appliqué sur des dalles en béton armé carbonatées artificiellement et étudié sur une période de 30 mois. Deux cas ont été considérés ; un traitement dit de "maintenance" appliqué sur les dalles en béton armé juste après carbonatation artificielle (armatures faiblement corrodées) et un traitement dit de "réhabilitation" appliqué sur des

dallettes en béton armé ayant subi une corrosion intentiostatique supplémentaire à l'issue de laquelle les armatures étaient recouvertes d'une couche de corrosion plus épaisse et plus homogène (Figure IV-14). L'efficacité et la durabilité des traitements ont été évaluées par un suivi de pH (par indicateurs colorés et mesures de pH développées pendant la thèse), par des dosages d'alcalins et par des mesures électrochimiques (potentiel, résistance de polarisation, impédance) à différentes échéances (avant traitement, 15 jours, 2 mois, 6 mois, 12 mois et 30 mois après traitement). L'impact sur la matrice cimentaire a été étudié par des observations en microscopie électronique à balayage. La nature des oxydes a été déterminée par micro spectroscopie raman.

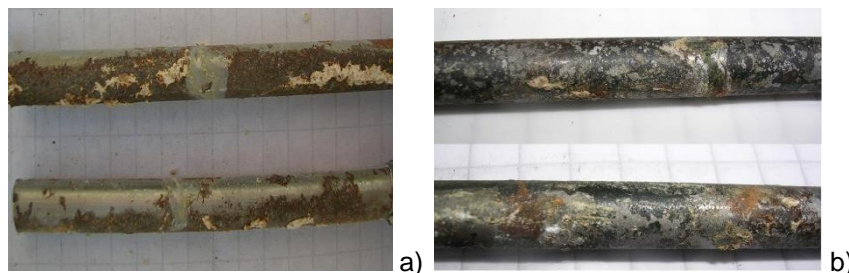


Figure IV-14 : Etat de corrosion des armatures avant le traitement de maintenance (a) et avant le traitement de réhabilitation (b) [43].

En parallèle, une étude de suivi de diagnostic et d'efficacité sur le traitement de réalcalinisation par courant imposé appliqué sur le pont Camille de Hogues à Chatellerault a été réalisée [50].

IV.2.1 Traitement de réalcalinisation de dalles en béton armé carbonaté

Les objectifs de l'étude du traitement de réalcalinisation de dalles en béton armé carbonaté étaient multiples :

- 1) Proposer des outils analytiques et électrochimiques afin de suivre l'évolution du traitement de manière quantitative et proposer un protocole pour les essais sur site,
- 2) Améliorer les connaissances scientifiques de la réalcalinisation en prenant en compte les deux procédés à savoir le courant imposé (I) et le courant galvanique ou anode sacrificielle (A),
- 3) Utiliser le traitement de réalcalinisation à des fins de maintenance ou de réhabilitation, en fonction de l'état initial de corrosion des armatures,
- 4) Etudier les éventuels effets secondaires du traitement sur la matrice cimentaire,
- 5) Vérifier si les armatures se re-passivent lorsque la réalcalinisation ($\text{pH} > 11$) est obtenue,
- 6) Donner des éléments d'information quant à la pérennité de la réparation sur le long terme (5 ans)

IV.2.1.1 Développement d'outils analytiques pour évaluer la réalcalinisation

Dans la spécification technique correspondant au traitement de réalcalinisation [4], la performance en pH est évaluée uniquement de manière qualitative en utilisant un indicateur coloré, la phénolphthaléine et il était donc pertinent de chercher une méthode d'analyse quantitative. D'autre part, il est apparu très important, afin de caractériser les produits de corrosion (oxydés et réduits), de développer un essai in-situ pour la spectroscopie micro-Raman.

IV.2.1.1.1 Caractérisations analytiques qualitatives et quantitatives de l'évolution du pH

Sur la base de l'article de Rasanen [53], les déterminations de pH quantitatives sur des suspensions de poudre de bétons sains, carbonatés et réalcalinisés ont été réalisées [42] avec une bonne répétabilité sur une formulation de béton à base de CEM I.

Après le traitement de réalcalinisation, les résultats quantitatifs obtenus à l'aide d'indicateurs colorés (Figure IV-15) permettent de juger de la remontée de pH au niveau des armatures (de 9 à 11 environ). Le gain de pH est plus grand (d'environ une unité de pH) pour le procédé par courant galvanique (dont la durée était de 2 mois) que pour le procédé par courant imposé (dont la durée était de 15 jours). Après

une période de 12 mois, les résultats obtenus (sur les mêmes dalles) indiquent une légère diminution du pH (0,5 environ) par rapport à la valeur obtenue tout de suite après traitement. Après une période de 30 mois, les résultats bien que non comparables directement aux précédents (les prélèvements ont été réalisés sur des dalles entreposées en extérieur (Ile de France)) indiquent pour les deux procédés, une valeur de pH supérieure à 11

Ces résultats quantitatifs sont concordants avec les résultats qualitatifs illustrés sur la Figure IV-16. La zone colorée rose après le traitement est plus importante lorsque le procédé est réalisé par anode galvanique que par courant imposé. De plus, après une période de 6 mois et de 12 mois, les zones roses sont moins étendues et la coloration s'estompe.

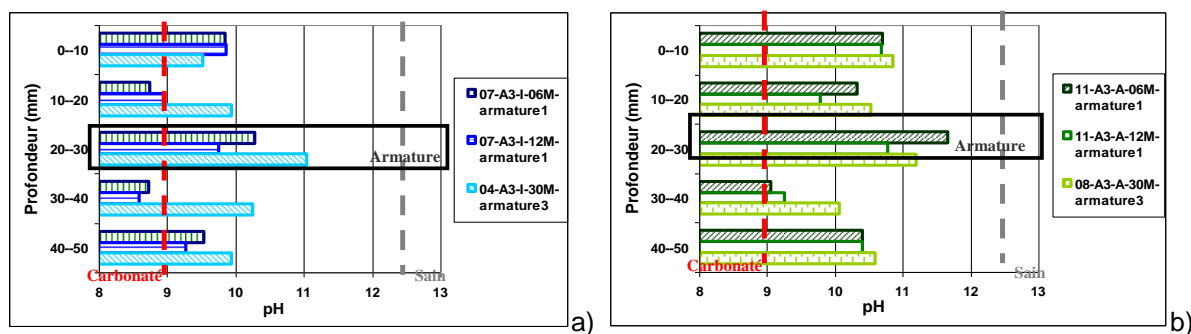


Figure IV-15 : Profils de pH après réalcalinisation par courant imposé (I, fig. de gauche) et par courant galvanique (A, fig. de droite) [42].

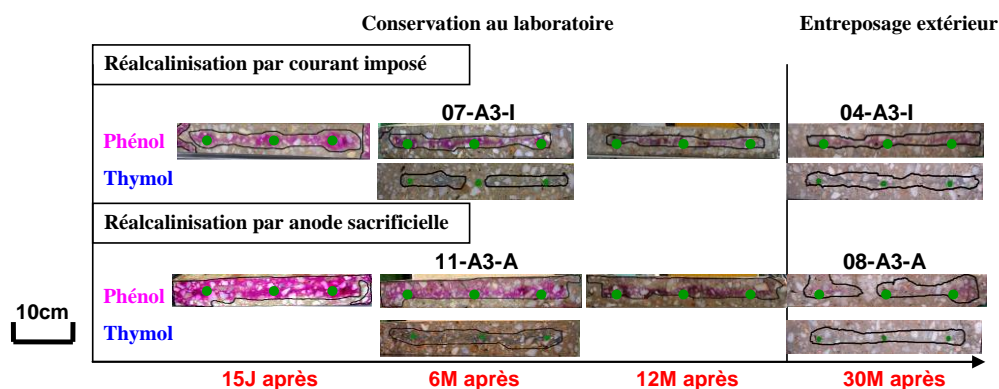


Figure IV-16 : Suivi de pH à l'aide d'indicateurs colorés, après réalcalinisation par courant imposé (I) et par anode sacrificielle (A) en fonction du temps (les armatures 1, 2 et 3 sont représentées de gauche à droite) et des conditions d'entreposage (extérieur = Ile de France) [42]

IV.2.1.1.2 Caractérisations in-situ des produits de corrosion par spectro-micro Raman

Les caractérisations électrochimiques des armatures des dalles ayant conduit à des résultats parfois difficiles à interpréter, de nouvelles éprouvettes en mortier armé appelées "mini-éprouvettes" ont été confectionnées, carbonatées et traitées par réalcalinisation avec un suivi "in-situ" sous le micro-spectro-raman. La nouvelle cellule ainsi développée est illustrée sur la Figure IV-17. Quelques spectres Raman obtenus pendant la réalcalinisation sont présentés sur la Figure IV-18.

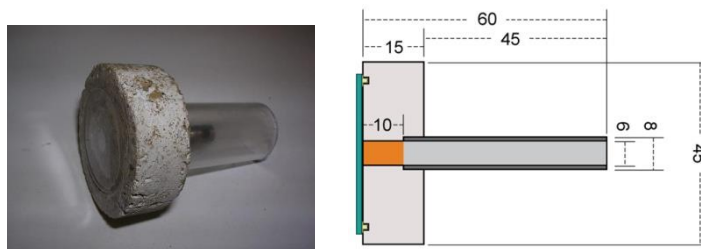


Figure IV-17 : Cellule électrochimique en mortier armé spécialement conçue pour les observations in-situ en microspectroscopie raman [42] ; la cellule électrochimique est reliée à un potentiostat.

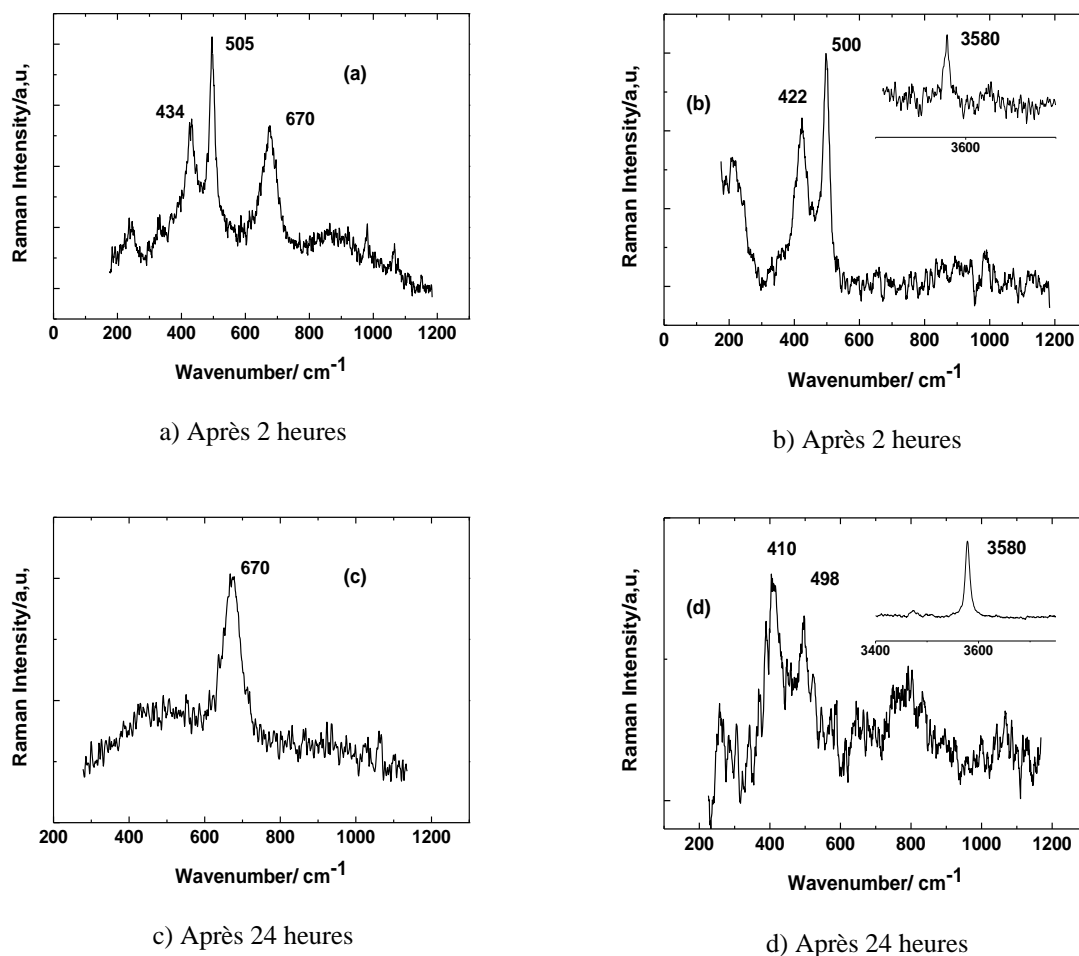


Figure IV-18 : Spectres Raman pendant le traitement de réalkalinisation (réduction galvanique à $-100 \mu A/cm^2$) [Thèse YY Tong, 2009]

Les spectres Raman collectés pendant le traitement cathodique par courant imposé (réalisé à l'aide d'un potentiostat) 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 IV-18). Après 2 heures de réduction, la bande de la magnétite à 670 cm^{-1} (Figure IV-18a) est détectée et les bandes caractéristiques de la structure brucite [54] apparaissent avec les deux bandes de la Rouille Verte (Figure IV-18b). Vingt-quatre heures après, il ne reste que de la magnétite pure (Figure IV-18c) et de l'hydroxyde ferreux presque pur (Figure IV-18d). La présence d'une bande faible à 498 cm^{-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.

IV.2.1.2 Repassivation des armatures

Les études réalisées en traitement de maintenance ou de réhabilitation, que ce soit par courant imposé ou par courant galvanique, n'ont pas permis de démontrer une re-passivation des armatures après traitement quand bien même le pH du béton était devenu supérieur à 10-11 [42].

IV.2.1.3 Pérennité du traitement

L'ensemble des essais a conduit à des résultats comparables pour les deux procédés par courant imposé ou par courant galvanique. Pour ce dernier la durée du traitement de réalcalinisation était plus longue et l'anode sacrificielle a dû être remplacée (consommation totale de la première anode). Ainsi, en terme d'efficacité, une augmentation du pH autour des armatures (vers des valeurs de l'ordre de 10-11) et une pénétration des alcalins jusqu'aux armatures, ont clairement été observées. Les mesures électrochimiques ont mis en évidence une augmentation des potentiels et une diminution de la vitesse de corrosion juste après traitement et jusque 12 mois après, plus notable d'ailleurs dans le cas du traitement de réhabilitation que dans celui du traitement de maintenance.

Par contre, après trente mois, des résultats contradictoires ont été obtenus, les tests aux indicateurs colorés mettant en évidence une diminution du pH alors que les mesures de pH sur suspension de béton broyé indiquaient une stabilité. Les vitesses de corrosion quant à elles étaient devenues très voisines de celles déterminées avant traitement. Ainsi, le traitement de réalcalinisation a bien permis de ralentir la corrosion pendant une durée de 1 an, mais pas de la stopper (Figure IV-19).

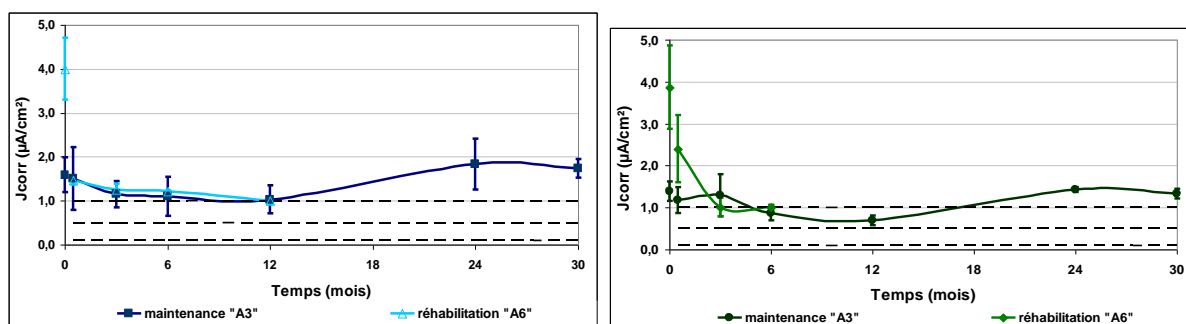


Figure IV-19 : Evolution de la densité de courant de corrosion en fonction du temps selon le procédé par courant imposé (à g) et par courant galvanique (à d). [Thèse YY Tong, 2009].

Dans le cadre d'un travail post-doctoral, l'efficacité du traitement de réalcalinisation a été étudiée sur une durée de 5 ans [52]. Les résultats de pH obtenus par mesure sur suspension de béton broyé (Figure IV-20) ou bien à l'aide d'indicateurs colorés (Figure IV-21) sont contrastés (comme à 30 mois).

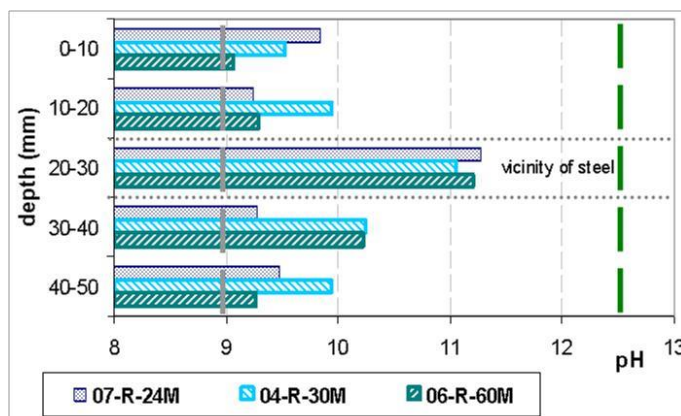


Figure IV-20 : Profils de pH après le traitement de réalcalinisation en fonction du temps (2ans, 2,5 ans et 5 ans).

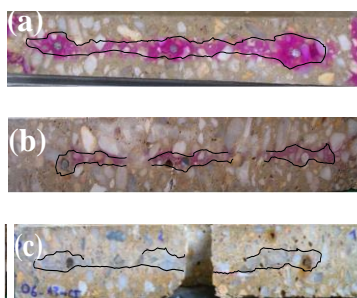


Figure IV-21 : Test à la phénolphthaléine après le traitement de réalcalinisation par courant imposé réalisé respectivement (a) 15 jours après, (b) 2,5 ans après et (c) 5 ans après.

Les mesures électrochimiques obtenues à 60 mois sont sensiblement les mêmes que celles observées après 30 mois.

Les observations au microscope électronique à balayage réalisées sur des coupes perpendiculaires aux armatures (Figure IV-22) ont montré une reprise de la corrosion mais de manière non généralisée sur le pourtour de l'armature.

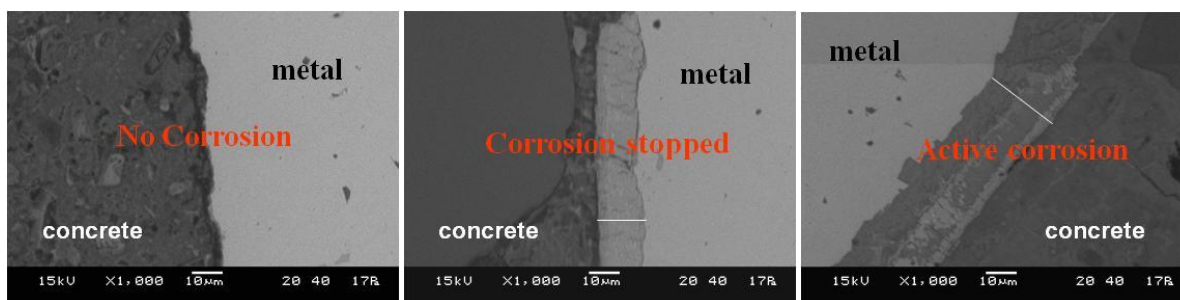


Figure IV-22 : Corrosion non uniforme autour de l'armature (5 ans après le traitement de réalcalinisation).

IV.2.2 Traitement de réalcalinisation par courant imposé du pont Camille de Hogues

En parallèle au travail de thèse en laboratoire, un travail sur le terrain a été mené [43, 50]. Il s'agissait de réaliser un diagnostic de corrosion sur ouvrage avant traitement et de suivre la mise en place et l'efficacité du traitement de réalcalinisation dans des conditions de chantier, en utilisant des outils de terrain.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'architecte F. Jeanneau en charge de la restauration, la société Renofors pour la mise en œuvre du traitement de réalcalinisation par courant imposé, le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques et le Laboratoire d'Angers du Réseau Scientifique et Technique du Ministère. Les quatre interventions sur le Pont Camille de Hogues à Châtelleraut ont été réalisées en août 2007 (diagnostic de corrosion avant traitement), en novembre 2007, janvier 2008 et novembre 2008, soit respectivement, juste après le traitement de réalcalinisation, deux mois après et un an après.

Le "pont de la manufacture", re-baptisé "Pont Camille de Hogues" en mémoire du maire qui a décidé de sa construction, est l'un des premiers ponts en béton armé en France. Il a été construit dans les années 1900, 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 dans le béton. L'ouvrage, large de 8 mètres, long de 150 mètres comporte 3 arches (Figure IV-23). 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", présente de multiples dégradations (Figure IV-24) nécessitant de nouveaux travaux de restauration.



Figure IV-23 : Pont Camille de Hogues à Chatellerault (avec sens du courant de la Vienne).



Les trottoirs sur l'ouvrage sont fissurés



Epaufrures au niveau des poutres sur plusieurs mètres de long



Traces importantes d'infiltration en sous-face du tablier



Stalactites blanches ou ocre



Etriers plats et armatures



Localement la corrosion est tellement sévère que les aciers ont disparu

Figure IV-24 : Exemples de dégradations observées en 2007.

Afin de suivre l'évolution du pH du béton et de la corrosion des armatures, un protocole d'essais en 6 étapes a été adopté⁷⁾ :

- 1) détection des armatures,
- 2) mesures de potentiel (réalisation de cartographies avec le CANIN),
- 3) mesures de résistivité (réalisation de cartographies avec le Gecor06[®]),
- 4) mesures de vitesse de corrosion avec le Gecor06[®],
- 5) suivi du pH par des tests avec indicateurs colorés, et
- 6) prélèvement de carottes pour des observations au MEB au laboratoire.

Le travail préliminaire de localisation de zones carbonatées a été fastidieux. Sur une dizaine de zones étudiées seulement deux démontraient une carbonatation totale de l'enrobage jusqu'aux armatures. Ces deux zones de l'arche rive gauche ont été étudiées et les résultats étant similaires, seule la zone 10 est décrite dans ce document (Figure IV-26).

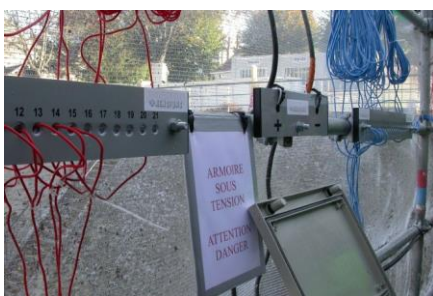
Les phases du traitement de réalcalinisation sont illustrées sur la Figure IV-25. Après une purge de l'enduit et du béton non adhérent, les connections entre armatures (= cathodes) ont été vérifiées, puis ces armatures ont été reliées à un générateur de courant électrique. Afin d'éviter tout court-circuit, 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. L'anode constituée d'un treillis en acier a été fixé temporairement à la surface du béton, relié au générateur de courant et enrobé d'une seconde couche de pulpe de papier. Le traitement de réalcalinisation par courant imposé (intensité de 1 A/m²) a été appliqué pendant une période de 15j. Du fait d'un vent permanent, la pulpe de papier a dû être ré-humidifiée très régulièrement afin d'assurer la continuité électrique entre l'anode et la cathode.



Les enduits et bétons non adhérents ont été purgés



Les connections entre armatures ont été vérifiées et en environ tous les 1m², les armatures ont été connectées à un générateur de courant électrique.



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



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

Figure IV-25 : Différentes étapes du traitement de réalcalinisation par courant imposé appliqué par Renofors.

⁷⁾ L'étape 1 n'a été réalisée que la première fois (une cartographie de ferrailage a été établie).

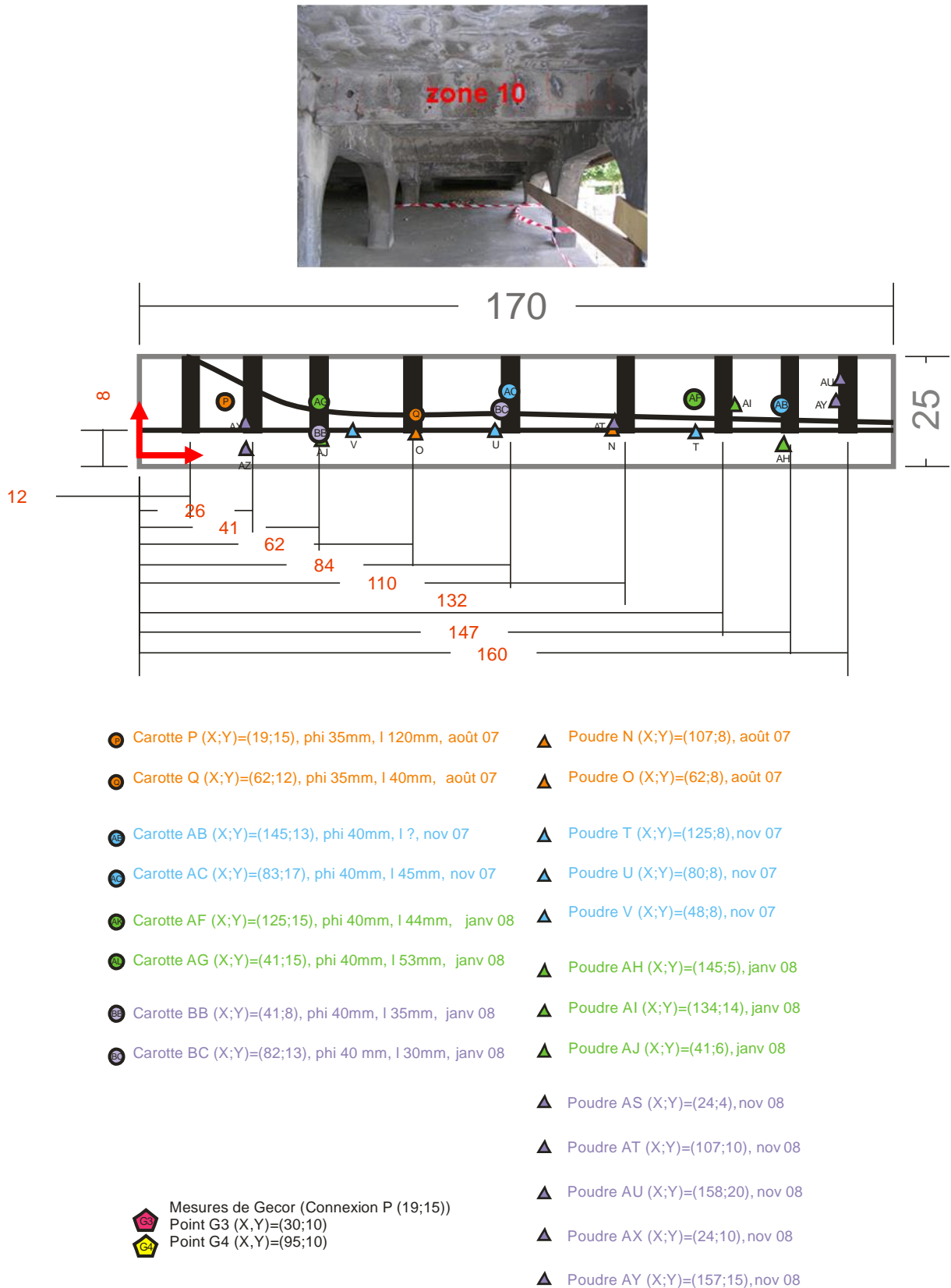


Figure IV-26 : Zone 10. Photo et plan de ferrailage avec la localisation des prélèvements et des points de mesures.

Les tests réalisés à la phénolphthaléine (Figure IV-27) et à la thymolphthaléine (non montrés ici), ont mis en évidence, à l'issue du traitement de réalkalinisation, une remontée du pH au voisinage des armatures avec des valeurs voisines de 10-11. Un an après traitement, le pH du béton se maintenait à des valeurs supérieures à 10.

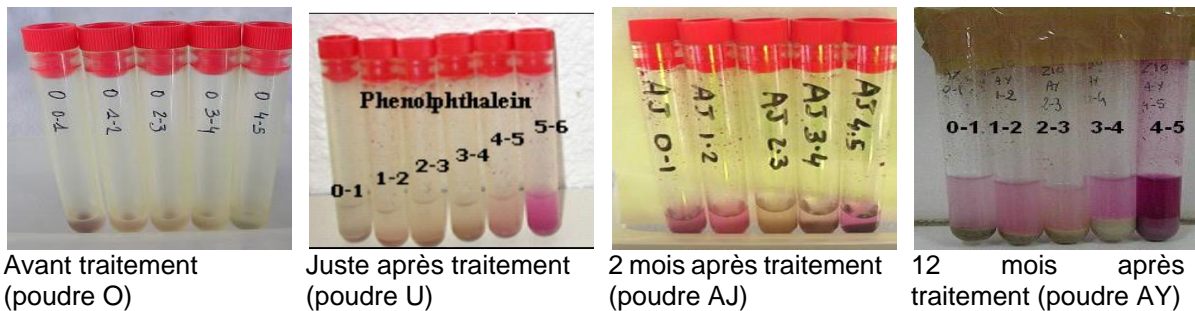


Figure IV-27 : Evolution du pH (test phénolphthaléine) de la zone 10 (l'armature est à 5 cm) en fonction du temps.

Les cartographies de potentiel avec le temps (Figure IV-28) ont permis de mettre en évidence plusieurs points utiles lors du suivi d'un traitement sur ouvrage :

- la forte polarisation des armatures (-1000 mV, Cu/CuSO₄) juste après traitement indique que ce dernier a bien été appliqué,
- la dépolarisation des armatures a nécessité plus de deux mois, soit un délai plus long qu'attendu, et
- les potentiels 12 mois après le traitement sont moins négatifs que ceux relevés avant traitement, ce qui tendrait à démontrer une moindre corrosion.

Les résultats de cartographie de potentiel plutôt positifs n'ont toutefois pas été confirmés par des vitesses de corrosion. En effet, ces dernières ont été très difficiles voire impossible à mesurer sur l'ouvrage carbonaté avec le Gecor06®. Il est important de préciser ici que la géométrie inhabituelle des armatures a rendu ces mesures déjà complexes, car sur béton carbonaté, encore plus difficiles à réaliser et à interpréter.

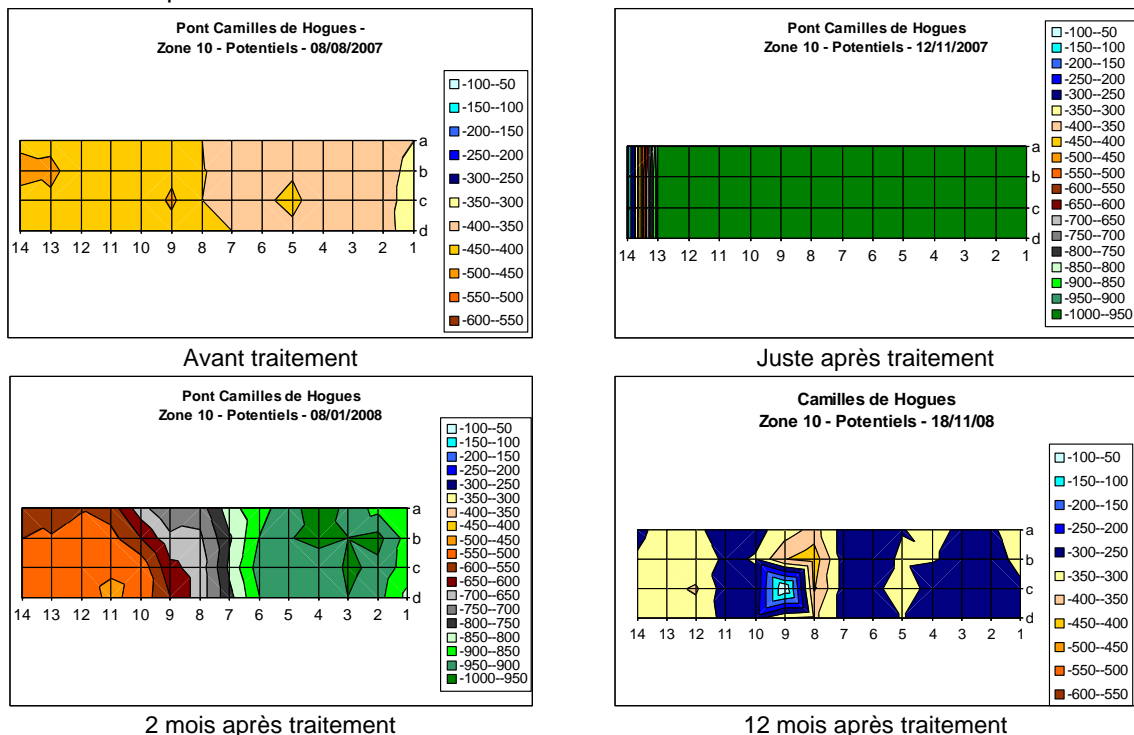


Figure IV-28 : Evolution des cartographies de potentiel de la zone 10 en fonction du temps.

IV.2.3 Conclusions sur la réalcalinisation

Le traitement de réalcalinisation a effectivement permis de remonter le pH du béton autour des armatures quel que soit le procédé (courant imposé et courant galvanique) au laboratoire et sur ouvrage. Les résultats qualitatifs obtenus à l'aide d'indicateurs colorés ont été complétés par une mesure quantitative sur suspension de poudre de béton broyée. Les alcalins présents dans l'électrolyte ont pénétré jusqu'à l'armature sans toutefois apporter une augmentation de pH complémentaire ou plus pérenne.

Les caractérisations électrochimiques de l'état de corrosion des armatures se sont révélées difficiles à mesurer et à interpréter pour le béton carbonaté (structure peu poreuse et par conséquent plutôt sèche (sur ouvrage)). La question notamment sur la composition de l'interface acier/béton avec la formation d'oxydes de fer plus ou moins isolants reste posée.

Les analyses par micro spectroscopie raman ont démontré que 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. La vitesse de corrosion peut donc être ralentie par l'augmentation de pH du béton.

Les observations au microscope électronique à balayage n'ont pas révélé d'évolution délétère (telle que le gonflement par exemple) de la matrice cimentaire.

Enfin, la pérennité du traitement de réalcalinisation a été évaluée sur une durée de 5 ans dans l'étude sur dalles. Les résultats ont montré une diminution de la corrosion jusqu'à un an après le traitement mais ensuite la corrosion semble reprendre. Il en résulte que le gain de durabilité au regard du coût du traitement est insuffisant.

En plus de l'acquis scientifique, ces travaux m'ont également permis de travailler dans le groupe miroir du CEFRACOR pour la transformation de la spécification technique sur la réalcalinisation (CEN TS 14038 Partie 1) en norme. J'ai également été sollicitée par les collègues du Réseau Scientifique et Technique pour la présentation des résultats lors d'un "club ouvrage d'art".

IV.3 Protection Cathodique

La protection cathodique (PC) est un traitement de réparation électrochimique qui vise à mettre les armatures dans un domaine de non corrosion alors même que le béton d'enrobage est pollué (s'il reste adhérent, sinon il faut le remplacer). Cette réparation peut s'avérer particulièrement intéressante dans le cas d'ouvrages où les ions chlorure ont dépassé le premier lit d'armatures par exemple. Il s'agit d'un dispositif permanent pour l'ouvrage.

Lorsqu'une alimentation électrique génère et donc permet de contrôler le courant entre l'anode et la cathode (= armature), il s'agit de PC par courant imposé (PCCI). La norme NF EN 12696 indique les critères de performance auxquels doit répondre une PCCI.

Lorsque l'anode est directement reliée à la cathode (= armature), il s'agit de PC par courant galvanique (PCCG) ou sacrificiel. Ce procédé est encore mal connu, les retours d'expériences sont rares et bien que évoqué dans la norme NF EN 12696, aucun critère de performance n'est indiqué. Les courants en PCCG sont en général inférieurs à ceux de la PCCI.

IV.3.1 Protection cathodique par courant galvanique

Dans le domaine de PCCG, lors du congrès Eurocorr en 2009, j'ai présenté une keynote sur l'expérience française en matière d'utilisation de la protection cathodique en utilisant des anodes galvaniques [55]. De plus, j'ai participé à la rédaction du guide technique intitulé "Anodes galvaniques pour le traitement de la corrosion des armatures des constructions en béton", au sein de la commission Construction Bâtiment du Centre Français de la CORrosion (CEFRACOR), sous l'animation de M. Guy Taché [5]. J'ai présenté ce guide lors de la journée "Rencontre CEFRACOR n°14" en 2012 (127 participants).

IV.3.2 Protection cathodique par courant imposé

J'ai été sollicitée par la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement de Ile-de-France (DRIEA-IF) pour apporter mon expertise à la problématique de la réparation des bracons du Viaduc de Saint-Cloud, par protection cathodique par courant imposé.

Le viaduc de Saint-Cloud est un ouvrage autoroutier entre Saint-Cloud et Boulogne (Département 92) qui a été construit dans les années 1970 (Figure IV-29). Cet ouvrage d'un kilomètre de long et de vingt mètres de large est en béton armé et précontraint et présente une structure en poutre caisson avec trois alvéoles. Avec les 120 000 véhicules par jour qui empruntent les deux fois deux voies, l'importance de cet ouvrage dans le réseau routier est indiscutable.

Initialement le projet du Viaduc de Saint-Cloud visait à installer des écrans anti-bruit le long du tablier mais au vu de la détérioration visuelle avancée de certains bracons une réparation globale a été étudiée.



Figure IV-29 : Le viaduc de Saint-Cloud (Crédit photo - H. Delahousse, Ifsttar).

Le choix de la protection cathodique par courant imposé a été argumenté par le fait que les ions chlorure étaient présents au delà du premier lit d'armatures et qu'il n'était pas envisageable de purger l'ensemble du béton chloruré sans risque structurel. Ensuite, le choix des anodes forées (et non pas de treillis titane sur le parement des bracons) résulte du fait que l'installation de la réparation peut être réalisée depuis l'intérieur des bracons (en majorité) et par conséquent sans interruption du trafic routier et sans avoir à mener des travaux de nuit et sans ajout de charge à l'ouvrage (nécessaire si béton à projeter sur le treillis anodique superficiel).

Les objectifs de ce travail visaient à dimensionner le système de PCCI, suivre l'installation et l'instrumentation du système de réparation, suivre l'évolution de la protection cathodique et finalement une fois le chantier pilote terminé et les résultats analysés et exploités, de fournir un cahier des charges permettant de lancer l'appel d'offre de travaux de réparation sur l'ensemble de l'ouvrage.

Ce travail a été l'occasion de partager les savoirs entre le maître d'ouvrage, les laboratoires qui ont effectué le diagnostic du matériau béton, le diagnostic de la corrosion des armatures passives et de l'état de la précontrainte, l'entreprise qui a réalisé l'essai pilote et enfin le bureau de contrôle.

Ce travail a été mené en collaboration avec la DRIEA-IF/DiRiF, le Cerema, In-Situ et BAC. J'ai présenté l'ensemble des résultats au comité technique qui gère le Viaduc de Saint-Cloud. Ce travail a été valorisé avec une présentation lors des Journées techniques Ouvrages d'Art 2014 [56] et un article (soumis) au bulletin des ouvrages d'art [57].

Les connaissances que j'ai acquises en traitements électrochimiques m'ont également permis de participer à la révision de la norme sur la protection cathodique (NF EN 12696) en norme ISO via le groupe miroir du CEFACOR (qui intervient pour l'AFNOR).

Dans ce document, je vais présenter certains des résultats qui ont permis de valider l'essai pilote de PCCI avec anodes forées sur le viaduc de Saint-Cloud au niveau de la pile P2 (Figure IV-30) en insistant, d'une part, sur l'efficacité du traitement visant à protéger l'ensemble des armatures passives et, d'autre part, sur la surveillance du risque de fragilisation à l'hydrogène des câbles de précontrainte.

La mise en place de l'installation de PCCI est illustrée sur la Figure IV-31.

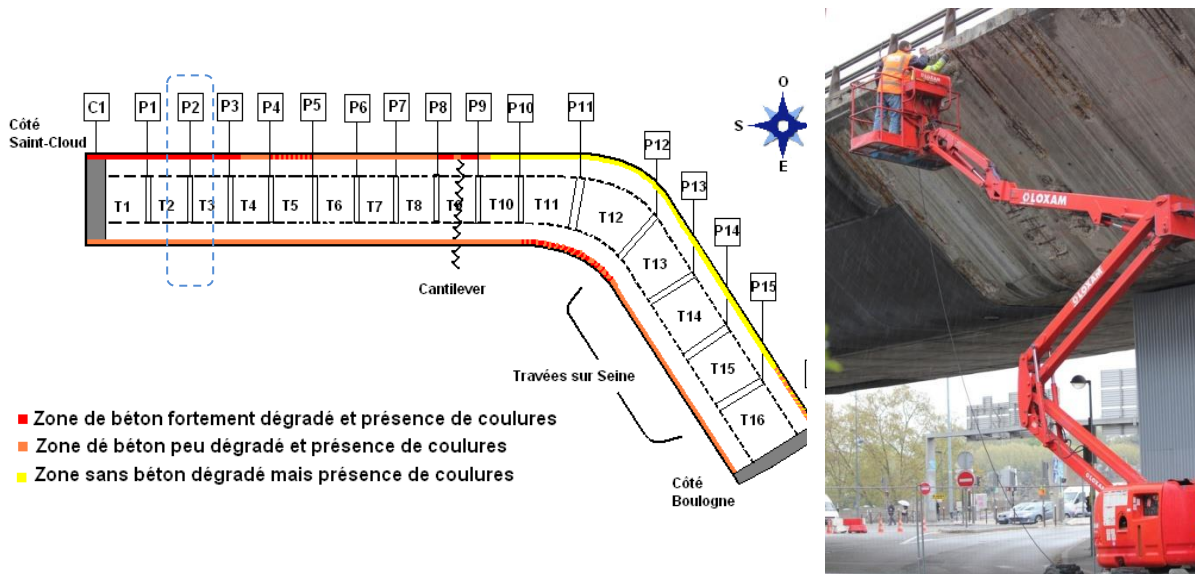


Figure IV-30 : La pile P2 a fait l'objet du chantier pilote.



Extérieur du voussoir



Intérieur du voussoir



Connexion aux armatures (Réseau cathodique)



Anode forée (DurAnode CPI) (Réseau anodique)



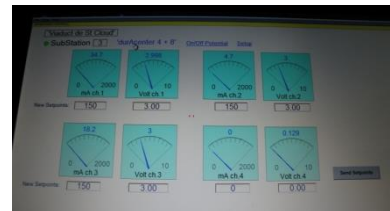
Sonde de référence noyée Mn/MnO₂ (ERE 20, Force Technology)



Unité centrale



3 cabinets esclaves



Réglage des tensions

Figure IV-31 : Quelques photos du chantier pilote de la PC CI avec anodes forées du Viaduc de Saint-Cloud (Crédit photo V. Bouteiller et H. Delahousse, Ifsttar).

Après discussion avec l'entreprise, le plan de recollement du voussoir incluant le positionnement des anodes (après calcul de dimensionnement en fonction des surfaces à protéger et des données fournisseur de l'anode) et des sondes de références (profondeurs de bracon pour protéger les deux lits d'armature et hauteurs différentes (précontrainte)) a été validé (Figure IV-32). En regard des surfaces d'armatures à protéger, et des spécifications techniques des anodes, il a été décidé d'installer 4 anodes par m² dans les zones courantes et 6 anodes par m² dans les zones avec précontrainte.

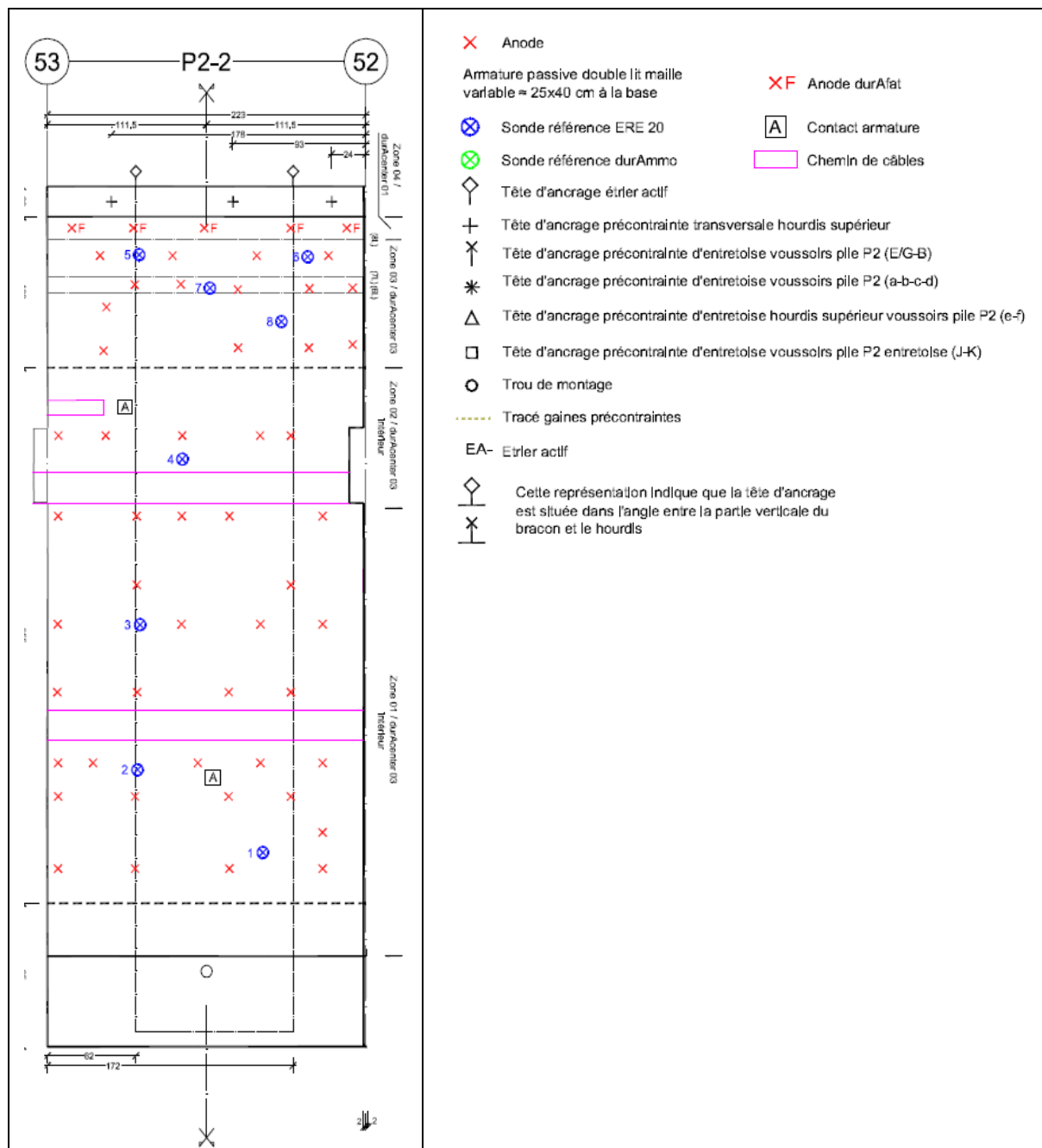


Figure IV-32 : Exemple de plan de recollement de l'installation, voussoir P2-2 (durAcenter 03)

Pour le monitoring, chaque voussoir est instrumenté avec 8 électrodes de référence ERE20® (ou durAmmo dans certains cas). L'unité centrale gère au travers des trois durAcenter la mesure des paramètres suivants, pour chaque zone :

- Potentiels « Instant Off » des électrodes de référence (mV) (0,1-1 s.)
- Potentiels « Instant On » des électrodes de référence (mV)

- « IR drop » (mV)
- Impédance du circuit de mesure des électrodes de référence (kOhm)
- Tension des différents circuits anodiques (V)
- Courant des différents circuits anodiques (A)
- Température des armoires monitoring (centrale, esclaves) (°C)

La performance de la protection cathodique a été évaluée sur une période d'une année, en fonction :

- de l'analyse des tensions et des courants distribués par sous-zone anodique (Figure IV-33),
- des courbes de suivi des potentiels "OFF" (Figure IV-34) et
- des valeurs de dépolarisation à 24h enregistrées chaque mois (Tableau IV-3). Nous avons considéré le critère b) de la norme NF EN 12696.

- un potentiel «à courant coupé» plus négatif que -720 mV par rapport à Ag/AgCl/KCl 0,5 M; ou
- une dépolarisation d'au moins 100 mV sur un maximum de 24 h à partir de la coupure du courant; ou
- une dépolarisation pendant une longue période (typiquement 24 h ou plus) d'au moins 150 mV à partir de la coupure du courant, sujette à une décroissance continue et l'utilisation d'électrodes de référence (et non de sondes de dépolarisation) pour les mesurages au-delà de 24 h.

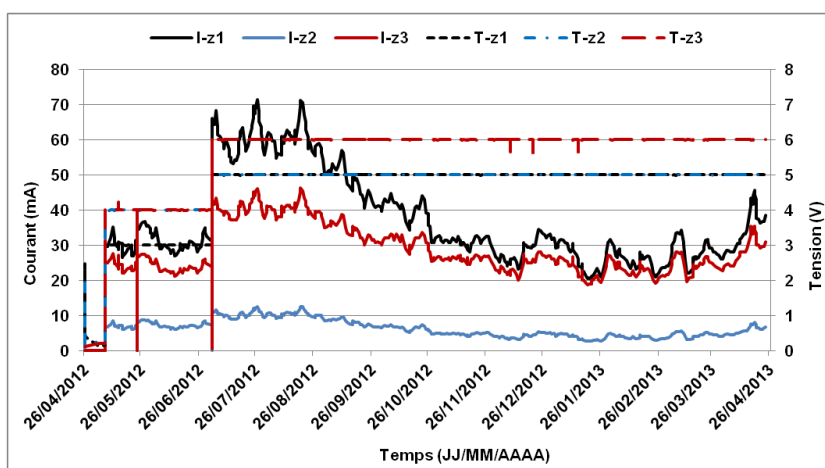


Figure IV-33 : Distribution des courants anodiques et des tensions en fonction du temps, P2-2, durAcenter 03.

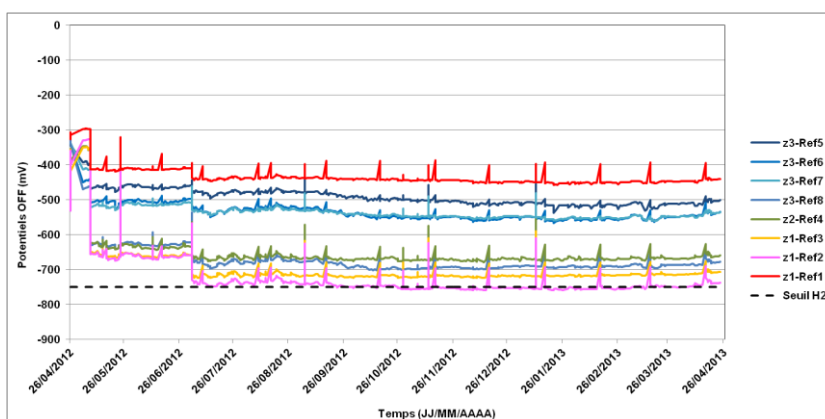


Figure IV-34 : Suivi des potentiels "OFF", P2-2, durAcenter 03.

Tableau IV-3 : Valeurs de dépolarisation à 24h (mV) mensuelles sur une année, P2-2, durAcenter 03.

Année	2012								2013			
	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	déc	janvier	février	mars	avril
z3-Ref5	78	78	102	116	119	118	124	123	131	133	127	124
z3-Ref6	82	97	121	144	152	144	153	144	152	147	148	139
z3-Ref7	121	127	151	164	168	163	165	164	165	163	164	158
z3-Ref8	187	214	270	289	302	286	290	282	283	278	282	280
z2-Ref4	288	292	318	330	334	313	315	296	302	293	295	292
z1-Ref3	310	314	375	375	376	360	353	343	342	335	334	334
z1-Ref2	337	346	419	414	416	406	400	395	388	383	382	389
z1-Ref1	122	126	157	159	162	153	149	144	145	146	142	145

Tableau IV-4 : Synthèse de l'ensemble des résultats du chantier pilote de PCCI avec anodes forcées sur le voussoir P2-2 (durAcenter 03) du Viaduc de Saint-Cloud.

Bracon	Zone anodique	Localisation dans le bracon	Surface (12,71 m ²)	Anode		Electrode de référence (8 par durAcenter)			Moyenne des résultats depuis le 3 juillet 2012 jusqu'au 24 avril 2013			Critère de dépolarisation 24h atteint (nombre de mois/10mois en %)
				Type	Nombre (pce/zone)	Nombre (pce/zone)	Input n°	Profondeur (cm)	Tension appliquée (V)	Courant total/zone (mA)	Courant par anode/zone (mA)	
durAcenter 01	04	gousset	ext	durAfat	(5)	-	-	-	-	-	-	-
P2-2	03	haut	ext	durAnode	14	4	5	10	6	30	2,1	100
							6	10				
							7	10				
							8	10				
P2-2	02	milieu	int	durAnode	5	1	4	20	5	6	1,2	100
P2-2	01	bas	int	durAnode	29	3	1	20	5	39	1,3	100
							3	20				

Les résultats de ce chantier pilote ont montré qu'il fallait environ 2 mois pour ajuster les paramètres de tension/courant de la PCCI pour obtenir le critère de 100 mV sur l'ensemble des huit sondes de référence. De plus, les valeurs de potentiels "OFF" n'étaient jamais plus électrochimiques que -750 mV (Mn/MnO₂) et par conséquent le risque de fragilisation par hydrogène des câbles de précontrainte était écarté.

En conclusion, pour les voussoirs courants, le dimensionnement de la PC CI par anodes forcées a présenté des résultats positifs en termes de performance. En revanche, pour les voussoirs sur pile, la zone 04 (du gousset) s'est révélée insuffisamment protégée (résultats non montrés ici).

IV.3.3 Conclusions sur la protection cathodique

Cette expérience unique en France a permis de travailler collectivement (maîtrise d'ouvrage, recherche, entreprise, contrôle) sur le terrain avec une approche scientifique pour réaliser le dimensionnement et le monitoring d'une PCCI par anodes forcées sur une durée d'une année. Un article a été soumis [57].

Les résultats se sont avérés concluants pour les voussoirs courants (P2-2 et P2-1) et donc directement extrapolables aux 518 voussoirs courants sur les 550 voussoirs du viaduc. Pour les voussoirs sur pile, de culée et la zone du cantilever, des aménagements ou autres solutions devront être envisagées.

Enfin, les résultats du chantier pilote ont permis de chiffrer la solution de PCCI avec anodes forcées et également de rédiger le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) pour le traitement de l'ensemble de l'ouvrage. Les réparations sur l'ouvrage ont démarré en 2015.

IV.4 Conclusions sur les traitements électrochimiques

Les résultats des travaux de recherche que j'ai réalisés, co-encadrés ou animés et valorisés démontrent que la déchloration, la réalcalinisation et la protection cathodique peuvent être des traitements électrochimiques pertinents pour réparer les structures en béton armé dégradées par corrosion.

Néanmoins, afin de permettre à ces traitements électrochimiques de trouver une place dans le domaine de la réparation des ouvrages en béton armé, il faut encore travailler sur plusieurs aspects.

Du point de vue scientifique, si l'on continue d'apporter une meilleure connaissance sur les traitements électrochimique alors ces derniers pourront être proposés en préconisation. Les axes de recherche ci-après devraient faire partie de ces connaissances : (i) étudier si des interruptions de courant lors du traitement électrochimique peuvent augmenter l'efficacité (car cela apporterait une certaine homogénéisation), (ii) démontrer l'efficacité des traitements électrochimiques sur le "long terme", (iii) évaluer l'efficacité des anodes galvaniques et (iv) apporter un éclairage complémentaire avec la modélisation. Pour juger de l'efficacité d'un traitement électrochimique il faut encourager la complémentarité des mesures analytiques et des mesures électrochimiques non destructives (même si ces dernières nécessitent d'attendre la dépolarisation de l'armature et que cette durée n'est pas encore maîtrisée). Il faudrait être capable de proposer des spécifications de performance en adéquation avec l'ouvrage à réparer.

Du point de vue technique et opérationnel, les références sur ouvrage des traitements électrochimiques restent faibles. De plus, certains traitements nouveaux tels que les systèmes dits "hybrides" manquent parfois d'argumentaires techniques issus du laboratoire ou du site. Cet état de fait pourra vraisemblablement évoluer avec une meilleure connaissance des grandeurs électrochimiques, des matériels développés et de la certification des opérateurs. Dès qu'il sera plus aisé de rédiger le Cahier des Clauses Techniques Particulières d'un chantier de traitement électrochimique, alors le niveau d'utilisation augmentera (En Norvège, le monitoring de la protection cathodique peut être inclus dans le CCTP !). Côté opérateurs, la première "certification de personnel niveau 1" a eu lieu en 2014 sur le site de Toulouse.

Du point de vue de la normalisation, mes connaissances sur les traitements électrochimiques m'ont permis de travailler pour la transformation ou la révision des normes sur la déchloration (14031 partie 2), sur la réalcalinisation (14038 partie 1) et sur la protection cathodique (ISO 12696). J'ai également participé à la rédaction d'une guide technique sur la protection cathodique par anodes galvaniques [5].

Du point de vue "communication", le dialogue entre l'ensemble des partenaires impliqués dans une réparation de type électrochimique doit être privilégié. Cet exercice est très difficile car les métiers sont différents (scientifiques, maîtres d'ouvrage, fournisseurs d'anodes, entrepreneurs, assistants maîtrise d'ouvrage, ingénieurs de contrôle, etc.). De plus, au laboratoire, en industrie ou sur chantier, les réponses fournies sont rarement dans la même échelle de temps. Grâce aux compétences que j'ai acquises suite à mes différents travaux de recherche, en diagnostic de corrosion et en traitements

électrochimiques, j'ai aidé au montage de différentes journées de rencontre du CEFRACOR lors desquelles j'ai fait une présentation.

- N°7 "Techniques électrochimiques appliquées à la protection et la réparation du béton armé", Paris, le 18 octobre 2005 (66 participants),
- N°13 " Le diagnostic des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion", Paris, le 24 juin 2010 (116 participants);
- N°14 "La Protection Cathodique pour la maîtrise de la corrosion des armatures des constructions en béton - Courant imposé et Anodes galvaniques", Paris, le 23 mars 2012 (127 participants)
- N°15 "Electrochimie et Protection Cathodique - La théorie au service de la pratique", Université La Rochelle, le 13 avril 2012 (63 participants).

Aujourd'hui, cette phase de dialogue est donc engagée.

Enfin, du point de vue budgétaire, le coût des traitements électrochimiques n'a pas encore de valeur moyenne en euro chiffrée car il dépend très fortement de l'ouvrage (éléments massifs ou non), de son utilisation (interruption de trafic routier ou de déchargement portuaire par ex) et du niveau de fiabilité/confiance par rapport au traitement lui-même.

IV.5 Références

- [1] Tilly GP, Jacobs J. CONREPNET - Concrete repairs - Performance in service and current practice. United Kingdom: IHS BRE Press; 2007.
- [2] Pocock D. Chloride extraction and realkalisation - six years on. Corrosion and protection of reinforced concrete. Dubai 1994.
- [3] AFNOR. NF EN ISO 12696 - Protection cathodique de l'acier dans le béton. 2012 avril.
- [4] AFNOR. PR EN 14038-1, Electrochemical realkalisation and chloride extraction treatments for reinforced concrete Part 1: Realkalisation. AFNOR; 2014.
- [5] Arliguie G, Berramdane N, Bouteiller V, Brouxel M, Chaussadent T, Colloud O, et al. Anodes galvaniques pour le traitement de la corrosion des armatures des constructions en béton. CEFRACOR, Commission Construction Bâtiment ed. Paris 2012.
- [6] Bouteiller V, Godart B. Traitement électrochimique de déchloration. Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures, STRES. 2008;Bull N°6.
- [7] Bennett J. Chloride removal implementation, SHRP-S-347. Strategic Highway Research Program; 1993.
- [8] Bennett J. Evaluation of NORCURE Process for electrochemical chloride removal from steel reinforced concrete bridge components , SHRP-C-620. Strategic Highway Research Program; 1993.
- [9] Bennett J. Electrochemical chloride removal and protection of concrete bridge components : laboratory studies, SHRP-S-657 Strategic Highway Research Program; 1993.
- [10] Bennett J. Electrochemical chloride removal and protection of concrete bridge components : field trials, SHRP-S-669. Strategic Highway Research Program; 1993.
- [11] Elsener B, Molina M, Böhni H. The electrochemical removal of chlorides from reinforced concrete. Corrosion Science. 1993;35(5-8):1563-70.
- [12] Tritthart J, Pettersson K, Sorensen B. Electrochemical removal of chloride from hardened cement paste. Cement and Concrete Research. 1993;23(5):1095-104.
- [13] Arya C, Sa'id-Shawqi Q, Vassie PRW. Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete. Cement and Concrete Research. 1996;26(6):851-60.

- [14] Polder RB. Electrochemical chloride removal from concrete prisms containing chloride penetrated from sea water. *Construction and Building Materials*. 1996;10(1):83-8
- [15] Marcotte TD, Hansson CM, Hope BB. The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar Part I: Electrochemical measurements. *Cement and Concrete Research*. 1999;29(10):1555-60.
- [16] Marcotte TD, Hansson CM, Hope BB. The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar Part II: Microstructural characterization. *Cement and Concrete Research*. 1999;29(10):1561-8.
- [17] Orellan Herrera JC. Thèse, Efficacité et effets secondaires des techniques électrochimiques de maintenance des structures en béton armé: Université de Toulouse; 2002.
- [18] Orellan JC, Escadeillas G, Arliguie G. Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(2):227-34.
- [19] Fajardo San Miguel GdJ. Thèse, Limites d'utilisation des techniques électrochimiques de maintenance non permanentes pour les ouvrages en béton armé: Université de Toulouse; 2004.
- [20] Bouteiller V, Laplaud A, Maloula A, Morelle RS, Duchesne B, Morin M. Electrochemical chloride extraction of a beam polluted by chlorides after 40 years in the sea. *Journal De Physique Iv*. 2006;136:331-40.
- [21] Fajardo G, Escadeillas G, Arliguie G. Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel-reinforced concrete specimens contaminated by "artificial" sea-water. *Corrosion Science*. 2006;48(1):110-25.
- [22] Orellan Herrera JC, Escadeillas G, Arliguie G. Electrochemical chloride extraction: Influence of C3A of the cement on treatment efficiency. *Cement and Concrete Research*. 2006;36(10):1939-46.
- [23] Garcés P, Sánchez de Rojas MJ, Climent MA. Effect of the reinforcement bar arrangement on the efficiency of electrochemical chloride removal technique applied to reinforced concrete structures. *Corrosion Science*. 2006;48(3):531-45.
- [24] Swamy RN, McHugh S. Effectiveness and structural implications of electrochemical chloride extraction from reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Composites*. 2006;28(8):722-33.
- [25] Yeih W, Chang JJ, Hung CC. Selecting an adequate procedure for the electrochemical chloride removal. *Cement and Concrete Research*. 2006;36(3):562-70.
- [26] Elsener B, Angst U. Mechanism of electrochemical chloride removal. *Corrosion Science*. 2007;49(12):4504-22.
- [27] Miranda JM, Cobo A, Otero E, González JA. Limitations and advantages of electrochemical chloride removal in corroded reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(4):596-603.
- [28] Pérez A, Climent MA, Garcés P. Electrochemical extraction of chlorides from reinforced concrete using a conductive cement paste as the anode. *Corrosion Science*. 2010;52(5):1576-81.
- [29] Sánchez M, Alonso MC. Electrochemical chloride removal in reinforced concrete structures: Improvement of effectiveness by simultaneous migration of calcium nitrite. *Construction and Building Materials*. 2011;25(2):873-8.
- [30] Hansson ILH, Hansson CM. Electrochemical extraction of chlorides from concrete part I - A qualitative model of the process. *Cement and Concrete Research*. 1993;23(5):1141-52.
- [31] Andrade C, Diez JM, Alamán A, Alonso C. Mathematical modelling of electrochemical chloride extraction from concrete. *Cement and Concrete Research*. 1995;25(4):727-40.
- [32] Sa'id-Shawqi Q, Arya C, Vassie PR. Numerical Modeling of Electrochemical Chloride Removal from Concrete. *Cement and Concrete Research*. 1998;28(3):391-400.
- [33] Castellote M, Andrade C, Alonso C. Electrochemical removal of chlorides: Modelling of the extraction, resulting profiles and determination of the efficient time of treatment. *Cement and Concrete Research*. 2000;30(4):615-21.
- [34] Toumi A, François R, Alvarado O. Experimental and numerical study of electrochemical chloride removal from brick and concrete specimens. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(1):54-62.

- [35] Li LY, Page CL. Finite element modelling of chloride removal from concrete by an electrochemical method. *Corrosion Science*. 2000;42(12):2145-65.
- [36] AFNOR. CEN TS 14038-2 / Electrochemical re-alkalisation and chloride extraction treatments for reinforced concrete - Part 2: chloride extraction. 2007.
- [37] Bouteiller V. Electrochemical chloride extraction efficiency on different reinforced concrete specimens (Keynote) EUROCORR Lisbon, Portugal 2005
- [38] Bouteiller V. Electrochemical chloride extraction of a beam polluted by chlorides after 40 years in the sea Nucperf. Cadarache, France 2006.
- [39] Bouteiller V, Tong YY. Electrochemical chloride extraction of a beam polluted by chlorides after 40 years in the sea DBMC. Hangzhou, China 2008.
- [40] Slater JE, Moreland PJ. Electrochemical removal of Chlorides from concrete bridge decks. . *Materials Performance*. 1976;15(11):21-6.
- [41] 509 C. Corrosion and protection of metals in contact with concrete: maintenance, electrochemical realkalisation 1997.
- [42] Tong YY. Thèse, Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé carbonaté Paris 6, France: Université Pierre et Marie Curie; 2009.
- [43] Tong Y, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Joiret S. Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation 2010.
- [44] Tong YY, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Joiret S. Durability evaluation of a realkalisation treatment using sacrificial anodes EUROCORR. Freiburg, Germany 2007.
- [45] Tong YY, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Joiret S. Durability evaluation of a realkalisation treatment using impressed current DBMC. Istanbul, Turkey 2008.
- [46] Tong YY, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Joiret S. Durability of realkalisation treatment using impressed current or galvanic anodes for the rehabilitation of reinforced concrete structures DBMC Hangzhou, China 2008.
- [47] Bouteiller V, Tong YY, Marie-Victoire E, Joiret S. Maintenance and rehabilitation of reinforced concrete slabs using realkalisation treatment EUROCORR. Nice, France 2009.
- [48] Tong YY, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Joiret S. Electrochemical realkalisation of carbonated reinforced concrete using impressed current or sacrificial anodes – 2.5 years durability EUROCORR. Nice, France 2009.
- [49] Tong YY, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Joiret S, Bernard M-C. Modifications of corrosion products during galvanic treatment of reinforced carbonated concrete EUROCORR. Nice, France 2009.
- [50] Marie-Victoire E, Bouichou M, Bouteiller V, Tong YY. Realkalisation of a late 19th century bridge Concrete Solutions Belfast, United Kingdom 2014.
- [51] Tong YY, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Joiret S. Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete — Part 1: Sacrificial anode process. *Cement and Concrete Research*. 2012;42(1):84-94.
- [52] Sahal M, Tong YY, Sanz-Merino B, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Joiret S. Durability of impressed current realkalization treatment applied on reinforced concrete slabs after 5 Years DBMC. Porto, Portugal 2011
- [53] Räsänen V, Penttala V. The pH measurement of concrete and smoothing mortar using a concrete powder suspension. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(5):813-20.
- [54] Lutz HD, Moeller H, Schmidt M. *Journal Molecular Structure*. 1994;328:121.
- [55] Bouteiller V, Tache G. Galvanic anodes for reinforced concrete repair – French experience EUROCORR. Nice, France 2009.
- [56] Bouteiller V, Damien G, Jacquelin A, Michaux C, Boinski F, Schneider J, et al. Protection Cathodique par Courant Imposé du Viaduc de Saint-Cloud - Chantier pilote (anodes forées). Journées techniques Ouvrages d'Art. Champs sur Marne, France 2014.

[57] Bouteiller V, Jacquel A, Damien G, Boinski F, Schneider J, Michaux C. Protection cathodique par courant imposé à l'aide d'anodes forées - chantier pilote du Viaduc de Saint-Cloud. Bulletin des Ouvrages d'Art (soumission). 2015.

CHAPITRE V MON PROJET DE RECHERCHE

Les précédents chapitres de ce mémoire dressent le bilan d'une dizaine d'années de travaux de recherche que j'ai effectués dans le domaine de la corrosion du béton armé. Dans ce cinquième chapitre, je vais présenter mon projet de recherche pour les années à venir.

Pour faire un résumé succinct de mes travaux, j'ai rassemblé les axes de recherche ainsi que les paramètres étudiés sur la Figure V-1. Les résultats obtenus (Tableau V-1), outre les publications et autres valorisations, peuvent constituer des données d'entrée précieuses pour les modélisateurs et un début d'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrage.

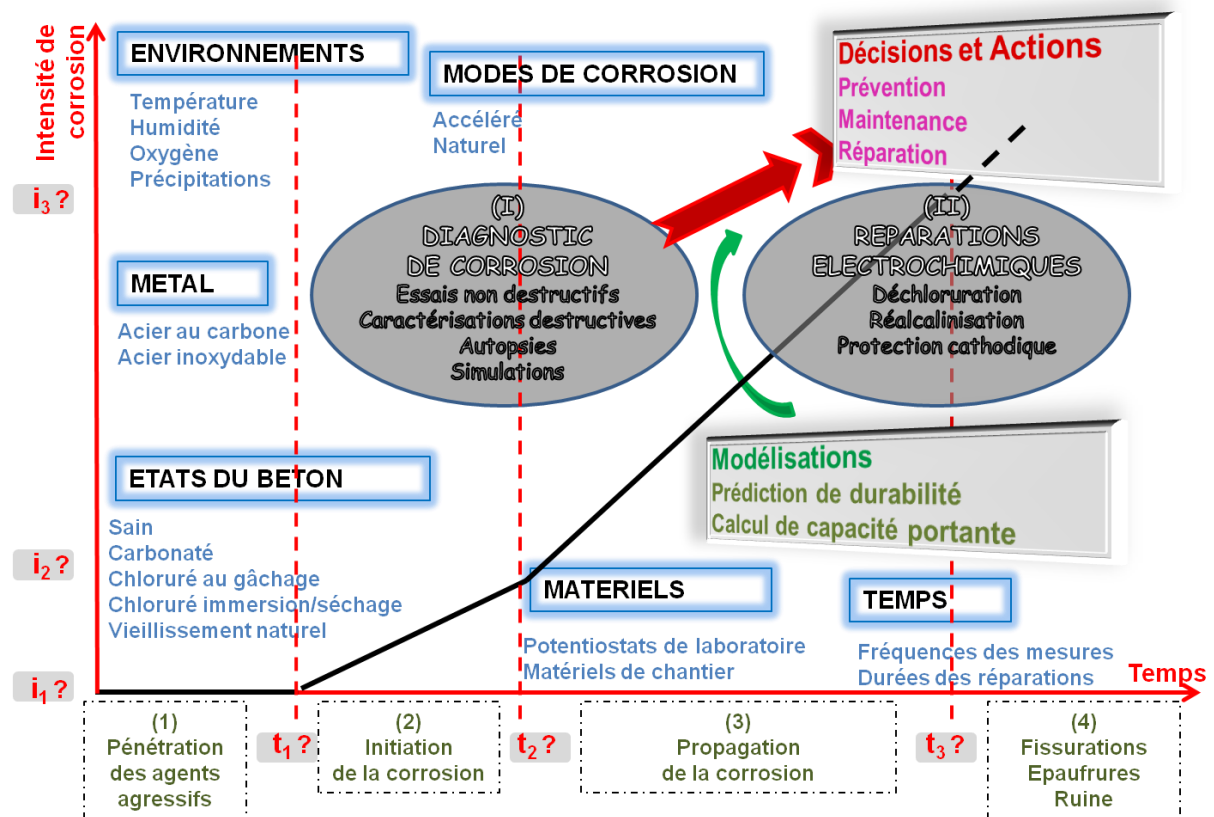


Figure V-1 : Représentation synthétique de l'ensemble de mes recherches sur la corrosion du béton armé

Mes compétences, essentiellement expérimentales, s'appuient sur des investigations électrochimiques et physico-chimiques des matériaux cimentaires armés et l'étude de leur évolution avec le temps en fonction de différents paramètres. Elles s'inscrivent dans les thématiques de la durabilité des structures en béton armé vis-à-vis du risque de corrosion et dans la gestion d'un patrimoine d'ouvrages d'art (ou de monuments historiques en collaboration avec le LRMH) avec l'utilisation récente en France de traitements de réparation de types électrochimiques.

Mes recherches sont à l'interface de différentes disciplines et de différents acteurs. Pour ce qui est de l'interface entre disciplines, je me suis entourée de différents partenaires pour que les études soient menées de manière aussi complète que possible en fonctionnant en équipes transdisciplinaires (sciences des matériaux, électrochimie, chimie analytique, mécanique, modélisation, etc). Les tenants et aboutissants de mes recherches intéressent différents acteurs (scientifiques, modélisateurs, ingénieurs sur le terrain, industriels, gestionnaires d'ouvrages, responsables de réseaux, etc.) et j'ai

Deuxième partie : Présentation des travaux de recherche
Chapitre V Projet de recherche

toujours essayé de les associer le plus possible si ce n'est aux études elles-mêmes et à leur financements, aux discussions et aux réflexions. Ma démarche s'est révélée particulièrement fructueuse avec la mise en place de la convention de recherche DéCoF-Ré qui a été signée en mai 2015. Ce projet qui s'articule autour du pont de l'île de Ré, implique six organismes⁸⁾ (publics et privés), une vingtaine de personnes dont un doctorant (L. Bourreau) et un budget voisin d'un million d'euros sur une durée de trois ans.

Mon travail s'est concrétisé par une production scientifique, des encadrements de travaux de recherche et un rayonnement dont les éléments chiffrés sont résumés dans le Tableau V-1.

Tableau V-1 : Bilan des encadrements, des publications scientifiques, des collaborations et du rayonnement, des interventions sur ouvrages, des normalisations et des expertises.

Bilan	"Indicateur"	"Quantification"
Formation et encadrement	Technicien	12
	IUT	1
	Maitrise, Mastère, PFE	9
	Doctorant	3 soutenues, 4 en cours
	Post-Doctorant	1
Publications	Contribution à des livres	4
	Revue internationale à comité de lecture	2 + 10 (+ 2 soumises)
	Revue nationale à comité de lecture	1
	Conférences internationales	23 dont 2 keynotes
	Conférences nationales	24 dont 1 keynote
	Revue techniques	5
Prix	Congrès RGCU –FNTP - 2009	3 ^{ème} prix ex aequo pour la doctorante YY. Tong
Collaborations (articles co-signés)	Nationales	5
	Internationales	2
Ouvrages	Pont sur le Loup, Lavoir à charbon de Binche, Pont d'Aquitaine, Appontement du Port autonome du Havre, Pont de Chatellerault, Cattenom, Eglise Notre Dame de Royan, Anneau Linas-Montlhéry, Tunnel du vieux port Marseille, Poste Charbonnier de Saint-Nazaire, Viaduc de Saint-Cloud, Pont de l'île de Ré ...	une douzaine
Normalisation	Groupe miroir CEFRAFOR pour l'AFNOR	3 normes (protection cathodique, déchloration, réalcalinisation)
Guide technique	Groupe CEFRAFOR	1 guide sur la protection cathodique par anode galvanique
Expertises	Port du Havre, RTE, Viaduc de Saint-Cloud	3

Avec l'acquis de diverses expériences, à savoir, gestion d'un laboratoire d'électrochimie et formation des personnels techniques, montage de projets et réponses à appel d'offres, encadrement des étudiants, des doctorants et des post-doctorants, réalisation d'activités de recherches (tant au laboratoire que sur le terrain), valorisation des résultats (congrès nationaux et internationaux, livres, publications scientifiques, supports techniques, ...), normalisation et enfin expertises, je suis tout à fait prête à me projeter dans l'avenir.

⁸⁾ Ifsttar, Université de Nantes et sa Filiale Capacités SAS, Concrete, Cerema (DTER Ouest et DTecITM IdF), Département de Charente-Maritime

Je souhaite continuer à travailler dans la problématique de la corrosion des structures en béton armé dans le génie civil et de leur réparation. En France, l'âge moyen de ces structures est d'environ 35 ans. Cette mission pourrait être étendue aux monuments historiques, aux bâtiments et aux entités nucléaires. , et, je pense avoir un rôle fort à jouer pour que perdurent les compétences scientifiques et techniques en France. Cette problématique présente de multiples facettes de recherche souvent complexes car multi-matériaux (minéral, métallique, organique ou polymérique), multi-échelles (micro, macro, laboratoire, ouvrage) et associant différents points de vue pas toujours complémentaires ni strictement techniques (sociétal, financier) et j'envisage de m'investir encore de nombreuses années dans cette passionnante recherche.

L'obtention de l'HDR m'autoriserait à me présenter à un concours de directeur de recherches. Premièrement, cela me permettra de "légitimer" les différents encadrements de thèse que je réalise déjà. Deuxièmement, cela m'ouvrira de nouvelles possibilités de missions de management. Etant donné que mes recherches suscitent un intérêt indéniable, engendrent un nombre croissant de contrats et de demandes d'expertises ou de missions normatives, j'ai besoin de mettre en place, au sein de l'Ifsttar, une équipe de taille critique suffisante et pérenne qui permette la réalisation de ces différentes activités (laboratoire et ouvrages sur le terrain) dans des conditions de travail opérationnelles raisonnables. Cela me donnera la possibilité, d'une part, de gérer l'ensemble des ces activités et, d'autre part, de davantage valoriser les résultats acquis. Je pense que les recrutements d'un cadre et d'un second technicien sont indispensables. Bien évidemment, je vais continuer et étendre mon cercle de partenaires aussi bien au niveau national qu'international.

Dans cette dernière partie de mon mémoire de HDR, je vais expliciter mes choix d'abandonner ou de poursuivre certaines recherches et de piloter de nouvelles thématiques selon des aspects temporels : court, moyen et long termes.

V.1 Recherches à court terme

Dans l'année à venir, je vais suspendre deux axes de recherche (Impact des courants alternatifs sur la corrosion des armatures en béton armé ; Fiabilité du diagnostic de corrosion en regard des matériels de mesure utilisés) et terminer d'encadrer la thèse qui porte sur l'étude d'aciers inoxydables en tant que solution durable pour les bétons en milieux fortement chlorurés.

V.1.1 Impact des courants alternatifs sur la corrosion des structures en béton armé

La problématique de l'impact des courants alternatifs sur la corrosion des structures en béton armé, au niveau du laboratoire, nécessite un savoir faire en courant alternatif que je ne pourrai pas capitaliser, ni reproduire à l'Ifsttar (manque d'installation et manque de compétence). De plus, le partenariat avec RTE et EDF Les Renardières est compromis pour une collaboration sur le long terme notamment avec l'ouverture à la concurrence et le déroulé de la recherche sous la forme d'appel à projets. C'est pourquoi j'ai décidé d'arrêter cette recherche. Actuellement, pour la problématique ouvrage et pour l'aspect modélisation, RTE collabore respectivement avec mes collègues du Cerema et avec SUPELEC.

V.1.2 Fiabilité du diagnostic de corrosion en regard des matériels de mesure utilisés

J'ai participé et/ou initié différents travaux de recherches pour comprendre les raisons des fortes dispersions des résultats électrochimiques à l'échelle du laboratoire et des ouvrages en fonction des matériels de mesure utilisés. Du point de vue expérimental, ces travaux ont permis d'évaluer les dispersions, de donner la tendance des différents appareils de mesure (notamment en fonction de l'agression testée), d'alerter les maitres d'ouvrage sur l'interprétation des valeurs de vitesses de corrosion, d'étudier l'impact de la surface polarisée, etc... Au vu de ces différents résultats expérimentaux et en considérant ma collaboration avec le LMDC dans le cadre du projet APPLLET sur de la modélisation, il apparait que cette recherche doit plutôt s'orienter vers des essais numériques 2D et 3D. C'est pourquoi j'ai décidé de suspendre cette recherche pour le moment.

V.1.3 Aciers inoxydables : une solution pour les milieux fortement chlorurés ?

En 2013, j'ai initié une collaboration avec Ugitech sur l'étude des aciers inoxydables pour le béton soumis à des teneurs en ions chlorure importantes qui s'est concrétisé par une thèse CIFRE (A. Oumarou). L'objectif principal de cette thèse était de développer un test discriminant qui permette de sélectionner une nuance d'acier inoxydable au regard de la dangerosité en ions chlorure. En objectifs secondaires, nous nous sommes intéressés au couplage galvanique acier carbone/acier inoxydable, au comportement cinétique de la corrosion sur des prismes en béton armé gâchés avec des ions chlorure et entreposés dans une enceinte climatique (45°C et 92%HR), et enfin au vieillissement naturel de poutres en béton armé entreposées sur un site de vieillissement naturel en zone de marnage à La Rochelle. La thèse se poursuit avec une soutenance prévue en 2016 (6 mois supplémentaires pour cause du déménagement de l'Ifsttar à Champs sur Marne). Je vais mener à son terme cette thèse et j'envisage une poursuite de cette recherche avec Ugitech avec un chercheur post-doctoral.

V.2 Recherches à moyen terme (3-4 ans)

La corrosion des structures en béton armé est une préoccupation majeure des maîtres d'ouvrage qui gèrent un parc d'ouvrages existants vieillissant. Pour les maîtres d'ouvrage, la problématique de la corrosion intervient avec l'apparition des fissures sur le parement béton (observation macroscopique visuelle). Pour les scientifiques, il est prouvé que la fissuration du parement béton provient de la corrosion des armatures, car les produits de corrosion engendrés sont plus volumineux que le fer métal. Il convient donc de se préoccuper de la corrosion des armatures à un stade plus précoce c'est à dire avant l'apparition des dégradations visuelles.

La corrosion des armatures dans le béton armé est une source de recherches très abondante car elle implique différents processus en termes d'échelles d'observations, d'évolution dans le temps et de techniques d'études.

Les recherches à moyen terme que je vais poursuivre portent sur la corrosion du béton armé à l'échelle micro, à l'échelle macro avec un suivi cinétique de la corrosion et à l'échelle réelle avec l'étude de la fiabilité du diagnostic de corrosion sur le pont de l'île de Ré. De plus, j'ai commencé à compléter ma compétence expérimentale avec la compétence numérique d'autres collègues chercheurs. Aussi, je vais poursuivre l'étude de l'interface acier/béton en couplant deux approches. L'approche expérimentale comportera des essais de corrosion anodique et des essais mécaniques y compris de pull-out (avec M. Quiertant.) L'approche numérique, pilotée par mon collègue L. Adelaïde, sera basée sur le modèle de B. Richard [1, 2], et prendra en compte les oxydes formés et leur influence sur l'endommagement du béton et les fissurations du béton.

V.2.1 Corrosion du béton armé à l'échelle micro et évolution des oxydes

Dans les années 2007-2009 (Thèse YY. Tong), j'avais travaillé avec le LISE et le LRMH sur la réalcalinisation du béton armé et nous avons développé une cellule électrochimique spécifique pour observer "in-situ" les composés du fer en microspectroscopie Raman. En effet, la préparation d'un échantillon avant analyse engendre toujours une modification des oxydes (contact avec l'oxygène notamment) et nous voulions observer en temps réel l'évolution des oxydes de fer (réduction et/ou oxydation).

J'ai initié une nouvelle collaboration avec le LRMH et le LISE pour travailler sur la corrosion "in-situ" des armatures dans des microbétons (ciment Portland et ciment avec laitiers de hauts fourneaux) (Thèse Y. Tissier en cours). Ce sujet assez amont comporte deux stades d'études. Dans le premier stade, l'étude porte sur le suivi de la corrosion des aciers dans un milieu carbonaté et chloruré (non décrit dans la littérature). Dans le second stade, l'étude porte sur la réparation du microbéton armé dégradé à l'aide de traitement électrochimique de déchloration. Le corps d'épreuve de taille centimétrique a spécialement été développé pour permettre l'observation in-situ, à l'aide de microspectroscopie Raman, des oxydes qui se forment, se transforment, continuent de s'oxyder ou au contraire se réduisent tout au long du processus de la corrosion mais également lors du traitement électrochimique cathodique de réparation. A l'aide de trois techniques complémentaires, la spectroscopie Raman, l'électrochimie non destructive et la microscopie électronique à balayage, nous allons étudier l'évolution des oxydes (nature, épaisseurs, stabilité), la pertinence et la durabilité du traitement de déchloration et la potentielle

transformation de la matrice cimentaire (changement de microstructure, réactions délétères, etc.). J'insiste sur le fait que seule la microspectroscopie Raman permet de savoir si une espèce oxydée peut être réduite et par conséquent prouver qu'une protection cathodique est efficace et qu'une armature peut se repasser. Les études basées uniquement sur des caractérisations électrochimiques non destructives qui concluent que l'armature est redevenue passive parce que le potentiel après traitement est moins électro-négatif qu'avant traitement ne sont que qualitatives et ne constituent pas vraiment une preuve (en particulier sur la pérennité du traitement).

La soutenance de thèse de Y. Tissier est prévue en 2017.

V.2.2 Corrosion des armatures dans le béton à l'échelle macro et cinétique

Dans une structure en béton armé, l'enrobage béton constitue une barrière de protection contre la carbonatation du béton et contre l'arrivée des ions chlorure au droit de l'armature. Aussi, la corrosion des armatures d'une structure en béton armé (lorsqu'elle est observée) survient une vingtaine d'années après la construction (en moyenne). Lorsque la corrosion a démarré, il serait très utile de disposer d'une loi de comportement qui permette de prédire la durée de vie de la structure. A ce jour, la littérature propose peu de loi de corrosion dans la phase de propagation [3] et c'est pourquoi, j'ai piloté, dans le cadre du projet ANR APPLLET (2007-2010), l'étude de prismes en béton armé, sains ou dégradés (dans des conditions de carbonatation et/ou d'ions chlorure (au gâchage ou par immersion/séchage)) qui avaient été entreposés dans sept conditions de température et d'humidité relative pouvant simuler un changement climatique. J'ai poursuivi ces essais après le projet ANR APPLLET via d'autres projets de recherches sur fonds propres (ORSI MCV de l'Ifsttar (2010-2015)) et je vais poursuivre ce travail dans un nouveau projet ANR MODEVIE (2015-2019). A partir des résultats expérimentaux accumulés sur plus de cinq années, j'ai trouvé une loi de corrosion mathématique qui fitte correctement les pertes d'épaisseur de fer des armatures des prismes béton contenant des ions chlorure (article soumis). Je tiens à signaler que ce travail a pu être réalisé pour deux raisons. La première raison est que l'Ifsttar est un organisme de recherches qui permet de travailler sur des problématiques dont la durée d'étude est de l'ordre d'une dizaine d'années, contre en moyenne trois années pour les financements des projets. La seconde raison, parce qu'à l'issue du projet ANR APPLLET, le partenaire LRMH a également investi du temps et des crédits pour le maintien de cette action de recherche en collaborant avec l'Ifsttar.

Les résultats qui sont en cours de publication constitueront également une source très importante de données pour les modélisateurs et pour la prédiction de la durabilité du béton armé d'où la participation à l'ANR MODEVIE (tâche 4).

Je veux poursuivre cette étude (restent 90 prismes sur les 160 initialement) car elle est assez unique en termes de base de données et que les lois mathématiques trouvées nécessitent d'être confrontées à l'ensemble des résultats sur des durées plus longues, notamment afin de vérifier que le processus cinétique de corrosion est à tendance monotone continu. Enfin, cette étude permet également de connaître les épaisseurs de fer oxydées pour lesquelles le béton se fissure et cette donnée est particulièrement intéressante pour les modélisateurs œuvrant sur la thématique de la fissuration et du calcul structurel.

J'ajoute qu'à partir de 2013, dans le cadre de la thèse de A. Oumarou, l'évolution de la corrosion d'une série de prismes en béton avec des ions chlorure au gâchage et avec des armatures en acier inoxydables est étudiée pour des conditions climatiques de 45°C et de 92% d'humidité relative. Ces données complémentaires permettront de qualifier/quantifier l'augmentation de la durée de vie lorsque des armatures en acier inoxydables remplacent les armatures en acier carbone.

V.2.3 Corrosion du béton armé à l'échelle réelle et fiabilisation du diagnostic

Je me suis toujours souciee de faire avancer la recherche sur la corrosion des armatures dans le béton, non seulement, d'un point de vue scientifique en laboratoire mais également, d'un point de vue technique opérationnel, utile, en travaillant, par conséquent, sur des ouvrages réels. Après environ trois années de propositions, discussions, recherches de fonds, recherches d'ouvrages, j'ai réussi à établir une convention de coopération de recherches. Cette convention est intitulée DéCoF-Ré (Décision Corrosion Fiability – pont de l'île de Ré) et l'ouvrage est donc le Pont de l'île de Ré (Figure V-2). L'objectif principal de ce projet est de fiabiliser et d'optimiser le diagnostic de corrosion sur ouvrage et ce, dans un but d'aide à la décision. Ce projet regroupe une vingtaine de personnes de six organismes : l'Ifsttar, le Cerema (Dter Ouest et DTecITM IdF), l'Université de Nantes, sa filiale Capacités SAS, l'industriel

Concrete et le département de Charente-Maritime. Le budget est d'environ un million d'euros sur trois ans.



Figure V-2 : Pont de l'île de Ré (crédit photo : S. Pasquet, Cerema)

En 2015, les piles du pont de l'île de Ré (Figure V-2), corps d'épreuve à l'échelle un, feront l'objet d'un ensemble de mesures (détection des armatures, cartographie de potentiels, cartographie de résistivités, mesures de vitesse de corrosion) de manière à fournir un diagnostic de corrosion très complet de l'ouvrage (environ 50% des piles, deux faces par pile, trois zones de mesures par face (dimensions hauteur 1m et largeur 1m85). En 2016 le diagnostic de corrosion prendra en compte les paramètres des saisons et de durée temporelle. En 2017, d'autres mesures viendront compléter l'aspect temporel (notamment en vitesse de corrosion). En parallèle à la thèse, des carottages seront réalisés et une étude sur la durabilité de l'ouvrage sera menée.

La collecte importante de l'ensemble de ces données permettra de travailler selon deux axes.

Dans le premier axe de recherche, il s'agira de fiabiliser les données en prenant en compte les biais de mesures (protocole, opérateur, conditions de bateau, séchage, etc.). Le fait que les données acquises à marée montante ou descendante puissent conduire à des résultats différents sera étudié par exemple. Autre point important : la complémentarité des mesures sera analysée en termes de convergence de résultats de diagnostic. En utilisant différents types d'analyse numérique telles que les analyses de dispersion et de corrélation des mesures et l'analyse de la représentativité et de la fiabilité des résultats, la connaissance des limites de ces mesures, de leur représentativité suivant l'élément considéré (et son état de dégradation), de l'impact des aléas (matériau, exposition, climatique (température et humidité) et de l'impact temporel seront apportées.

Dans le second axe, il s'agira dans un premier volet, de réfléchir à l'impact d'un enrichissement / appauvrissement de données pour dimensionner avec un certain équilibre le diagnostic de corrosion. Dans un deuxième volet, la fusion des données sera utilisée pour classifier les piles de l'ouvrage (par exemple pour déterminer si la pile est saine ou corrodée). Dans un troisième volet, une analyse supervisée des données pourra permettre de proposer des évolutions qui pourront être accompagnées de propositions d'aide à la décision pour le maître d'ouvrage en termes de maintenance et/ou réparation.

En tant qu'animatrice de ce projet, je m'appuie très fortement sur les compétences de diagnostic de corrosion du Cerema, de Concrete et de l'Ifsttar, des compétences numériques de l'Université de Nantes, de Capacités SAS et de l'Ifsttar, de la connaissance de l'ouvrage du département de Charente-Maritime et du travail du doctorant L. Bourreau recruté en novembre 2014 (thèse CIFRE Concrete).

En parallèle à ce travail de thèse, l'ouvrage ayant maintenant 27 ans, nous réaliserons une étude de durabilité du matériau béton qui apportera des éléments sur la carbonatation, la pénétration des ions chlorure, les caractérisations mécaniques et les témoins de durée de vie, principalement. Ces résultats

de durabilité seront mis en regard des résultats de corrosion. Ils seront également confrontés à d'autres résultats de durabilité du Projet National PERFDUB⁹⁾.

La soutenance de thèse de L. Bourreau est prévue en 2017.

V.2.4 Modélisation de l'interface acier/béton en vue de prédire la fissuration et la cartographie d'endommagement

Dans le cadre d'un contrat cadre entre l'Ifsttar et l'Andra, je participe avec mes collègues de l'Ifsttar, à l'encadrement de la thèse d'O. Loukil intitulée "Etude expérimentale et numérique de la dégradation par corrosion d'éléments structurels en béton armé". Les objectifs de cette thèse sont triples. Je pilote le premier objectif à savoir l'étude de corrosion anodique de corps d'épreuve en béton armé (dimensions L50x10xH12,5 cm, environ 20 kgs) pour suivre la dégradation de l'interface acier/béton et la fissuration du béton engendrée en fonction des paramètres de densité de courant de corrosion et de durée de corrosion anodique. Dans le deuxième objectif, L. Adelaïde gère les aspects numériques avec la modélisation de l'interface acier/béton en prenant en compte le gonflement des oxydes afin de décrire l'endommagement et de caractériser les faciès de fissurations. Dans le troisième objectif, M. Quiertant, supervise l'étude mécanique avec des essais de pull-out et des essais de flexion conduits sur des éléments structurels (poutrelles de dimensions L100x125xH10cm, environ 80 kgs) en fonction de différents taux de corrosion contrôlés.

La soutenance de thèse d'O. Loukil est prévue en 2017.

V.3 Recherches à long terme (10 ans)

La corrosion est un phénomène qui doit être étudié sur plusieurs dizaines d'années : connaissance de la cause et détermination des phases de corrosion (initiation, propagation, fissuration) puis, du diagnostic et enfin, de la réparation.

L'Ifsttar reste l'un des rares instituts publics qui permettent de réaliser des études de recherche sur de longues durées et en adéquation avec la gestion des structures en béton armé. En tant que chercheur de cet institut, je vais donc pouvoir me projeter dans le futur avec des travaux de recherche déclinés selon quatre axes.

Dans le premier axe, je vais poursuivre l'étude de la résistance du béton armé vis-à-vis de la corrosion sur une échelle d'une dizaine d'années, dans le cadre de projets nationaux et internationaux.

Dans le second axe, je souhaite enrichir l'expérience française en termes de réparation d'ouvrages à l'aide de traitement électrochimiques et confronter cette expérience à celle de l'Europe et du monde.

Dans le troisième axe, nouveau pour moi, je veux m'impliquer dans la gestion du patrimoine des ouvrages vieillissants de génie civil. Pour cela, je vais m'entourer de partenaires numériques et modélisateurs qui peuvent apporter un complément aux résultats expérimentaux que je suis en mesure de fournir. Ensemble, nous pourrions proposer une aide à la classification et à l'analyse des risques et par conséquent aider le maître d'ouvrage dans son métier de gestionnaire.

Enfin, dans le quatrième axe, je vais mettre en place des formations de type cours académiques et/ou classes de formation continue car je me suis rendue compte que l'aspect pédagogie jouait un grand rôle dans les décisions prises par les différentes professions, maîtrise d'ouvrages, bureaux d'étude, laboratoires, scientifiques, etc, et qu'il était donc primordial de disséminer les connaissances acquises lors des études de recherches.

V.3.1 Suivi de la corrosion du béton armé sur le long terme

Pour décrire la résistance du béton armé vis-à-vis de la corrosion, je m'intéresse aux phénomènes d'initiation, de propagation, de fissuration et finalement de ruine. La plupart des projets de recherches portent sur une durée de 2 à 4 ans et pour satisfaire à cette durée, l'étude de la résistance du béton armé vis-à-vis de la corrosion implique généralement une accélération des phénomènes.

⁹⁾ Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton

En site réel, lorsque les ouvrages sont soumis à des ambiances agressives, la corrosion des armatures se déclare en moyenne au bout d'une vingtaine d'années. Il me semble donc important de prendre cette échelle de temps de dégradation en compte et ce de trois manières : (i) le suivi de la corrosion d'éléments structurels entreposés en vieillissement naturel, (ii) le suivi de la corrosion de dalles en béton armé instrumentées avec des capteurs noyés afin d'alerter le gestionnaire de l'apparition des dégradations et de faire de la prédiction de durée de vie et de la gestion de réseaux d'ouvrages et (iii) l'étude d'ouvrages réels. De plus, la comparaison des résultats entre essais accélérés et vieillissement naturel pourra conforter la validité des interprétations formulées à partir des premiers résultats.

V.3.1.1 Corrosion du béton armé dans son environnement naturel

Pour étudier la corrosion d'éléments structurels dans leur environnement naturel et par conséquent sans accélération des phénomènes, nous disposons de deux sites. Le premier site, dont la logistique est assurée par l'Ifsttar (R-P. Martin), est situé à Guerville en région parisienne (78) et représente un environnement de type rural. Le second site, représentatif d'un environnement marin est situé à La Rochelle (17)¹⁰.

J'ai fabriqué (avec l'aide de R-P. Martin de l'Ifsttar) des poutrelles en béton armé (dimensions 100x25x10 cm avec deux armatures HA20, CEM I). Une dizaine d'entre elles sont entreposées à Guerville depuis 2012 afin d'étudier la carbonatation en milieu naturel (Figure V-3a). Deux autres poutrelles (l'une avec des aciers au carbone et l'autre avec des aciers inoxydables) sont entreposées à La Rochelle depuis 2013 pour étudier la corrosion naturelle en milieu marin (Figure V-3b). Je réalise, annuellement, les caractérisations électrochimiques de suivi de la corrosion des armatures de l'ensemble de ces corps d'épreuve.

Cette nouvelle activité sera également considérée dans le projet National PERFDUB avec la fabrication de nouveaux corps d'épreuve avec des formulations de béton plus larges et des zones d'exposition qui pourront refléter l'ensemble des classes de durabilités (XO, XC, XD, XS).

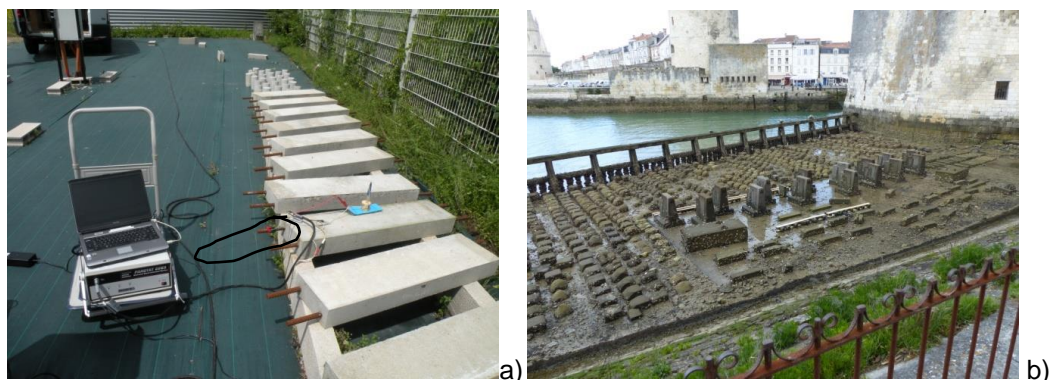


Figure V-3 : Poutrelles en béton armé entreposées en vieillissement naturel a) Zone rurale à Guerville (crédit photo : P. Boujard, Ifsttar) b) Zone de marnage à La Rochelle (crédit photo: V. Bouteiller, Ifsttar).

De plus, je pense poursuivre l'étude d'ouvrages réels. Le pont de l'île de Ré fera l'objet de nouvelles investigations dans quelques années pour confronter les éléments de la prédiction de durée de vie obtenus pendant le projet DéCoF-Ré et le PN PERFDUB.

V.3.1.2 Corrosion Health Monitoring

Au même titre que les ouvrages sont suivis par des instrumentations à finalité mécaniques ou vibratoires (Structural Health Monitoring), je pense qu'il serait également pertinent de les instrumenter avec des

¹⁰ Le site est "géré" par l'Université de La Rochelle.

capteurs de suivi de corrosion. Quelques ouvrages neufs précurseurs ont été instrumentés avec des capteurs de corrosion : Pont Vasco de Gama (Portugal), Viaduc de Volestvres (France) (Figure V-4).

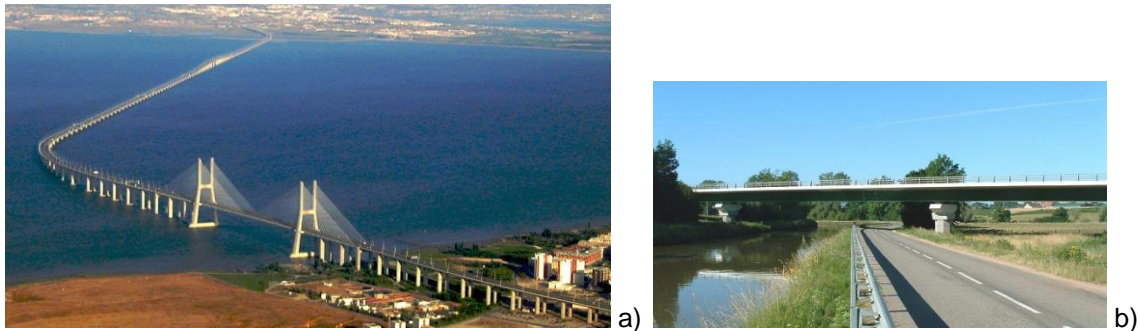


Figure V-4 : Ouvrages instrumentés à la construction à l'aide de capteurs de corrosion a) Pont Vasco de Gama (Portugal) et b) Viaduc de Volestvres (France) – (Crédit photo Internet)

Depuis 2013, j'ai co-animé deux projets d'instrumentation de dalles en béton armé avec des capteurs noyés. Le premier projet, ORSI APOS¹¹⁾ (en collaboration avec le Cerema Dter Ouest) porte sur la corrosion d'un treillis d'armature de béton pollué par des ions chlorure. Le deuxième projet, CANOPEE¹²⁾ (en collaboration avec le LRMH, projet Dim-Oxymore) porte sur la corrosion d'un treillis d'armature de béton pollué par carbonatation. Les capteurs noyés utilisés permettent d'appréhender la corrosion des armatures, avec premièrement la mesure du potentiel de l'armature (2 sondes ERE20), deuxièmement la mesure de la résistance du béton (MRE) et enfin la vitesse de corrosion de barreaux en acier (Anode Ladder) (Figure V-5). Ces deux dernières mesures sont obtenues selon un profil d'enrobage. Pour chaque projet, une dizaine de dalles en béton armé de dimensions voisines du m² avec des épaisseurs de 7 ou 13 cm ont été fabriquées en 2013 et en 2015 (Figure V-6). La formulation de béton repose sur deux ciments CEM I et CEM III (avec laitiers de haut fourneau).

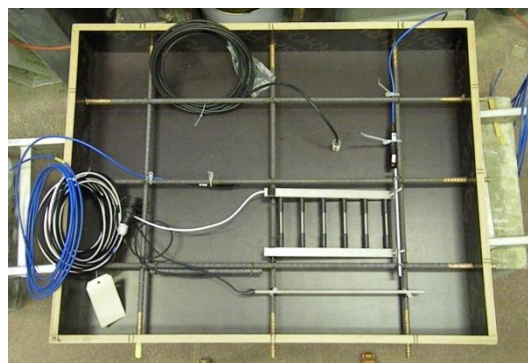


Figure V-5 : Exemple de dalle instrumentée avec des capteurs de corrosion (ORSI APOS)- (crédit photo: V. Bouteiller, Ifsttar).

¹¹⁾ APOS : Auscultation pour des Ouvrages Sûrs

¹²⁾ CANOPEE : CApteurs NOyés vs Potentiels-rEsistivitE-polarisation : suivi in situ de la corrosion des armatures dans les bétons carbonatés



Figure V-6 : Corps d'épreuve du projet CANOPEE - (crédit photo: V. Bouteiller, Ifsttar).



Figure V-7 : Mesures électrochimiques de corrosion réalisées sur le parement d'une dalle en béton armé avec des ions chlorure (crédit photo: V. Bouteiller, Ifsttar).

Les mesures de ces capteurs en fonction du temps permettront d'alerter le maître d'ouvrage sur la dégradation du béton armé et d'indiquer la période à laquelle un diagnostic de corrosion complet doit être réalisé. En parallèle, des mesures électrochimiques de corrosion seront réalisées sur le parement béton des dalles (Figure V-7). L'ensemble de ces informations permettra de mieux gérer l'ouvrage ou le réseau d'ouvrages en fonction non seulement des éléments techniques mais également budgétaires.

Actuellement, j'essaie de trouver un financement sur ces deux projets (avec le Cerema et le LRMH) et de préférence dans le cadre d'un programme européen afin de partager les retours d'expérience dans ce domaine avec d'autres laboratoires (LNEC (Portugal), Université de Aachen IBAC (Allemagne), IETcc (Espagne), par ex).

V.3.2 Traitements électrochimiques pour la réparation du béton armé

La corrosion des armatures du béton armé est un phénomène électrochimique et je pense que les réparations électrochimiques sont très pertinentes pour contrecarrer cette dégradation. Les résultats de mes travaux tant au laboratoire que sur site le laissent présager. De plus, d'après les résultats du projet européen Conrepnet, la durabilité des traitements électrochimiques pourrait se révéler supérieure à celles des réparations traditionnelles (parce qu'il n'y a pas d'effet de pile résiduel).

Les traitements électrochimiques sont utilisés depuis les années 80 mais excepté en Grande Bretagne, en Norvège et aux Pays-Bas, ils restent peu utilisés en Europe.

Je scinde les réparations électrochimiques en deux ensembles : les traitements électrochimiques temporaires (déchloration, réalcalinisation) et les traitements électrochimiques permanents (protection cathodique (PC)). Dans ce dernier ensemble, j'estime qu'il faut étudier séparément et de manière dédiée la PC par courant imposé et la PC par anode sacrificielle.

J'ai co-piloté une recherche de douze mois sur un chantier pilote de protection cathodique par courant imposé par anodes noyées sur le Viaduc de Saint-Cloud (actuellement en cours de réparation généralisée) et j'ai démarré un travail avec une équipe du Cerema DTer IdF sur la modélisation de cette réparation sur des dalles en béton armé au laboratoire.

Je vise à long terme un projet ambitieux, pour rendre ces traitements électrochimiques de réparation plus "légitimes" (Figure V-8). Avec cette finalité, je propose d'apporter des données pour optimiser le design des procédés, de mieux démontrer leur efficacité et leur durabilité (besoin d'outils analytiques et numériques), d'évaluer l'impact en terme de coût, et enfin de faire évoluer les mentalités et par conséquent les marchés.

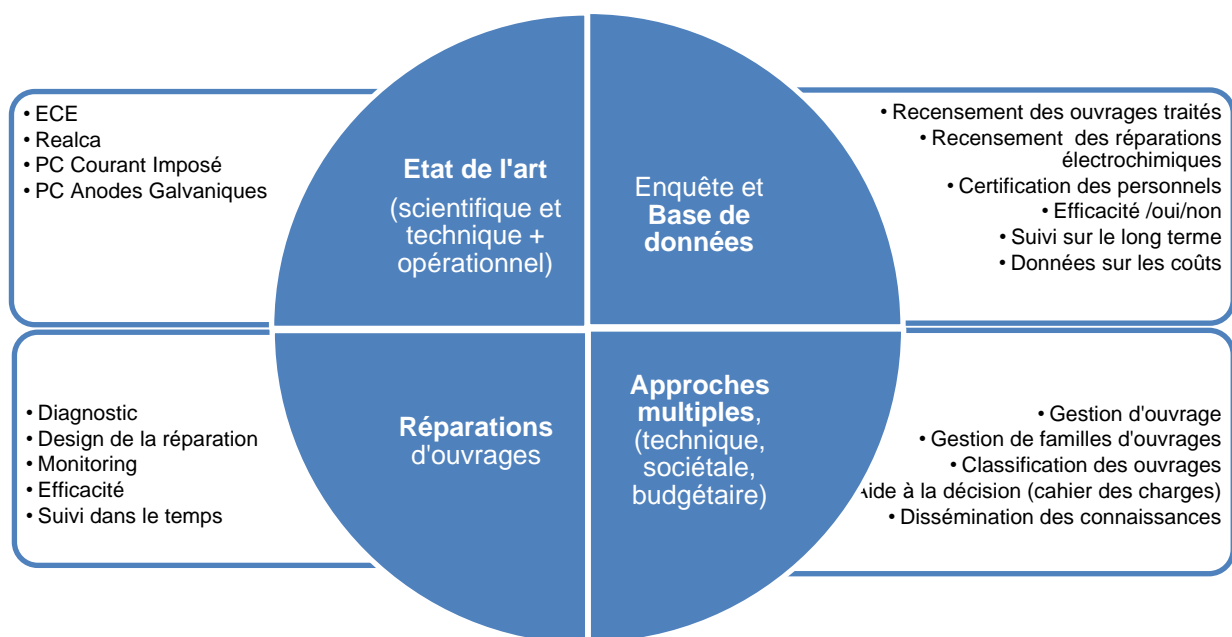


Figure V-8 : Proposition de projet sur les traitements électrochimiques pour la réparation des bétons armés dégradés par corrosion.

Les partenaires potentiels à ce projet pourraient être :

- en France : Ifsttar, LRMH, LMDC, CEA, Andra, Maîtres d'Ouvrages, Renofors, Freyssinet, ...
- en Espagne : IETcc
- au Portugal : LNEC
- aux Pays-Bas : TNO
- en Italie : Université de Milan
- en Suède : Force Technology
- au Danemark : CPI
- en Norvège : Université de Trondheim et de Tromsø
- Dans le monde : Etats-Unis, Japon, Australie

V.3.3 Gestion des ouvrages et analyse des risques

De plus en plus, je fais en sorte que mes résultats expérimentaux puissent être couplés à des résultats numériques et à de la modélisation dans le cadre de travaux collaboratifs. Cette synergie expérimental/numérique devrait combler certaines lacunes dans le domaine des lois de comportement et de la validation des paramètres influents, et également apporter des données d'entrées pour la prédiction de la durée de vie des structures.

Je souhaite, de plus, m'impliquer dans une nouvelle orientation qui vise la gestion des ouvrages et l'analyse des risques.

V.3.3.1 Gestion

Je vais travailler en partenariat, à l'élaboration d'outils d'analyse et de gestion d'ouvrages ou de réseaux d'ouvrages, en termes de corrosion, pour venir en appui aux conseils départementaux par exemple (Figure V-9).

L'approche basée uniquement sur les mesures pourra permettre de définir des métriques pour exploiter des bases de données, pour faire de la classification (pile d'ouvrage corrodée ou saine par ex.), et de la détection d'une évolution (initiation de la corrosion ou propagation par ex.).

L'information de type "données" pourra être agrégée à des "concepts". Les données classiques pourront être traitées comme des données symboliques.

L'approche basée sur "les mesures et un modèle" me paraît très prometteuse en termes d'actualisation de données. Elle permettrait par exemple de répondre à la question suivante : combien d'essais, de prélèvements, de points de mesure sont nécessaires et/ou suffisants pour améliorer la connaissance d'un paramètre ? Elle permettrait également de pouvoir recalculer de manière fiable le comportement d'une structure (évolution dans le temps d'une structure saine et/ou corrodée).

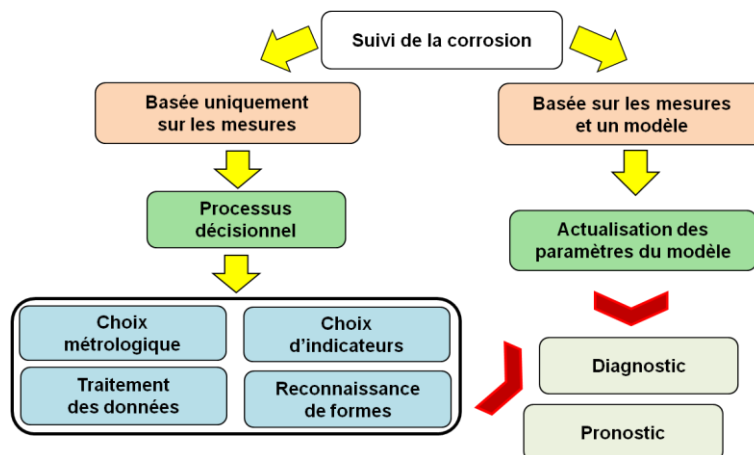


Figure V-9 : Démarche pour une meilleure gestion des ouvrages d'art en intégrant les mesures de corrosion (d'après A. Orcesi, Ifsttar).

V.3.3.2 Analyse de risques

Ce travail est basé sur des réflexions menées par le CETE de l'Ouest et qui sont maintenant déployées dans le cadre du groupe de travail "Inspections ciblées" piloté par le Cerema.

Le principe de l'analyse de risque peut-être illustré par la Figure V-10 avec :

- Aléa : phénomène naturel à l'origine du risque pouvant se produire ou non au cours de la vie de l'ouvrage
- Vulnérabilité : sensibilité de la structure à l'aléa
- Enjeux : importance des conséquences de la manifestation de l'aléa

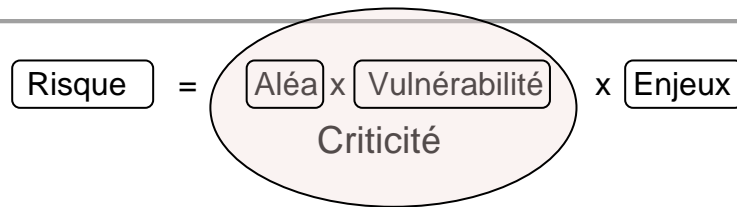


Figure V-10 : Principe d'analyse de risques.

Les différentes étapes de l'analyse de risque de structures en béton armé dégradées par corrosion sont illustrées sur la Figure V-11 (proposition A. Orcesi, Ifsttar).

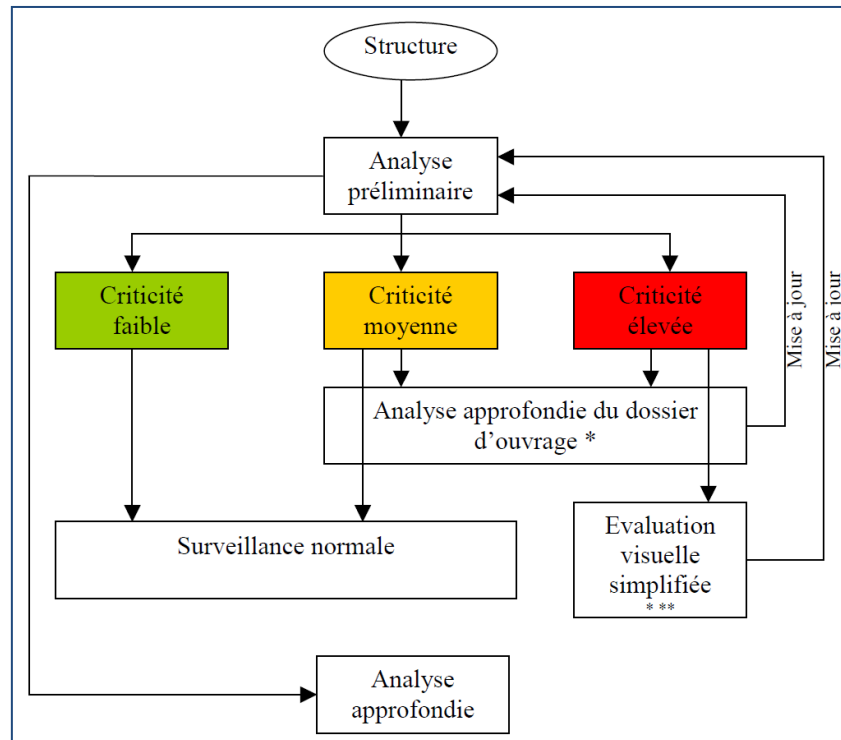


Figure V-11 : Proposition de schéma d'étude d'analyse de risques (A. Orcesi, Ifsttar)

L'analyse de risque qualitative porte sur les dégradations du béton armé. En supposant une dégradation par corrosion, plusieurs modes de défaillance peuvent être envisagés : corrosion due à la carbonatation ou corrosion due aux ions chlorures, ou ...;

L'analyse préliminaire consiste à étudier un nombre limité d'information (plans d'ouvrages, résultats des contrôles, rapports d'inspection) et à visiter l'ouvrage (reconnaissance rapide) [4].

Pour un mode de défaillance donné, évaluer le niveau d'aléa revient à décliner l'ensemble des agressivités (l'agressivité chimique de l'environnement, l'agressivité mécanique de l'environnement, etc.) et de les pondérer "à dire d'expert" pour présenter des niveaux d'aléa allant de "faible" à "moyen" à "élevé". Toujours dans ce même mode de défaillance, évaluer le niveau de vulnérabilité demande de prendre en compte des paramètres tels que l'enrobage, la fonction de classe d'exposition, les paramètres du matériau, etc. de manière à classer de les niveaux de vulnérabilité de "faible" à "moyen" à "élevé". A l'issue de cette première analyse "légère", la criticité (pour un mode de défaillance et pour une partie d'ouvrage) peut alors être renseignée en croisant les niveaux d'aléas et de vulnérabilité (Figure V-12).

Criticité		Niveau d'aléa		
		Faible	Moyen	Élevé
Niveau de vulnérabilité	Faible	Faible	Faible	Moyenne
	Moyen	Faible	Moyenne	Élevée
	Élevé	Moyenne	Élevée	Élevée

Figure V-12 : Evaluation de la criticité (A. Orcési, Ifsttar)

Dans une deuxième phase, une analyse ciblée qui s'appuie sur des investigations spécifiques réalisées sur la structure peut permettre d'identifier les risques privilégiés de dégradation. Les résultats de cette deuxième analyse peuvent également permettre de hiérarchiser les structures selon leur criticité vis-à-vis d'un mode de défaillance et finalement de programmer des actions de suivi et de maintenance préventive et/ou curative [5, 6].

V.3.4 Dissémination des connaissances

Dans le but d'aider les différents acteurs (propriétaires et gestionnaires d'ouvrages, maitres d'œuvre et prescripteurs, ingénieurs des entreprises, fournisseurs de procédés, ingénieurs de laboratoires d'étude et/ou de contrôle, intervenants dans la normalisation, étudiants...), un effort particulier sur la communication de l'ensemble des résultats obtenus en recherche et de leur utilisation dans des contextes scientifiques, normatifs et applicatifs sur ouvrages est nécessaire étant donné nos objectifs communs de meilleure gestion du patrimoine et de partage de bonnes pratiques.

Actuellement, je valorise l'ensemble de mes travaux au travers de différentes missions avec des publics très variés :

- mission scientifique : publications, congrès (Eurocorr, Concrete Solutions, International Congress on Durability of Concrete Structures, Non Destructive Techniques, International Congress Concrete Under Severe Conditions, ...) ;
- mission normative : groupe miroir CEFRAFOR-AFNOR pour les traitements électrochimiques ;
- mission technique : articles, congrès (Journées Ouvrage d'Art, Club ouvrage d'art, Journées Rencontre CEFRAFOR,...) ;
- mission d'enseignement (élèves ingénieurs en 3^{ème} année de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et doctorants Ifsttar dans le cadre de l'école doctorale SIE à l'UPEC).

Pour consolider cette mission, je souhaite proposer deux nouvelles formations. La première formation visera un public de professionnels, via les formations "Ponts Formations Conseils" avec un support de cours dédié. La deuxième formation sera destinée aux personnels du réseau scientifique et technique du ministère. Je mettrai un accent particulier sur l'aspect plus opérationnel avec un support de cours accompagné de travaux pratiques sur corps d'épreuve au laboratoire ou directement sur site. Pour cette deuxième formation, j'ai commencé à élaborer une trame avec mes collègues du Cerema.

V.4 Références

- [1] Richard B. Thèse Modélisation d'éléments de structure en béton armé dégradés par corrosion : la problématique de l'interface acier/béton en présence de corrosion: Université Paris Est; 2010.
- [2] Richard B, Quiertant M, Bouteiller V, Adelaide L, Tailhan J-L, Cremona C. Influence of accelerated corrosion on the reinforced cover concrete cracking behavior: experimental and numerical study. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2012;16(3-4):450-9.
- [3] Otieno MB, Beushausen HD, Alexander MG. Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures – A critical review. Cement and Concrete Composites. 2011;33(2):240-5.
- [4] Orcesi AD, Cremona C. Projet national S3 - Surveillance de santé structurale des ouvrages 2012.
- [5] Courtois A, Genest Y, Diday E, Orcesi AD. In service inspection and monitoring of reinforced concrete draught cooling towers – EDF's practice and feedback IALCCE'12

Vienna, Austria2012.

[6] Afonso F, Diday E, Badez N, Genest Y, Orcesi AD. Use of symbolic data analysis for structural health monitoring applications. IALCCE'10. Taipei, Taiwan 2010.

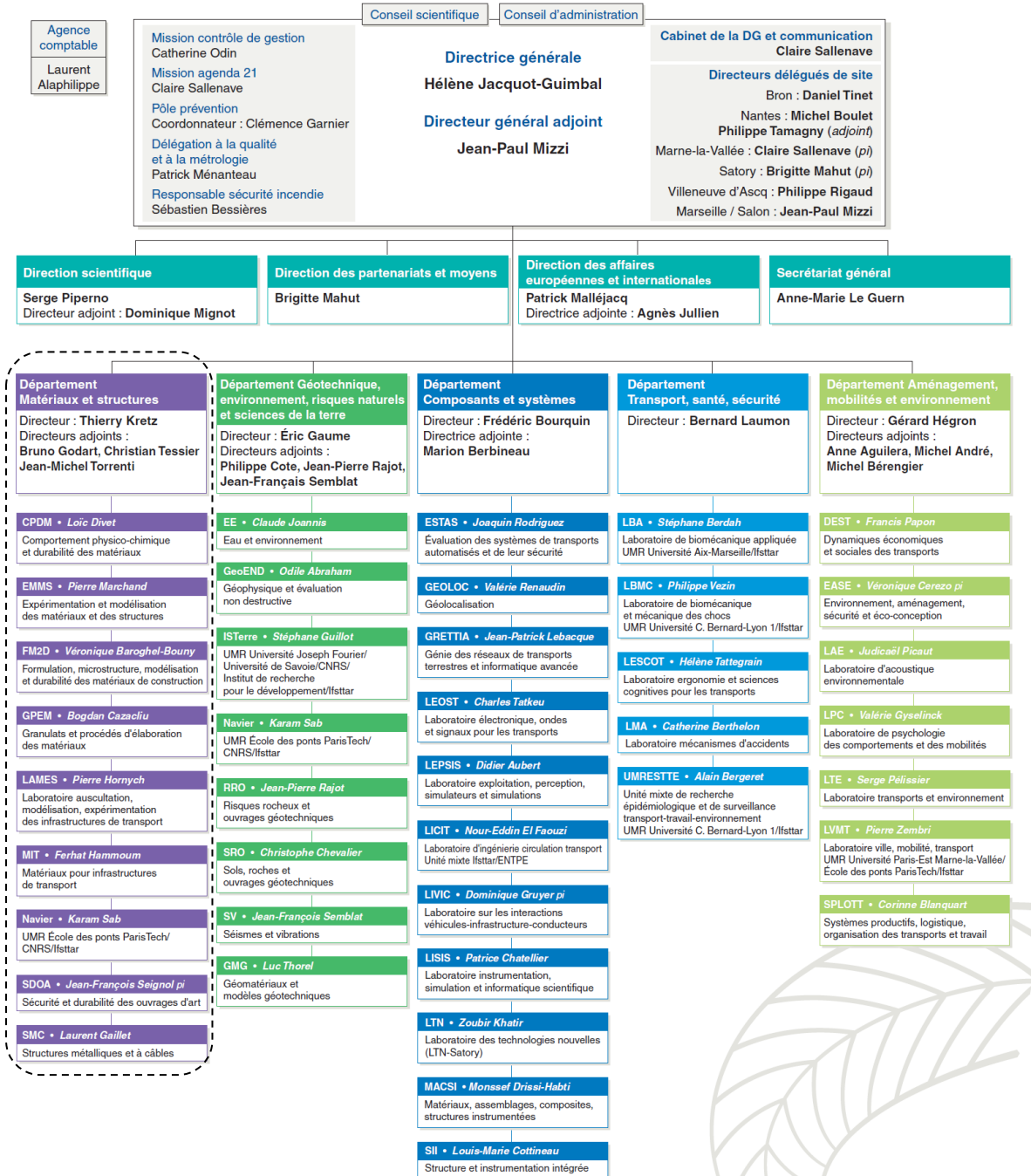
Annexe 1 : Organigramme général de l'Ifsttar



IFSTTAR

Organigramme général

Juillet 2015



Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
14-20, boulevard Newton - Cité Descartes, Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée CEDEX 2
Tél. : +33 (0)1 81 66 80 00 • www.ifsttar.fr

Annexe 2 : Organigramme des départements de l'Ifsttar

Organisation des départements

Juin 2015



Département Matériaux et structures (MAST)
Directeur : Thierry Kretz Directeurs adjoints : Bruno Godart, Christian Tessier, Jean-Michel Torrenti Pôle administratif : Valérie Fournier
CPDM Comportement physico-chimique et durabilité des matériaux Loïc Divet • Thierry Chaussadent, adj.
EMMS Expérimentation et modélisation des matériaux et des structures Pierre Marchand, Florent Baby et Renaud-Pierre Martin, adj.
FM2D Formulation, microstructure, modélisation et durabilité des matériaux de construction Veronique Banghel-Boumy • Teddy Fen-Chong, adj.
GPDM Granulats et procédés d'élaboration des matériaux Bogdan Cazadiu • Patrick Richard, adj.
LAMES Laboratoire auscultation, modélisation, expérimentation des infrastructures de transport Pierre Horrych
MIT Matériaux pour infrastructures de transport Ferhat Hammoum • Thierry Sedran, adj.
Navion UMR ENPC/CNRS/Ifsttar Karam Sab • François Chevoir, adj.
SDCA Sécurité et durabilité des ouvrages d'art Jean-François Seignol, pi.
SMC Structures métalliques et à câbles Laurent Gallie

Département Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre (GERS)
Directeur : Éric Gaume Directeurs adjoints : Philippe Cole, Jean-Pierre Rajot, Jean-François Sembilat Pôle administratif : Jeanmine Leroy
EE Eau et environnement Claude Joannis • Veronique Ruban, adj.
GeoEND Géophysique et évaluation non destructive Odile Abraham
GMC Géomatériaux et modèles géotechniques Luc Thorel • Thierry Dubreucq, adj.
IS Terre UMR Université Joseph Fourier/ Université de Savoie CNRS/Institut de recherche pour le développement/Ifsttar Stéphane Guillot
Navion UMR ENPC/CNRS/Ifsttar Karam Sab • François Chevoir, adj.
RRO Risques rocheux et ouvrages géotechniques Jean-Pierre Rajot
SRO Sols, roches et ouvrages géotechniques Christophe Chevalier
SV Séismes et vibrations Jean-François Sembilat

Département Composants et systèmes (COSYS)
Directeur : Frédéric Bourquin Directrice adjointe : Marion Berbineau Pôle administratif : Annick Bertrand
ESTAS Évaluation des systèmes de transports automatisés et de leur sécurité Joaquin Rodriguez
GEOLOC Géolocalisation Valérie Renaudin
GRETTIA Géné des réseaux de transport terrestres et informatique aérospatiale Jean-Patrick Lebacqz • Régine Seidowsky, adj.
LEOST Laboratoire électronique, ondes et signaux pour les transports Charles Tatkeu
LEPSPIS Laboratoire exploitation, perception, simulateurs et simulations Didier Aubert • Éric Dumont, adj.
LICIT Laboratoire d'ingénierie circulation transport, UMR Ifsttar/ENTPE Nour-Eddin El Fouzi
LIVIC Laboratoire sur les interactions véhicules-infrastructure-conducteurs Dominique Gruyer, pi. • Olivier Orfila, adj. pi.
ISIS Laboratoire instrumentation, simulation et informatique scientifique Patrice Châtellier • François Derx, adj.
LTN Laboratoire des technologies nouvelles Zoubir Khairi
MACSI Matériaux, assemblages, composites, structures instrumentées Monsef Drissi-Habti
SII Structure et instrumentation intégrée Louis-Marie Cottineau • Vincent le Cam, adj.

Département Transport, santé, sécurité (TS2)
Directeur : Bernard Laumon Pôle administratif : Patricia Chapuis
LBA Laboratoire de biomécanique appliquée UMR Université Aix-Marseille/Ifsttar Stéphane Berdah • Pierre-Jean Arnoux, adj.
LBMCM Laboratoire de biomécanique et mécanique des chocs UMR Université C. Bernard-Lyon 1/Ifsttar Philippe Vezin • Laurence Cheze, adj.
LESCOT Laboratoire ergonomie et sciences cognitives pour les transports Hélène Tattagrain • Claude Marin-Lamellet, adj.
LMA Laboratoire mécanismes d'accidents Catherine Berthelon, Thierry Serre et Michèle Guilbot, adj.
UMRESTTE Unité mixte de recherche épidémiologique et de surveillance transport-travail-environnement UMR Université C. Bernard-Lyon 1/Ifsttar Alain Bergeret, Martine Hours et Jean-Louis Martin, adj.

Département Aménagement, mobilité et environnement (AME)
Directeur : Gérard Hégron Directeurs adjoints : Anne Aguilera, Michel André, Michel Bérangier Pôle administratif : Alexandra Richard
DEST Dynamiques économiques et sociales des transports François Papon • Laurent Hivert, adj.
EASE Environnement, aménagement, sécurité et éco-conception Veronique Cerezo, pi.
LAE Laboratoire d'acoustique environnementale Judicaël Picaut • Joël Lelong, adj.
LPC Laboratoire de psychologie des comportements et des mobilités Valérie Gyselinck
LTE Laboratoire transports et environnement Serge Pelissier
LVMT Laboratoire ville, mobilité, transport, UMR Université Paris-Est Marne-la-Vallée/ École des ponts Paris/Ifsttar Pierre Zanetti • Olivier Bonin et Fabien Leurent, adj.
SPLOTT Systèmes productifs, logistique, organisation des transports et travail Corinne Blanquart



Sites	
Champs-sur-Marne	01 81 66 80 00
Bron	04 72 14 23 00
Nantes	02 40 84 58 00
Satory	01 30 84 40 00
Villeneuve d'Ascq	03 20 43 83 43
Grenoble	04 76 63 52 00
Marseille	04 91 65 80 00
Salon-de-Provence	04 90 56 86 30

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
14-20, boulevard Newton - Cité Descartes, Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée CEDEX 2
Tél. : +33 (0)1 81 66 80 00 • www.ifsttar.fr

Annexe 3 : Organigramme du Laboratoire Sécurité et Durabilité des Ouvrages d'Art (SDOA) – 08/2015

Jean-François SEIGNOL : Chef de laboratoire (par intérim)
Minh ORCESI : Secrétaire

Cadres de recherche

Lucas ADELAÏDE ^{a)}
Véronique BOUTEILLER ^{b)}
Anne-Sophie COLAS ^{c)}
Cédric DESPREZ ^{d)}
André ORCESI
Claude ROSPARS
Franziska SCHMIDT

Technicienne

Nina COULATY-CHIN ^{b)}

Doctorants

Lucas BOURREAU ^{b)}
Sophie CAPDEVIELLE ^{d)}
Claire LIMOGE ^{d)}
Oifa LOUKIL ^{a) b)}
Omar MORENO REGAN ^{c)}
Adam OUMAROU ^{b)}
Benjamin TERRADE ^{c)}
Yolaine TISSIER ^{b)}

Invité

Yuichiro KAWABATA (Japan)

Annexe 4 : Sigles

ANR	Agence Nationale de la Recherche
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CEBTP	Centre d'Expertise du Bâtiment et des Travaux Publics
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CETMEF	Centre d'Etude Technique de la mer et des eaux fluviales
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Batiment
CSTC	Centre Scientifique et Technique de la Construction, Belgique
DRAST	Direction des Recherches des Affaires Scientifiques et Techniques
EDF	Electricité de France
FIB	Fédération Internationale du Béton
IETcc	Instituto Eduardo Torroja, Espagne
IQOA	Image de la Qualité des Ouvrages d'Art
LERM	Laboratoire d'Etudes et de Recherches Matériaux
LISE	Laboratoire des Interfaces et des Systèmes Electrochimiques
LMDC	Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions
LNEC	Laboratoire National de Genie Civil, Portugal
LREP	Laboratoire Régional de l'Est Parisien
LRMH	Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques
PN	Projet National
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
SETRA	Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
SP Institute	Institut de recherches suédois

Annexe 5 : Les mesures non-destructives électrochimique pour caractériser la corrosion d'une armature dans du béton

Ci-après, je décris les trois principales mesures que j'ai utilisées afin de caractériser l'état de corrosion d'une armature dans du béton. J'explique leurs conditions d'acquisition et j'illustre par des exemples les résultats expérimentaux obtenus sur des dalles en béton armé du projet ANR APPLET (CEM I ; e/c = 0,7 ; sain (T), chloruré au gâchage (G), chloruré par immersion/séchage (I) et carbonaté (C)).

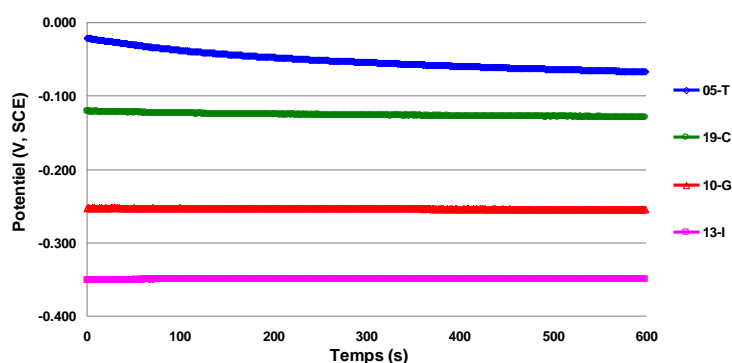
Potentiel libre

Le potentiel libre ou potentiel de corrosion, E_{corr} , correspond à la différence de potentiel entre l'armature et une électrode de référence lorsqu'aucun courant ne circule. L'unité est le mV par rapport à une électrode de référence donnée. Le potentiel libre est enregistré en fonction du temps et la valeur de E_{corr} est celle obtenue après stabilisation.

L'ASTM [1] et la RILEM [2] ont proposé des gammes de valeurs de E_{corr} qui renvoient à une probabilité de corrosion pour les bétons formulés avec un ciment de type CEM I (Portland) (Tab ci-dessous). Toutefois, le potentiel libre dépend également de l'humidité, de la carbonatation, de la teneur en ions chlorure du béton et de la teneur en oxygène, et sur ouvrage il est nécessaire de travailler en raisonnant sur des gradients de potentiels et non pas sur des valeurs seuils.

E_{corr} (mV,ECS)	Probabilité de corrosion
$E_{corr} < - 276$	Probable (>90%)
$- 276 < E_{corr} < - 126$	Incertaine
$- 126 < E_{corr}$	Peu probable (<10%)

A titre d'exemple, la figure ci-dessous illustre des courbes de potentiels libres d'armatures de dalles en béton armé entreposés en extérieur en fonction de la contamination du béton.



Exemples de courbes de potentiel libre sur des dalles en béton armé entreposées en extérieur (T sain, G ions chlorure au gâchage, I ions chlorure par immersion/séchage et C carbonatation), potentiostat Parstat 2263 [GT3-APPLET].

Résistance de polarisation linéaire

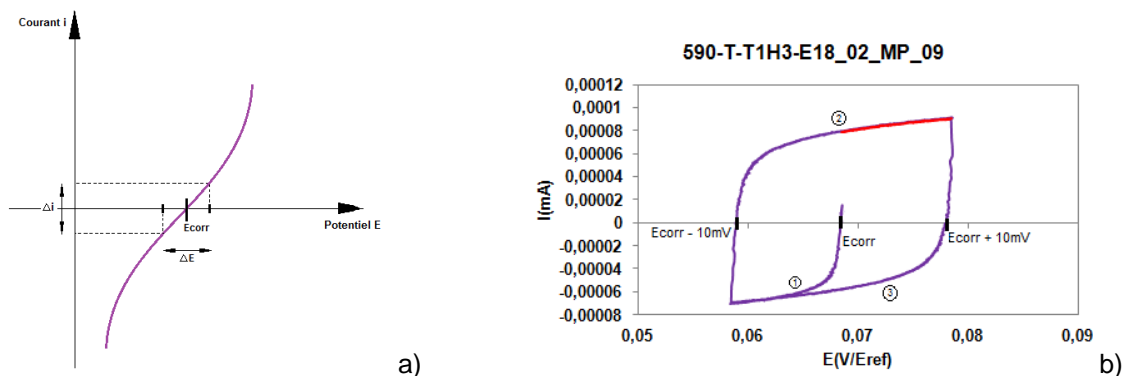
La figure ci-dessous (a) illustre une courbe potentiostatique $I=f(E)$ dans un grand domaine de potentiel. Autour du potentiel de corrosion, la courbe peut être assimilée à une droite pour laquelle :

$$\frac{1}{R_p + R_e} = \frac{\Delta I}{\Delta E}$$

Avec R_p la résistance de polarisation linéaire et R_e la résistance de chute ohmique

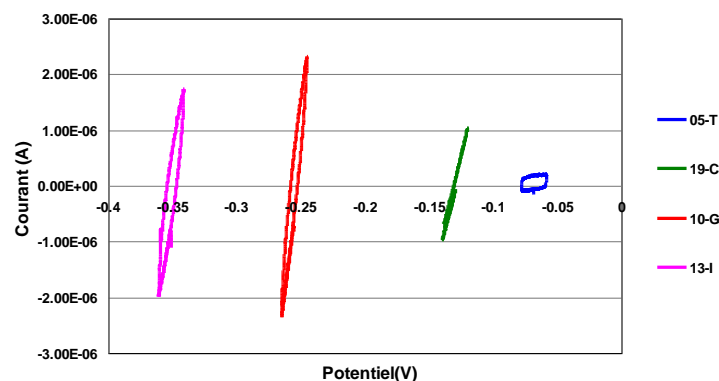
D'après la littérature, les mesures de résistance de polarisation linéaire doivent être effectuées dans un domaine de balayage en tension compris entre ± 20 mV par rapport à la valeur du potentiel libre et à des vitesses de balayage comprises entre 2,5 mV/min et 10 mV/min. Il est donc nécessaire d'établir un compromis entre les temps d'observations et la non perturbation de l'interface acier/béton que pourraient engendrer les conditions de la mesure.

De manière générale, pour les éprouvettes étudiées, j'ai utilisé un balayage en tension de ± 10 mV autour de la valeur de E_{corr} effectué en mode rampe avec une vitesse de balayage égale à 5 mV/min. L'enregistrement de l'ensemble de l'hystérèse demande 10 minutes. L'ensemble du signal mesuré permet de qualifier la non évolution du système acier/béton pendant la mesure. Pour déterminer la pente, la courbe considérée est celle comprise entre E_{corr} et $E_{corr}+10$ mV (figure ci-dessous (b), tronçon 2 en rouge). Cette courbe aurait tout aussi bien pu être considérée entre $E_{corr} - 5$ mV et $E_{corr} + 5$ mV.



Courbe de polarisation linéaire globale (a) et zoom sur la partie linéaire lors d'un essai (b).

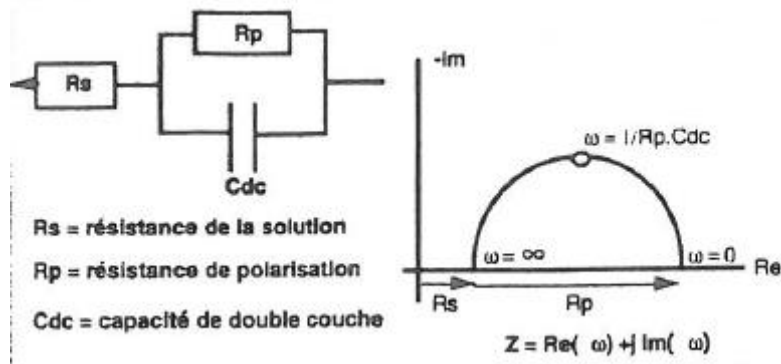
A titre d'exemple, la figure ci-dessous illustre des courbes de résistances de polarisation linéaire d'armatures de dalles en béton armé entreposées en extérieur en fonction de la contamination du béton.



Exemples de courbes de résistance de polarisation linéaire sur des dalles en béton armé entreposées en extérieur (T sain, G ions chlorure au gâchage, I ions chlorure par immersion/séchage et C carbonatation), potentiostat Parstat 2263 [GT3-APPLET].

Spectroscopie d'impédance électrochimique

Le modèle de Randles est un modèle électronique simple pour représenter le béton armé (Figure ci-dessous). La résistance "Re" intègre d'une part, le béton d'enrobage et, d'autre part, l'interface acier/béton. Elle s'exprime en ohms. La résistance Rp est la résistance de polarisation et la capacité Cdc caractérise la double couche.

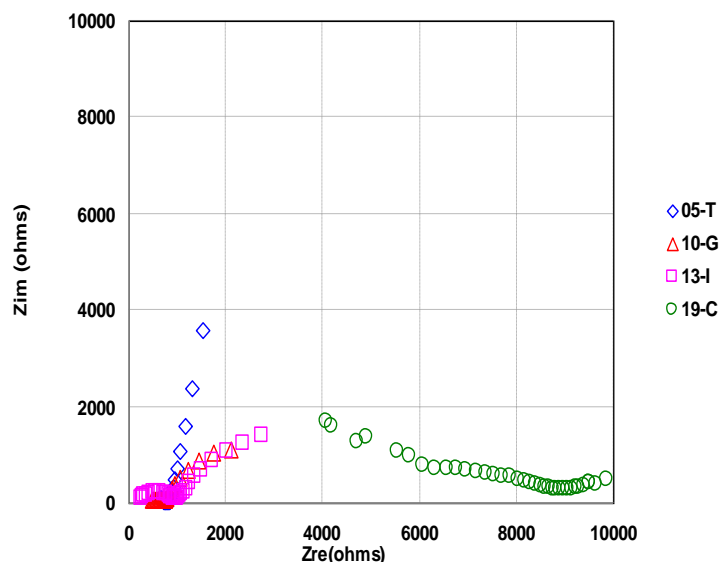


Modèle de Randles [3].

Les mesures sont réalisées pour des fréquences comprises entre 100kHz et 100μHz. La perturbation est de 5 à 10 mV. Les points sont mesurés à raison de 5 points par décade (ou plus) et la mesure est stoppée après la fréquence 39 mHz ou 100μHz si c'est la partie basse fréquence qui est intéressante.

Le diagramme de Nyquist : $-Z_{im} = f(Z_e)$ où Z_{re} et Z_{im} sont respectivement les parties réelle et imaginaire de l'impédance déterminées pour une fréquence donnée. Dans le domaine de la haute fréquence, la résistance Re est égale à la valeur de Z_{Re} pour laquelle la valeur de $-Z_{im}$ est la plus faible. La résistance Re dépend de la porosité du béton, de l'humidité, de la teneur en ions, etc.

A titre d'exemple, la figure ci-dessous illustre les courbes Nyquist d'armatures de dalles en béton armé entreposées en extérieur en fonction de la contamination du béton.



Exemples de courbes de Nyquist sur des dalles en béton armé entreposées en extérieur (T sain, G ions chlorure au gâchage, I ions chlorure par immersion/séchage et C carbonatation), potentiostat Parstat 2263 [GT3-APPLET].

Densité de courant de corrosion

La densité de courant de corrosion J_{corr} est calculée à partir de l'équation de Stern et Geary [4] :

$$J_{corr} = \frac{B}{R_p * S}$$

Elle s'exprime en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ avec :

B une constante et $B = 26 \text{ mV}$ ou 52 mV [5]

R_p la résistance de polarisation linéaire (ohm)

S la surface d'armature étudiée en cm^2 ($S = \pi d.L$)

La densité de courant de corrosion J_{corr} est une valeur instantanée assimilée à un courant de corrosion I_{corr} .

Le groupe de travail de la RILEM a proposé des gammes de courant de corrosion associées à des vitesses de corrosion¹³⁾ ($\mu\text{m}/\text{an}$) et à des niveaux de corrosion allant de négligeable à élevé [5] (tableau ci-dessous).

I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	V_{corr} ($\mu\text{m}/\text{an}$)	Niveau de corrosion
> 1	> 10	Elevé
0,5 - 1	5-10	Modéré
0,1 - 0,5	1-5	Faible
< 0,1	< 1	Négligeable

Si l'objectif est de prédire une durabilité avec le temps à partir des mesures de vitesse de corrosion, il est indispensable de réaliser des mesures régulièrement voire de mettre en place un monitoring.

REFERENCES

- [1] ASTM. C 876-09, Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM; 2009.
- [2] Elsener B. RILEM TC 154-EMC:Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion - Recommendations - Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures. Materials and Structures. 2003;36:461-71.
- [3] Keddou M. Principes et applications des techniques électrochimiques en corrosion. Matériaux et Techniques. 1994(1-2):39-45.
- [4] Stern M, Geary AL. Electrochemical polarization. I - A theoretical analysis of the shape of polarization curves. Journal of Electrochemical Society. 1957;104:56-65.
- [5] Andrade C, Alonso C. 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;37:623-43.

¹³⁾ Essentiellement à partir de données obtenues avec un matériel Gecor.