

DURÉE DE VIE DES OUVRAGES : APPROCHE PRÉDICTIVE PERFORMANTIELLE ET PROBABILISTE LE PROJET APPLLET

Christian CREMONA
MEEDDAT - CGDD

1. INTRODUCTION

Que l'on s'intéresse à la gestion des structures existantes ou à la conception de structures nouvelles, l'un des enjeux majeurs est la maîtrise de leur durée de vie tout en maintenant une garantie de réponse optimale aux exigences de performance (durabilité, aptitude au service, sécurité structurale). Les attentes des maîtres d'ouvrages, et du monde professionnel en général, les développements de la normalisation européenne sur une **approche performantielle** des ouvrages, impliquent de regrouper les efforts de différentes institutions travaillant sur ces sujets. 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 type de risques (bâtiments, édifices classés, ouvrages d'arts, déchets nucléaires, ports...), le domaine de la prédiction et de l'évaluation de la performance des ouvrages est un dénominateur commun à tous les acteurs concernés et qui doit être approché par une démarche globale et cohérente.

Satisfaire à cet enjeu, c'est avant tout se donner les moyens d'assurer le bon fonctionnement des structures dans leur environnement et tout au long de leur cycle de vie. Autrement dit, c'est concevoir des « structures durables ». C'est également se donner les outils quantitatifs et prédictifs afin d'estimer correctement les chances d'y parvenir. Ce développement durable implique d'être considéré pendant tout le processus de construction : du développement du concept initial et de la définition des exigences du maître d'ouvrage, en passant par la conception et la construction, jusqu'à la performance en service, la réhabilitation, l'extension de la durée de vie et, finalement, la démolition et le recyclage des matériaux.

Afin d'optimiser la maintenance des ouvrages, l'analyse de la performance au cours du temps, et de façon plus générale des cycles de vie des ouvrages, doit gagner en précision. Cet objectif doit être atteint par l'amélioration de la qualité et de la pertinence des données fournies par l'auscultation, par l'adaptation des modèles d'évolution de la dégradation aux conditions réelles que connaissent les ouvrages et par l'amélioration des outils d'analyse statistique. Disposer de tels modèles, méthodes et outils permettra une meilleure évaluation de la performance. La prise de décision précoce, ajustée par des informations sur site, offrira un retour sur investissement des opérations d'entretien et de réparation. Une approche prédictive performantielle et probabiliste s'appuie sur des modèles, des méthodes et des outils robustes et validés permettant ainsi des niveaux de démonstration élevés. Elle est d'autant plus importante si on s'intéresse à des durées de vie pluri-centenaires que l'on veut globalement garantir, ou si on veut évaluer une fonction précise de l'ouvrage au cours du temps. C'est notamment le cas de la gestion des déchets et des ouvrages leur étant consacrés (sites d'entreposage ou de stockage).

L'estimation de la durée de vie, en tant qu'approche prédictive, d'ouvrages neufs ou existants est donc un challenge important du secteur du génie civil. Selon les domaines d'application, cette estimation requiert des niveaux variables de compréhension des processus altérant les propriétés initiales des ouvrages. Ces niveaux de compréhension sont directement liés aux types de propriétés que l'on veut garantir ou estimer dans le temps. La compréhension des processus de vieillissement des ouvrages fait appel à des notions multi-physiques (mécaniques, chimiques, transferts) et multi-échelles (des constituants des matériaux jusqu'à l'ouvrage) intimement liées et couplées entre-elles. Ces processus multi-physiques et multi-échelles sont d'autant plus complexes si l'on tient compte, à l'échelle de l'ouvrage, de l'hétérogénéité des composants constitutifs. Les problèmes d'interface et d'inter-réactivité à long terme de ces composants constituent une partie essentielle des processus à étudier et à analyser dans le cadre de la compréhension des évolutions des ouvrages liées au vieillissement. La corrosion des armatures dans les milieux cimentaires correspond typiquement à des processus d'interface et de réactivité entre différents types de matériaux. Elle constitue l'une des principales causes de détérioration des ouvrages en béton armé.

En raison du patrimoine important d'ouvrages de génie civil en béton armé, et par conséquent du nombre de structures potentiellement dégradées, des décisions sont souvent prises en urgence sur les techniques et les moments pour les réparer. La prise en compte de l'évaluation de la durée de vie des ouvrages en béton armé à venir dimensionne fortement ceux-ci. Ces prises de décision (réparation, dimensionnement) ne peuvent être efficaces qu'en disposant de modèles d'évaluation pertinents, prédictifs et adaptatifs pour ces diverses phases de performance.

Dans le domaine de la modélisation du comportement des matériaux, de très nombreuses recherches ont déjà été réalisées, et lors du montage du projet, le **consortium APPLET** a analysé que la marge de manœuvre est très restreinte si l'on veut réellement innover dans ce domaine. Dans celui de la modélisation de la durabilité, de la fissuration et du comportement des ouvrages anciens, de nombreux travaux ont également été réalisés. Cependant, de nombreux progrès restent à réaliser dans la caractérisation expérimentale et dans la compréhension de certains mécanismes. D'un point de vue fondamental, les difficultés théoriques liées à l'apparition d'une discontinuité dans le matériau ont conduit à quelques développements (théoriques ou numériques) qui permettent de résoudre bon nombre de problèmes (unicité de solution, convergence numérique ...) mais pas tous. En tout état de cause, il est actuellement reconnu que ces outils ne sont pas viables pour une utilisation industrielle (ou difficilement) et que, finalement, depuis les quinze dernières années, il n'y a eu que très peu d'avancées majeures en la matière. Par exemple, le phénomène de fissuration intervient rarement seul et il est souvent couplé à des mécanismes physiques, chimiques, thermiques complexes.

Les besoins de la profession, dans ce domaine, sont de disposer de modèles robustes, simples mais ayant des bases physiques fortes : telle est l'ambition du projet APPLET. Proposé à l'appel d'offres « Programme Génie Civil & Urbain » (PGCU) en 2006, le projet APPLET bénéficie du soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et du pôle de compétitivité Advancity. Le **consortium APPLET** est formé de deux catégories de partenaires : les partenaires « fondateurs » et les partenaires « associés ». Les partenaires fondateurs sont ceux qui ont participé au montage du projet déposé à l'ANR, et qui bénéficient de fait d'une convention avec l'ANR. Les partenaires associés se sont associés en cours de projet sur fonds propres aux études menées et/ou qui ne sont donc pas liées à l'ANR par convention. La liste des partenaires est la suivante :

- **Parties fondatrices**
 - Vinci construction – Nanterre
 - Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB) – Epervan
 - Oxand – Avon
 - Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) – Orsay
 - INSA Toulouse / LMDC – Toulouse
 - ENS – Cachan / LMT – Arcueil
 - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Paris
 - Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux (LERM) – Arles
 - Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques (LRMH) – Champs-sur-Marne
 - Polytech'Lille – Villeneuve d'Ascq
 - Université de Bordeaux 1 / CGDA – Talence
 - Université de La Rochelle / LEPTIAB – La Rochelle
- **Parties associées**
 - EDF/SEPTEN – Villeurbanne
 - IRSN – Fontenay aux Roses
 - Institut des Sciences de la Construction Eduardo Torroja – Madrid, Espagne
 - Centre Scientifique et Technique de la Construction – Bruxelles, Belgique
- **Parties sous-traitantes** (liées par convention avec LCPC)
 - LREP – Melun
 - LRPC Lille – Haubourduin
 - Syrokko – Roissy

Un accord de groupement a été signé entre les parties fondatrices et associées avec pour prise d'effet à la date du 24 mai 2007.

2. ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES DU PROJET APPLET

Le consortium APPLET a retenu trois orientations principales dans le programme de recherche :

- **une distinction de la durabilité « matériau » et de la durabilité « structure »**. L'une des étapes essentielles dans l'évaluation de la **performance des ouvrages**, ou parties d'ouvrages, en béton est la qualification de la durabilité. Cette exigence de performance, notamment par des critères d'états limites au-delà desquels la fonctionnalité n'est plus assurée, est souvent difficile à définir et plusieurs sens lui sont donnés en pratique : celle du matériau et celle de la structure. La durabilité du matériau se vérifie à partir de sa capacité à conserver ses caractéristiques et son intégrité pendant la durée de vie prévue pour la structure. Selon l'Eurocode EN1990, la durabilité de la structure consiste dans l'accomplissement de ses performances de sécurité structurale et d'aptitude au service durant la durée de vie prescrite et ceci avec une maintenance appropriée. Elle ne se résume donc pas exclusivement à la qualité du matériau employé. L'une des problématiques abordées dans le projet est donc de distinguer ces deux niveaux

d'échelles par rapport à leur propre notion de durabilité, d'offrir des éléments de réponse pour leur modélisation, leur prévision et leur suivi sur la durée d'usage.

- **une caractérisation probabiliste de la performance.** Un ouvrage en béton présente des variabilités spatiales liées à la nature du matériau et des éléments constitutifs (épaisseur, ferrailage, conditions de fabrication...). De plus certaines spécificités de cet ouvrage peuvent évoluer au cours du temps, soit par le changement d'usage ou de charges d'exploitation, soit par des phénomènes de dégradation liés à la variation des conditions environnementales et qui peuvent provoquer une réduction de sa résistance. Ces évolutions introduisent de nombreuses incertitudes. C'est pourquoi, il est souhaitable que la prédiction de la performance soit réalisée en utilisant une **approche probabiliste**. L'approche probabiliste a été retenue afin de caractériser notamment la confiance apportée aux prédictions déterministes du profil de performance. Dans ce cadre, les diverses variables qu'elles soient physico-chimiques, environnementales, structurales ou d'exploitation, possèdent des variabilités à introduire dans les simulations. Ceci explique la mise en œuvre de programmes expérimentaux ambitieux dans le cadre du projet APPLÉT.
- **une prise en compte de la gestion des ouvrages.** Limiter l'opération aux seuls aspects de durabilité, de fissuration par corrosion et de perte de capacité portante apparaîtrait réducteur aux yeux des maîtres d'ouvrages soucieux de gérer au mieux leur patrimoine. Cela conduirait également à laisser de côté une approche préventive de la gestion de ces ouvrages. L'inspection d'ouvrages en béton au moyen de contrôles non destructifs par caractérisation électrochimique et le diagnostic de l'état de dégradation par corrosion seront des problématiques également considérées par le projet. Le projet APPLÉT s'intéresse notamment à la manière dont les informations fournies par l'auscultation des ouvrages seront utilisées pour réajuster les prédictions des modèles. Ceci implique de concevoir des modèles adaptatifs, en cohérence avec la fiabilité des résultats des inspections. Cette fiabilité des résultats d'inspection fait l'objet d'une attention particulière, car elle fonde tout le processus de prise de décision en amont des actions de maintenance.

La détérioration du béton se traduit par des étendues de dommages différents, allant de la fissuration à l'éclatement du béton, de la perte de section d'armatures à la perte d'adhérence. Une estimation pertinente de cette performance est la base du succès d'une réparation, d'une réhabilitation ou d'un renforcement. L'expérience montre que, dans la majorité des situations, un diagnostic inapproprié de la dégradation (en type comme en étendue) conduit à des réparations inefficaces ou inadaptées. Les étapes principales pour accomplir une telle démarche reposent sur l'inspection et le diagnostic sur site, l'identification, l'étendue du dommage et son influence sur la performance, la prédiction du développement de l'endommagement et des conséquences structurales. La démarche générale du projet APPLÉT est de définir une procédure détaillée d'évaluation de la performance des éléments de structure en béton. Le projet APPLÉT est notamment structuré autour de cette démarche au travers de trois Groupes de Travail :

- Groupe de travail GT1 : Etude de l'interaction béton/environnement
- Groupe de travail GT2 : Comportement des structures dégradées par corrosion
- Groupe de travail GT3 : Diagnostic électrochimique des ouvrages dégradés

Tableau 1 : Responsables des groupes de travail et des sujets du programme APPLÉT

Groupe	Titre	Organisme	Responsable
GTF	Groupe des utilisateurs finaux	CERIB	P. Rougeaud
GTF-1	Définition de la forme finale des produits	Oxand	B. Capra
GTF-2	Rédaction du guide méthodologique d'évaluation de la performance	LCPC	C. Cremona
GT1	Interaction béton/environnement	LMT/CEA	JM Torrenti/S. Poyet
GT1-1	Acquisition de données sur fabrication réelle	GTM	F. Cussigh
GT1-2	Modélisation des caractéristiques de matériaux	CEA	S. Poyet
GT1-3	Modélisation des phénomènes de transport	LCPC	V. Baroghel
GT1-4	Modélisation des variabilités de mesure	Oxand/CEA	B. Capra / V. Poyet
GT1-5	Exemples d'application	LCPC	C. Cremona
GT2	Modèles prédictifs de la performance	LCPC/LMT	L. Adelaide/Y. Berthaud
GT2-1	Etude expérimentale et modélisation de l'action de la corrosion sur le comportement de l'association acier/béton	LMT	Y. Berthaud
GT2-2	Etude de la fissuration	LCPC	L. Adelaide
GT2-3	Etude du vieillissement et des comportements différés	LCPC	JL. Tailhan
GT2-4	Impact d'une fissuration sur la corrosion	CEA	A. Millard
GT2-5	Exemples d'application	LMDC	R. François
GT3	Diagnostic de la corrosion	LCPC/CEA	V. Bouteiller/V. L'Hostis
GT3-1	Etude bibliographique et documentaire	LCPC	V. Bouteiller
GT3-2	Fabrication des corps d'épreuve et vieillissement	LCPC	V. Bouteiller
GT3-3	Amélioration des techniques de mesures des vitesses de corrosion	CEA	V. L'Hostis
GT3-4	Etude de l'influence environnementale	LCPC/IETcc	V. Bouteiller/C. Andrade
GT3-5	Exemples d'application et validation	LMDC	G. Arligue

L'originalité de la structure du projet repose sur l'existence d'un Groupe de Travail des utilisateurs Finaux (GTF) placé sous l'animation des entreprises et des maîtres d'ouvrage intervenant dans le projet. Il a pour mission de s'assurer que les besoins à destination des utilisateurs finaux sont correctement pris en compte dans le projet, et de produire les re-commandations finales du projet sur la requalification des ouvrages. Chaque groupe de travail

est divisé en sujets, répartis en actions pour les plus importants. Cette structuration en mode projet présente l'avantage de préciser les actions à accomplir et à coordonner. Chaque groupe de travail comprend un sujet dont la finalité est de produire des exemples d'application des méthodes de calcul et expérimentales développées dans chaque groupe. Ces exemples constitueront les applications des recommandations, ou guides, sur la requalification des ouvrages en béton produits par le Groupe de Travail des utilisateurs Finaux (GTF). Le Tableau 1 indique les personnes responsables des Groupes de Travail et des Sujets.

3. GROUPE DE TRAVAIL GT1 : ÉTUDE DE L'INTERACTION BÉTON/ENVIRONNEMENT

L'objectif du Groupe de Travail GT1 est de prendre en compte la variabilité des constituants d'un ouvrage par une approche probabiliste et d'intégrer cette approche dans la prédiction de la durée de vie des structures en béton. Cette approche s'efforcera de définir une méthodologie complète (modélisation, acquisition des données initiales, suivi des ouvrages et correction des prévisions). En complément de l'approche déterministe inhérente à la compréhension des processus de base du vieillissement des matériaux, l'approche probabiliste permettra non seulement de rendre compte de la variabilité intrinsèque des matériaux mais également de se rapprocher du comportement global de la structure au cours du temps.

Le travail du groupe GT1 du projet APPLET est appliqué à deux types de problème :

- caractérisation de la variabilité des bétons issus de chantiers,
- étude de l'impact de cette variabilité sur des processus de transport (chlorure, H₂O (humidité, saturation, désaturation)) et de réactivité chimique (lixiviation, carbonatation atmosphérique).

L'étude de ces problématiques est intimement liée aux travaux des GT2 et GT3 du projet. En effet l'évolution dans le temps de la dépassivation et de la corrosion des armatures dépend de l'évolution intrinsèque du matériau au droit de celles ci sous l'impact des processus couplés de réactivité chimique et de transport modifiant ainsi l'interface acier/béton d'origine.

Les travaux du groupe de travail GT1 (Poyet, 2009), (Torrenti, 2009) correspondent à l'acquisition de données sur des matériaux correspondant une fabrication réelle sur chantier, à la caractérisation et la modélisation des processus physico-chimiques (approche déterministe) précédemment cités sur ces matériaux en tenant compte de la variabilité des propriétés du béton (approche probabiliste) et de la prise en compte des mesures in situ afin d'améliorer et d'actualiser les prédictions. Le groupe de travail GT1 du projet APPLET est divisé en **5 sujets** :

- GT1-1 : Acquisition de données sur fabrication réelle.
- GT1-2 : Modélisation des caractéristiques des matériaux intègres et dégradés.
- GT1-3 : Modélisation des phénomènes de transport sur matériaux intègres et dégradés.
- GT1-4 : Modélisation de la variabilité des mesures.
- GT1-5 : Exemples d'application.

3.1. GT1-1 : Acquisition de données sur fabrication réelle.

Placé sous la responsabilité de Vinci Construction France, ce sujet a eu pour mission de définir les chantiers sur lesquels les prélèvements de matériau seront réalisés, de confectionner les corps d'épreuve, et de définir les conditions de ventilation des éprouvettes. L'option retenue dans le cadre du GT1 est la caractérisation de la variabilité de bétons mis en œuvre en conditions industrielles. Pour cela, le GT1-1 bénéficie du support de Vinci Construction France pour la fourniture des éprouvettes. Deux chantiers (A1 et A2) ont été identifiés sur lesquels des éprouvettes sont coulées régulièrement et envoyées aux différents participants pour la réalisation des essais. Les deux formulations de béton retenues sont représentatives des formulations couramment utilisées aujourd'hui dans l'industrie du BTP :

- un B50 (résistance moyenne à la compression à 28 jours égale à 50 MPa) à base de ciment Portland (CEM I + cendres volantes) utilisé pour la réalisation de la dalle séparant les deux voies de circulation du tunnel de l'A86 (chantier A1 – Figure 1) ;
- un B40 à base ciment composé CEM III utilisé pour la réalisation des appuis (semelles, piles et chevêtres) du viaduc de Compiègne (chantier A2 – Figure 2).



Figure 1 : Photo du chantier de l'A86 (chantier A1)



Figure 2 : Chantier du viaduc de Compiègne (chantier A2)

Les éprouvettes ont été coulées à l'avancée sur les deux chantiers (utilisation des centrales à bétons, coulage par les ouvriers du chantier). Elles sont ensuite conservées sous eau (cure normalisée) puis envoyées aux différents partenaires pour essais. 40 livraisons de lots d'éprouvettes (appelées prélèvements) par chantier correspondant à 40 gâchées différentes sont prévues. Les livraisons d'éprouvettes ont débuté mi-2007 et en janvier 2008 pour les chantiers de l'A86 et du viaduc de Compiègne respectivement. Les 40 éprouvettes du chantier A1 (A86) ont été livrées et sur le chantier Compiègne (A2), il reste 5 éprouvettes à envoyer. Ces envois prendront fin au cours du premier semestre 2009. Sur chacun de ces chantiers, Vinci Construction prend en charge la confection des éprouvettes, du contrôle du béton frais (consistance), de la collecte des bons de pesée et de la supervision de la conservation sur chantier. Chaque prélèvement est rapatrié dans le laboratoire Vinci de Marolles-en-Hurepoix pour conservation en conditions normalisées pendant 14 à 21 jours puis envoyée aux laboratoires partenaires (Torrenti, 2009).

3.2. GT1-2 : Modélisation probabiliste des caractéristiques des matériaux intègres et dégradés

3.2.1. Essais de sorption

Les éprouvettes 11 x 22 cm du chantier A86 sont conservées sous eau à une température d'environ 20°C, à partir de 24 heures après leur confection. Lors du transport entre Paris et La Rochelle, les éprouvettes ont été placées dans des sacs étanches en plastique. L'eau de conservation n'a pas été traitée au préalable ; elle servait antérieurement à conserver les éprouvettes de béton du laboratoire. Elle est donc supposée avoir la même ionisation que l'eau interstitielle de bétons en général. A l'âge de 3 mois, les éprouvettes 11 x 22 cm sont sciées, pour obtenir trois disques de diamètre 11 cm et d'épaisseur $5 \pm 0,5$ mm. Les disques sont percés d'un trou de diamètre 4 mm, qui permettra leur accrochage sous une balance pour des mesures de masse ponctuelles. Les échantillons ainsi obtenus sont ensuite replacés dans l'eau. La conservation dans l'eau dure au total 4 mois $\pm$ 1 semaine (Figure 3).



Figure 3 : Essais de sorption

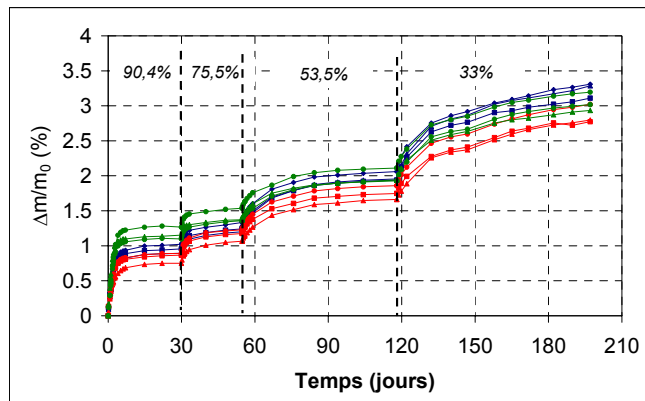


Figure 4 : Exemple d'essais de sorption (LEPTIAB)

Le mode opératoire des mesures d'isothermes de sorption et désorption est inspiré des travaux du LCPC (2007), des recommandations de l'AFREM-AFPC (1997) et du projet Grandubé (2007), ainsi que de travaux antérieurs du LEPTIAB. Les essais de désorption et sorption sont réalisés dans une salle climatisée à $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Après 4 mois de cure sous eau, les échantillons 11 x 0,5 cm sont placés dans des enceintes où l'humidité relative est imposée par des solutions salines. Les essais permettent de tracer les isothermes de sorption / désorption, c'est-à-dire l'évolution de la teneur en eau des échantillons en fonction de l'humidité relative de l'environnement (Figure 4).

3.2.2. Mesures de résistivité

Les méthodes de mesure des résistivités électriques sont utilisées sur site pour évaluer les probabilités de corrosion des aciers dans le béton armé. Elles permettent soit d'acquérir des informations sur la présence de facteurs propices à la corrosion des aciers (humidité, présence de sels, ...), soit d'estimer des facteurs de biais sur les mesures électrochimiques utilisées pour décrire la corrosion des armatures (mesure du potentiel de corrosion, mesure de la résistance de polarisation). En outre, de par leur sensibilité aux paramètres intrinsèques au béton, les mesures de résistivités apparaissent maintenant adaptées à l'évaluation de la durabilité du matériau, indépendamment de la caractérisation des aciers. Dans le cadre du projet APPEL, la technique utilisée vise à fournir une indication sur les propriétés de transfert du béton. La méthodologie est inspirée du projet Européen ChlorTest, en intégrant quelques simplifications notamment sur la préparation des échantillons, afin d'alléger la procédure de test. Le travail s'effectue sur une éprouvette cylindrique (coulée, ou issue d'un carottage), saturée (conservation en immersion) dans l'eau. L'éprouvette est disposée entre deux électrodes métalliques (Figures 5-6). Les électrodes sont mises en places sur les deux faces opposées de l'échantillon, et munies d'éponges humides afin d'améliorer le couplage électrode-béton.



Figure 5 : Mesure en laboratoire

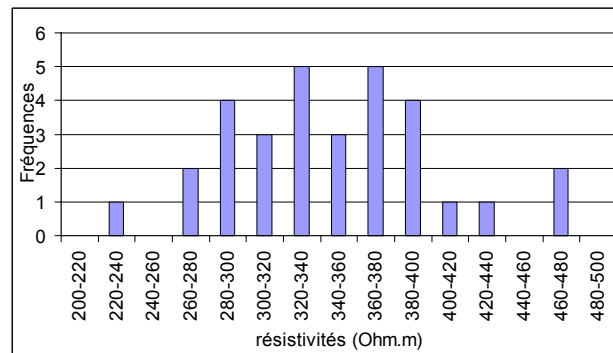


Figure 6 : Histogramme des résistivités en laboratoire (GHYMAC)

3.3. GT1-3 : Modélisation des phénomènes de transport sur matériaux sains et dégradés

L'étude de la phase relative au transport des espèces potentiellement agressives dans le béton et des interactions avec la matrice a été longuement étudiée durant ces dernières années. De nombreux problèmes restent encore à traiter et les premiers modèles mathématiques se sont révélés très prometteurs. Face aux incertitudes sur les paramètres, il est apparu aujourd'hui incontournable de les analyser dans un cadre probabiliste, de les étendre à deux dimensions et de distinguer les cas de bétons sains, fissurés et saturés ou non.

3.3.1. Action GT1-3-1 : Etude de la lixiviation

Les tests de dégradation accélérée au nitrate d'ammonium sont mis en œuvre pour étudier et caractériser les processus de dégradation des bétons sur des échelles de temps raisonnables et les conséquences au cours du temps de cette dégradation sur l'évolution de leurs propriétés mécaniques ou de transports. Dans le cadre du projet APPLLET, l'objectif est d'établir un lien entre la variabilité naturelle des matériaux (à formulation équivalente) issus d'un chantier de construction (GT1-1) et la variabilité de « la résistance » à la dégradation caractérisée par la vitesse de déplacement du front de lixiviation au sein du matériau. Les phénomènes mis en jeu dans le protocole de dégradation accélérée par nitrate d'ammonium sont identiques à ceux d'une dégradation en eau peu minéralisée mais avec une cinétique nettement plus rapide. Il n'existe actuellement pas de protocole expérimental de référence. Différents protocoles ont été mis en œuvre dans différents travaux, mais jamais sur les mêmes matériaux de sorte que l'impact du protocole sur les résultats finaux est difficile à évaluer. Dans une approche probabiliste, de traitement des données, le biais, si il existe, induit par le protocole doit être évalué. Le protocole expérimental retenu dans le projet APPLLET correspond à une mise en place pour des essais en laboratoire dans des réacteurs de petite dimension. Un seul échantillon est plongé généralement dans la solution. Dans tous les cas le dimensionnement des fréquences de renouvellement, le post traitement des données chimiques sur la quantité de calcium lixivié par unité de surface doivent être réalisés en prenant en compte le rapport des surfaces réelles exposées sur le volume de la solution de lixiviation. Ce mode opératoire correspond à celui mis en place au CERIB et au CEA pour réaliser des dégradations accélérées. L'étude réalisée par le LMT de l'ENS-Cachan porte sur différents paramètres de conditionnement (préparation et stockage des échantillons) : influence de la surface exposée (distinction face sciée, face coffrée ou talochée), ambiance de stockage (extérieur, intérieur), agitation et renouvellement de la solution....

Parallèlement, une modélisation déterministe des processus de dégradation, réalisée dans un certain nombre d'études, bénéficiera des données expérimentales issues de ce projet pour permettre le passage de cette modélisation déterministe de la dégradation à une approche probabiliste permettant ainsi de mieux estimer le comportement global de la structure (CEA – LMT Cachan).

3.3.2. Action GT1-3-2 : Analyse du transport des chlorures et du CO₂

A partir des éprouvettes élaborées en GT1-1, les étapes expérimentales de la partie carbonatation sont la réalisation d'essais accélérés sur deux séries de béton (CERIB, LEPTIAB) et l'étude du transfert hydrique dans les (LEPTIAB, Polytech'Lille, LCPC). Ces données sont nécessaires à la modélisation cinétique de la carbonatation.

L'analyse du transport en milieu saturé portera sur l'extension des modèles de pénétration de chlorures à des problèmes à deux dimensions, en ne les rendant probabilistes que pour le cas à une dimension (Figures 7-8). Le modèle retenu intègre un aspect multi-espèces pour prendre en compte les hydroxydes. Le LMDC possède notamment un outil de prédiction pour la diffusion ionique en milieu poreux saturé basé sur l'expression du flux des espèces principales en solution interstitielle par la relation de Nernst-Planck : les équations de conservation des espèces sont alors couplées au travers du champ électrique local créé par les espèces ioniques. L'impact des erreurs commises sera appréhendé par intervalles de confiance. Similairement, l'étude du transport en milieu partiellement saturé concernera la modélisation :

- des transferts hydriques, avec prise en compte des cycles de séchage-humidification se rapprochant des conditions réelles. Le travail (LCPC, Oxand) consistera tout d'abord à développer un modèle utilisable dans le cas de matériaux poreux.

- de la carbonatation du béton. Il s'agira d'incorporer dans le modèle le processus de séchage, afin de rendre compte des conditions in situ, et de passer en 2D (LCPC, Oxand).

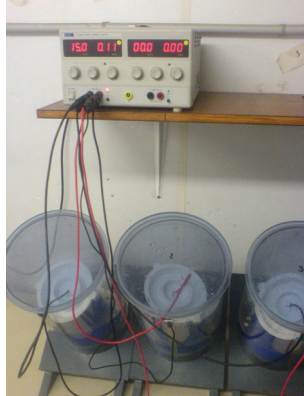


Figure 7 : Schéma de principe de la méthode NT Build 492 (LMDC)

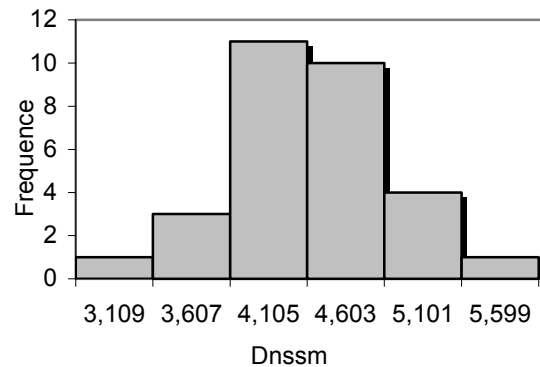


Figure 8 : Histogramme des coefficients de diffusion apparent en régime transitoire (LMDC)



Figure 9 : Voile expérimental

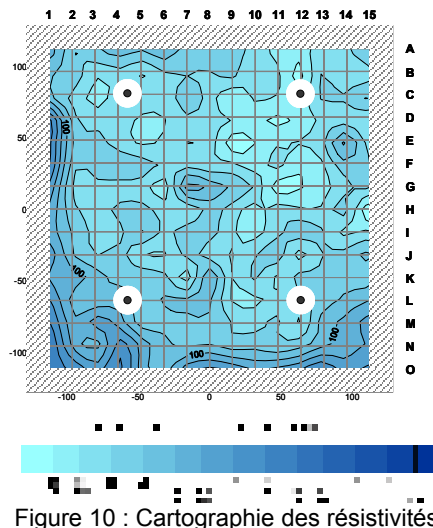


Figure 10 : Cartographie des résistivités

3.4. GT1-4 : Modélisation de la variabilité des mesures et des protocoles

La construction d'un voile par Vinci Construction France (Figure 9) permet l'accès à l'étude de la représentativité spatiale des mesures. Des mesures de résistivité sur toute la surface du voile ont été programmées afin d'évaluer la dispersion et la variabilité des propriétés thermiques et électriques (Figure 10) sur un élément de structure (GHYMAC). Ces mesures sur les prélèvements doivent permettre de caler et d'évaluer la représentativité des mesures de résistivité et leurs corrélations avec les mesures sur éprouvettes. On pourra distinguer la variabilité liée aux propriétés du matériau (variation de l'altération, ou des paramètres parasites tel que l'humidité par exemple) et celle liée uniquement à la mesure (bruit de mesure, répétabilité de la mesure). Ce point fournira des indications sur la pertinence des données alimentant les modèles.

4. GROUPE DE TRAVAIL GT2 : COMPORTEMENT DES STRUCTURES DÉGRADÉES PAR CORROSION

Le groupe de travail GT2 se donne pour objectif de caractériser et de modéliser de manière efficace, pertinente et la plus réaliste, le rôle de l'interface acier/béton dans la performance globale des structures tout au long de leur durée de vie. D'un point de vue mécanique, l'interface acier/béton joue un rôle primordial dans le fonctionnement global de la structure en assurant le transfert des efforts entre les deux matériaux. Elle permet ainsi à l'acier de pallier les faiblesses du béton, évitant la rupture brutale, fragile et localisée de ce dernier du fait des contraintes de traction dans les armatures (transformées en contraintes de cisaillement à la surface du béton), tout en redistribuant les efforts sur l'ensemble de la structure. Ces objectifs participent de la définition même de la performance globale d'un ouvrage en béton armé. L'évaluation de cette performance passe par la mise au point et/ou l'utilisation d'un ensemble d'outils, de stratégies d'analyses, de prédiction optimisées et fiables des comportements, de l'échelle des matériaux à l'échelle de l'ouvrage. Pour cela, le groupe de travail GT2 du projet APLET se propose d'atteindre ces objectifs de modélisation au travers des actions suivantes :

- GT2-1 : Etude expérimentale et modélisation tridimensionnelle de l'action de la corrosion sur le comportement de l'association acier / béton,
- GT2-2 : Modélisation de la fissuration,
- GT2-3 : Etude du vieillissement et des comportements différés sur l'adhérence acier béton,
- GT2-4 : Impact d'une fissuration localisée sur la problématique de la corrosion,
- GT2-5 : Exemples d'application.

4.1. GT2-1 : Etude expérimentale et modélisation tridimensionnelle de l'action de la corrosion sur le comportement de l'association acier/béton.

Sur la base d'études expérimentales réalisées en laboratoire et visant à caractériser mécaniquement le comportement de l'interface béton/acier corrodé, l'objectif est d'aboutir à une modélisation tridimensionnelle du comportement de l'interface acier/béton corrodée.

4.1.1. Action GT2-1-1 : Etude expérimentale du comportement mécanique d'aciers de renforcement corrodés avec prise en compte des processus de corrosion localisée

4.1.1.1. Comportement mécanique de l'acier corrodé

L'objectif est d'identifier l'effet de la corrosion sur le comportement de l'acier. Ce travail est de nature expérimentale essentiellement et consiste à mesurer l'évolution du comportement de l'acier corrodé en fonction de la corrosion. La corrosion dite localisée est en fait la corrosion de type piquûre, en l'occurrence reproduite en laboratoire par un essai de corrosion accélérée. Les différentes étapes retenues pour cette démarche consistent à effectuer des essais expérimentaux (associés avec quelques simulations sur code éléments finis avec le modèle de Weibull si le temps le permet), et réaliser (et réinterpréter) des essais simples sur des barres d'acier corrodées (en solution ou dans du béton) avec différents taux de corrosion. L'idée est d'étudier les effets probabilistes en fonction de la corrosion. Les résultats espérés sont les mesures des courbes contraintes/déformations, des variabilités des propriétés et du taux de corrosion (moyen et éventuellement histogramme) et le tracé des graphes déformation à rupture/taux de corrosion, probabilité de rupture/taux de corrosion à partir d'une approche type Weibull en calcul avec clivage local. Ce travail est réalisé par le LMT de l'ENS Cachan.

4.1.1.2. Réduction de la ductilité des aciers corrodés

L'objectif est d'étudier la réduction de la ductilité des armatures corrodées par piquûre afin de modéliser et d'intégrer ce phénomène dans les modèles de comportement des structures en béton armé corrodées. La démarche consiste à tester à différentes échéances de corrosion les armatures corrodées en traction directe jusqu'à rupture, ceci afin de déterminer les courbes contrainte/déformation et donc l'allongement à rupture. S'ajoute à ce programme expérimental, l'étude en détail de lien entre la corrosion et la perte de ductilité pour le modéliser, l'état de corrosion réel des aciers étant connu. A partir de l'état de corrosion des armatures (distribution et intensité des piquûres), cette étude doit fournir des éléments de réponse sur l'évolution de la ductilité en fonction de la corrosion et sa modélisation, le lien entre la fissuration et l'état de corrosion en relation avec l'état initial de l'interface acier/béton et l'analyse de la durée de vie en phase de propagation de la corrosion ainsi que sa modélisation. Ce travail est réalisé par le LMDC de l'INSA de Toulouse. Il constitue l'épine dorsale de plusieurs sujets de recherche menés non seulement dans le GT2-1, mais aussi dans le GT2-2 et le GT2-3. Ces axes prévus s'intègrent en effet dans un même programme expérimental. L'originalité du travail est de prendre en compte la qualité de l'interface acier/béton sur le processus de corrosion des aciers. En effet, l'amorçage de la corrosion et son développement sont extrêmement sensibles aux conditions locales de l'interface acier/béton. En particulier, les défauts présents à cette interface, liés aux défauts de l'acier, du béton (trop poreux...) ou ceux de l'interface (décohésion de ressuage, mécanique...) auront un effet sur la distribution spatiale de la corrosion et sur la cinétique de corrosion. L'objectif principal est donc d'étudier l'amorçage et la phase de propagation de la corrosion et non la phase d'initiation.

4.1.2. Action GT2-1-2 : Etude expérimentale du comportement mécanique de l'interface acier/béton

4.1.2.1. Effet de la corrosion sur les propriétés de l'interface

L'objectif est de mettre en évidence expérimentalement l'effet de la corrosion sur les propriétés de l'interface. Classiquement, les essais pull-out (Figure 11) sont réalisés pour identifier l'adhérence acier/béton. Nous considérons cet essai complexe car les conditions aux limites et la géométrie de l'éprouvette font que l'état de contrainte local autour de l'armature est non uniforme. La démarche consiste donc à développer un nouvel essai qui permettra l'identification cohérente de la cohésion et de l'angle de frottement (voire l'angle de dilatance) et ensuite leurs variations selon la corrosion. Cet essai doit permettre d'obtenir des courbes effort/déplacement par rapport à la variation du taux de corrosion, du type d'armature (lisse, corrodée, nervurée) et du confinement. Il s'agit de l'essai PIAF (Pour Identifier l'Adhérence et le Frottement) (Figure 12).



Figure 131 : Essai pull-out (LMT)

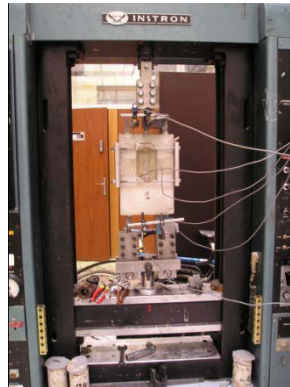


Figure 12 : Essais PIAF (LMT)

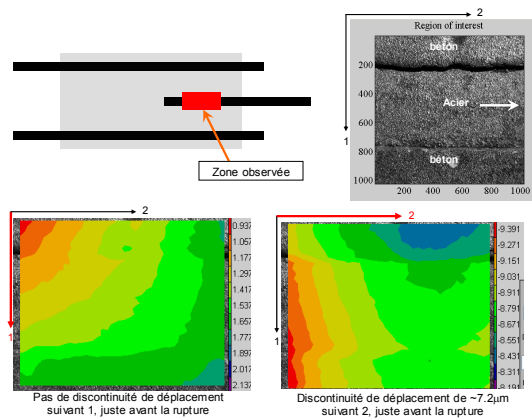


Figure 13 : Traitement d'image Correli (LMT)

L'essai PIAF présente la particularité de limiter les efforts latéraux qui apparaissent lors d'essais d'arrachement classiques et de permettre la mesure du champ de déplacement autour de la barre centrale par corrélation d'images numériques avec le logiciel CORRELI^{LMT} (Figure 13). Il est donc possible d'observer le glissement à l'interface au cours des essais et ainsi, relever l'influence du confinement latéral suivant le type de barre, donc selon la rugosité ainsi que la dégradation (corrosion) de la barre sur le comportement de l'interface. Une étude expérimentale sur l'essai PIAF et l'essai de pull-out a été effectuée sur des barres lisses non corrodées, nervurées non corrodées et lisses corrodées. Un modèle d'interface a donc été considéré par le biais d'un élément joint selon le critère Mohr-Coulomb (béton et acier sont décrits par un modèle élastique). Ce modèle a pu être validé dans les trois cas mais les résultats les plus proches de l'expérimental sont fournis par la barre lisse non corrodée. Le modèle ne donne pas de bons résultats dans le cas de la barre corrodée et nervurée. Le modèle proposé a besoin d'être affiné par les prochains essais qui permettront d'identifier la cohésion et l'angle de frottement (voire l'angle de dilatance) selon le degré de corrosion. Il nous reste également, d'une part à identifier l'effet de la corrosion sur le comportement de l'acier et d'autre part à déterminer l'instant d'amorçage de la fissuration. Ce travail sera de nature expérimentale essentiellement.

4.1.3. Action GT2-1-3 : Etude expérimentale et modélisation de l'impact de la corrosion sur le processus d'endommagement du béton

L'objectif de cette action est d'identifier l'instant d'amorçage de la fissuration. Les différentes étapes de cette démarche portent sur l'étude expérimentale du temps d'amorçage de la fissuration avec une forte instrumentation sur les éprouvettes simples (type plaques) en corrosion accélérée, et sur l'obtention d'une loi de comportement de la rouille. Les résultats attendus regroupent les mesures des champs de déplacement, le calcul de l'évolution des champs d'endommagement en 2D ou 3D et les tracés des déformations mesurées et calculées. Cette étude est réalisée par le LMT de l'ENS Cachan. L'objectif de l'action est également d'identifier la fissuration du béton en fonction de la propagation de la corrosion ainsi que de l'état initial de l'interface acier/béton. L'influence de la distribution des piqûres issues d'une corrosion naturelle par les ions chlorures est aussi étudiée. Les divers points à réaliser sont l'analyse en détail de la fissuration du béton (ouverture et distribution des fissures) à différentes échéances correspondant à différents niveaux de développement de la corrosion et l'étude de l'état de corrosion réel des aciers afin d'établir le lien entre la corrosion et la fissuration. Dans le cadre du programme expérimental du LMDC, l'influence de l'état initial de l'interface acier/béton est intégrée dans le but d'évaluer la cinétique de corrosion et le temps nécessaire pour l'initiation puis le développement de la fissuration, en somme pour évaluer la durée de vie. A partir de la qualité initiale de l'interface acier/béton, les principaux attendus sont le lien entre la fissuration et l'état de corrosion en relation avec l'état initial de l'interface acier/béton et l'analyse de la durée de vie en phase de propagation de la corrosion, de même que sa modélisation.

4.2. GT2-2 : Modélisation du comportement des structures en béton armé corrodées

4.2.1. Action GT2-2-1 : Modélisation améliorée de la fissuration

L'objectif est de prendre en compte les caractéristiques du phénomène localisé de fissuration dans le comportement d'ouvrages en béton armé grâce aux différents modèles connus ou développés durant le projet APPLÉT et validés par des études expérimentales tirées de la littérature. Trouver un lien entre l'aspect extérieur de la structure (fissures et apparition de rouilles en peau, délaminage) et les phénomènes internes (donc invisibles à l'œil) est le point de départ de cet axe de recherche, afin d'offrir au gestionnaire d'ouvrages des éléments d'appréciation de la performance de ses ouvrages en béton sur la base d'inspections visuelles. Le béton étant un matériau composite constitué de granulats de différentes tailles, d'une matrice cimentaire et de cavités, son comportement mécanique est très complexe. A la lumière des modèles proposés dans la littérature, modéliser de manière fiable et simple le comportement du béton reste un exercice difficile. Suivant la nature et l'intensité des

sollicitations (traction, compression, cisaillement), le béton se déforme de manière complexe en faisant intervenir une ou plusieurs combinaisons de mécanismes élémentaires, élasticité, endommagement, glissement, frottement, fissuration, dissymétrie... Vis-à-vis de toute cette complexité liée au comportement du béton, la démarche envisagée dans le projet APPLET est :

- d'analyser les divers modèles existants (continus, mixtes et discrets) afin de mieux connaître l'état de l'art et d'en tirer des conclusions utiles, c'est-à-dire comprendre les phénomènes non linéaires de fissuration et de rupture et avoir une connaissance plus approfondie sur le comportement du béton ;
- d'élaborer un nouveau modèle du comportement du béton tout en s'appuyant sur les spécificités pertinentes de modèles existants avec une description plus fidèle du comportement mécanique du béton. Le modèle RICRAG développé au LCPC, est développé dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. Il nécessite évidemment d'identifier ses paramètres par des essais élémentaires et des tests simples (traction simple, compression simple...). Implanté sous CAST3M, il prend en compte les ouvertures et les fermetures de fissures, le glissement et le frottement probable des lèvres de fissures (Richard, 2009) ;
- de valider ce modèle par des comparaisons avec des résultats expérimentaux et numériques provenant d'autres modèles existants.

4.2.2. Action GT2-2-2 : Modélisation améliorée du comportement des structures dégradées

L'objectif est de :

- développer un modèle de comportement de l'interface acier/béton en présence de corrosion permettant de prendre en compte la variabilité spatiale des grandeurs mécaniques caractérisant le comportement mécanique de l'interface, de gérer les effets dus au chargement mécanique mais aussi dus au phénomène corrosion et de considérer la variable temps. Ce modèle sera enfin probabiliste dans le cadre de la théorie de la fiabilité ;
- de coupler ce modèle au modèle de fissuration développé à l'action GT2-2-1 dans le but de concevoir un modèle fiable du comportement de structures dégradées par corrosion et d'effectuer des recalculs de structures complexes moyennant un coût de calcul admissible.

Pour atteindre l'objectif fixé, la démarche mise en place dans le cadre du projet APPLET est la suivante :

- analyser et comprendre les aspects phénoménologiques du comportement de l'interface entre l'acier et le béton (en absence et en présence de corrosion) afin de comprendre le mécanisme de dégradation par corrosion (production de rouilles), l'influence de la corrosion sur l'acier (perte de section), l'interface (perte d'adhérence) et le béton (fissuration) ;
- élaborer un nouveau modèle du comportement de l'interface qui sera formulé dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles, tout en s'appuyant sur les analyses effectuées précédemment ;
- mettre en évidence le mécanisme de cinétique de corrosion, ses causes (conditions environnementales, caractéristique du béton et de l'acier, la présence, la concentration et la propagation des ions jusqu'à l'acier...) et ses conséquences (production de rouille, dégradation l'interface, expansion des produits de corrosion) ;
- modéliser la cinétique de corrosion afin de connaître la quantité de produits de corrosion générés au cours du temps, et l'instant de dégradation de l'interface acier/béton et d'apparition de la première fissure ;
- intégrer ce modèle dans le modèle d'interface pour le rendre plus général et ainsi bénéficier d'un nouveau modèle interface ;
- valider le modèle par des comparaisons avec des résultats expérimentaux et numériques provenant d'autres modèles existants.

Cette démarche prend naissance dans la volonté d'obtenir un modèle probabiliste du comportement de structures complexes dégradées par corrosion. Sur la base du modèle de béton défini dans l'action GT2-2-1, un modèle de l'interface acier/béton a été mis en place par le LCPC. Dans ce modèle, en plus des décollements locaux entre l'acier et le béton, du glissement et du frottement entre l'acier et le béton, le phénomène d'expansion des produits de corrosion normale à l'armature, les contraintes de traction issues de cette expansion dans le béton se traduisant par de la fissuration sont considérés (Figure 14).

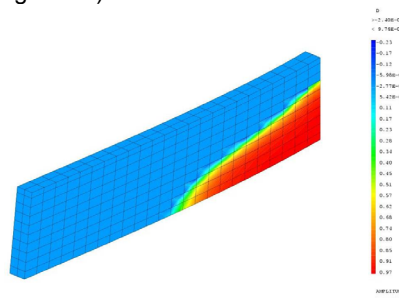


Figure 14 : Exemples de calcul menés avec le module RIGRAG de CAST3M (LCPC)

4.2.3. Action GT2-2-3 : Relation entre corrosion et comportement en service

L'objectif principal est d'étudier l'évolution de la rigidité en fonction de la corrosion. Cela revient à prendre en compte l'effet de raideur du béton tendu entre les fissures de flexion sur le comportement en service et à rupture, en raison du caractère très localisé de la corrosion par piqûre. Sachant que la perte de rigidité est liée principalement à la perte d'adhérence, la perte de capacité portante maximale est liée à la réduction de section dans les zones de rupture et la perte de ductilité est liée à l'influence d'entailles créées par les piqûres de corrosion. Le programme expérimental d'étude du vieillissement par corrosion naturelle de poutres en béton armé qui a débuté en 1984 au LMDC de l'INSA de Toulouse, est repris dans le cadre du projet APPLET. Au cours de leur vie, ces poutres ont été placées dans des environnements différents avec une humidification initiale par eau, l'exposition à un brouillard salin continu pendant 6 ans à température du laboratoire et en cycles humidification-séchage (15j –15j) pendant 11 ans à température extérieure. En s'appuyant sur l'expertise de 3 des poutres restantes, la démarche mise en place dans le projet APPLET consiste à :

- poursuivre l'analyse de l'évolution de la diffusion des chlorures en fonction du temps dans les poutres afin de comparer les résultats des modèles existants et des expérimentations en pour déceler si les sollicitations ont une influence sur la pénétration des chlorures dans les poutres ;
- analyser et comprendre les différences existantes sur le temps d'amorçage de la corrosion entre les différentes poutres suivant leur type, et selon les résultats expérimentaux et les résultats obtenus à partir de modèles. Ainsi, pour les profils expérimentaux à 5 ans, 14 ans et 17 ans, les « taux critiques » sont largement dépassés alors qu'aucune corrosion n'est détectée sur les armatures « comprimées » des poutres ;
- comprendre pourquoi et comment la corrosion se développe de façon très hétérogène sur les armatures des poutres.

Le seuil d'amorçage de la corrosion et le développement de la corrosion sont extrêmement sensibles aux conditions locales de l'interface acier/béton. En particulier, les défauts présents à cette interface sont très importants, que ce soit les défauts de l'acier (en particulier pour le développement de la corrosion sous contrainte), les défauts du béton (trop poreux, etc.) ou les défauts de l'interface (mécanique, etc.). Il est donc important d'analyser entièrement et finement le mécanisme de corrosion. Les essais sur ces 3 poutres doivent permettre d'améliorer le macro-élément développé au LMDC. A partir de l'état de corrosion des armatures (distribution, intensité des piqûres, quantité de produits de corrosion, courbes force/déplacement), la principale attente est la réduction de la capacité portante et les déplacements à rupture des structures en béton dégradées ainsi que leur modélisation améliorée par macro-élément en adéquation avec l'expérimental.

4.3. GT2-3 : Etude du vieillissement et des comportements différés sur l'adhérence acier/béton

L'objectif principal est d'étudier de l'impact d'une dégradation de l'interface acier/béton sur le comportement à long terme d'éléments de structure. Des essais de fluage en flexion sur des poutres en béton armé corrodées et non corrodées sont en cours de réalisation au LCPC. Ces essais structuraux seront complétés par une caractérisation expérimentale du matériau béton sous diverses sollicitations simples (traction - compression), quasi-statiques et maintenues.

4.3.1. Action GT2-3-1 : Expérimentation de fluage en flexion sur des poutres en béton armé corrodées et non corrodées

Le premier objectif a été de mettre en œuvre un essai préliminaire de corrosion d'armatures de béton armé dans un prisme de béton. Trois prismes de béton de dimension 100 x 10 x 25 cm, représentatifs des tranches inférieures de la poutre, ont été coulés : F1, F2 et F3. Ces poutrelles sont strictement identiques en partie basse (enrobage et armatures) aux poutres de l'étude. Bien évidemment la formulation du béton est également identique. Les armatures HA ont un diamètre de 20 mm. Elles sont positionnées à 2,5 cm du fond de coffrage et ont 3,5 cm d'enrobage latéral. Chaque acier comporte une connexion électrique de manière à réaliser le montage de corrosion intentionnelle sans avoir à détruire l'enrobage pour se brancher aux aciers. La poutrelle F1 est un corps d'épreuve de référence (non corrodé) ; la poutrelle F2 aura ses armatures corrodées sur une longueur de 50 cm et la poutrelle F3 aura ses armatures corrodées sur une longueur de 10 cm. Pour accélérer la corrosion, une densité de courant entre l'armature à corroder (qui sert d'anode et qui est branchée au pôle positif de l'alimentation) et une contre-électrode (qui sert de cathode et qui est branchée au pôle négatif de l'alimentation) est imposée. La contre-électrode est constituée d'une grille de titane platiné qui ne se corrode pas. Elle est posée sur la face basse de la poutrelle qui correspond à la face basse du coffrage où les aciers sont à 2,5 cm. La réaction anodique conduit à la dissociation du fer. Le béton est partiellement immergé dans un électrolyte (tamponné à pH 13) qui assure la conductivité électrique. La densité de courant est choisie égale à 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ d'acier ce qui est un bon compromis entre le temps de l'essai et le non échauffement de l'armature. Afin de faire de la corrosion sur une zone d'armature précise (50 ou 10 cm), la taille de la contre-électrode et la dimension des « piscines » en PVC (Figure 15) ont été spécialement mises en adéquation avec les longueurs à corroder et le poids des poutrelles (environ 60 kg chacune).

La poutrelle F2 (2 armatures) a été soumise à une corrosion intentionnelle pendant 15 jours. Après 30 jours de corrosion accélérée, un relevé des fissurations a été réalisé (Figure 16). L'analyse montre que :

- la corrosion a bien eu lieu sur la zone à rouiller des 50 cm (avec peut-être un débordement) ;
- la corrosion n'a pas lieu sur la zone saine ;
- les aciers se corrodent sur leur partie basse c'est à dire en bas de poutre, là où se trouve la contre-électrode. La corrosion n'est donc pas uniforme sur l'ensemble du diamètre de l'acier ;
- la corrosion accélérée sur 30 jours (96 μm théoriques) conduit à une corrosion plus importante que celle sur 15 jours (48 μm théoriques). De plus, des fissures de l'acier (qui se corrode) vers le parement sont très bien identifiées (avec des angles voisins de 45°).



Figure 15 : Montage de l'essai de corrosion intensifié (LCPC)

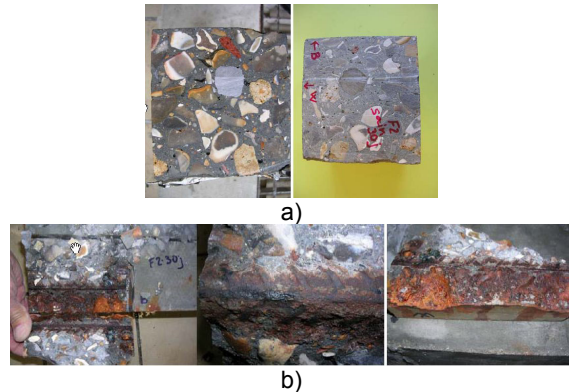


Figure 16 : Poutrelle F2 à 30 jours (LCPC)
a) partie protégée b) partie non protégée

Cette étude de faisabilité permet de conclure à la possibilité de corroder une armature enrobée dans du béton et cela sur une longueur pré-déterminée à l'aide d'un procédé de corrosion accélérée de nature intensifiée. Fort de cette étude de faisabilité, le dimensionnement des corps d'épreuve pour les essais de fluage a été réalisé. Le premier objectif de cette étude de dimensionnement est de déterminer avec le plus de précision possible la flèche résultante de l'essai de flexion 4 points à 6 mois, car elle permettra d'estimer le débit d'huile nécessaire au fonctionnement des vérins qui appliqueront l'effort sur des poutres du programme expérimental (330 x 25 x 50 cm). L'effort de fluage qui sera appliqué sur la poutre a été défini comme étant égal à 25 % de l'effort de rupture. Le second objectif est d'obtenir un faciès de fissuration, ainsi qu'une estimation d'ouverture de fissure. L'objectif est d'apprécier le niveau d'endommagement de la partie tendue de la poutre, et d'accéder à l'ordre de grandeur des fissures et aux pas de fissuration. Pour atteindre ces objectifs, des approches basées sur la méthode des éléments finis ont été utilisées. Le code de calcul CESAR, développé au LCPC, contient notamment deux modules répondants à nos attentes, VISC (comportement viscoélastique) et PROB (fissuration probabiliste du béton _ Figure 17).

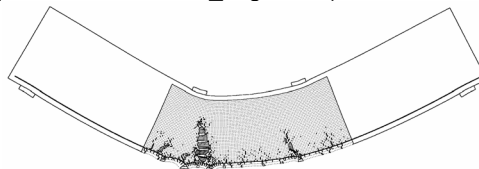


Figure 17 : Fissures et contour déformé pour un effort de 160 kN (LCPC)

Le dernier objectif de cette action sera de caractériser expérimentalement le comportement mécanique à court terme et différé du béton utilisé. La démarche sera de réaliser des essais standard de caractérisation mécanique (compression, module, fendage) ainsi que des essais de fluage en compression et en traction. Les résultats attendus sont les résistances en traction et en compression, les modules d'élasticité, les courbes de fluage (allongement/temps). Cette caractérisation sera réalisée par le LCPC concomitamment à mise en place du programme expérimental sur poutres de dimension 330 x 25 x 50 cm.

4.4. GT2-4 : Impact d'une fissuration localisée sur la problématique de la corrosion

L'objectif est d'étudier les mécanismes physiques entrant en compte dans la croissance des piqûres au droit d'une fissure. Ces travaux combineront à la fois les effets couplés entre les transferts hydriques et les mécanismes de corrosion dans le contexte particulier d'un matériau pré-fissuré. Ils ont pour but de quantifier l'effet d'une fissure existante sur la cinétique de corrosion. Ils conduiront à élaborer des approches modélisatrices des mécanismes mis en jeu, confrontées à des résultats de tests expérimentaux réalisés dans ce même contexte.

4.4.1. Action GT2-4-1 : Etude paramétrique de l'influence d'une fissure sur les cinétiques et les faciès de corrosion d'un béton armé

L'objectif de cette étude expérimentale est d'acquérir, pour une armature enrobée d'un matériau cimentaire fissuré, des données de vitesses de corrosion moyennes (pertes de masse) et de faciès de corrosion (distribution

géométrique et nature des produits de corrosion). Ces données seront directement utilisables pour l'action GT2-4-2, comme cas tests du modèle développé. La démarche établie conduit à :

- exposer des éprouvettes en mortier fissuré contenant une armature d'acier (lisse) à des cycles humidification/séchage (production artificielle de gradients Humidité Relative/Température au niveau de l'acier). Ces échantillons seront fabriqués de telle façon que l'ouverture des fissures soit variable ;
- expertiser deux éprouvettes tous les trois mois (expertise destructive). Utiliser un échantillon à chaque échéance pour réaliser des pertes de masses afin d'accéder à la vitesse moyenne de corrosion ;
- effectuer des analyses de surface de la seconde éprouvette afin de prendre connaissance de la distribution géométrique et de la nature des produits de corrosion autour de l'armature. Utiliser plusieurs techniques analytiques (microscopies, micro-spectroscopie Raman) sur une coupe transversale de l'échantillon.

Des études précédentes menées en interne au CEA avaient permis de connaître les vitesses de corrosion moyennes et les distributions par rapport à la nature des produits de corrosion dans le cas de mortiers non fissurés. Il sera ainsi possible de conclure quant à l'influence d'une fissure sur les faciès de corrosion de l'acier. Pour mener à bien le suivi de la corrosion des éprouvettes pré-fissurées, plusieurs groupements d'échantillons ont été établis, soient deux grands groupes comprenant dans le premier des éprouvettes ayant une armature poli et dans le second, une armature pré-corrodée. Ces deux grands groupes vont se scinder en plusieurs sous-groupes selon l'ouverture de la pré-fissure envisagée. Les données recueillies serviront de données d'entrée pour la modélisation de l'influence d'une fissure pré-existante sur les cinétiques de corrosion. Plusieurs échéances sont prévues afin de déterminer à l'aide du Microscope optique, du MEB - EDS, du micro-raman, le type de rouilles, l'étendue du MT (Milieu Transformé), et de la CPC (Couche de Produits de Corrosion), les concentrations en calcium par exemple.

4.4.2. Action GT2-4-2 : Modélisation numérique de l'influence d'une fissuration sur le développement de la corrosion

Il s'agit d'évaluer numériquement et quantitativement l'effet rétroactif de la présence d'une fissure, due éventuellement à un chargement mécanique ou à une phase de corrosion active, sur la cinétique ultérieure de la corrosion d'armatures dans une structure en béton armé, en conditions de corrosion atmosphérique. L'étude consiste donc à :

- modéliser de la façon la plus réaliste possible le développement de la corrosion en conditions atmosphériques, en utilisant conjointement un modèle de corrosion, un de séchage permettant de tenir compte de l'effet important du degré de saturation dans le liant, et un autre d'endommagement du béton par corrosion ;
- mettre au point ce modèle sur des géométries bidimensionnelles dans un premier temps, le valider sur des éléments de structure en béton armé non fissuré dans un second temps et .l'utiliser sur des cas de structures présentant des fissures (dont les paramètres seront supposés connus), ce qui permettra d'étudier l'effet sur la cinétique de corrosion, par comparaison à des cas similaires sans fissures ;
- étendre le modèle à des situations tridimensionnelles permettant d'étudier l'effet de la dégradation de la liaison acier/béton, ayant pour origine un chargement mécanique, sur la cinétique de corrosion des armatures.

Le résultat attendu est de pouvoir évaluer l'effet des fissures sur la cinétique de corrosion à l'aide de modèles de corrosion, de séchage, d'endommagement par corrosion. Le modèle de corrosion en milieu atmosphérique choisi au CEA est le modèle analytique « Huet-Chitty ». Dans un premier temps, il s'agit d'obtenir un couplage des modèles séchage / corrosion avec le modèle d'endommagement CORDOBA (CAST3M). Ce modèle séchage/corrosion devra être validé par des cas tests simples et le cas d'application retenu pour le modèle couplé avec CORDOBA sera le Château d'eau du CEA Saclay. Dans un deuxième temps, une modélisation 2D de l'influence d'une fissure pré-existante sur les cinétiques de corrosion a été effectuée et validée par l'observation de bouchon en fond de fissures sur les poutres en béton armé du LMDC Toulouse (corrosion durant 24 ans en ambiance chlorurée) qui ralentit la vitesse de corrosion (Figure 18). La prochaine étape est la modélisation 3D et des simulations numériques sur des cas tests ayant plusieurs fissures.

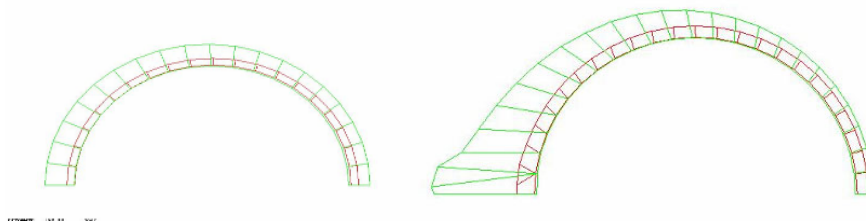


Figure 18 : Formation d'un bouchon en fond de fissure et ralentissement de la vitesse de corrosion (CEA)

4.4.3. Action GT2-4-3 : Etude expérimentale et modélisation du développement de la corrosion dans les fissures d'origine mécanique

L'objectif de cette étude expérimentale est de vérifier les conditions de développement de la corrosion en fond de fissure, c'est à dire un développement rapide de la corrosion suivi d'une période dormante correspondant pratiquement au temps d'initiation en absence de fissure puis une reprise de la corrosion. En particulier, les phénomènes d'auto-cicatrisation et de cicatrisation par les premiers produits de corrosion seront étudiés. Grâce au dispositif expérimental appelé le cœur expansif (Figure 19), la démarche générale employée permet de générer des fissures d'origine mécanique d'ouverture contrôlée. Une large gamme d'ouvertures de fissures sera étudiée de 0 à 60 μm (qui correspond à l'existence d'une interaction mécanique entre les lèvres des fissures et pour laquelle une restriction de l'accès des agents agressifs existe), de 60 μm à 300 μm (qui correspond au domaine d'application des restrictions environnementales des règlements de calculs), et de 300 μm à 1 mm pour élargir le champ d'application ou déterminer (le cas échéant) un seuil de bifurcation de la réponse en corrosion en fond de fissure. A partir de la largeur des fissures et du temps d'exposition (il faudra pouvoir séparer les résultats à court terme (quelques mois) de ceux à long terme), une étude de la capacité de cicatrisation des fissures par les premiers produits de corrosion est attendue par l'intermédiaire du seuil de fissure conduisant à un amorçage de la corrosion, du seuil de fissure conduisant à un arrêt de la corrosion et du seuil de fissure (le cas échéant) conduisant à une propagation de la corrosion.

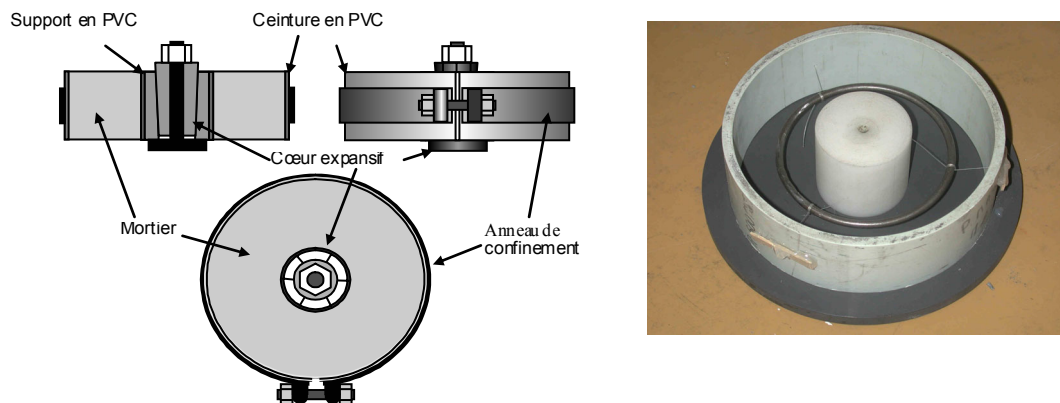


Figure 19 : Etude expérimentale du développement de la corrosion (LMDC)

5. GROUPE DE TRAVAIL GT3 : DIAGNOSTIC ELECTROCHIMIQUE DES OUVRAGES DÉGRADÉS

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. L'étude récente RGC&U « Benchmark des poutres de la Rance » a conduit à des valeurs de vitesse de corrosion très dispersées selon les matériels du commerce et du laboratoire, voire contradictoire d'un point de vue de l'activité de la corrosion. Pour interpréter les résultats de ces mesures, il est indispensable de connaître l'aire des aciers concernée par cette polarisation électrique. Les différents appareils existants actuellement pour effectuer ces mesures ne permettent pas toujours de connaître cette aire polarisée. De plus, il faut se montrer prudent quant aux valeurs de mesures de résistance de polarisation si l'on utilise le tableau d'activité de corrosion de la RILEM car il faut bien prendre en compte le type de matériel ayant servi à la mesure (certains appareils semblent sous-estimer ou sur-estimer largement les vitesses de corrosion). On est donc en droit de se demander quelle est la validité des diagnostics : selon l'appareillage utilisé pour les mesures puis le calcul des vitesses de corrosion, certains résultats indiquent la nécessité de réhabiliter, d'autres mettent en évidence une zone passive de corrosion, alors que la zone d'analyse est identique.

Les objectifs du groupe de travail GT3 du projet APPLET (Bouteiller, 2009) sont liés à l'efficacité de la gestion technique des ouvrages en béton armé ; ils se décomposent divisé en 5 sujets :

- GT3-1 : Etude bibliographique et documentaire,
- GT3-2 : Fabrication des corps d'épreuves et vieillissements,
- GT3-3 : Amélioration de la connaissance des techniques de mesures des vitesses de corrosion,
- GT3-4 : Etude de l'influence des conditions environnementales (température et hygrométrie) sur les mesures de corrosion,
- GT3-5 : Exemples d'application.

5.1. GT3-1 : Etude bibliographique et documentaire

La revue bibliographique est effectuée sur les différentes grandeurs (Ecorr, Rp, Icorr) qui seront mesurées au cours du projet APPLET en accentuant les recherches sur l'impact des conditions de mesure (méthodologie de mesure, prise en compte de la chute ohmique, aire polarisée) et des conditions environnementales (température et humidité relative). Afin d'approfondir la connaissance du fonctionnement (mesure et analyse) de chaque appareil utilisé (de laboratoire et de chantier), une étude documentaire sera également menée. Ces deux études sont menées respectivement sous la direction du LCPC et du LRMH.

5.2. GT3-2 : Fabrication des corps d'épreuves et vieillissements

5.2.1. Action GT3-2-1 : Fabrication

Le programme de recherche du GT3 vise à étudier, d'une part, l'influence des paramètres de l'instrumentation et, d'autre part, l'influence des conditions environnementales (température et humidité relative), sur les résultats de mesures électrochimiques réalisées sur des bétons armés. La réalisation de ce programme a nécessité la fabrication de trois types de corps d'épreuve différents de par leurs dimensions et leur ferrailage : des dalles, des dallettes et des prismes. Les prismes seront utilisés pour étudier l'influence du couple température/humidité. Les dallettes serviront majoritairement à l'étude portant sur l'influence des paramètres de l'instrumentation et notamment l'aire polarisée. Les dalles (de dimensions plus représentatives d'un élément de structure) seront utiles pour la comparaison des mesures réalisées sur dallettes et sur ouvrages *in situ*. Ces trois types de corps d'épreuve de dimensions différentes ont respectivement pour nombre et pour dimensions :

- 4 dalles (60 x 60 x 7 cm) – Figure 20,
- 56 dallettes (30 x 30 x 5 cm) – Figure 21,
- 160 prismes (15 x 15 x 5 cm).

Le ciment, choisi avec les autres groupes de travail, est un ciment Holcim CEM I 52.5 N CE CP2 NF de l'Usine de Dannes. Le dosage en ciment est de 275 kg/m³ de béton. Les granulats proviennent de Palvadeau. Les corps d'épreuve sont coulés à l'horizontale, ils sont démoulés à 24h et font une cure de 28 jours dans l'eau. Les coffrages, les coulages et les cures des dallettes ont été réalisés au LR de Lille. Les dalles ont été fabriquées au CSTC en Belgique.

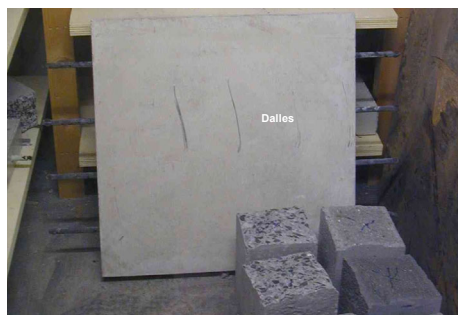


Figure 20 : Dalles (CSTC)

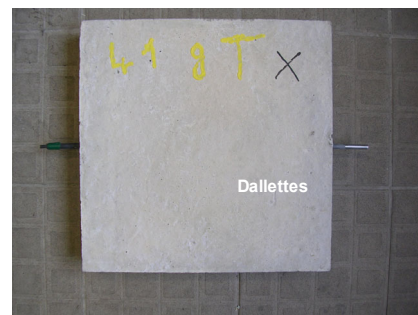


Figure 21 : Dallettes (LR Lille)

L'acier est un fer à béton rond (Fe24) lisse de diamètre 8 mm nominal usinés à 6 mm pour les dallettes et 12 mm usiné à 10 mm pour les dalles. La longueur d'une barre d'acier est égale à 40 cm pour les dallettes (les aciers dépassant de 5 cm de chaque côté) et de 80 cm (les aciers dépassant de 10 cm de chaque côté). La surface de l'acier est polie (pour réaliser des pertes de masse lors des essais destructifs). De la peinture par cataphorèse et de la gaine thermorétractable sont utilisées successivement afin de bien délimiter la surface à étudier par électrochimie.

5.2.2. Action GT3-2-2 : Vieillessement

Les corps d'épreuve sont soumis à plusieurs ambiances. Pour les dallettes, les ambiances suivantes ont été retenues (**livrable L3-2/1**) :

- témoins ou référence (béton sain – **T**),
- chlorures apportés au gâchage (**G**),
- chlorures apportés par des cycles d'immersion/séchage (**I**),
- carbonatation (**C**),

Les vieillissements sont réalisés au LREP Melun. Les corps d'épreuve **T** ne nécessitent aucun vieillissement, par définition. Ces dallettes sont stockées dans une ambiance de 20°C ± 2°C en température et de 60 % ± 10 % en humidité relative. Afin d'accélérer la corrosion des aciers, des chlorures sont ajoutés à l'eau de gâchage lors de la fabrication des dallettes **G**. Les chlorures ajoutés sont sous forme NaCl (chlorure de sodium), à raison de 5 % en poids par rapport au poids de ciment. Après la cure, les dallettes **I** sont soumises à des cycles d'immersion/séchage, dans de l'eau salée (NaCl à 35 g/l), à raison de 4 jours immergées dans la solution et de 3

jours de séchage dans l'ambiance du laboratoire. La concentration en chlorures libre, à atteindre au niveau de l'acier, est de 0,4 % par rapport au poids de ciment (seuil critique donné dans la littérature pour lequel la corrosion peut s'initier). Des carottages sont réalisés au cours du temps et les chlorures seront dosés par potentiométrie. Enfin, après la cure, les dalles **C** sont vieillies artificiellement par carbonatation. Le vieillissement comprend une étape de préconditionnement de quatre semaines dans une enceinte climatique à une température de 45°C et une humidité relative de 65 %, suivie d'une étape de carbonatation dans des cuves régulées en humidité relative (proche de 60 %) et en concentration de dioxyde de carbone (Figure 22). L'objectif est de carbonater toute l'épaisseur de la dalle, soit 5 cm (les aciers sont dans un enrobage de 2,5 cm), ce qui prend trois à quatre mois. Des carottages seront réalisés, à différentes échéances, et le front de carbonatation sera évalué à l'aide de la phénolphaléine.



Figure 22. Vieillessement des dalles (LREP)



Figure 23. Vieillessement des dalles (CSTC)

Les mêmes vieillissements ont été retenus pour les dalles, une seule dalle étant concernée par type d'ambiance (Figure 23). Pour le dosage des chlorures, des échantillons de poudre seront obtenus par perçage dans les prismes ad hoc. La teneur en chlorures totaux (par rapport au poids de béton) au niveau de l'acier sera déterminée par colorimétrie en analysant la poudre avec le système LASA Chlorid du Dr.Lange. Une correction sera alors réalisée afin de déterminer la teneur en chlorures par rapport au poids de ciment. Lorsque la valeur mesurée dépassera le seuil de 0,4%, un dosage en chlorures libres sera réalisé par potentiométrie afin d'évaluer plus précisément la concentration en chlorures. La dalle **C** est tout d'abord séchée durant 14 jours à 50°C. Puis elle est maintenue durant 7 jours en chambre climatique à une température de 20°C $\pm$ 2°C et à une humidité relative de 60 % $\pm$ 2%. Enfin, elle sera placée dans la cellule de carbonatation à 1 % de CO₂, 20°C et 55 % d'humidité relative. Les quatre dalles seront entreposées en extérieur, au LRMH. Le vieillissement des corps d'épreuve a été terminé fin d'année 2008.

5.3. GT3-3 : Amélioration de la connaissance des techniques de mesures des vitesses de corrosion

Des études récentes (et en particulier l'étape de caractérisation des poutres âgées de 40 ans dans le cadre du « Benchmark des poutres de la Rance ») ont mis en évidence une dispersion importante des résultats de vitesses de corrosion d'armatures dans le béton en fonction des appareillages utilisés pour réaliser les mesures (appareils de terrain, potentiostats de laboratoire). Cette dispersion est problématique, d'une part, pour les maîtres d'ouvrages, puisqu'elle signifie une disparité des diagnostics et donc des programmes de réparation et, d'autre part, pour les modélisateurs qui utilisent les résultats comme données d'entrée dans leurs modèles. Cette étude vise à mieux comprendre les phénomènes qui induisent les écarts observés jusqu'à présent, et permettra de fiabiliser les résultats. L'étude comportera deux volets. Le premier est expérimental et le second volet comporte de la simulation numérique. Le sujet est placé sous la responsabilité du CEA.

5.3.1. Action GT3-3-1 : Influence des paramètres de l'instrumentation sur les résultats

Afin de mieux comprendre les dispersions des résultats de mesures (et espérer les réduire), les principaux paramètres et grandeurs suivants seront évalués par méthode de perturbation électrique, dispositif de compensation de la chute ohmique, et aire polarisée. L'une des causes possibles de la dispersion des mesures constatée entre les différents appareils (de chantier et de laboratoire) est la mauvaise évaluation de l'aire réellement polarisée du métal lors de la mesure. En effet, certains appareils (chantier) disposent d'un système de

confinement (actif ou passif) des courants de polarisation alors que les outils de laboratoire en sont généralement dépourvus. Ces trois types de mesures permettront le calcul de R_p , avec et sans chute ohmique, et l'évaluation de la dispersion due au mode de perturbation électrique (statique ou dynamique) et, pour les modes dynamiques, de la rampe et du cycle. Les mesures débiteront en début d'année 2009 lors de la répartition des corps d'épreuve en partenaires du GT3. Les tableaux des résultats doivent être uniformisés (formulaires) de manière à pouvoir analyser, comparer et exploiter les résultats de chaque partenaire de la manière la plus aisée possible. Pour l'exploitation des mesures la société SYROKKO sera associée pour apporter sa compétence en traitement de données statistiques.

5.3.2. Action GT3-3-2 : Simulation de la polarisation électrique

Il s'agit de réaliser une simulation du système de polarisation électrique constitué de l'armature (électrode de travail), du béton et du dispositif de mesure à l'aide d'un outil de type COMSOL Multiphysics®. Faire varier les différents paramètres tels que la position et la surface de l'aire polarisée par rapport à l'électrode, les propriétés diélectriques du béton... et observer l'influence sur la direction des courants constituent l'objectif de cette simulation. Elle devrait permettre une meilleure compréhension de la dispersion des courants et donc une meilleure évaluation de l'aire réellement polarisée. Le LMDC de l'INSA de Toulouse a en charge la réalisation de ces simulations numériques. Les premiers résultats en simulation 3D montrent que les dispositifs de confinement ne sont pas efficaces et que la polarisation doit rester dans la gamme 10-20 mV. Ces observations sont en bon accord avec les résultats obtenus lors du benchmark de la Rance. Néanmoins, ces premières tentatives de simulation soulèvent un certain nombre de questions portant sur la position des électrodes pour ajuster l'anneau de confinement, la réalisation d'une polarisation par pallier pour les mesures en potentiostatique, et réalisation de mesures sur aciers polarisés contrôlés. En début d'année 2009, des mesures de résistivité (appareil LMDC) seront réalisées sur les corps d'épreuve.

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

Cette étude vise à apporter une réponse aux problèmes posés par la disparité des mesures réalisées à différentes saisons. Il s'agit d'étudier l'impact de différents couples de température et d'humidité relative sur les mesures de corrosion. Les expériences seront réalisées sur des prismes vieilliss (témoin, chlorures au gâchage, chlorures par immersion/séchage et carbonatation) afin de prendre en compte les divers modes de corrosion. Les travaux de cet axe de recherche ne débiteront qu'en 2009. Ce sujet est placé sous la responsabilité du LCPC.

5.5. GT3-5 : Validation des mesures de vitesse de corrosion – Exemples d'application

Cette étude vise à valider les mesures réalisées précédemment en prenant en compte le « recalage » des mesures suivant les appareils utilisés et les conditions environnementales des ouvrages pendant la mesure, sur des structures existantes. Des mesures complémentaires de type Radar, capacimétrie et résistivité seront réalisées sur les dalles. Après analyse des différents paramètres étudiés au GT3-2, une campagne de mesures visant à confronter les résultats des différents appareils (de laboratoire et de chantier) sera menée sur des corps d'épreuve de grandes dimensions (dalles) par l'ensemble des partenaires au projet intervenant sur le GT3. Ces résultats seront exploités à l'aide d'une approche statistique (si le nombre de mesures le permet) afin de recalibrer les différents appareils. Enfin, la mesure gravimétrique (vitesse de corrosion moyenne) permettra de s'assurer que l'ensemble des résultats obtenus est en accord avec l'état réel de corrosion des aciers. De plus, l'autopsie fine de l'interface acier/béton (microscopies, diffraction de rayons X, spectroscopie Raman) permettra d'accéder à la nature et à la structure des produits de corrosion. Ces données alimenteront les modèles d'endommagement et de comportement mécanique développés dans le cadre du GT2-2.

L'étape finale du projet consistera à valider l'ensemble des résultats obtenus (corrélations, lois de comportement) par des campagnes de mesures in situ sur ouvrages. Elle consiste également à produire des recommandations pour les maîtres d'ouvrages et les laboratoires concernant les résultats à attendre des contrôles non destructifs de diagnostic électrochimique de la corrosion. Ces activités ne débiteront qu'en fin d'année 2009, sauf pour les mesures in situ où la recherche de sites a déjà été lancée. Ce sujet est placé sous la responsabilité du LMDC.

6. CONCLUSIONS

Parmi le patrimoine d'ouvrages, celui des structures en béton est le plus grand en nombre et en qualité, puisqu'il recouvre entre autres des ouvrages aussi divers que des pylônes, des silos, des barrages, des tunnels, des structures souterraines, des bâtiments ou des ponts... La maîtrise du vieillissement de ces ouvrages est donc 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.

Le retour d'expérience montre que la meilleure gestion de la maintenance des structures vieillissantes, dans un contexte de développement durable, nécessite des outils performants de prédiction de la performance et de la durée de vie des structures. Par ailleurs, le développement de tels outils est également aujourd'hui un enjeu important qui émerge lors de la construction d'ouvrages neufs pour lesquels la pérennité économique du projet

dépend aussi des coûts de maintenance. De nombreux exemples montrent que pour le patrimoine bâti au 20ème siècle, les coûts de réparation prévisibles peuvent grever la valeur de certains édifices de manière importante. Jusqu'à présent, la connaissance partielle des phénomènes de dégradation, en particulier dans les conditions de vie réelles des ouvrages, la qualité parfois médiocre des constructions au cours du temps, l'augmentation et l'évolution des charges de service et des conditions environnementales, le manque d'entretien, ont amené à une accélération du vieillissement de nombreux ouvrages. Faute d'anticipation, les maîtres d'ouvrages procèdent souvent à des maintenances curatives parfois dans l'urgence alors qu'une gestion préventive permettrait de gérer et de prolonger la durée de vie des ouvrages tout en assurant au moindre coût leur sécurité et leur fonctionnement. Ces divers constats montrent qu'il est aujourd'hui nécessaire, pour les différents acteurs de la filière génie civil et construction, d'aborder le cycle de vie des ouvrages et leur durée de vie de manière plus efficace, rationnelle et pertinente. Une telle action est aujourd'hui un passage obligé pour à terme, optimiser leur maintenance en accord avec une stratégie de développement durable. Les objectifs scientifiques du projet APPLET sont en parfaite adéquation avec ces besoins, l'originalité du projet visant à franchir une étape nouvelle dans l'appréhension de la dégradation des ouvrages en béton.

REMERCIEMENTS

Les recherches et les résultats rapportés dans cet article bénéficient de l'aide apportée par l'Agence Nationale de la Recherche (France) dans le cadre du projet APPLET (contrat ANR-06-RGCU-001-01). Le pôle de compétitivité Advancity est également remercié pour son appui dans la valorisation des résultats du projet.

RÉFÉRENCES

- Bouteiller V. & al, 2009. Contribution au projet APPLET : Diagnostic de la corrosion des ouvrages en béton armé. *Journées AFGC GC'09*, 18-19 mars 2009, Cachan.
- Poyet S. & al., 2009. Contribution au projet APPLET : variabilité de la perméabilité au gaz et influence des conditions expérimentales sur la variabilité de la résistance à la dégradation accélérée. *Journées AFGC GC'09*, 18-19 mars 2009, Cachan.
- Richard B. & al, 2009. Contribution au projet APPLET : une contribution à la modélisation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion. *Journées AFGC GC'09*, 18-19 mars 2009, Cachan.
- Torrenti J-M & al, 2009. Contribution au projet APPLET : caractérisation de la variabilité des performances des bétons. Application à la durabilité des structures. *Journées AFGC GC'09*, 18-19 mars 2009, Cachan.