



HAL
open science

Etude de la durabilité des systèmes béton armé : mortiers de réparation en milieu marin

Abderrahmane Soufi

► **To cite this version:**

Abderrahmane Soufi. Etude de la durabilité des systèmes béton armé : mortiers de réparation en milieu marin. Autre. Université de La Rochelle, 2013. Français. NNT : 2013LAROS400 . tel-01067496

HAL Id: tel-01067496

<https://theses.hal.science/tel-01067496>

Submitted on 23 Sep 2014

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.



UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE



ÉCOLE DOCTORALE
Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et Aéronautique (SI-MMEA)

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE)
FRE 3474 CNRS

THÈSE

Présentée par :

Abderrahmane SOUFI

Soutenue le 28 mai 2013

Pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Rochelle

Discipline : Génie civil

Étude de la durabilité des systèmes béton armé – mortiers de réparation en milieu marin

JURY :

Gilles ESCADEILLAS
William PRINCE-AGBODJAN
Sylvie YOTTE
Ouali AMIRI
Chafika DJELAL-DANTEC
Abdelkarim AÏT-MOKHTAR
Pierre-Yves MAHIEUX

Professeur, Université de Toulouse III, Président du jury
Professeur, INSA de Rennes, Rapporteur
Professeur, Université de Limoges, Rapporteur
Professeur, Polytech de Nantes, Examineur
Professeur, Université d'Artois, Examinatrice
Professeur, Université de La Rochelle, Directeur de thèse
Maître de conférences, Université de La Rochelle, Co-encadrant

Je remercie les financeurs de ce projet de thèse :

 *Atlantic Area platform pour le projet INTERREG IV DURATINET – (2009-2012).*

 *La région Poitou-Charentes*

Je remercie les partenaires du projet DURATINET (Durable Transport Infrastructure in Atlantic Area)

Portugal :

EP, REFE, Port de Lisbonne (gestionnaires d'ouvrages) ainsi que le Laboratoire National de Génie Civil (LNEC) à Lisbonne

France :

- Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC)

- Conseil General de la Charente-Maritime (CG-17)

- Laboratoire GHYMAC (Géosciences, Hydrosciences, Matériaux, Construction), Université de Bordeaux 3.

- Laboratoire GeM (Génie civil et Mécanique), Université de Nantes

Royaume Uni : Queens University Belfast

Irlande : NRA (gestionnaire d'ouvrages), Trinity College Dublin

Espagne : Xunta de Galiza et Port de Vigo (gestionnaires d'ouvrages), Université de Vigo

.

Je remercie les membres du jury :

- M. Ouali Amiri
- Mme. Chafika DJELAL- DANTEC
- M. Gilles ESCADEILLAS
- Mme Sylvie YOTTE

Je remercie mes encadrants :

- M. Abdelkarim AÏT-MOKHTAR
- M. Pierre-Yves MAHIEUX

Je remercie mes collègues du LASIE :

- M. Rafik BELARBI
- Mme Egle CONFORTO
- Mme Stephanie MALLARINO
- Mme Celine REMAZEILLES
- M. Philippe TURCRY

Je remercie aussi :

- Kamilia ABAHRI
- Mahfoud TAHLAITI
- Michel TARDIEU

Ainsi que mes amis et ma famille

Résumé

Le domaine de la réparation et de la réhabilitation des ouvrages en béton armé est en pleine évolution. En effet, la plupart des ouvrages en béton armé, en particulier les structures marines, ont plus de 40 ans et beaucoup d'entre eux nécessitent des travaux de maintenance et de réparation vu leur état de dégradation. La corrosion des armatures occupe le premier rang des dégradations causant ainsi des désordres dans le béton jusqu'à la ruine partielle de l'ouvrage. Le coût engendré par ces réparations représente de grands enjeux économiques pour les maîtres d'ouvrages qui doivent trouver des solutions et des méthodes optimisées de réparation. Devant l'augmentation de l'ampleur des travaux de réparation et de maintenance des ouvrages en béton armé dégradés, des guides techniques, des normes et des règles de l'art ont été développés. Parmi ces documents, la norme européenne EN 1504. D'après cette norme, il existe de nombreuses méthodes de réparation pour les ouvrages en béton armé « produit et système pour la protection et la réparation des structures en béton ». Parmi lesquelles figure la réparation par mortiers, méthode ciblée dans les travaux de thèse présentés ici.

Dans la littérature, il existe peu d'études sur la durabilité des mortiers de réparation. C'est pourquoi nous visons à contribuer à une meilleure compréhension du comportement des mortiers de réparations vis-à-vis des propriétés de transfert pour une réparation plus efficace et plus durable.

L'objectif principal est de réaliser une analyse performantielle sur des mortiers de réparation industriels et de proposer un meilleur choix quant à l'utilisation de ces matériaux dans un milieu marin.

Huit mortiers de réparation disponibles dans l'industrie ont été sélectionnés pour cette étude. Dans un premier temps, une investigation de la formulation de ces mortiers a été réalisée (proportions de ciment, sable, polymères et additions). Dans un deuxième temps, la quantification de quelques indicateurs de durabilité a été réalisée : ont été mesurés la porosité, l'absorption capillaire, la perméabilité à l'air et le coefficient de diffusion effectif des chlorures. Dans un troisième temps, l'objectif a été de quantifier leurs performances par des essais expérimentaux de corrosion accélérée sur des éprouvettes de béton armé réparées par ces mortiers.

La méthode utilisée est la Spectroscopie d'Impédance Electrochimique. Enfin, une simulation de la pénétration des ions chlorures dans les mortiers de réparation a été réalisée, moyennant un modèle développé au laboratoire qui se base sur l'équation de Nernst-Planck afin de définir des concentrations critiques en chlorures et les temps d'amorçage de la corrosion correspondants.

Mots clés : durabilité, béton armé, chlorures, mortiers de réparation, polymères, amorçage de la corrosion.

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE	5
1 PATHOLOGIES DES OUVRAGES EN BETON ARME EN MILIEU MARIN	5
1.1 CONTEXTE	5
1.2 LA CORROSION DES ARMATURES PAR LES IONS CHLORURES	6
1.3 AUTRES PARAMETRES INTERVENANTS DANS LE PROCESSUS DE CORROSION	8
1.3.1 <i>Le taux d'oxygène et d'humidité</i>	8
1.3.2 <i>Le béton d'enrobage et la nature du ciment</i>	9
1.3.3 <i>La résistivité électrique du béton</i>	9
1.4 MECANISMES DE TRANSFERT DES CHLORURES	10
1.4.1 <i>La diffusion</i>	11
1.4.2 <i>La migration ou diffusion ionique</i>	12
1.4.3 <i>Détermination du coefficient de diffusion par un essai migration</i>	15
1.4.4 <i>Absorption capillaire</i>	17
2 REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME	17
2.1 CONTEXTE NORMATIF	18
2.2 LES METHODES ELECTROCHIMIQUES	19
2.2.1 <i>La protection cathodique</i>	20
2.2.2 <i>Extraction électrochimique des ions chlorures</i>	20
2.3 LES METHODES NON ELECTROCHIMIQUES	21
2.3.1 <i>Application de revêtements</i>	21
2.3.2 <i>Les Inhibiteurs de corrosion</i>	21
2.3.3 <i>La réparation par mortiers</i>	22
2.3.4 <i>Les mortiers de réparation</i>	23
2.3.5 <i>Les polymères dans les mortiers de réparation</i>	25
2.3.6 <i>Influence des polymères sur les propriétés à l'état frais</i>	29
3 CARACTERISATION DES MORTIERS DE REPARATION	31
3.1 RESISTANCES MECANIQUES	31
3.2 LA POROSITE ET LA STRUCTURE POREUSE DES MORTIERS DE REPARATION	33
3.3 PROPRIETES DE TRANSFERT DES MORTIERS DE REPARATION	35
3.3.1 <i>Effet de l'ajout du polymère sur l'absorption d'eau</i>	35
3.3.2 <i>Effet de l'ajout du polymère sur la pénétration des chlorures</i>	36
3.3.3 <i>Effet de l'ajout du polymère sur la perméabilité</i>	36
3.3.4 <i>Bilan des propriétés de transfert</i>	38

3.4	DURABILITE DES REPARATIONS	39
3.4.1	<i>Corrosion après réparation</i>	39
3.4.2	<i>Interaction des mortiers de réparation avec les supports</i>	40
4	CONTEXTE, PROBLEMATIQUE ET PLAN D'ETUDE	41
CHAPITRE 2 : MATERIAUX, METHODES ET CARACTERISATION PRELIMINAIRE		47
1	INTRODUCTION	47
2	MATERIAUX	47
2.1	MORTIERS DE REPARATION ETUDIES	48
2.2	BETONS SUPPORT	50
2.3	MORTIERS TEMOINS	50
3	TECHNIQUES ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX	51
3.1	PREPARATION DES ECHANTILLONS	51
3.1.1	<i>Echantillons pour les essais de transfert</i>	52
3.1.2	<i>Echantillons pour les essais de corrosion accélérée</i>	52
3.1.3	<i>Echantillons pour les essais de transfert à l'interface mortier-béton</i>	54
3.2	PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUE, MINERALOGIQUES ET MECANIQUES	55
3.2.1	<i>Analyse granulométrique par tamisage</i>	55
3.2.2	<i>Analyse thermogravimétrique (ATG)</i>	55
3.2.3	<i>Microscopie électronique à balayage (MEB)</i>	56
3.2.4	<i>La spectroscopie infrarouge</i>	58
3.2.5	<i>Résistances à la compression et à la flexion</i>	59
3.3	PROPRIETES DE TRANSFERT	59
3.3.1	<i>Porosité à l'eau</i>	59
3.3.2	<i>Porosité au mercure</i>	60
3.3.3	<i>Absorption capillaire à l'eau</i>	61
3.3.4	<i>Perméabilité au gaz</i>	62
3.3.5	<i>Isothermes d'interaction chimique</i>	65
3.3.6	<i>Electrodifusion des ions chlorures</i>	66
3.4	ETUDE DE L'INITIATION DE LA CORROSION	67
3.4.1	<i>Mesure du potentiel de corrosion</i>	68
3.4.2	<i>Spectrométrie d'impédance électrochimique</i>	69
3.4.3	<i>Profils en chlorures et concentrations critiques en chlorures</i>	72
4	CARACTERISATION PRELIMINAIRE DES MORTIERS DE REPARATION	73
4.1	GRANULOMETRIE PAR TAMISAGE	74
4.2	ANALYSES THERMOGRAVIMETRIQUES (ATG)	75
4.3	ANALYSES PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE	82

4.4	OBSERVATIONS AU MEB	85
5	RESISTANCES MECANIQUES.....	94
5.1	RESISTANCE A LA FLEXION	94
5.2	RESISTANCE A LA COMPRESSION	94
6	CONCLUSION	95

CHAPITRE 3: PROPRIETES DE TRANSFERT ET ANALYSE PERFORMANTIELLE DE LA DURABILITE DES MORTIERS DE REPARATION99

1	INTRODUCTION.....	99
2	PROPRIETES DE TRANSFERT DES MORTIERS DE REPARATION.....	99
2.1	LA POROSITE.....	101
2.2	ABSORPTION CAPILLAIRE.....	110
2.3	PERMEABILITE AU GAZ	117
2.4	DIFFUSION DES CHLORURES.....	123
2.5	SYNTHESE DES PROPRIETES DE TRANSFERT ET INDEX DE DURABILITE	127
3	PROPRIETES DE TRANSFERT A L'INTERFACE MORTIER-SUPPORT	131
3.1	DIFFUSION DES CHLORURES.....	131
3.2	ABSORPTION CAPILLAIRE.....	137
4	CONCLUSION	143

CHAPITRE 4 : ETUDE DE L'INITIATION DE LA CORROSION ET MODELISATION DE LA PENETRATION DES CHLORURES DANS LES MORTIERS DE REPARATION..... 147

1	INTRODUCTION.....	147
2	ETUDE DE L'INITIATION DE LA CORROSION.....	147
2.1	AMORÇAGE DE LA CORROSION EN MILIEU INFINI	147
2.1.1	<i>Spectroscopie d'impédance électrochimique</i>	148
2.1.2	<i>Potentiel de corrosion</i>	154
2.1.3	<i>Teneur critique en chlorures</i>	156
2.1.4	<i>Observations au MEB</i>	161
2.2	AMORÇAGE DE LA CORROSION EN MILIEU SEMI INFINI.....	166
2.3	CONCLUSION	170
3	SIMULATION NUMERIQUE DE LA PENETRATION DES CHLORURES	171
3.1	PRESENTATION DU MODELE.....	171

3.1.1	<i>Equation de la conservation en milieu saturé</i>	171
3.1.2	<i>Equation de diffusion ionique : Nernst-Planck et l'équation d'électro-neutralité</i>	172
3.1.3	<i>Isothermes d'interactions chimiques</i>	173
3.2	MISE EN ŒUVRE NUMERIQUE	174
3.2.1	<i>Méthode de résolution</i>	174
3.2.2	<i>Conditions initiales et aux limites</i>	174
3.2.3	<i>Les entrées expérimentales du modèle</i>	175
3.3	SIMULATIONS	177
3.4	CONCLUSION	184
4	CONCLUSION	185
	CONCLUSION GENERALE	187
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	191
	ANNEXES	209

Introduction Générale

La corrosion des armatures dans le milieu marin est considérée comme la dégradation la plus fréquente des ouvrages en béton armé. Cette pathologie résulte de l'agressivité de l'environnement mais aussi des défauts de conception et de mise en œuvre. Aujourd'hui, une grande partie des ouvrages situés dans l'espace Atlantique ont plus de 40 ans et ne satisfont plus les exigences actuelles en matière de durabilité. Cette problématique représente un enjeu technologique et économique important et pousse les maîtres d'ouvrages à chercher des solutions rapides et efficaces pour prolonger la durée de vie de leurs ouvrages, assurer la sécurité des usagers et optimiser les coûts de maintenance et de réparation. C'est dans cette optique que des programmes de recherche européens ont été initiés. Parmi eux, le projet DURATINET (Durable Transport Infrastructures in Atlantic Area -Network), dans lequel s'inscrit ce travail de thèse et qu'il a financé en partie. Ce projet regroupe des institutions et des industriels de la côte atlantique (Espagne, Portugal, France, Irlande et Royaume Uni) et dont le but est d'améliorer la durabilité et l'optimisation des méthodologies de maintenance et de réparation applicables aux infrastructures de transport de l'Espace Atlantique.

D'après la norme Européenne NF EN 1504, il existe de nombreuses méthodes de réparation pour les ouvrages en béton armé (« produit et système pour la protection et la réparation des structures en béton »). Parmi lesquelles figure la réparation par mortiers, méthode étudiée dans le cadre de cette thèse. C'est une méthode rapide pouvant traiter la corrosion à plusieurs stades de son évolution, mais nécessite une grande maîtrise de mise en œuvre et un bon diagnostic avant les travaux de réparation.

Le retour d'expérience montre que certains travaux de réparation nécessitent de nouveau, après quelques années seulement, un entretien très important, voire une réparation de « la réparation ». Le coût économique engendré est ainsi gigantesque. Deux causes seraient à l'origine de ces détériorations prématurées : l'incompatibilité entre les matériaux de réparation et le support et le problème de résistance de ces réparations à la pénétration des agents agressifs tels que les chlorures.

Bien que des études sur l'incompatibilité entre matériau de réparation et béton support aient été réalisées peu d'études existent sur la durabilité des mortiers de réparation.

C'est parce que ce facteur reste souvent ignoré ou négligé que nous essayons dans cette étude de contribuer à une meilleure compréhension du comportement des mortiers de réparation vis-à-vis des transferts des chlorures afin d'optimiser la durabilité de la réparation.

L'objectif principal est de réaliser une analyse performantielle sur des mortiers de réparation industriels et de proposer un meilleur choix quant à l'utilisation de ces matériaux dans un milieu marin. Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie expérimentale a été mise en œuvre. Elle consiste à sélectionner un panel de mortiers de réparation industriels, à étudier leurs propriétés intrinsèques vis-à-vis de la durabilité ainsi que le comportement d'un ensemble béton support/mortier de réparation vis-à-vis des propriétés de transfert et de l'amorçage de la corrosion.

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre est une étude bibliographique ciblée sur les mortiers de réparation, leurs formulations, leurs méthodes de mise en œuvre ainsi que leurs propriétés mécaniques et de durabilité.

Le deuxième chapitre présente les méthodes et techniques expérimentales utilisées dans ce projet ainsi qu'une investigation préliminaire visant à caractériser la nature et les proportions des constituants des mortiers de réparation. Cette investigation préliminaire est une étape importante pour l'étude de leurs propriétés de durabilité, notamment dans la compréhension des mécanismes mis en jeu lors du transfert des agents agressifs.

Le troisième chapitre présente l'analyse performantielle de la durabilité des mortiers de réparation. Les indicateurs de durabilité analysés sont la porosité, l'absorption capillaire, la perméabilité à l'air et le coefficient de diffusion des chlorures à l'état saturé. Ces indicateurs de durabilité sont très importants pour appréhender le comportement des mortiers vis à vis de leur performance dans la protection des armatures du béton armé de la corrosion.

Enfin, le dernier chapitre présente une analyse performantielle vis-à-vis de l'amorçage de la corrosion et une simulation de la pénétration des ions chlorures dans les mortiers de réparation, moyennant un modèle numérique développé au laboratoire. Ces simulations ont pour objectif de relier de façon prédictive les concentrations critiques en chlorures responsables de l'amorçage de la corrosion au temps nécessaire à cet amorçage dans les zones réparées d'une structure en environnement marin.

Chapitre 1 : Etude Bibliographique et Contexte de l'Étude

Chapitre 1 : Etude Bibliographique et Contexte de l'Étude

1 Pathologies des ouvrages en béton armé en milieu marin

1.1 Contexte

Le béton armé est utilisé pour la réalisation de très nombreux ouvrages d'art ou de structures situés en sites maritimes. La dégradation de ces ouvrages est en grande partie liée aux processus de transfert des ions chlorures contenus dans l'eau de mer à travers le béton d'enrobage. Le transfert des ions chlorures favorise l'initiation de la corrosion des armatures, affectant ainsi la durabilité de l'ouvrage et entraînant des coûts importants de maintenance, de réparation et de reconstruction.

Les mécanismes de dégradation sont fonction de l'exposition de l'ouvrage par rapport à son environnement. Ainsi, en site maritime, quatre zones d'exposition sont définies : la zone atmosphérique, la zone immergée, la zone d'éclaboussures et la zone de marnage (figure 1.1).



Figure 1.1 : Zones d'exposition en site maritime [Steven, 99] et exemple d'un ouvrage exposé à l'environnement marin (pont de l'île de Ré) (Photo : Pierre-Yves Mahieux)

La figure 1.1 présente les différentes zones d'exposition pour une pile de pont exposée à un environnement marin. Les zones d'exposition où le risque de corrosion est le plus important sont les zones de marnage et d'éclaboussures.

Dans ces deux zones, les teneurs en chlorures et en oxygène sont très élevées, l'alternance des cycles d'humidification / séchage a pour effet d'accélérer le processus de transfert des chlorures par diffusion et convection dans un béton partiellement saturé.

Dans la zone totalement immergée, les risques de corrosion sont plus limités car les chlorures ne pénètrent que par diffusion. Enfin, dans la zone atmosphérique, les risques de corrosion sont modérés en raison des faibles concentrations en chlorures et en humidité.

La norme EN 206-1 [Afnor, 00] définit trois zones d'exposition (Tableau 1.1) : les ouvrages exposés à l'air marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer (XS1), les ouvrages immergés en permanence (XS2) et enfin, les zones de marnage et zones soumises à des projections ou à des embruns (XS3).

	<i>Description de l'environnement</i>	<i>Exemples d'ouvrages</i>
<i>XS1</i>	<i>Exposés à l'air marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer</i>	<i>Structures sur ou à proximité d'une côte</i>
<i>XS2</i>	<i>Immergé en permanence</i>	<i>Eléments de structures marines</i>
<i>XS3</i>	<i>Zone de marnage Zone soumise à des projections ou à des embruns</i>	<i>Eléments de structures marines</i>

Tableau 1.1 : Classes d'exposition en milieu marin (Norme EN 206-1)

1.2 La corrosion des armatures par les ions chlorures

Dans un béton sain, l'alcalinité de la solution interstitielle (pH de l'ordre de 13) contenue dans les pores du béton engendre la formation d'une couche ou un film d'oxydes ou d'hydroxydes de fer sur la surface des armatures d'une épaisseur variable entre 10^{-3} et 10^{-1} μm [Poupard, 01]. Dans ces conditions et en l'absence d'ions chlorures, l'acier est en état de passivation avec une vitesse de corrosion négligeable. Les ions chlorures provenant de l'eau de mer pénètrent dans le réseau poreux du béton, diffusent dans la solution interstitielle du béton et atteignent les armatures. Lorsque leur concentration atteint un seuil critique [Alonso, 00], [Polder, 02], la morphologie du film passif qui protège l'armature est modifiée par la production des ions FeCl^{3-} qui consomment les ions OH^- présents, conduisant à une diminution du pH [Ollivier, 06]. Ces réactions conduisent à la destruction du film protecteur. Ceci engendre l'apparition de piqûres qui deviennent de petites anodes formant des piles électrochimiques de corrosion actives avec un pH très bas.

Les zones anodiques et cathodiques de ces piles sont reliées par l'intermédiaire de la solution interstitielle. Les ions ferreux Fe^{2+} passent en solution à l'anode (perte de section à l'anode) alors que des électrons libres se déplacent jusqu'à la cathode (autre section de la barre d'acier). Les électrons se combinent avec de l'eau et de l'oxygène pour former des ions hydroxyle. Les réactions qui se produisent sont les suivantes : [Hanson, 84], [Ahmad, 03].

La dissolution du fer à l'anode :



En présence d'oxygène une réaction se produit dans la zone cathodique correspondant à la réduction d'espèces chimiques en solution:



Les ions ferreux se combinent avec les ions OH^{-} pour former de l'hydroxyde ferreux:



Les hydroxydes et les ions ferreux se déplaçant dans l'électrolyte, se combinent pour former de l'hydroxyde ferrique, qui se transforme par la suite en rouille qui se dépose sur l'acier [Neville, 95]. Les réactions se poursuivent et conduisent à la formation de produits de corrosion expansifs [Koleva, 06]. Cette augmentation de volume par rapport au volume initial provoque une fissuration et un éclatement au niveau du béton d'enrobage. Sur le plan structurel, la corrosion est à l'origine d'une perte de section des armatures et une perte d'adhérence entre le béton et l'acier.

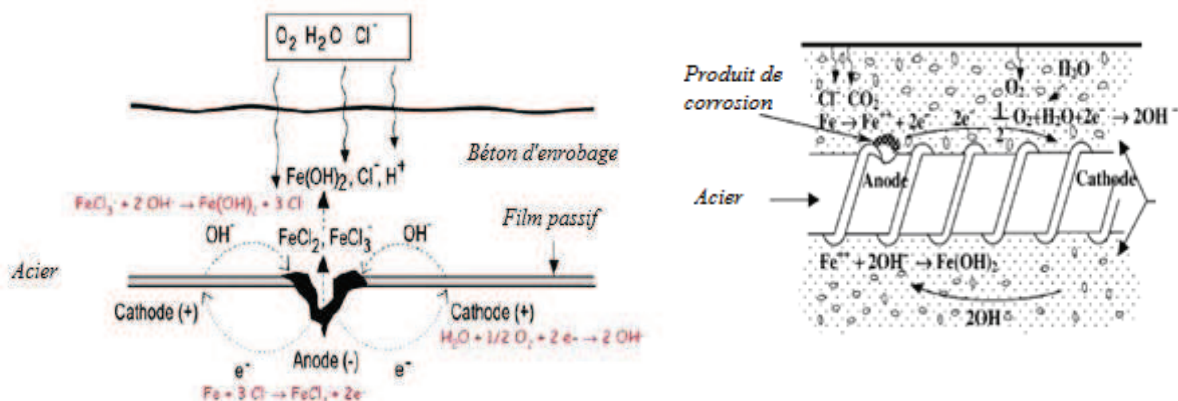


Figure 1.2 : Processus électrochimique de la corrosion [Hanson, 84], [Ollivier, 06]

La dépassivation de l'armature dépend non seulement de la concentration en chlorure mais aussi du rapport Cl^{-}/OH^{-} . D'après le chercheur Hausmann, la valeur de ce rapport est égale à 0,6 [Hausmann, 67].

Toutefois, la difficulté de mesurer la concentration des ions OH^- a incité la communauté scientifique à utiliser un autre paramètre qui est le pourcentage en ions chlorures (totaux ou libres) par rapport à la masse du ciment ou du béton. Les valeurs de ce pourcentage sont très variables, cette variation est essentiellement due à l'existence d'autres facteurs qui ont une influence sur le processus de la corrosion, par exemple : la teneur en eau du béton, la température, la teneur en C_3A du ciment qui affecte la capacité de la matrice cimentaire à fixer les chlorures, ainsi que le pH de la solution porale [Hussein, 95], [Michael, 96].

Les chlorures sont présents dans la matrice cimentaire sous deux formes : chlorures libres et chlorures liés ou fixés. La dépassivation de l'armature est provoquée essentiellement par les chlorures libres. La quantité des chlorures fixés dépend de la capacité de fixation de la matrice cimentaire. Par conséquent, plus les chlorures sont fixés et plus le risque de corrosion est faible. La fixation des chlorures peut être sous deux formes : chlorures adsorbés sur les parois internes du réseau poreux du matériau cimentaire [Amiri, 98], [Sleiman, 08] et sur les gels du C-S-H. Ces derniers sont le siège d'une adsorption physico-chimique des chlorures et d'un piégeage au sein des feuillettes [Delagrave, 97]. La deuxième forme est les chlorures fixés chimiquement par les aluminates tricalciques (C_3A) et les alumino-ferrites tétracalciques (C_4AF). Dans ce cas, une liaison chimique se fait avec les chlorures pour former les monochloroaluminates de calcium hydratés (ou sel de Friedel $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) et des monochloroferrites de calcium hydratés ($\text{C}_3\text{F} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) [Francy, 98], [Thomas, 12]. Les chlorures fixés (C_b) sont fonction des chlorures libres (C_f) suivant une courbe appelée isotherme d'interaction : $C_b = f(C_f)$. Les concentrations sont exprimées en mol/kg de matériau pour les chlorures liés et en mol/m^3 de solution interstitielle pour les chlorures libres [Truc, 00], [Amiri, 98], [Nguyen, 06]. Les isothermes d'interaction sont détaillées dans la section 1.4.

1.3 Autres paramètres intervenants dans le processus de corrosion

Hormis les chlorures, d'autres paramètres entrent en jeu dans le processus de corrosion et influencent l'initiation, la vitesse et les produits de corrosion. Ces paramètres sont résumés dans ce qui suit.

1.3.1 Le taux d'oxygène et d'humidité

L'oxygène et l'humidité jouent un rôle majeur dans le processus de corrosion et plus particulièrement lors de la création de la pile électrochimique.

L'humidité joue le rôle du milieu électrolytique, un taux élevé de saturation dans le réseau poreux du matériau augmente le courant de corrosion mais diminue l'accès de l'oxygène ; un taux trop bas favorise l'accès de l'oxygène mais ralentit les courants de corrosion. Par conséquent, un taux élevé d'humidité sans arriver à la saturation augmente la vitesse de corrosion [Pietro, 96], [Shamsad, 03].

L'eau réagit avec l'oxygène à la cathode et permet d'établir le circuit des charges électriques porté par les ions entre l'anode et la cathode. La présence d'oxygène est nécessaire à la cathode où il se combine avec l'eau et les électrons pour former les ions hydroxyles OH⁻. L'oxygène à l'anode modifie également la composition chimique des produits de corrosion [Poupard, 01].

1.3.2 Le béton d'enrobage et la nature du ciment

Le béton d'enrobage assure une barrière physique et chimique contre l'initiation de la corrosion du fait qu'il assure une protection de l'armature (pH élevé) et qu'il s'oppose à la pénétration des chlorures, de l'humidité et de l'oxygène. Toutefois, la porosité de cette barrière fait que la corrosion se produit et se propage affectant ainsi la durabilité de l'ouvrage et remettant en cause l'efficacité de cette protection. Ainsi, d'après les explications apportées précédemment au processus de corrosion, on peut dire que plus le matériau d'enrobage a une bonne compacité et plus la couche d'enrobage est épaisse, plus le processus de corrosion sera retardé. Le ciment joue un rôle dans le processus de corrosion puisque il participe à la fixation des chlorures au sein des hydrates. Une bonne fixation participe à retarder l'initiation de la corrosion.

1.3.3 La résistivité électrique du béton

La résistivité électrique représente la capacité du matériau à s'opposer au courant électrique. Elle est influencée par le taux de saturation et la composition du matériau. Plus la teneur en eau du béton est élevée, plus la résistivité diminue [Saleem, 96]. La résistivité augmente avec la diminution du rapport E/C et l'ajout d'additions minérales telles que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes et les fumées de silice. Le taux de corrosion est inversement proportionnel à la résistivité. Plus la résistivité est faible, plus le risque de corrosion est élevé. Le risque de corrosion en fonction de l'intervalle de résistivité pour un béton ordinaire à 20°C et donné dans le tableau 1.1, d'après [Polder, 01].

<i>Résistivité du béton ($\Omega.m$)</i>	<i>Risque de corrosion</i>
<i><100</i>	<i>Elevé</i>
<i>100-500</i>	<i>Modéré</i>
<i>500-1000</i>	<i>Faible</i>
<i>>1000</i>	<i>Négligeable</i>

Tableau 1.2 : Résistivité et risque de corrosion dans le béton [Polder, 01]

D'autres facteurs ont aussi une influence sur le processus de corrosion et qui sont [Angst, 09] :

- l'état d'interface acier-béton,
- la concentration des ions hydroxyde dans la solution interstitielle (pH),
- le potentiel électrochimique de l'acier,
- les conditions de surface de l'acier,
- le rapport E/C,
- le degré d'hydratation,
- la composition chimique de l'acier,
- la température,
- le type de cation accompagnant l'ion chlorure.

1.4 Mécanismes de transfert des chlorures

Les ions chlorures pénètrent dans le réseau poreux du béton d'enrobage par des mécanismes de transfert. Quand ils atteignent les armatures en quantité suffisante (concentration critique), les aciers sont alors dépassivés et la corrosion débute [Poupard, 04]. La pénétration des chlorures dépend de l'état de saturation du réseau poreux et des mécanismes de transfert qui entrent en jeu, ces derniers dépendent de la nature d'exposition de l'ouvrage. En milieu saturé (zones immergées en permanence), les ions chlorures pénètrent dans le béton d'enrobage par diffusion.

Pour les parties de structures en zones de marnage, la pénétration des chlorures se fait par imbibition à marée montante. L'imbibition se traduit par deux phénomènes physiques : le mouvement dû au gradient de concentration en ions chlorures (diffusion) et le mouvement dû au mouvement du liquide interstitiel dans le milieu poreux (convection). Dans le cas du séchage (marée basse), la pénétration se fait par diffusion des ions chlorures dans le milieu poreux non saturé.

Cette diffusion se fait sous le gradient de concentration créée par l'évaporation de l'eau dans les zones superficielle du matériau. Ainsi, les différents mécanismes de transfert mis en jeu pour une structure exposée à un environnement marin sont la diffusion et l'absorption capillaire et éventuellement un couplage des deux mécanismes [Sleiman, 08].

1.4.1 La diffusion

La diffusion est définie comme étant le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. Une différence de concentration entre deux points du milieu, engendre un transfert du constituant de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée (gradient de concentration).

La première loi du flux provoqué par diffusion sous gradient de concentration a été développée par Adolf Fick en 1855 sous l'appellation de la première loi de Fick :

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1.4)$$

Où:

J : le flux (mol/ m².s).

D : le coefficient de diffusion de l'espèce (m²/s).

C : la concentration de l'espèce diffusante (mol/m³).

x : la position (m)

Dans un volume élémentaire, où la variation de la concentration entre deux instants est égale à la quantité de matière échangée par diffusion, la première loi de Fick s'écrit:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1.5)$$

Cette loi est connue sous le nom de la deuxième loi de Fick. Elle n'est qu'une explication simplifiée du processus de diffusion dans le matériau puisqu'elle ne considère que la diffusion moléculaire et est inadaptée à la diffusion ionique [Friedman, 03], [Friedman, 04], [Friedman, 08].

Le transfert de chlorures à travers un matériau peut être caractérisé avec deux coefficients de diffusion, coefficient de diffusion effectif et apparent [Amiri, 07]. Ces deux coefficients sont reliés entre par les isothermes d'interactions chimiques. Les méthodes d'essai en régime stationnaire permettent de déterminer un coefficient de diffusion effectif D_{eff} , et les méthodes en régime transitoire un coefficient de diffusion apparent D_{app} :

- D_{eff} : le coefficient de diffusion effectif (m^2/s) est déterminé à partir du flux d'ions chlorures passant à travers l'échantillon de matériau en condition stationnaire. Dans ces conditions, les interactions entre la matrice cimentaire et les chlorures atteignent l'équilibre et n'interfèrent pas sur le flux des ions chlorures. C'est le flux de chlorures libres qui est alors mesuré et ce coefficient de diffusion n'est pas affecté par les interactions physico-chimiques entre les ions chlorures et la matrice cimentaire,

- D_{app} : ce coefficient est déterminé suite à une mesure de la profondeur atteinte dans le matériau par les chlorures en régime transitoire au cours duquel les interactions entre la matrice cimentaire interfèrent sur le flux des ions chlorures. Il est à noter que la procédure de détermination de ce coefficient est entachée d'un certain empirisme, détaillé par Amiri et Aït-Mokhtar [Amiri, 07].

Les deux coefficients sont liés par les isothermes d'interactions chlorures/matrice cimentaire. Les isothermes d'interactions peuvent être modélisées selon différentes approches plus ou moins empiriques dont les plus connues sont :

- L'isotherme de Freundlich :

$$C_b = \alpha C_f^\beta \quad (1.6)$$

- L'isotherme de Langmuir :

$$C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f} \quad (1.7)$$

Où :

- C_b : la concentration en chlorures liés (mol/kg de matériau)
- C_f : la concentration en chlorures libres (mol/m³ de solution)
- α et β sont des constantes ajustées en fonction des résultats expérimentaux

1.4.2 La migration ou diffusion ionique

La migration est définie comme étant le transport d'ions sous l'influence d'un champ électrique. La pénétration des chlorures dans le réseau poreux du matériau est gouvernée par le gradient de concentration, mais aussi par le gradient de potentiel. Les modèles de la littérature qui décrivent le transfert des chlorures dans les matériaux cimentaires saturés peuvent être classés en deux familles :

- les modèles mono-espèces : ces modèles traitent le mouvement des ions chlorures indépendamment des mouvements des autres ions existant dans la solution interstitielle (Na^+ , K^+ , OH^-).

- les modèles multi-espèces : l'approche est de prendre en compte les interactions entre les espèces présentes dans la solution interstitielle.

Rappelons que les études de laboratoire ont généralement recours à l'application d'un champ électrique aux bornes de l'échantillon dans une cellule de diffusion. Ceci permet d'accélérer l'essai et deux types de transfert de chlorures apparaissent : la diffusion, due au gradient de concentration et la migration, due à l'application du champ électrique.

- Les modèles mono-espèces

Parmi les modèles trouvés dans la littérature, on peut citer le modèle de Tang [Tang, 96], [Tong, 01] qui se base sur l'équation de Nernst-Planck. Tang exprime le flux unidimensionnel J des ions chlorures à travers la surface d'un échantillon. Le flux J est la somme d'un terme de diffusion et d'un terme de migration :

$$J = \left(D \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{zFU}{RTL} c \right) \quad (1.8)$$

Où :

D ($m^2.s^{-1}$) est le coefficient de diffusion effectif du matériau, c ($mol.m^{-3}$) la concentration des ions chlorures en un point de l'échantillon, U ($V.m^{-1}$) la tension entre les faces de l'échantillon et L (m) son épaisseur, R ($J.K^{-1}.mol^{-1}$) la constante des gaz parfaits, F ($C.mol^{-1}$) la constante de Faraday, T (K) la température absolue, z la valeur absolue de la valence de l'ion.

En régime stationnaire, le flux est constant. L'intégration de l'équation permet de déterminer le coefficient de diffusion effectif :

$$D = \frac{JRTL(e^{\frac{zFU}{RT}} - 1)}{zFU(c_0 e^{\frac{zFU}{RT}} - c_1)} \quad (1.9)$$

Où c_0 et c_1 sont respectivement les concentrations des ions chlorures dans les deux compartiments amont et aval exprimées en ($mol.l^{-1}$).

En régime instationnaire, le flux n'est pas constant, le caractère réactif du matériau cimentaire vis-à-vis des ions chlorures est pris en compte :

$$\frac{\partial J}{\partial x} = - \left(\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial c_b}{\partial t} \right) \quad (1.10)$$

Où : c est la concentration des ions chlorures libres dans la solution porale, c_b est la concentration des ions chlorures liés à la phase solide.

Un autre modèle mono-espèce, Andrade [Andrade, 95] présente une méthode qui s'appuie sur l'utilisation des courants électriques pour déterminer le coefficient de diffusion effectif des ions chlorure. Ce coefficient, en régime stationnaire, est lié au courant du aux seuls ions chlorures par la formule suivante :

$$De_{ff} = \frac{RTL}{F^2 E} \cdot \frac{i_{cl}}{c_{cl}} \quad (1.11)$$

Où :

i_{cl} (A.m⁻²) la densité du courant due aux ions cl⁻, c_{cl} (mol.m⁻³) la concentration des ions chlorure dans l'échantillon, supposée égale à celle du compartiment amont de la cellule de migration.

En régime transitoire, le phénomène de diffusion est négligé par rapport à la migration. Ainsi, l'équation de migration pure s'écrit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{zFE}{RT} \cdot D_{app} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1.12)$$

Où :

D_{app} le coefficient de diffusion apparent (m².s⁻¹), E le champ électrique externe appliqué (volts) (essai de migration).

- Les modèles multi-espèces

Parmi ces modèles on peut citer celui d'Amiri [Amiri, 98], [Amiri, 01a]. En introduisant plusieurs espèces ioniques présentes dans la solution porale, par l'écriture des équations du courant électrique, le modèle d'Amiri est un modèle multi-espèce qui a pour but de calculer le courant de transfert du uniquement aux ions chlorures lors d'un essai de migration, les équations de densité de courant sont d'abord écrites à l'échelle microscopique :

$$i = -F \sum_{i=1}^n z_i D_i \text{grad} c_i + \frac{F^2}{RT} \left(\sum_{i=1}^n z_i^2 D_i c_i \right) E + F \left(\sum_{i=1}^n z_i^2 D_i c_i \right) U \quad (1.13)$$

Où :

i la densité de courant électrique, c_i la concentration de l'espèce ionique i , U la vitesse de la solution liée au mouvement de convection et D_i le coefficient de diffusion effectif de l'espèce ionique. Les autres notations sont les mêmes que dans l'équation 1.8.

En régime stationnaire, le flux des ions chlorures est obtenu à l'aide d'une mesure de courant en fonction du temps (chronoampérométrie) et s'écrit :

$$J_{cl^-} = \frac{i_T(1 - \gamma_T) - i_B(1 - \gamma_B)}{2z_{cl^-}} \quad (1.14)$$

Où :

i_T ($A \cdot m^{-2}$) est le courant de transfert stationnaire mesuré en utilisant les électrolytes NaOH+ KOH+ NaCl dans une cellule de migration. i_B ($A \cdot m^{-2}$) est le courant de transfert stationnaire mesuré en utilisant les électrolytes NaOH+ KOH. γ_T et γ_B sont des paramètres traduisant l'effet de la double couche électrique. F est la constante de Faraday.

De son côté Samson [*Samson, 99a*], [*Samson, 99b*] a développé un modèle multi-espèce basé sur l'équation de Nernst-Planck appliquée aux différentes espèces ioniques de la solution, négligeant l'effet de l'activité chimique. Les équations de transport des différentes espèces sont d'abord formulées au niveau microscopique, l'utilisation de la technique de moyenne spatiale permet le passage à l'échelle macroscopique du milieu poreux.

En plus de l'équation de Nernst-Planck, Friedman [*Friedman, 03*], [*Friedman, 04*] a introduit les phénomènes de double couche électrique dans les équations de transfert tout en prenant en compte la réactivité du matériau.

1.4.3 Détermination du coefficient de diffusion par un essai migration

La diffusion naturelle est un processus très lent. Pour accélérer le transport des chlorures, l'essai de migration a été développé. Le principe consiste à appliquer une différence de potentiel à une cellule de diffusion des chlorures, afin d'accélérer leur transport à travers le matériau. Comme noté précédemment il existe deux façons d'exploiter l'essai de migration : une exploitation en régime stationnaire pour l'obtention d'un coefficient de diffusion effectif et une exploitation en régime transitoire pour l'obtention d'un coefficient de diffusion apparent. La figure 1.3 présente le principe de l'essai en régime permanent. Un échantillon de matériau saturé est placé entre deux compartiments amont et aval, l'un contient une solution de chlorure de sodium, d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de potassium, et l'autre contient la même solution sauf les chlorures de sodium.

Un champ électrique externe est appliqué à l'échantillon par l'intermédiaire de deux électrodes placées au droit des deux faces de l'échantillon. La mesure du flux de chlorures traversant le matériau permet de calculer un coefficient de diffusion effectif.

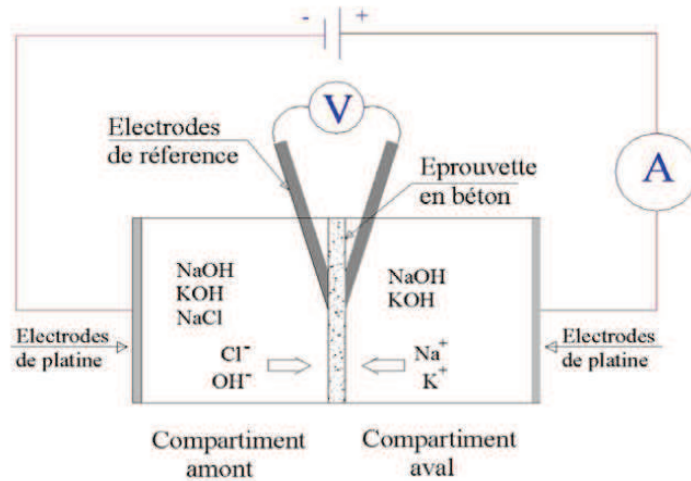


Figure 1.3 : Cellule de l'essai de migration [Loche, 01]

L'exploitation de l'essai de migration en régime transitoire a été proposée par Tang [Tang, 92]. Le dispositif expérimental associé est actuellement largement utilisé, il est connu sous le nom de l'essai CTH. La figure 1.4 présente le principe de cet essai. La pénétration des chlorures dans l'éprouvette est accélérée par un champ électrique. À la fin de l'essai, l'éprouvette est rompue par fendage, et la profondeur de pénétration est mesurée au moyen du nitrate d'argent. La différence de potentiel est choisie de telle sorte qu'à la fin de l'essai, qui dure 24 heures, le front de pénétration des chlorures n'atteigne pas la face de sortie de l'éprouvette. Le réglage de la tension est effectué sur la base de la mesure du courant traversant l'échantillon au début de l'essai. Le coefficient de diffusion apparent est calculé au moyen d'une formule empirique [Tang, 92].

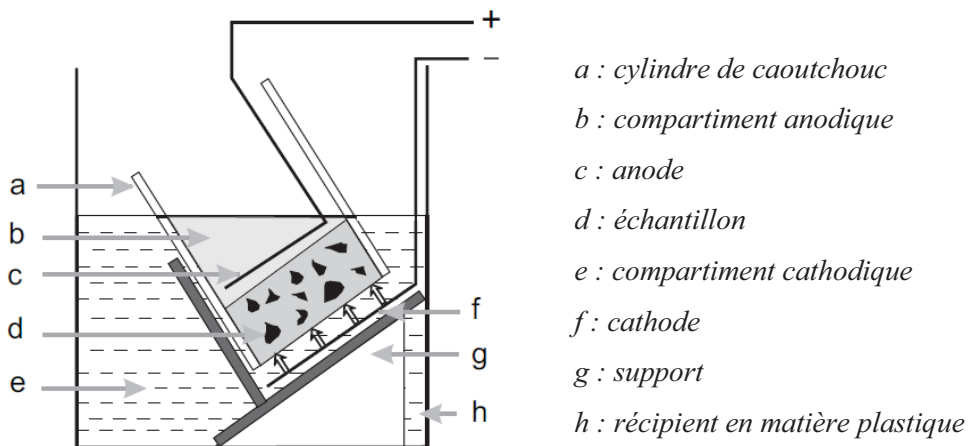


Figure 1.4 : Représentation schématique de la méthode CTH [NT Build, 99]

1.4.4 Absorption capillaire

C'est le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires. Ce mécanisme de transfert dépend de la structure poreuse du matériau et de l'état de saturation [Basheer, 01]. Ce mécanisme de transport se produit dans un milieu partiellement saturé ou soumis à des cycles d'humidification / séchage (zones de marnage et d'embruns). En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton jusqu'à l'obtention d'une masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse. L'augmentation de la masse dans le temps peut être décrite par l'équation suivante :

$$M(t) = St^{\frac{1}{2}} \quad (1.15)$$

Où:

M : la quantité d'eau absorbée (kg/m²)

S : l'absorptivité (kg/m².s^{1/2})

T : le temps écoulé (s)

2 Réparation des ouvrages en béton armé

Le domaine de la réparation et de la réhabilitation des ouvrages en béton armé est en pleine évolution. En effet, la plupart des ouvrages en béton armé, en particulier les structures marines, ont plus de 40 ans et beaucoup d'entre eux nécessitent des travaux de maintenance et de réparation vu leur état de dégradation.

La corrosion des armatures occupe le premier rang des dégradations causant ainsi des désordres dans le béton jusqu'à la ruine partielle de l'ouvrage. Le coût engendré par ces réparations représente de grands enjeux économiques pour les maitres d'ouvrages qui doivent trouver des solutions et des méthodes adéquates de réparation. Devant l'augmentation de l'ampleur des travaux de réparation et de maintenance des ouvrages en béton armé dégradés, des guides techniques, des normes et des règles de l'art ont été développés. Parmi eux, on peut citer les guides du STRRES en France ou la norme européenne EN 1504. On présentera dans les sections suivantes la norme EN 1504 et les principales méthodes de réparation qui en découlent.

2.1 Contexte normatif

La norme européenne *EN 1504* [Afnor, 08] définit les produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Elle se compose de dix parties et de 65 méthodes d'essai. Les dix parties sont présentées dans le tableau 1.3.

EN 1504-1	Termes et définitions de la norme
EN 1504-2	Caractéristiques des produits/systèmes de protection de surface pour béton
EN 1504-3	Caractéristiques de réparation structurale et non structurale
EN 1504-4	Caractéristiques de collage
EN 1504-5	Caractéristiques d'injection
EN 1504-6	Caractéristiques d'ancrage des barres d'acier d'armatures
EN 1504-7	Caractéristiques de protection contre la corrosion des armatures
EN 1504-8	Maîtrise de la qualité et l'évaluation de la conformité des sociétés de fabrication
EN 1504-9	Principes généraux régissant l'utilisation des produits/systèmes de protection et de réparation des structures en béton
EN 1504-10	Informations concernant l'application sur site des méthodes et systèmes de contrôle de la qualité des travaux

Tableau 1.3 : Parties de la norme EN 1504

La partie 9 de la norme définit deux grandes familles de dégradation, la dégradation des bétons et la corrosion des armatures. Elle établit aussi 11 principes de réparation incluant la réparation des défauts du béton pour les six premiers principes et jusqu'à la corrosion des armatures pour les quatre derniers principes. On présente dans le tableau 1.4 les principes de solution pour la corrosion des armatures. Ces principes peuvent être répertoriés en deux familles, les méthodes électrochimiques et les méthodes non électrochimiques. L'application des méthodes nécessite au préalable une bonne connaissance du mécanisme de corrosion, un bon diagnostic et une bonne maîtrise technique. Les méthodes non électrochimiques sont connues pour être des méthodes classiques de réparation, assez simple à appliquer et moins coûteuses, contrairement aux méthodes électrochimiques.

Les différentes méthodes sont présentées dans les sections 2.2 et 2.3. On s'intéressera dans le cadre de ce travail de thèse à l'une des méthodes non-électrochimiques qui est la réparation par mortiers de réparation.

<i>Principe</i>	<i>Définition</i>	<i>Méthodes fondées sur le principe</i>
Principe 7	Préservation ou restauration de la passivité de l'armature	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la couverture de l'armature avec mortier ou béton hydraulique supplémentaire. - Remplacement du béton contaminé ou carbonaté. - Ré alcalinisation électrochimique du béton carbonaté - Ré alcalinisation du béton carbonaté par diffusion. - Extraction électrochimique du chlorure
Principe 8	Augmentation de la résistivité électrique du béton	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation de la teneur en humidité par des traitements de surface, des revêtements ou par recouvrement.
Principes 9 10 et 11	Contrôle et protection cathodique	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation de la teneur en oxygène (au niveau de la cathode) par saturation ou revêtement de la surface - Application d'un potentiel électrique - Badigeonnage de l'armature avec des revêtements contenant des pigments actifs - Badigeonnage de l'armature avec des revêtements de protection - Application d'inhibiteurs sur le béton

Tableau 1.4 : Principes et méthodes relatifs à la corrosion des armatures

2.2 Les méthodes électrochimiques

Le principe de ces méthodes consiste à appliquer un courant électrique entre une anode placée sur la surface du béton et l'acier à protéger (cathode).

Trois techniques existent : la protection cathodique (qui contrôle le courant électrochimique de corrosion), la réalcalinisation et la déchloruration (qui modifient l'environnement autour de l'armature) [Al Hajjar, 08].

2.2.1 La protection cathodique

Comme expliqué précédemment, la corrosion est un processus électrochimique qui implique la création d'une pile électrochimique au niveau de l'armature. Cette pile est constituée d'une anode, une cathode et un milieu électrolytique. Le principe de la protection cathodique est de relier une anode externe au métal à protéger et de faire passer un courant électrique continu de manière que tous les secteurs de la surface en métal deviennent cathodiques et donc ne se corrodent pas. L'anode externe peut être une anode galvanique sacrificielle, où le courant est un résultat de la différence de potentiel entre les deux métaux, ou une anode inerte, avec un système de courant imposé utilisant une alimentation de courant continu. L'anode est placée de façon permanente sur le parement ou parfois dans l'enrobage [Pedefferri, 96], [Bertolini, 02]. D'un point de vue potentiel électrochimique, elle consiste à abaisser le potentiel de l'armature jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection afin que la vitesse de corrosion de l'acier devienne négligeable [Parthiban, 08]. Le principe de la protection galvanique est de créer une pile électrique entre deux métaux de noblesse différente, le premier est le métal à protéger et le deuxième est l'anode réactive ou sacrificielle. Si ces deux métaux sont raccordés l'un à l'autre par un circuit électrique, le métal le moins noble (l'anode) sera sacrifié au bénéfice de la cathode. Dans la technique de protection cathodique par courant imposé, des anodes inertes (de dissolution nulle ou basse) sont reliées à la surface de l'armature (cathode) par une source extérieure d'alimentation.

2.2.2 Extraction électrochimique des ions chlorures

Cette technique est temporaire (6 à 8 semaines d'application), elle consiste à faire passer un courant électrique continu entre une anode placée sur la surface du béton enrobée d'une pâte saturée d'un liquide convenablement choisi (électrolyte) et l'acier (cathode). Ce courant provoque le déplacement des ions chlorures chargés négativement vers l'anode extérieur. Lorsque les ions chlorures arrivent à la surface du béton, ils passent dans l'électrolyte et peuvent donc être extraits définitivement du béton [Marcotte, 99], [Orellan, 04].

2.3 Les méthodes non électrochimiques

2.3.1 Application de revêtements

Ces revêtements peuvent être appliqués soit à l'armature soit à la surface du béton [Almusallam, 03]. Les peintures appliquées sur la surface de l'armature la protègent contre les agents agressifs qui favorisent la corrosion [Moradillo, 12]. Les revêtements les plus utilisés sont de type métallique ou galvanique à base de zinc ainsi que les peintures époxy.

La couche de zinc agit comme une barrière physique aux agents agressifs et comme une anode sacrificielle car le zinc est un métal moins noble que l'acier (plus anodique).

Toutefois, le zinc peut réagir avec la solution interstitielle provoquant ainsi un dégagement d'hydrogène et une diminution de l'adhérence entre l'armature et le béton [Arenas, 06].

Les revêtements appliqués sur la surface du béton jouent un rôle de barrière physique contre les chlorures, l'oxygène et l'eau [Woo, 08]. Les plus généralement utilisés sont les hydrofuges de surface. Les produits hydrofuges peuvent être classés en fonction de la nature chimique de leur constituant de base. Les produits les plus répandus sont les silicones et leurs dérivés (siliconâtes, silanes, siloxanes).

2.3.2 Les Inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques ajoutés au béton pour diminuer la vitesse de corrosion. Ils peuvent être classés en fonction de leurs méthodes d'application, en fonction de leur mécanisme de protection, ou de leur contenu. Ils peuvent être ajoutés au matériau frais, appliqués sur la surface du béton, ajoutés à des mortiers de réparation ou appliqués sur les armatures. Concernant leurs mécanismes de protection, ils peuvent être [Soylev, 08] :

- anodique : les inhibiteurs anodiques agissent sur la dissolution de l'acier en réduisant la vitesse de corrosion par une augmentation du potentiel de corrosion de l'acier. Les plus utilisés sont le nitrite de calcium ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$), le nitrite de sodium et le chromate de sodium,
- cathodique : Ils agissent sur la réaction de l'oxygène. Les plus utilisés sont les hydroxydes de sodium et les carbonates de sodium. Ils agissent en augmentant le pH à proximité de l'acier et en réduisant le transfert d'oxygène en recouvrant la surface de l'acier,
- mixte : Ils agissent sur la réaction cathodique et anodique.

2.3.3 La réparation par mortiers

La réparation par mortier est l'une des méthodes les plus utilisées pour des structures affectées par la corrosion. C'est une méthode de reconstitution de l'enrobage dégradé et pollué par les chlorures. Elle est utilisée pour restaurer la passivation des armatures touchées par la corrosion. D'un point de vue électrochimique, une réparation par mortier est conçue pour supprimer la réaction anodique qui existait avant la réparation et l'empêcher de se reproduire [Qian, 06]. Elle peut être utilisée pour réparer les désordres dus à la corrosion à divers stades de leur évolution (depuis l'amorçage de la corrosion jusqu'à la corrosion des armatures) [Strres, 08]. Cette technique passe par trois phases de réparation qui sont la préparation du support, la protection des armatures et la mise en œuvre du mortier de réparation.

Avant de procéder à un ragréage, il est nécessaire de préparer les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, pour qu'il y ait une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont l'hydro démolition et le décapage au marteau pneumatique. Lors de cette phase le béton dégradé ou pollué est retiré sur toute la surface, les armatures sont débarrassées de toute trace de corrosion manuellement (décapage et brossage) ou mécaniquement (sablage hydro sablage, etc.) et, en dernier lieu, les surfaces du béton sont nettoyées par soufflage ou aspiration afin d'éliminer toutes traces de poussières polluées [Strres, 08].

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont entièrement dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion tel que les oxydes de zinc ou les époxydes zinc. Les armatures très corrodées doivent être remplacées. Ce remplacement se fait par scellement ou soudure afin de restituer la section initiale en tenant compte des longueurs d'ancrage, de recouvrement et des armatures de couture. Dans le cas de soudures, celles-ci devront être effectuées selon les normes en vigueur après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée [Afgc, 03].

L'enrobage des armatures est reconstitué de façon à retrouver la géométrie de la structure. Une couche complémentaire de protection peut être appliquée sur le mortier pour avoir une forte imperméabilisation. Pour améliorer l'adhérence entre l'ancien béton et le nouveau béton, une couche d'accrochage peut être mise en œuvre.

Trois méthodes peuvent être utilisés pour l'application du mortier : à la main, en mortier projeté ou en mortier coulé (coffrage).

- **Mortier appliqué à la main**

Le mortier de réparation doit être appliqué en le faisant pénétrer dans le support préparé et il doit être compacté en évitant l'inclusion de poches d'air et de manière à obtenir la résistance requise et à protéger les armatures contre la corrosion. Le mortier peut être appliqué en plusieurs couches pour éviter le risque d'affaissement ou de glisse.

- **Mortier projeté**

On distingue deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne : par voie sèche avec ou sans pré-mouillage où l'eau est introduite au niveau de la lance, et par voie humide où l'eau est introduite lors du malaxage du mortier.

- **Mortier coulé**

Le mortier est mis en œuvre à l'aide d'un coffrage. L'application doit être réalisée tout en évitant les risques de ségrégation et de ressuage. Les ouvertures du coffrage doivent être protégées pour empêcher la pénétration de débris ou de contaminants. La mise en place par vibration doit être effectuée en évitant l'inclusion de poches d'air et de manière à obtenir la résistance requise.

2.3.4 Les mortiers de réparation

La norme EN 1504 définit deux catégories de mortiers de réparation : mortier de réparation structurale et non structurale. Pour les mortiers non structuraux, ils sont appliqués sur une surface de béton pour restituer l'aspect géométrique ou esthétique de la structure. Pour les mortiers structuraux, ils sont appliqués à une structure en béton pour remplacer le béton défectueux et pour restituer à la structure son intégrité et sa durabilité. Les mortiers de réparation peuvent être classés en deux familles selon leurs compositions, à savoir des mortiers à base de liant hydraulique et mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères. Ces derniers peuvent modifier et améliorer les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité du matériau [Medeiros, 09]. Ces modifications seront d'ailleurs abordées par la suite.

D'autres types de classifications existent puisque Embersons et Morgan [Embersons, 90], [Morgan, 96] attribuent trois catégories aux mortiers de réparation, à savoir des mortiers classiques, mortiers modifiés par des polymères et des mortiers à base de résines. Des exemples de ces mortiers sont présentés dans le tableau 1.5.

<i>Mortiers classiques</i>	<i>Mortiers modifié par des polymères</i>	<i>Mortiers à base de résine</i>
<p>-Mortiers à base ciment portland ordinaire</p> <p>-Mortiers à base de ciment alumineux</p>	<p>-Mortiers à base de ciment modifié par un polymère styrène butadiène</p> <p>-Mortier à base de ciment modifié par un polymère vinyle acétate</p>	<p>-Mortier d'époxy</p> <p>-Mortier acrylique</p> <p>-Mortier polyester</p>

Tableau 1.5 : Classification des mortiers par Emersons et Morgan [Emberson, 90], [Morgan, 96]

Les mortiers à base de résines sont des mélanges de liant polymère et de granulats calibrés dont la prise se fait par réaction de polymérisation [Afnor, 08]. Le liant est constitué en général de deux composants, une base en polymère réactif et un durcisseur ou catalyseur qui polymérise à température ambiante. Les liants couramment utilisés sont les résines époxydes, les polyesters insaturés, les acryliques réticulables et les polyuréthanes mono ou bi-composants [Afnor, 08].

Ces mortiers ont un module de déformation nettement plus faible que celui des bétons et un module de dilatation beaucoup plus élevé que celui des bétons. En plus, ils ne peuvent avoir aucune action passivante vis-à-vis de l'acier, comme les mortiers hydrauliques. Ils ne protègent donc les armatures des agents agressifs que par la barrière physique que constitue leur propre épaisseur.

Des études ont montré que les matériaux à base de résine tels que les mortiers époxy n'ont pas de performances acceptables lorsque ils sont sous des conditions climatiques sévères en raison de leur incompatibilité thermique avec le béton de support et leur adhérence est très faible pour des surfaces de béton humide [Mirza, 02].

Actuellement, la plupart des mortiers de réparation sont des matériaux préformulés en usine. La part des mortiers fabriqués sur chantier n'a fait que diminuer au profit de mélanges réalisés en usine. Leurs compositions sont devenues complexes associant des ciments, des adjuvants, des additions, des fibres et des polymères.

Les liants hydrauliques utilisés dans la formulation des mortiers de réparation peuvent être des ciments courants ou des ciments spéciaux conformes aux normes EN 197-1 et EN 413-1.

Les additions employées sont des matériaux inorganiques finement broyés pouvant être ajoutés aux produits de réparation pour en améliorer certaines propriétés à l'état frais et

faciliter leur mise en œuvre ou à l'état durci pour augmenter leur résistance et/ou leur durabilité. Il existe deux types d'additions : les additions pratiquement inertes (type I), qui peuvent remplir les vides laissés dans l'empilement granulaire formé par le ciment et les granulats grâce à leur finesse et les additions pouzzolaniques ou hydrauliques latentes (type II). Dans ce cas, l'addition peut avoir un pouvoir de liant, soit par réaction avec l'eau de gâchage (liant hydraulique, tels que les laitiers de hauts fourneaux), soit par réaction avec les hydrates du ciment (par réaction pouzzolanique par exemple). Les principales additions sont les fillers calcaires, les cendres volantes, la fumée de silice et les laitiers de hauts fourneaux.

L'ajout d'adjuvants dans les mortiers a pour but d'améliorer les propriétés du matériau à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci. Le dosage est inférieur ou égale à 5% de la masse du ciment. Les principales familles d'adjuvants sont les plastifiants et superplastifiants, les accélérateurs et retardateurs de prise ainsi que les agents entraîneurs d'air.

Les fibres ajoutées aux mortiers de réparation sont généralement des fibres synthétiques d'origine organique. Elles sont réparties d'une manière aléatoire dans le mélange. Elles ont le rôle de diminuer les microfissures et de reprendre les efforts de traction dus au phénomène de retrait dans la matrice cimentaire afin de retarder la propagation des fissures (figure 1.5)

[Fowler, 99], [Mallat, 11].

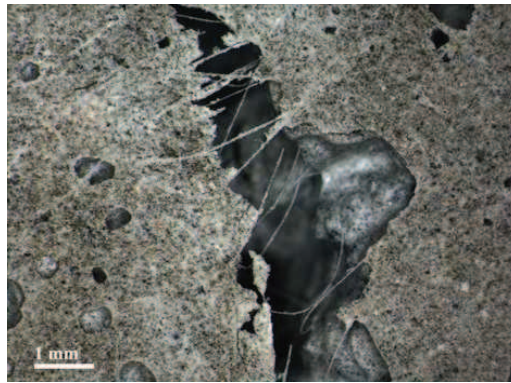


Figure 1.5 : Pontage par les fibres des fissures dues au retraits [Mallat, 11]

2.3.5 Les polymères dans les mortiers de réparation

Les polymères sont parmi les constituants les plus présents dans la composition des mortiers de réparation et surtout dans les mortiers industriels. Les polymères sont ajoutés afin d'améliorer les propriétés mécaniques et d'adhérence des mortiers de réparation et de réduire les propriétés de transfert (porosité, perméabilité, diffusivité des chlorures).

Cette amélioration dépend non seulement du type du polymère mais aussi du rapport polymère/ciment [Ohama, 98]. Les polymères les plus utilisés sont les latex.

Le Styène-Butadiène (SBR), le chlorure de polyvinyle (PVDC), l'acrylonitrile-butadiène (NBR), le polychloropène (CR), l'ester polyacrylique (PAE), l'acétate de polyvinyle (PVAC), le poly (styrène/acrylate de n-butyle) (SA) ou encore le poly (éthylène/acétate de vinyle) (EVA) sont les latex les plus utilisés [Omrikin, 06], [Nicot, 08], [Fowler, 99], [Mauroux, 11], [Mauroux, 12]. Les polymères latex peuvent se présenter sous deux formes, en poudre et en solution polymérique (dispersion aqueuse).

- Polymères latex sous forme de dispersions aqueuses

Ce sont de très petites particules polymériques (0,05-5 μm) dispersées dans l'eau produite par la polymérisation en émulsion, avec l'utilisation d'un tensioactif (le rôle du tensioactif est de diminuer la tension de surface entre les deux phases liquides, en formant un film autour des gouttelettes dispersées). Ces polymères sont généralement classés en trois catégories d'après le type de charge électrique des particules polymériques qui est déterminé par le type de tensio-actif utilisé dans la production du latex : cationique (chargé positivement), anionique (chargé négativement) et non-ionique (non chargé) [Ohama, 98].

- Polymères latex sous forme de poudre

Ils sont obtenus par un séchage par atomisation des dispersions aqueuses. Lors du malaxage avec l'eau, les polymères re-dispersent ou ré-émulsionnent facilement et fournissent des dispersions aqueuses. Des produits sont ajoutés tels que l'argile, la silice ou le carbonate de calcium pour éviter l'agglutination de la poudre.

Les polymères sous forme de poudre peuvent être mélangés aux différents constituants du mortier pour obtenir des sacs pré-dosés prêt à la commercialisation [Ohama, 98].

Les mortiers modifiés par des polymères peuvent être des mono-composants ou des bi-composants. Dans le mortier mono-composant, le polymère est sous forme de poudre mélangée au liant et dans le bi composant, le premier composant contient le polymère et l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment et le deuxième contient le ciment, le sable et les fines inertes ainsi que les additifs éventuels (fibres, fumée de silice...). Les mélanges sont généralement pré dosés en usine, la composition de ces mélanges, y compris le dosage en eau, est définie par le fabricant.

Le type d'interactions existant entre la phase cimentaire et la phase polymérique n'est pas encore claire et certaines controverses existent entre les chercheurs.

Certains estiment que seules les interactions physiques existent entre les deux phases avec la formation du film polymère responsable de l'amélioration de certaines propriétés physiques et mécaniques [Sakai, 95].

D'autres pensent qu'il y a des interactions chimiques entre les polymères et les hydrates responsables de changements dans la composition, la morphologie et la qualité des hydrates notamment la portlandite [Su, 96], [Janokta, 96], [Silva, 02].

Lors de l'hydratation, un film de polymère peut se former correspondant à la coalescence des particules de polymères au moment de la consommation en eau de la matrice cimentaire [Sakai, 95]. La représentation schématique de la formation du film est illustrée dans la figure 1.6. Les particules se rapprochent, flocculent, puis coalescent pour former un film continu [Su, 96]. Cette coalescence ne peut se faire qu'à partir d'une température seuil appelée température minimale de formation de film (TMFF) [Gretz, 11]. Des études entreprises par Afridi [Afridi, 03] ont montré que les polymères liquides forment un film de meilleure qualité que ceux sous forme de poudre pour lesquels le film est moins uniforme. De plus, la formation du film dépend non seulement du type de latex mais aussi de sa quantité. Ainsi, il conclut que pour les polymères liquides un P/C de 5% est suffisant pour la formation du film mais que pour les polymères sous forme de poudre le rapport P/C doit être de 10%. Cette valeur a été confirmée par Pascal [Pascal, 03] pour un latex styrène-butadiène.

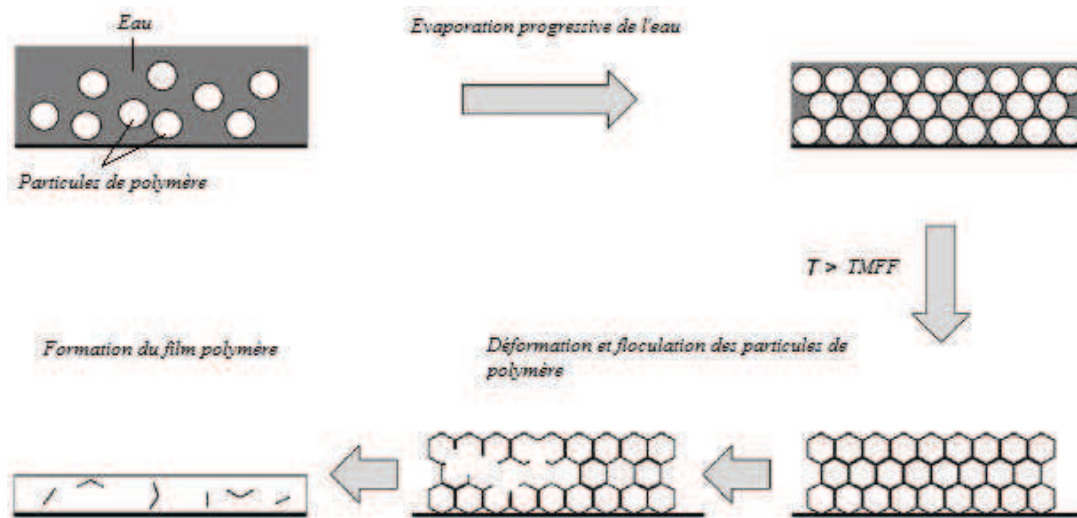


Figure 1.6 : Représentation schématique de la formation du film polymère [Gretz, 11]

Les polymères peuvent interagir physiquement et éventuellement chimiquement avec la matrice cimentaire en formant une comatrice polymère-ciment.

Ohama [Ohama, 98] a proposé un scénario sur la formation de la comatrice qui se déroule en quatre étapes (figure 1.7). Lors du malaxage, les particules de polymère se dispersent

uniformément dans la matrice cimentaire où elles se déposent partiellement sur les hydrates et les anhydres du ciment. Les particules de polymère se confinent progressivement dans les pores.

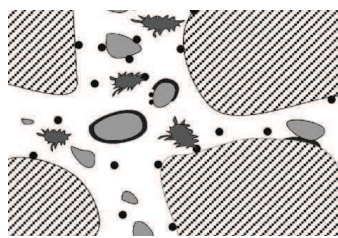
Elles vont ensuite flocculer pour former une couche continue à la surface des hydrates et des anhydres du ciment et adhèrent à la surface des granulats. Certaines liaisons chimiques peuvent avoir lieu entre les polymères et les ions Ca^{2+} contenus dans la solution interstitielle, à la surface des cristaux de portlandite ou à la surface des granulats [Do, 03].

Un exemple de ces réactions est présenté dans la figure 1.8. Ces réactions chimiques modifient la morphologie des phases hydratées, en particulier celle de la portlandite [Janotka, 96]. Ces réactions améliorent l'adhérence entre les hydrates et les granulats mais affectent le degré d'hydratation. Enfin, avec la consommation d'eau par l'hydratation du ciment, les particules de polymère coalescent en film continu ou membrane qui lie les hydrates de ciment entre eux.

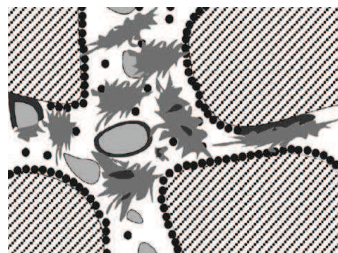


1- Juste après le malaxage, les particules de ciment anhydre sont dispersées dans l'eau. L'hydratation débute.

Les granulats (hachuré), les particules de ciment anhydre (gris), les particules de polymères (noir), eau (blanc).



2- Une partie des particules de polymère se dépose sur les grains de ciment et les granulats. Dans le cas d'une cure sèche, un film continu de polymère peut se former, les particules de polymère flocculent les unes avec les autres (il n'y a pas encore de coalescence). De petites aiguilles d'ettringite sont formées.



3- L'hydratation du ciment se poursuit, le film de polymère commence à se former sur des sites spécifiques. Les particules de polymères commencent à coalescer et former un film continu.



4- L'hydratation se poursuit, les particules de polymère coalescent en un film continu, les particules de ciment sont hydratées.

Figure 1.7 : Modèle de formation de la co-matrice polymère-ciment [Van Gemert, 05]

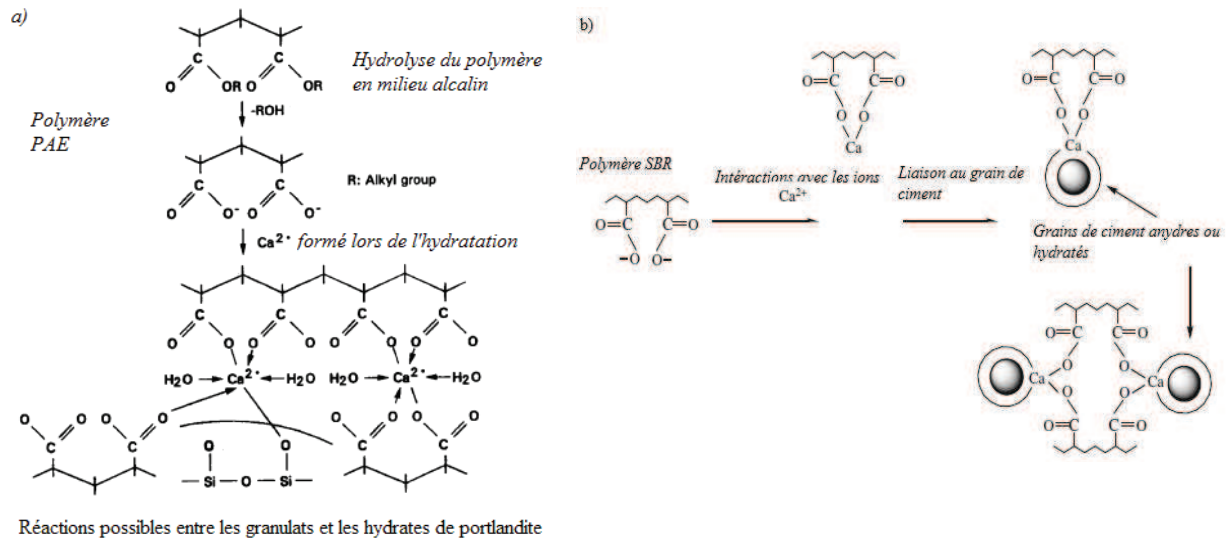


Figure 1.8 : Exemples de réactions des polymères PAE (a) et SBR (b) avec la matrice cimentaire [Ohama, 98]

Les propriétés à l'état frais et à l'état durci des mortiers de réparation modifiés par des polymères sont différentes de celles des mortiers classiques, elles sont influencées par plusieurs paramètres, qui sont [Ohama, 96], [Ohama, 97], [Ohama, 98] :

- le type du polymère,
- le rapport polymère / ciment,
- le rapport eau/ ciment,
- les conditions de cure,
- la quantité d'air entraînée.

2.3.6 Influence des polymères sur les propriétés à l'état frais

- La maniabilité

Les mortiers modifiés par des polymères ont une maniabilité améliorée par rapport aux mortiers classiques grâce à l'effet de dispersion de l'agent tensio-actif [Ohama, 98]. Le mortier nécessite moins d'eau pour une même consistance d'un mortier classique Le rapport E/C est nettement réduit pour une augmentation du rapport P/C [Barluenga, 04]. Cet effet dépend de la concentration et du type de l'agent tensioactif [Saija, 95].

- L'air entraîné

Les mortiers modifiés par des polymères se caractérisent par un volume élevé d'air entraîné comparé à des mortiers classiques [Jae-Ho, 97].

Ceci est dû à l'action des agents tensio-actifs qui jouent le rôle d'émulsifiants et de stabilisants dans le polymère [Meishan, 02]. Ce pourcentage d'air entraîné est compris entre 5 et 20% [Ohama, 98]. Une quantité excessive d'air entraîné provoque une réduction de la résistance mécanique. Parallèlement à cela, des agents anti mousse peuvent être ajoutés pour contrer l'effet entraîneur d'air. [Kim, 97].

- La rétention d'eau

Les mortiers modifiés par des polymères ont une rétention d'eau nettement améliorée par rapport à un mortier ordinaire (sans polymère). Cette rétention d'eau s'explique par le caractère hydrophile des particules de polymère et dépend donc du rapport P/C (plus le rapport P/C augmente plus la rétention d'eau augmente aussi) [Afridi, 95], [Saija, 95], [Ohama, 98], [Wang, 11]. Dans la figure 1.9 est illustré l'effet du rapport P/C et de la nature du polymère sur la rétention d'eau où l'on constate très nettement que plus le rapport P/C est grand et plus le pourcentage de rétention d'eau est élevé et ceci quelle que soit la nature du polymère.

- Ségrégation et ressuage

Contrairement aux mortiers classiques, les mortiers modifiés par des polymères ont de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage malgré une fluidité augmentée. Ceci est dû aux propriétés hydrophiles des particules de polymère et à l'effet d'entraîneur d'air réducteur d'eau de l'agent tensioactif [Ohama, 98].

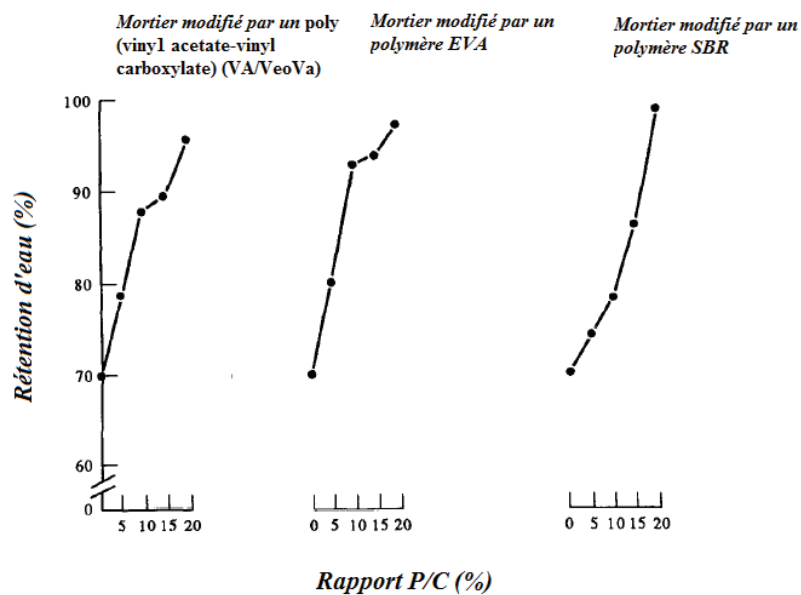


Figure 1.9 : Effet du rapport P/C sur la rétention d'eau [Afridi, 95]

3 Caractérisation des mortiers de réparation

Les données de la littérature concernant l'influence des polymères sur les propriétés mécaniques et de durabilité des mortiers de réparation montrent que l'ajout de polymères au ciment peut apporter une amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques telles que la résistance à la traction, l'adhérence et la perméabilité. Ces avantages sont liés au type de polymère, à sa quantité et à son interaction avec la matrice cimentaire. C'est pourquoi nous allons exposer l'influence des polymères sur les résistances mécaniques, la structure poreuse et les propriétés de transfert.

3.1 Résistances mécaniques

De bonnes propriétés mécaniques des mortiers de réparation sont essentielles pour la performance d'une réparation. Aussi, les mortiers doivent avoir de bonnes résistances à compression, à la traction et une bonne adhérence au béton de support. Ces propriétés mécaniques sont influencées par plusieurs facteurs. Les principaux sont la nature des constituants (ciment, polymères), les proportions des constituants (P/C, E/C), la porosité et la quantité d'air entraîné.

Des études réalisées sur des mortiers modifiés par des teneurs différentes en polymères et un mortier de référence (sans polymères) ont montré que pour la même maniabilité (E/C ajusté) les résistances à la traction, compression et flexion augmentent avec l'augmentation du taux de polymère. Par contre, pour un E/C maintenu constant, la résistance à la compression diminue et la résistance à la traction augmente avec le taux de polymères. Cette amélioration de la résistance à la traction est due à l'amélioration de l'adhérence dans la matrice cimentaire et au pontage des microfissures par le polymère [Bureau, 01], [Pascal, 03]. D'autres études montrent que les résistances dépendent du type du polymère, du rapport P/C et des conditions de cure [Ru, 05], [Wang, 05]. La figure 1.10 présente une tendance générale des études faites sur l'effet du rapport P/C et de la cure [Ohama, 98].

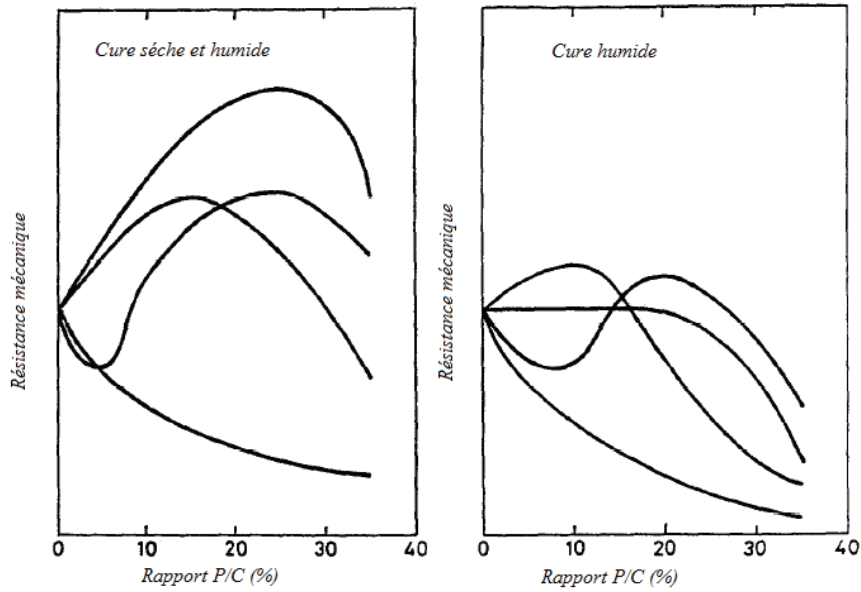


Figure 1.10 : Effet du rapport P/C et de la cure sur les résistances mécaniques [Ohama, 98]

Les figures 1.11 et 1.12 illustrent l'effet de cure sur les résistances mécaniques. Les valeurs optimales sont obtenues pour des cures humides au jeune âge qui permettent d'atteindre un degré d'hydratation élevé suivies par des cures sèches permettant la formation du film de polymère responsable de l'amélioration des propriétés mécaniques des mortiers. À l'inverse, les mortiers modifiés par des polymères perdent de leur résistance quand ils sont immergés. Cette perte est plus significative pour la résistance en flexion [Ohama, 98].

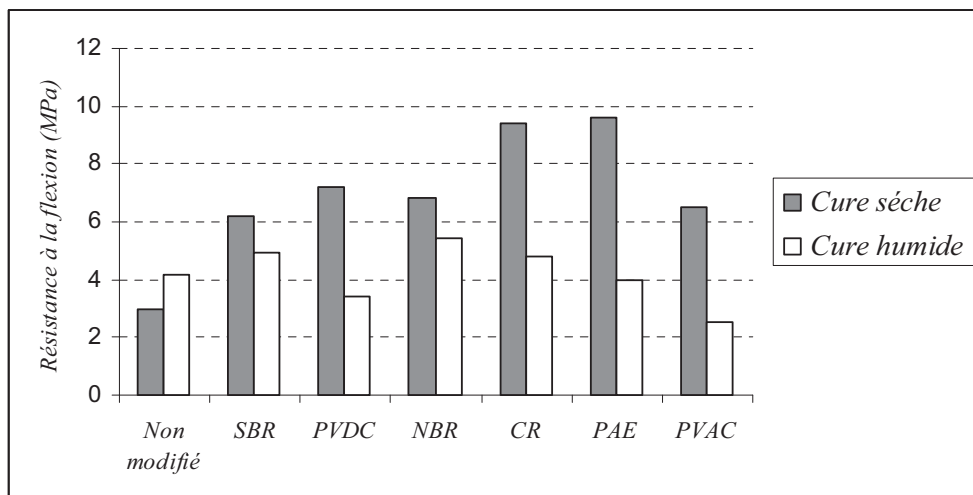
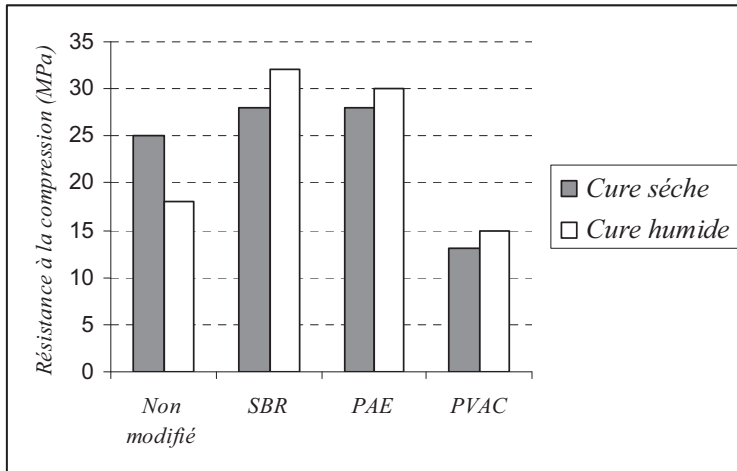


Figure 1.11 : Effet des conditions de cure sur la résistance à la flexion [Ohama, 98]



SBR: Styrène - Butadiène
PVDC: Chlorure de Polyvinyle
NBR: Acrylonitrile - Butadiène
CR: Polychloroprène
PAE: Ester Polyacrylique
PVAC: Acétate de Polyvinyle

Figures 1.12 : Effet des conditions de cure sur la résistance à la compression [Ohama, 98]

Le pourcentage en masse du monomère dans le polymère peut aussi affecter les résistances mécaniques. Dans la figure 1.13, est présenté l'effet du monomère styrène ou éthylène sur les résistances à la compression et à la flexion de mortiers modifiés par un polymère SBR, SAE ou EVA.

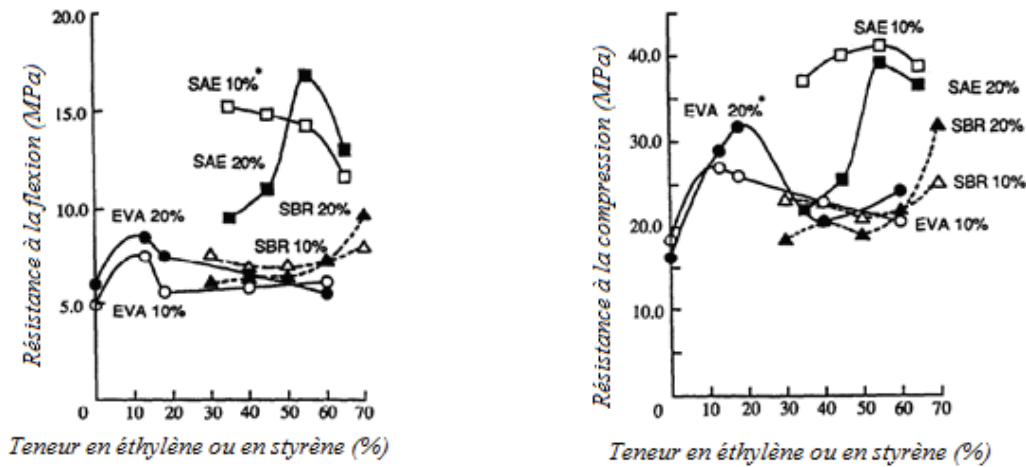


Figure 1.13 : Effet du pourcentage de monomère sur les résistances des mortiers modifiés par des polymères SBR, EVA et SAE [Ohama, 98]

3.2 La porosité et la structure poreuse des mortiers de réparation

La porosité et la distribution porale sont considérées comme des indicateurs de durabilité des mortiers de réparation. Des propriétés de durabilité comme la résistance à la corrosion et la perméabilité sont étroitement liées à la structure poreuse du matériau [Bagel, 97].

D'une manière générale, les mortiers modifiés par des polymères ont une structure poreuse où les plus gros pores peuvent être remplis par les polymères. Cet effet augmente avec l'augmentation du rapport P/C [Ohama, 98]. La porosité a tendance à diminuer avec une augmentation du rapport P/C et une diminution du rapport E/C [Ohama, 91]. Des études réalisées par Yang [Yang, 09] ont montré que pour un rapport P/C supérieur ou égal à 10%, la microstructure d'un mortier modifié par un SBR devient plus dense, la taille des pores et la porosité sont réduites. D'autres études ont montré que l'ajout du polymère a tendance à diminuer le nombre des micros pores ($> 0,2 \mu\text{m}$) et à augmenter le nombre des nano pores ($< 75 \text{ nm}$) [Ohama, 87]. Ollitrault-Fichet a trouvé que l'ajout d'un polymère acrylique (P/C= 10%) a tendance à décaler la distribution porale vers les petits pores (figure 1.14 (b)) [Ollitrault, 98]. Park [Park, 12] observe la même chose pour un polymère PVDC et a constaté que ce décalage augmente avec l'augmentation du rapport P/C (figure 1.14 (a)). Contrairement à cela, Silva a trouvé que l'ajout du polymère EVA a tendance à décaler la distribution porale vers les gros pores. [Silva, 01], (figure 1.15).

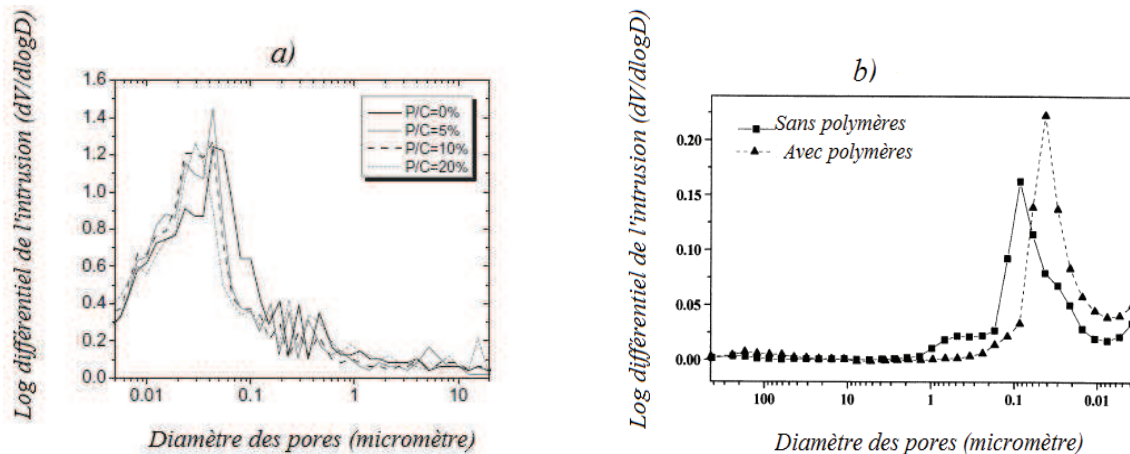


Figure 1.14 : Influence de l'ajout du polymère sur la structure poreuse [Park, 12], [Ollitrault, 98]

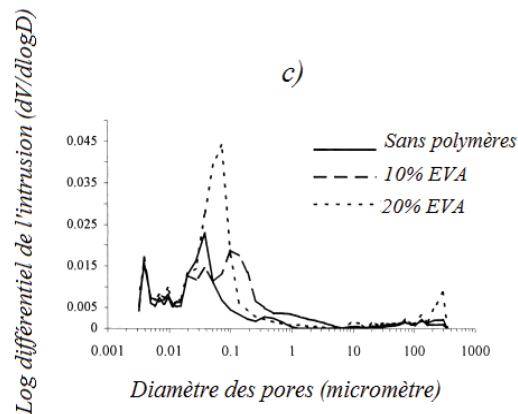


Figure 1.15 : influence de l'ajout du polymère sur la structure poreuse [Silva, 01]

3.3 Propriétés de transfert des mortiers de réparation

Nous avons vu précédemment que les principaux agents agressifs responsables du processus de corrosion sont les chlorures, l'eau et l'oxygène. La pénétration de ces derniers s'effectue par l'intermédiaire du réseau poreux du matériau. Les trois principaux mécanismes de transfert à l'intérieur du mortier sont la perméation, la diffusion et l'absorption. L'ajout de polymères peut améliorer certaines propriétés de durabilité des mortiers de réparation en raison de la réduction de la porosité et de la taille des pores ainsi que le changement apporté dans la microstructure. On présentera dans ce qui suit l'effet des polymères latex sur la pénétration des chlorures, l'absorption d'eau et la perméabilité.

3.3.1 Effet de l'ajout du polymère sur l'absorption d'eau

Les mortiers modifiés par des polymères ont une structure poreuse où les pores peuvent être remplis par les polymères ou scellés avec un film continu de polymère. En conséquence, leur absorption d'eau est plus faible que celle d'un mortier classique. Ceci dépend de la nature du polymère et du rapport P/C [Ray, 95], [Ohama, 98], [Nepomuceno, 06]. Lors de ses travaux de recherche, Ramli [Ramli, 12] a observé une réduction d'absorption d'eau de plus de 50% par rapport à un mortier de référence ne contenant pas de polymères. Les polymères utilisés sont des SBR (styrène-butadiène rubber), PAE (polyacrylique ester), VAE (vinyle acétate-éthylène) avec des rapports P/C de 6,75 et 15%. Shaker [Shaker, 97] a mesuré la profondeur de pénétration de l'eau pour deux matériaux, l'un avec un polymère SBR (P/C=15) et l'autre sans polymère et a trouvé une réduction de 75%.

Wang [Wang, 11] a étudié l'absorption capillaire d'un mortier modifié par un polymère vinyle acétate sous forme de poudre et a observé que celle-ci diminuait avec l'augmentation du rapport P/C (figure 1.16 (a)). Aggarwal [Aggarwal, 07] a observé la même chose pour un polymère acrylique sous forme d'une solution aqueuse. Saija [Saija, 95] a eu aussi les mêmes résultats pour le même polymère en maintenant E/C constant ou en l'ajustant pour avoir la même consistance (figure 1.16 (b)). Il conclut que lors de l'évaporation d'eau dans le processus d'hydratation, un film continu de polymère à caractère hydrophobe se forme dans la matrice cimentaire. Ce film polymère ne peut se former qu'à partir d'un rapport P/C supérieur à 5%. En dessous de cette valeur, le polymère agit comme un filler.

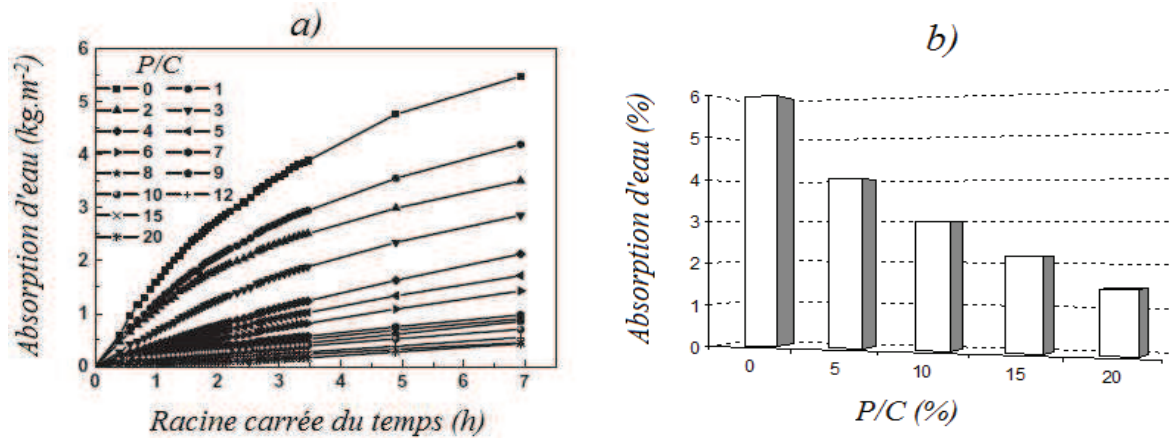


Figure 1.16 : Effet du rapport P/C sur l'absorption d'eau [Saija, 95], [Wang, 11]

3.3.2 Effet de l'ajout du polymère sur la pénétration des chlorures

L'ajout du polymère influence aussi la pénétration des chlorures dans les mortiers. D'après Aggarwal [Aggarwal, 07], l'ajout d'un polymère acrylique avec un rapport P/C de 20% réduit de 40% la profondeur de pénétration des chlorures lors d'un essai d'immersion. Saija [Saija, 95] a obtenu aussi une diminution de la profondeur de pénétration avec l'augmentation du rapport P/C pour un mortier modifié par un polymère acrylique. Zhong [Zhong, 02] a mesuré le coefficient de diffusion de trois mortiers modifiés par les polymères SBR, SAE (styrène acrylique ester) et PVDC avec un rapport P/C de 10% et a obtenu une nette diminution de ce coefficient. Gao [Gao, 02] a étudié l'influence du rapport P/C et de la fumée de silice sur le coefficient de diffusion effectif des chlorures, le polymère est de type polyacrylique ester (PAE). Les résultats ont montré une diminution du coefficient de diffusion effectif des chlorures avec l'augmentation du rapport P/C et l'ajout de la fumée de silice. Yang [Yang, 09] obtient les mêmes résultats avec un polymère SBR. Il explique ces résultats par la formation d'un film polymère et l'augmentation de la capacité de fixation des chlorures par le polymère.

3.3.3 Effet de l'ajout du polymère sur la perméabilité

Les essais de perméabilité sur les matériaux cimentaires sont souvent réalisés à l'eau ou à l'oxygène (ou air). D'après Mangat [Mangat, 95], l'ajout d'un polymère SAE diminue la perméabilité à l'eau d'un mortier de réparation.

Hassan et Rober [Hassan, 00] ont étudié la perméabilité à l'eau et à l'oxygène de mortiers de réparation classiques contenant des additions minérales (fumées de silice et cendres volantes) et un mortier modifié par un polymère (solution polymérique de type acrylique). Ils ont trouvé que le mortier modifié par le polymère présente des perméabilités plus faibles d'un ordre de grandeur que celles des mortiers classiques. Cabrera et Al-Hasan [Cabrera, 97] ont eux aussi étudié la perméabilité à l'eau et à l'oxygène de mortiers de réparation prédosés en usine modifiés par des polymères et d'autres à base d'additions minérales. Les mortiers modifiés par des polymères avaient les plus faibles valeurs de perméabilité. Ramli [Ramli, 12] a étudié l'effet de cure et du polymère sur la perméabilité à l'oxygène de mortiers modifiés par les polymères suivants : styrène butadiène rubber (SBR), polyacrylique ester (PAE), vinyle acétate éthylène (VAE) avec deux rapports P/C (6,75 et 15%) (figure 1.17 et 1.18). Les résultats montrent que la perméabilité diminue avec l'augmentation du rapport P/C, les valeurs dépendent aussi du type du polymère et de son action sur la matrice cimentaire. La cure-sèche-humide présente le plus de diminution dans la perméabilité des mortiers.

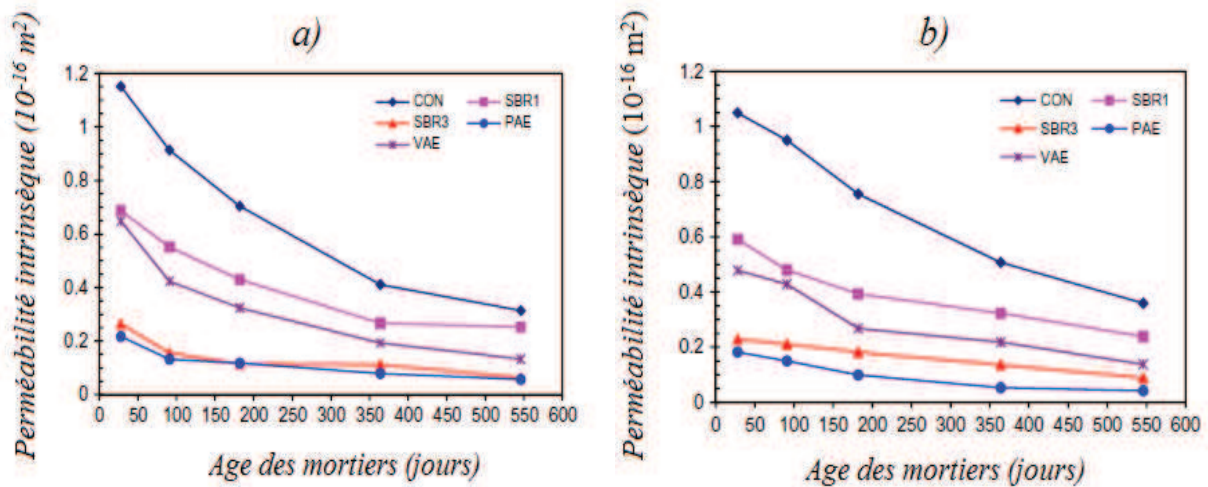
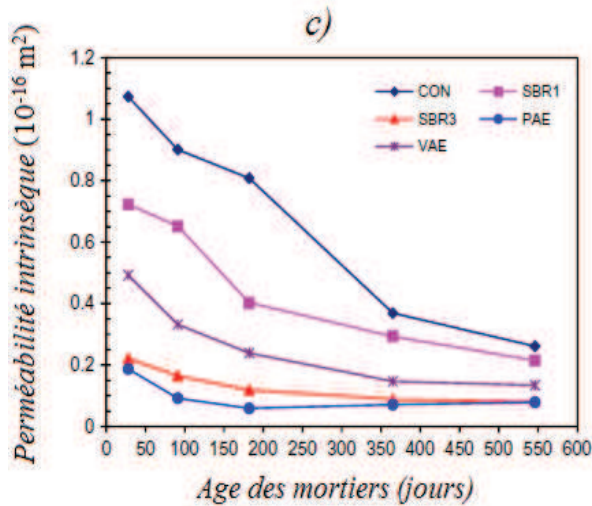


Figure 1.17 : Effect de l'ajout du polymère et de la cure sur la perméabilité intrinsèque
 (a) : cure sous l'eau, (b) : cure à l'air [Ramli, 12]



CON : Mortier de référence

SBR1 : P/C= 6,75%

PAE : P/C = 15%

VAE : P/C=15%

SBR3: P/C= 15%

Figure 1.18: Effet de l'ajout du polymère et de la cure sur la perméabilité intrinsèque (c) : cure sèche-humide [Ramli, 12]

3.3.4 Bilan des propriétés de transfert

Les résultats de la littérature concernant les propriétés de transfert des mortiers de réparation sont peu nombreux. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour appréhender les propriétés de durabilité des mortiers de réparation et plus particulièrement les mortiers industriels. Les études réalisées montrent que les mortiers modifiés par des polymères ont l'avantage de voir certaines de leurs caractéristiques physiques et mécaniques améliorées. Ceci est dû en grande partie à l'ajout du polymère qui peut agir sur la microstructure du matériau. Là encore, les recherches nécessitent un approfondissement sur le type d'interactions qui peut exister entre le polymère et la matrice cimentaire et sur les principaux facteurs entrant en jeu tels que le type de polymère, sa quantité, la quantité d'eau ajoutée,...

En résumé, les améliorations qui peuvent être apportées par les polymères sont les suivantes :

- Réduction de la porosité et/ou de la taille des pores.
- Réduction de la diffusivité des chlorures.
- Diminution de la cinétique d'absorption d'eau.

Ces différents points feront l'objet de la première partie de nos travaux expérimentaux.

3.4 Durabilité des réparations

Après des travaux de réparation par mortiers, une structure réparée se trouve de nouveau exposée aux conditions environnementales qui ont déjà créé la corrosion et de nouvelles pathologies peuvent apparaître, engendrant ainsi de nouveaux désordres comme la fissuration et l'éclatement de la zone réparée favorisant une corrosion prématurée.

La durabilité d'une réparation dépend de la pertinence du choix du matériau, de sa mise en œuvre ainsi que de ses interactions avec le béton support. Une bonne compatibilité avec ce dernier contribue à la pérennité de la structure réparée. On présente dans ce qui suit quelques facteurs responsables des dégradations prématurées de structures réparées.

3.4.1 Corrosion après réparation

La corrosion des armatures est un processus électrochimique qui implique la création d'une pile électrochimique au niveau de l'armature. Cette pile est constituée d'une anode, d'une cathode et d'un milieu électrolytique. La création d'une pile électrochimique locale sur l'acier entre les zones cathodique et anodique en présence d'eau et d'oxygène conduit à la dissolution du métal au niveau de l'anode et la précipitation de différents oxydes ferreux. Cette situation est illustrée dans la figure (1.19 (a)). Après une réparation, de nouvelles anodes peuvent se créer autour de cette zone réparée (devenue zone cathodique). Le couplage entre ces deux zones se traduit par le passage d'un courant de corrosion émanant de la surface anodique conduisant ainsi à une nouvelle corrosion (figure (1.19 (b))). Les nouvelles zones anodiques peuvent se situer soit dans la zone d'interface soit dans la zone support [Raupach, 96], [Qian, 06], [Raupach, 06], [Zhang, 06].

Il faut signaler que cette corrosion est due essentiellement à une mauvaise dépollution du béton contaminé par les chlorures autour de la zone réparée. Un bon diagnostic et un bon nettoyage de la zone corrodée ainsi que des zones adjacentes sont donc nécessaires pour éviter toute récurrence.

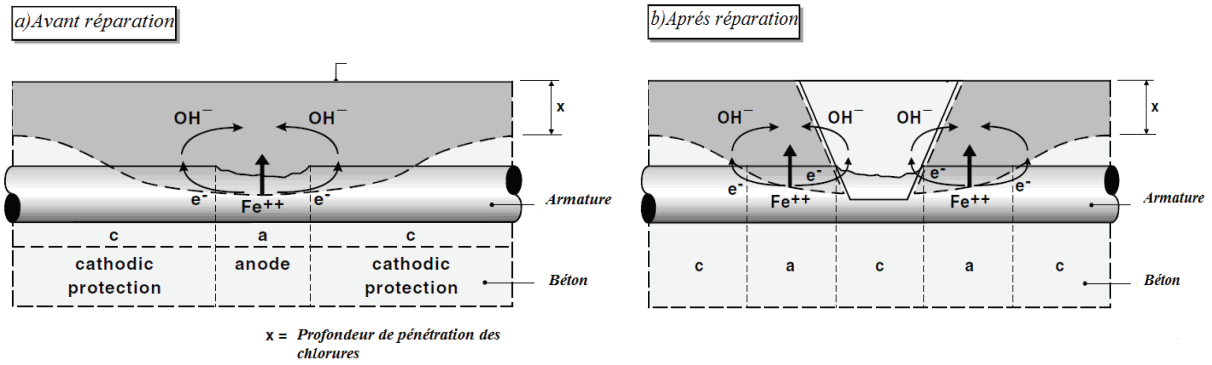


Figure 1.19 : Mécanismes de corrosion (a) avant et (b) après réparation [Raupach, 06]

3.4.2 Interaction des mortiers de réparation avec les supports

Une bonne compatibilité entre le matériau et le support assure une bonne durabilité de la réparation. Cette durabilité correspond au fait qu'elle ne doit pas être renouvelée avant un certain délai où le matériau de réparation résiste aux différentes agressions et détérioration.

La compatibilité peut être définie comme l'équilibre des propriétés physiques, chimiques, électrochimiques et aussi de dimensionnement entre le matériau de réparation et le support sans détérioration pendant la durée de vie de l'ouvrage [Emmons, 94], [Morgan, 96.]. La figure 1.20 récapitule les différents facteurs qui peuvent affecter la durabilité d'une réparation.

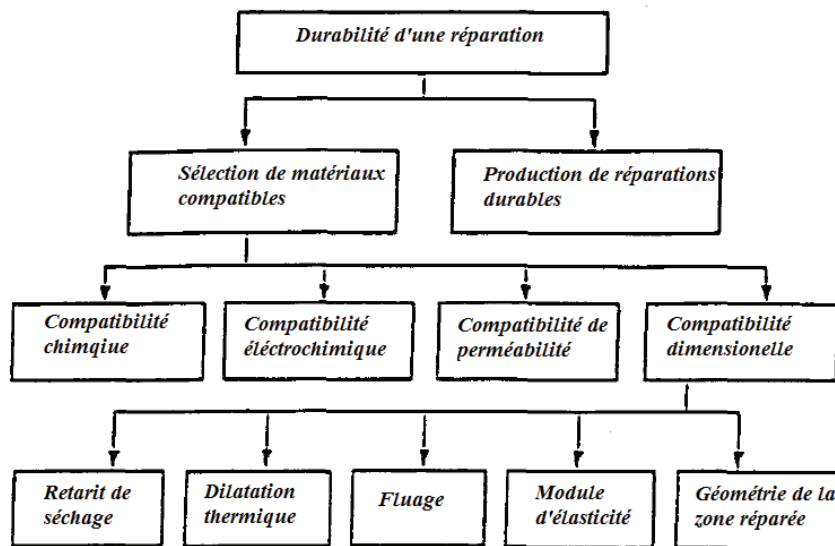


Figure 1.20 : Facteurs affectant la durabilité d'une réparation [Emmons, 94]

La compatibilité chimique correspond aux propriétés chimiques des matériaux de réparation qui n'ont pas un effet défavorable sur le béton du support. Cet effet défavorable peut se traduire par des réactions secondaires telles que la réaction alcali granulats.

L'incompatibilité dimensionnelle se manifeste par des décollements de la zone réparée, les principales causes sont :

- Le retrait excessif des mortiers de réparation (retrait de séchage et plastique) [Emberson, 94] [Emmons, 93].
- L'expansion des matériaux à retrait compensé.
- La dilatation thermique excessive du mortier de réparation.

D'autres facteurs peuvent influencer la compatibilité dimensionnelle comme la taille, la forme et l'épaisseur de la zone réparée, le module d'élasticité du matériau et le fluage [Emberson, 90].

La compatibilité électrochimique correspond à l'effet de la réparation sur la corrosion des armatures : va-t-elle stopper la corrosion ou engendrer une autre corrosion dans le support ou dans la zone réparée ? [Emmons, 96].

Le tableau 1.6 présente les différentes recommandations pour une compatibilité mécanique. [Morgan, 96].

<i>Propriétés</i>	<i>Relation entre mortier de réparation (R) et béton de support (C)</i>
<i>Résistance à la compression</i>	$R \geq C$
<i>Module d'élasticité</i>	$R \approx C$
<i>Coefficient de dilatation thermique</i>	$R \approx C$
<i>Résistance à traction</i>	$R \geq C$
<i>Retrait</i>	$R < C$
<i>Adhérence</i>	$R > C$

Tableau 1.6 : Conditions générales pour une compatibilité mécanique et dimensionnelle

4 Contexte, problématique et plan d'étude

Cette synthèse bibliographique a pour objectif de synthétiser les connaissances relatives sur les connaissances relatives au processus de corrosion du béton armé par les chlorures ainsi qu'à la caractérisation des mortiers de réparation. Les données disponibles concernant les propriétés de durabilité des mortiers de réparation sont peu nombreuses.

Le peu de données disponibles dans la littérature concernent davantage des mortiers fabriqués au laboratoire avec l'ajout ou non d'un polymère. Rares sont les études réalisées sur des mortiers industriels préformulés à l'usine. La majorité des études sur la durabilité des mortiers concernent les propriétés mécaniques, le retrait et la compatibilité avec le béton du support.

Ces propriétés sont importantes pour la durabilité d'une réparation mais insuffisante car comme nous l'avons vu précédemment, un mortier de réparation doit non seulement avoir une bonne compatibilité, mais aussi une bonne résistance à la pénétration des agents agressifs (i.e. les chlorures). La compatibilité et la résistance aux agents agressifs sont deux propriétés qui se complètent. Ainsi, le choix de notre étude s'est porté sur la performance des matériaux de réparation industriels dans la protection des armatures contre la corrosion. Pour cela, une sélection des mortiers de réparation industriels les plus utilisés a été effectuée. Ces derniers sont des mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères mono composants ou bi-composants disponibles dans l'industrie.

Sur le plan scientifique, il s'agit d'étudier :

- les mécanismes mis en jeu lors du transport d'ions chlorures dans ce type de matériaux (mortiers de réparation modifiés par des polymères et préformulés en usine),
- l'interaction entre le mortier de réparation et le béton support. Nous examinons ici la diffusivité aux ions chlorures du composé mixte mortier/support par des essais d'électrodiffusion aux ions chlorures,
- puis, nous étudierons le comportement électrochimique de l'acier placé à l'interface mortier de réparation/ béton support, simulant ainsi à l'échelle du laboratoire une zone réparée d'un ouvrage en béton armé, comme expliqué ci-dessous.

La première étape de ce projet a été d'étudier les formulations de ces mortiers (dosage en ciment, dosage en polymère, dosage en sable et dosage en additions) en utilisant des méthodes de caractérisation physique et minéralogique (ATG et granulométrie).

Les propriétés de durabilité ont été étudiées. Les différentes caractérisations ont été : la microstructure, la résistance mécanique, le transport de fluide et la diffusivité. Cette première démarche nous a servi pour faire une étude comparative entre les différents matériaux et d'en déduire une tendance générale concernant leurs performances. Elle nous a permis aussi de voir l'influence de leurs propriétés sur leur capacité de résister à la pénétration des chlorures quand ils sont appliqués sur un béton. Pour cela, des essais de transfert de chlorures ont été réalisés sur des échantillons de béton réparé.

Cette seconde démarche concerne l'étude de l'amorçage de la corrosion dans une réparation d'un béton sain. Ainsi des mortiers ont été appliqués sur des bétons de compositions différentes qui ont eux aussi été caractérisés. L'étude de l'amorçage de la corrosion nous a permis de déterminer des profils en chlorures et la concentration critique responsable de l'initiation de la corrosion. Une dernière étape a été de réaliser des simulations numériques moyennant le logiciel Comsol Multiphysics© en utilisant un modèle de transport des chlorures développé dans des travaux antérieurs au laboratoire [*Friedman, 03*]. Cette étape nous a servi à la comparaison des résultats expérimentaux et théoriques et caler ainsi des paramètres d'entrée de nos outils de modélisation. Le modèle utilisé est un modèle multi-espèces se basant sur l'équation de Nernst Planck et prenant en compte la réactivité du matériau avec l'espèce ionique.

**Chapitre 2 : Matériaux, Méthodes et Caractérisation
Preliminaire**

Chapitre 2 : Matériaux, Méthodes et Caractérisation Préliminaire

1 Introduction

Ce deuxième chapitre a pour objectif de présenter les principales techniques et méthodes utilisées pour étudier la performance des mortiers de réparation vis-à-vis de la corrosion des armatures.

Les matériaux sélectionnés dans le cadre de ces travaux de recherche sont des mortiers de réparation industriels et des matériaux fabriqués au laboratoire. Ces derniers sont des bétons support et des mortiers témoins. Quant aux mortiers de réparation, ce sont des matériaux préformulés en usine aux compositions précises inaccessibles pour cause de secrets industriels. C'est pour cette raison qu'une caractérisation préliminaire a été nécessaire et réalisée afin de déterminer leurs caractéristiques physiques, minéralogiques et les bases de leurs formulations pour mieux comprendre les mécanismes dont ils sont l'origine pour agir vis-à-vis de la durabilité. La deuxième étape de ce projet concerne la caractérisation de leurs propriétés de transfert. Les essais réalisés sont la porosimétrie à l'eau et au mercure, la diffusion des chlorures, la perméabilité au gaz et l'absorption capillaire.

Des essais d'initiation de la corrosion ont aussi été effectués avec un suivi par spectroscopie d'impédance électrochimique. Cette technique a permis d'estimer le temps de la première piquuration par corrosion et de déterminer, par des analyses chimiques, la concentration critique en chlorures. Enfin la technique de microscopie électronique à balayage a été utilisée comme une analyse complémentaire pour déterminer les éléments chimiques à l'interface acier/ matériau cimentaire.

Dans ce qui suit, une première partie est consacrée à la présentation des matériaux étudiés, puis sont présentés les différentes techniques et protocoles expérimentaux qui ont servi à la caractérisation des propriétés mécaniques, minéralogiques et physico-chimiques. Enfin, les résultats issus des premiers essais préliminaires sont présentés.

2 Matériaux

Comme nous l'avons précisé en introduction, les matériaux étudiés sont de deux familles, à savoir des matériaux commercialisés (mortiers de réparation) et des matériaux fabriqués en laboratoire (mortiers témoins et bétons support).

La description des matériaux industriels ainsi que la composition des matériaux fabriqués au sein du laboratoire sont présentées dans la suite de ce chapitre.

2.1 Mortiers de réparation étudiés

Une sélection de huit mortiers de réparation structuraux commercialisés a été faite afin d'englober les matériaux les plus utilisés lors d'une réparation avec des variantes dans leurs compositions. Il s'agit de mortiers de réparation normalisés prêt à l'emploi et pré-dosés en usine, répondant aux exigences de la norme EN 1504 [Afnor, 08], classés dans la catégorie des mortiers de ciments hydrauliques polymères. Ces mortiers s'appliquent à une structure en béton armé pour remplacer le béton défectueux et pour restituer à la structure son intégrité et sa durabilité.

Les mortiers de réparation sont classés en deux familles, à savoir, mortiers mono-composant où le polymère est présent sous forme de fines déshydratées mélangées au liant hydraulique et des mortiers bi-composants où le premier composant contient le polymère et l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. Quant au second, il contient le ciment, le sable ainsi que les additions minérales.

Les mortiers mono-composant sont au nombre de six et sont notés mortiers "PB". Ce sont des mortiers fibrés (fibres synthétiques) sauf pour le mortier PB6. La granulométrie des mélanges est assez fine (entre 0 et 1,6 mm). Les mortiers PB2 et PB3 ont des compositions presque similaires à la différence du PB3 qui est un mortier autoplaçant.

Les mortiers bi-composants sont au nombre de deux et notés "BC". Ce sont des mortiers non fibrés. Deux autres mortiers ont été étudiés en ôtant la solution polymérique des mortiers bi-composants tout en gardant la même consistance. Ces mortiers sont appelés "BC*".

Les mortiers de réparation sont des matériaux thixotropes sauf les mortiers PB5 et PB6. Ils répondent aux exigences de la classe R3 et R4 de la norme EN 1504-3 [Afnor, 98] (voir annexe 3), sauf pour le mortier PB6 qui est classé en R2. Un résumé de quelques données techniques extraites des fiches techniques des mortiers de réparation est présenté dans le tableau 2.1. Deux exemples de fiches techniques sont donnés dans les annexes 1 et 2.

<i>Propriétés</i>	<i>PB1</i>	<i>PB2</i>	<i>PB3</i>	<i>PB4</i>	<i>PB5</i>	<i>PB6</i>	<i>BC1</i>	<i>BC2</i>
Granulométrie Max (mm)	1,2	1,5	1,6	0,8	1,6	1,6	0,5	1,0
Résistance en compression à 28 jours MPa (EN 12190)	≥35	≥60	≥55	≥50	≥40	≥50	≥50	≥50
Module d'élasticité à 28 jours GPa (EN 13412)	19,4	24,8	29,9	20,1	-	22,6	-	21,3
Adhérence à 28 jours MPa (EN 1542)	≥1,5	≥2	≥2	≥1,5	≥0,8	≥0,8	≥2	≥2
Classe de résistance (EN 1504-3)	R3	R4	R4	R3	R2	R3	R4	R4
Présence de fibres	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non
Mortier thixotrope	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui

Tableau 2.1 : Caractéristiques générales des mortiers de réparation

2.2 Bétons support

Deux bétons ont été fabriqués notés C15 et C30, faisant référence à leur résistance à la compression à 28 jours. La formulation de ces bétons est identique à celle des bétons confectionnés par Tahlaïti [Tahlaïti, 10]. Les compositions des bétons ont été déterminées avec la méthode de Dreux-Gorisse avec le but d'obtenir des porosités assez différentes (E/C différents)

Le ciment utilisé est de type CEM II/B-LL/32,5 R issu de l'usine Lafarge de La Couronne, utilisé pour les bétons de bâtiment. Ce type de ciment contient 26% de filler calcaire.

Les granulats sont de type siliceux. Le sable est de Cadeuil, provenant de carrières Mercier et Fils. Les graviers sont issus de la carrière de Saint Michel le Cloucq en Vendée (85). Le diamètre maximum des granulats est égal à 12,5 mm.

La composition des deux bétons est présentée dans le tableau 2.2. Ces compositions ont été retenues d'une part car ces formulations ont déjà été étudiées au laboratoire (des données sont disponibles sur leurs propriétés de transfert), d'autre part pour la simplicité des compositions, contrairement à des bétons à hautes performances classiquement utilisés dans un environnement marin.

<i>Béton</i>	<i>Gravier</i> (kg/m ³)	<i>Sable</i> (kg/m ³)	<i>Ciment</i> (kg/m ³)	<i>Eau</i> (kg/m ³)	<i>E/C</i>
<i>C15</i>	<i>1085</i>	<i>729</i>	<i>275</i>	<i>222</i>	<i>0,8</i>
<i>C30</i>	<i>1205</i>	<i>593</i>	<i>380</i>	<i>193</i>	<i>0,5</i>

Tableau 2.2 : Compositions des bétons support

2.3 Mortiers témoins

Deux mortiers de référence MR1 et MR2, ont été confectionnés avec pour objectif de les confronter aux mortiers de réparation. Ces mortiers ont deux E/C différents (0,5 et 0,6). Les matériaux utilisés pour leur confection sont le sable de Cadeuil et le ciment CEM I 52,5 issu de l'usine Lafarge de La Couronne. Ces formulations de mortiers ont été choisies afin d'obtenir la même classe de résistance que les mortiers de réparation, avec une composition simple, sans ajouts de polymères.

3 Techniques et protocoles expérimentaux

L'objectif de cette partie est de détailler les différents protocoles qui ont servi à mener le programme expérimental de cette étude. Avant cela, les procédures de malaxage, de coulage et de fabrication des échantillons sont présentées.

3.1 Préparation des échantillons

Les mortiers de réparation ont été malaxés d'après les prescriptions du fabricant. Les mortiers mono-composants ont été mélangés pendant trois minutes avec la quantité d'eau de gâchage prescrite, puis remélangés à nouveau pendant trois minutes après une pause de deux minutes. Pour les mortiers bi-composants, les deux composants ont été mélangés sans ajout d'eau, le mélange a été poursuivi jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. La séquence de malaxage des matériaux fabriqués au laboratoire est similaire à celle des mortiers mono-composant. Les formulations de gâchage des mortiers de réparation sont données dans le tableau 2.3.

La mise en place dans les moules a été effectuée avec une aiguille vibrante et une table vibrante. La géométrie des échantillons varie en fonction du type d'essai. Ainsi, des cylindres de dimensions 11 x 22 cm ont été fabriqués pour les essais physico-chimiques, des prismes de dimensions 4 x 4 x 16 cm ont été coulés pour les essais mécaniques et d'autres de dimensions 40 x 40 x 5,5 cm pour les essais d'initiation de la corrosion.

<i>Mortiers</i>	<i>Consommation (kg / m³ de mortier frais)</i>	<i>Eau de gâchage (l/kg)</i>
<i>PB1</i>	<i>1820</i>	<i>0,23</i>
<i>PB2</i>	<i>2273</i>	<i>0,16</i>
<i>PB3</i>	<i>1953</i>	<i>0,13</i>
<i>PB4</i>	<i>2000</i>	<i>0,16</i>
<i>PB5</i>	<i>2100</i>	<i>0,15</i>
<i>PB6</i>	<i>1866</i>	<i>0,13</i>
<i>BC1</i>	<i>2100</i>	<i>0,11</i>
<i>BC2</i>	<i>2100</i>	<i>0,09</i>

Tableau 2.3: Formulations des mortiers de réparation

3.1.1 Echantillons pour les essais de transfert

Des échantillons cylindriques 11 x 22 cm ont été fabriqués en mortier et en béton. Les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures de conservation en salle humide (HR= 90 %, température ambiante 20 ± 2 °C) et conservées dans la même salle pendant 40 jours. Les éprouvettes ont été par la suite découpées en disques et carottés pour avoir les dimensions d'échantillon appropriées à chaque essai, à savoir :

- des disques de mortier de diamètre 65 mm et d'épaisseur 15 mm pour les essais de porosité à l'eau et d'électrodifusion.
- des disques de béton de diamètre 65 mm et d'épaisseur 30 mm pour l'essai de porosité à l'eau et d'épaisseur 20 mm pour l'essai d'électrodifusion.
- des cylindres de 11 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur pour les essais d'absorption capillaire.
- des cylindres de 6,5 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur pour les essais de perméabilité à l'air.
- des cubes de 20 mm de côté pour les essais de porosité mercure.

3.1.2 Echantillons pour les essais de corrosion accélérée

Pour simuler une réparation, des prismes de dimension 20 x 20 x 5,5 cm ont été fabriqués. Ces échantillons ont été confectionnés en utilisant les mortiers de réparation comme matériaux d'enrobage et le béton C30 comme matériau de support, avec une armature à l'interface mortier-béton. Une partie en silicone avec une surface rugueuse a été utilisée pour avoir le même état d'interface pour tous les échantillons. La procédure de fabrication et de mise en œuvre des éprouvettes et illustrée dans la figure 2.1.

(1)



Fabrication des empreintes en silicone : le silicone a été coulé dans un moule contenant une éprouvette de béton prismatique sablée sur laquelle était collée une armature pour avoir à la fin une partie en silicone avec l'empreinte de l'armature et du béton sablé.

(2)



Mise en place de l'empreinte et de l'armature avant coulage du béton en trois couches par table vibrante et conservation du moule dans la salle humide pendant 24h.

(3)



Démoulage de l'empreinte et montage du moule à nouveau.

(4)



Coulage du mortier en trois couches avec mise en place par table vibrante.

(5)



*Démoulage de l'éprouvette.
Galvanisation de l'armature (partie saillante).
Cure en chambre humide.*

Figure 2.1 : Etapes de fabrication des éprouvettes mortier-béton

3.1.3 Echantillons pour les essais de transfert à l'interface mortier-béton

Des échantillons avec interface mortier-béton ont été aussi fabriqués pour étudier l'influence de l'interface sur les propriétés de transfert et sur la corrosion. Une partie en silicone a été utilisée pour garantir la même rugosité à l'interface pour toutes les éprouvettes. Les étapes de fabrication sont présentées sur la figure 2.2. Les échantillons obtenus sont des disques de 65 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur pour l'essai d'électro diffusion et des cylindres de 11 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur pour les essais d'absorption capillaire.



Figure 2.2 : Etapes de confection des éprouvettes mortier-béton

3.2 Propriétés physico-chimique, minéralogiques et mécaniques

3.2.1 Analyse granulométrique par tamisage

Afin de déterminer les pourcentages pondéraux des différentes familles de grains constituant le mortier, des analyses granulométriques par tamisage ont été effectuées. Ces dernières nous ont permis de déterminer la quantité de liant, de sable et de fibres pour chaque mortier de réparation préformulé. L'essai a été conduit d'après les normes EN 933-1 et EN 933-2. La proportion de sable a été calculée d'après les refus cumulés. De même pour les fibres qui avaient l'aspect de boules de coton après le tamisage. La quantité du liant a été prise comme étant la quantité de mortier restante au fond après soustraction de la quantité de polymères et de calcaire déterminée par l'analyse thermogravimétrique (ATG). Les fibres ont été extraites manuellement des tamis puis pesées.

3.2.2 Analyse thermogravimétrique (ATG)

Le principe de cette analyse consiste à suivre l'évolution de la masse d'un échantillon de matériau soumis à une élévation de température dans un four. Cette température peut aller jusqu'à 1000°C. La perte de masse est suivie par une mesure continue à l'aide d'une balance. A la fin de l'essai, on obtient une courbe donnant l'évolution de la masse en fonction de la température. La représentation de la perte de masse sous la forme de sa dérivée par rapport au temps (dTG), met en évidence les différents pics de décomposition des phases constituant le matériau. Cette méthode est généralement employée pour les matériaux cimentaires afin de déterminer le degré d'hydratation et la proportion massique des différentes phases de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de calcite (CaCO_3). Dans notre cas, cette technique a été utilisée pour estimer la quantité de polymère et de calcite dans les mortiers de réparation avant hydratation. L'appareil utilisé est de marque SETARAM de type SETSYS Evolution 16/18 (figure 2.3).



Figure 2.3: Dispositif expérimental pour l'analyse thermogravimétrique

3.2.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage (MEB) utilisé est un microscope Philips Quanta 200 ESEM/FEG, fonctionnant à 20 kV en Mode Environnemental (sous pression de vapeur d'eau, autour de 1 mbar dans la chambre contenant l'échantillon) (figure 2.4). En plus de l'imagerie, la technique EDS (« Energy Dispersive X-ray Spectroscopy ») a été utilisée pour l'analyse chimique locale à l'état solide.

Les observations ont été réalisées en mode électron secondaire et en mode électron rétrodiffusé. Les analyses effectuées en mode électron secondaire permettent de nous renseigner sur la topographie des surfaces ainsi que sur la microstructure des constituants.

En revanche, le contraste dans l'image nous indique les variations chimiques locales. Les régions où le poids atomique est plus élevé apparaissent plus claires et celles constituées par des éléments plus légers apparaissent sombres. Pour ce faire, le MEB est équipé d'un système d'analyse chimique élémentaire par rayonnement X caractéristique (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) de la marque EDAX. Cette technique est capable de détecter la plupart des éléments chimiques du tableau périodique à l'exception des 5 plus légers (hydrogène, hélium, lithium, béryllium et bore).

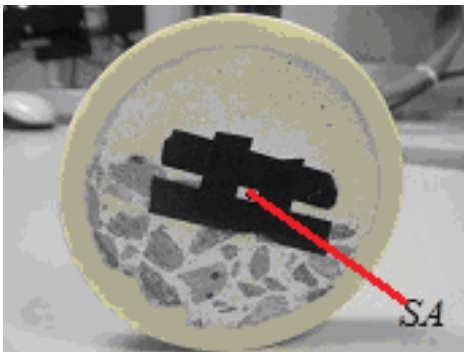


Figure 2.4: Microscope électronique à balayage (MEB) utilisé

Les mortiers de réparation ont été analysés au MEB pour :

- identifier les polymères dans les matériaux anhydres.
- identifier les polymères dans le mortier durci et observer les modifications qu'ils apportent à la microstructure (porosité, interaction avec la matrice cimentaire, formation du film polymère).
- observer la distribution des fibres dans de la matrice cimentaire.
- analyser l'état d'interface des échantillons cylindriques mortier-béton.
- analyser les produits de corrosion pour les essais de corrosion accélérée.

Les échantillons utilisés pour l'identification des polymères et l'observation des fibres étaient des cubes de 1cm de côté avec une surface polie ou fracturée. L'analyse de l'interface a été effectuée directement sur l'échantillon (figure 2.5).



SA : Surface analysée

Cette méthode a été choisie en raison de la difficulté de trouver l'interface en analysant toute la surface de l'échantillon

Figure 2.5 : Analyse de l'interface au MEB

3.2.4 La spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Lorsque la longueur d'onde apportée par un faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et l'intensité de la lumière réfléchiée ou transmise diminuera. Le spectre infrarouge d'un échantillon est établi en faisant passer un faisceau de lumière infrarouge au travers de cet échantillon. L'examen de la lumière transmise indique la quantité d'énergie absorbée à chaque longueur d'onde. Des spectres présentant la variation de l'absorbance ou bien la transmittance en fonction du nombre d'ondes sont obtenus. L'analyse de ces caractéristiques donne des informations sur la structure moléculaire de l'échantillon.

Cette technique permet de détecter la présence de matières organiques et éventuellement de les identifier. Elle permet aussi d'identifier la nature de composés anioniques présents dans le matériau tels que CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , SiO_4^{4-} ,...

Cette technique a été utilisée afin d'identifier la nature des polymères présents dans les mortiers de réparation. Les essais ont été effectués sur les solutions polymériques (après séchage) ainsi que sur les poudres des mortiers mono-composant.

Les analyses ont été réalisées en mode réflexion totale atténuée (ATR) pour les solutions polymériques et en mode réflexion diffuse pour les poudres. Les spectres infrarouges sont enregistrés à l'aide d'un spectromètre de type NICOLET Magna IR 760 (figure 2.6).

Le domaine de nombres d'ondes étudié s'étend de 4000 à 600 cm^{-1} . L'acquisition des spectres est réalisée avec 64 balayages et une résolution de 4 cm^{-1} pour le mode ATR et 128 balayages et une résolution de 8 cm^{-1} pour le mode réflexion diffuse.

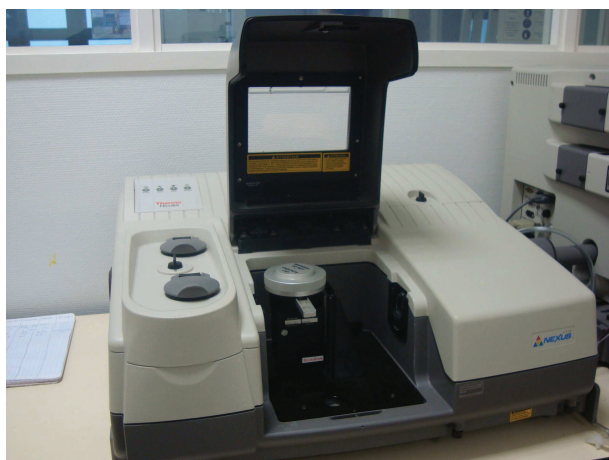


Figure 2.6 : Spectromètre à infrarouge utilisé

3.2.5 Résistances à la compression et à la flexion

Les résistances mécaniques ont été déterminées d'après la norme NF EN 12190 [Afnor, 98] sur des éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm. Les éprouvettes ont été démoulées au bout de 24 h et emballées dans un film plastique pendant 48 h. Elles ont ensuite été placées dans une salle humide jusqu'aux échéances 1, 7, 28, 60 et 90 jours. Trois échantillons pour chaque mortier ont été testés.

3.3 Propriétés de transfert

3.3.1 Porosité à l'eau

Les porosités à l'eau ont été déterminées selon la procédure recommandée par GranDuBé [Arliguie, 07]. L'essai se déroule en trois phases : séchage des échantillons, saturation sous vide et pesées hydrostatiques. Avant d'être disposés dans le dessiccateur, les échantillons ont été séchés pendant deux mois dans une étuve à 45°C. Cette température ne conduit pas à un séchage complet de l'échantillon mais évite toute dégradation de la microstructure.

La porosité à l'eau a été calculée en utilisant l'équation 2.1 :

$$p(\%) = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{\rho_{eau} \times V_{éch}} \times 100 \quad (2.1)$$

Où :

M_{sat} : la masse de l'échantillon saturé (kg)

M_{sec} : la masse de l'échantillon sec (kg)

$V_{éch}$: le volume apparent de l'échantillon (kg/m^3)

ρ_{eau} : la masse volumique de l'eau (kg/m^3)

La masse volumique apparente sèche (kg/m^3) a été calculée en utilisant l'équation 2.2 :

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{V_{éch}} \quad (2.2)$$



Figure 2.7: Dispositif expérimental pour la porosité à l'eau

3.3.2 Porosité au mercure

Le principe de cette technique est de faire pénétrer un liquide non mouillant, qui est le mercure, à l'intérieur du matériau en exerçant une certaine pression et d'en déduire la taille des pores. La méthode est basée sur la loi de Laplace liant la pression d'injection du mercure au diamètre d'entrée du pore. Les pores sont assimilés à des canaux cylindriques et le diamètre des pores est relié à la pression par l'équation suivante :

$$P = -\frac{4\gamma \cos \theta}{D} \quad (2.3)$$

Où :

P est la pression d'injection du mercure (Pa).

γ est la tension superficielle du mercure (N/m), à 20°C, $\gamma = 0,480$ N/m.

θ est l'angle de contact du mercure avec la surface du matériau, généralement pris égal à 130°.

D est le diamètre des pores (m).

Lors de la pénétration du mercure, la pression P est augmentée par incrémentation et le volume cumulé de mercure V(P) entrant dans l'échantillon est mesuré à chaque incrément ainsi que le rayon moyen de la classe de pores envahis.

On obtient ainsi la courbe d'intrusion de mercure en fonction du diamètre des pores investis (volume cumulé des pores en fonction du diamètre du pore). Par différentiation logarithmique, on obtient la courbe de distribution poreuse. Le porosimètre utilisé est de marque Micromeritics de type AutoPore III9420 (figure 2.8), couvrant une gamme de pores allant de 0,003 μm à 360 μm , et pouvant aller jusqu'à une pression supérieure à 400 MPa.

Les échantillons ont été séchés pendant deux mois avant l'essai à une température de 45°C pour éviter tout risque de fissuration ou de dégradation de la microstructure.



Figure 2.8 : Porosimètre mercure (à gauche) et pénétromètre (à droite)

3.3.3 Absorption capillaire à l'eau

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de mortier préalablement séchée à une température de 80°C. Les échantillons ont été entourés d'une résine Axon F16 à prise rapide (5 à 10 min) avec une épaisseur de 5 mm pour éviter l'évaporation d'eau aux surfaces latérales.

Le suivi de l'évolution de masse des éprouvettes plongées dans 3 mm d'eau a été fait aux échéances suivantes : ¼, ½, 1, 2, 4, 8 et 24h puis tous les jours jusqu'à stabilisation de la masse ($\Delta M \leq 0,05\%$)

La masse d'eau absorbée par unité de surface en contact avec l'eau, exprimée en kg/m^2 est calculée en utilisant la relation 2.4 :

$$M_a = \frac{M_x - M_0}{A} \quad (2.4)$$

Où:

M_x : La masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg)

M_0 : La masse initiale de l'éprouvette (kg)

A: La section de l'éprouvette par unité de surface (m^2)

La masse d'eau absorbée peut être exprimée en fonction de la racine carrée du temps par l'équation suivante : [Martys, 97]

$$M_a = C_a \sqrt{t} \quad (2.5)$$

Où:

C_a : Coefficient d'absorption capillaire ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)

t : La durée de l'imbibition (s)

Le coefficient d'absorption capillaire est obtenu par régression linéaire de la courbe d'absorption capillaire.

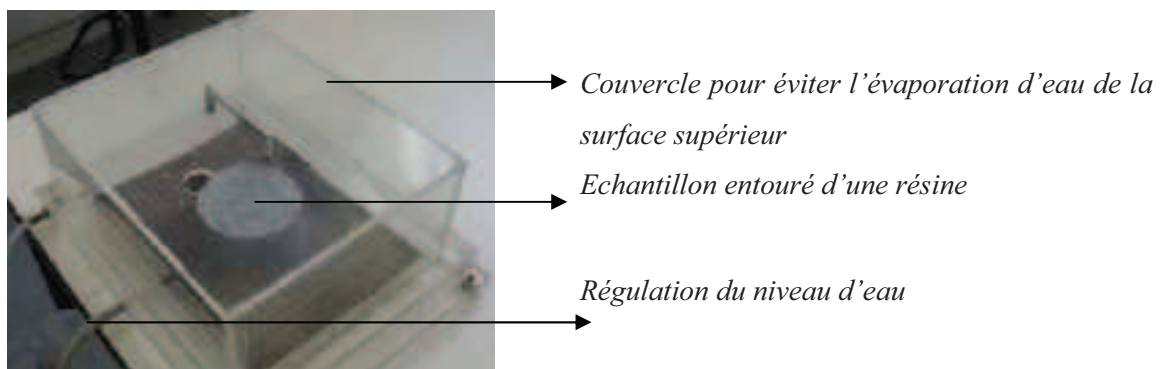


Figure 2.9: Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption capillaire

3.3.4 Perméabilité au gaz

Le but de cet essai est d'estimer la perméabilité intrinsèque des mortiers et des bétons. En premier lieu, la perméabilité apparente est mesurée puis la perméabilité intrinsèque est déterminée par l'approche de Klinkenberg [Klinkenberg, 41]. Le dispositif utilisé est présenté sur la figure 2.11. Avant l'essai les échantillons ont été entourés d'une résine Axon 16F afin d'assurer une étanchéité latérale et d'avoir un écoulement unidirectionnel. L'échantillon est disposé entre deux chambres, l'une basse pression et l'autre haute pression et l'essai se déroule en trois phases, à savoir, l'imposition du gradient de pression, la mesure de la perméabilité apparente et la déduction de la perméabilité intrinsèque.

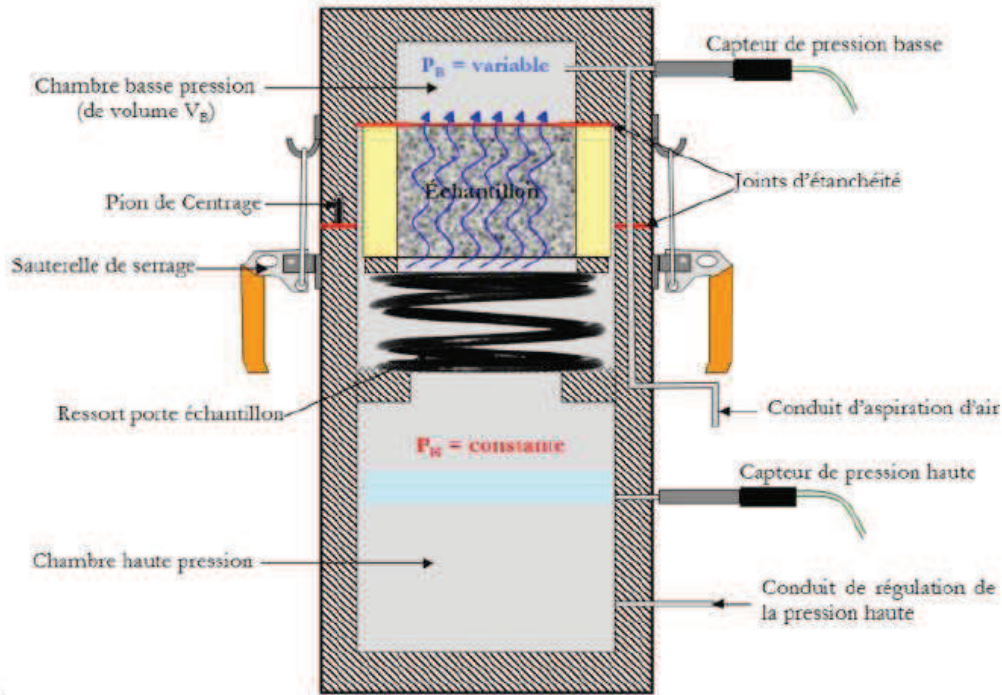


Figure 2.10 : Dispositif schématique pour la mesure de la perméabilité à l'air

- Imposition du gradient de pression

Durant cette phase, la pression haute PH est augmentée dans la chambre à haute pression par injection d'air jusqu'à avoir la valeur imposée lors de l'acquisition et en même temps, un venturi relié à la chambre basse pression permet de faire baisser la pression à une valeur PB de l'ordre de 8,5 kPa environ. Les pressions appliquées en chambre haute et chambre basse sont stabilisées avant de commencer la mesure. La stabilisation des pressions est contrôlée par l'application d'un critère de stabilisation en (Pa/s) choisi lors de l'acquisition.

- Mesure de la perméabilité apparente

Durant cette phase la pression haute est maintenue constante et l'écoulement d'air se produit sous l'effet du gradient de pression imposé conduisant à une augmentation de la pression basse, l'évolution de cette dernière en fonction du temps est mesurée. L'essai se poursuit jusqu'à ce que la pression basse atteigne 35 kPa et s'arrête au plus tard 80 secondes après le début de la mesure. Ainsi, la perméabilité apparente peut être déterminée par le développement de la loi de Darcy en supposant que le gaz traversant l'échantillon est parfait. L'expression finale de la perméabilité apparente est donnée par l'équation (2.6).

$$K = \frac{2\mu L}{[P_H^2 - P_B^2]S} V_B \frac{dP_B}{dt} \quad (2.6)$$

Où :

K est la perméabilité apparente (m^2), μ la viscosité dynamique du gaz (Pa. s), L est l'épaisseur de l'échantillon (m), S est la section de l'échantillon (m^2) et V_B le volume de la chambre basse (m^3).

- Perméabilité intrinsèque suivant l'effet Klinkenberg

La perméabilité apparente dépend du gradient de pression imposé à l'échantillon. L'estimation de la perméabilité intrinsèque se fait d'après l'effet Klinkenberg. Cet effet caractérise le phénomène de glissement aux parois. En effet, lors du transfert du gaz, l'écoulement est affecté par la présence de chocs des molécules d'air avec les parois des pores du matériau, ce qui modifie la perméabilité à l'air.

Cet effet se traduit par l'équation (2.7) :

$$K = K_{int} \beta \frac{2}{[P_H + P_B]} + K_{int} \tag{2.7}$$

K_{int} étant la perméabilité intrinsèque et β est un facteur de glissement du gaz (constant). Le coefficient β est fonction de la finesse du réseau poreux et de la nature du gaz. La perméabilité intrinsèque K_{int} est la valeur limite de la perméabilité apparente lorsque que la pression moyenne du fluide tend vers l'infini, c'est-à-dire lorsque que le gaz tend vers une phase condensée (liquide) [Picandet, 01].

La courbe de K en fonction de l'inverse de la pression moyenne est donnée par une droite dont l'intersection avec l'axe des ordonnées donne la perméabilité intrinsèque (K_{int}) (figure 2.11). Plusieurs paliers de pression haute doivent être utilisés pour tracer cette droite. Dans notre cas les pressions imposées sont : 160, 180, 210 et 230 kPa.

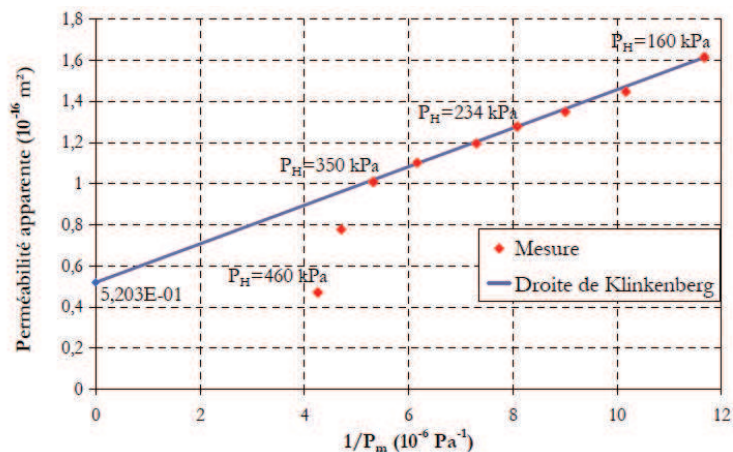


Figure 2.11 : Exemple d'évolution de la perméabilité apparente en fonction de la pression moyenne [Hamami, 09]

Afin d'étudier l'influence du degré de saturation sur la perméabilité intrinsèque, les essais ont été effectués après un séchage des échantillons aux températures 65, 80 et 105°C. Les perméabilités apparentes ont été déterminées sur trois échantillons pour chaque matériau. La perméabilité intrinsèque, quant à elle, a été déterminée à partir de la perméabilité moyenne pour chaque palier de pression en fonction de l'inverse de la pression moyenne. Le degré de saturation (S_r) pour une température donnée a été déterminé sur trois échantillons pour chaque matériau à partir de l'équation (2.8). La saturation des échantillons a été faite sous vide après un séchage à 105°C.

$$S_r(T) = \frac{V_{eau(T)}}{V_{vides}} = \frac{(M_T - M_{sec})\rho_{eau}}{(M_{sat} - M_{sec})\rho_{eau}} \quad (2.8)$$

Où :

$V_{eau(T)}$ et V_{vides} sont respectivement le volume de l'eau à une température donnée et le volume des vides (en considérant que le volume total des vides est égal au volume total de l'eau)

M_T : masse de l'échantillon après un séchage à une température donnée

M_{sec} : masse de l'échantillon après un séchage à 105°C

M_{sat} : masse de l'échantillon après saturation en eau

3.3.5 Isothermes d'interaction chimique

Afin d'évaluer la capacité de fixation des chlorures par les mortiers de réparation, des essais d'isothermes d'interactions chimiques ont été effectués d'après la procédure GranDuBé [Arliguie, 07]. Les échantillons de mortiers broyés ont été introduits dans des flacons contenant des solutions de chlorure à trois concentrations différentes (0.14, 0.28 et 0.56 mol/l). Le volume de chaque solution (V) est de 0.25 l pour une masse d'échantillon (M) de 50 g. Les analyses des chlorures ont été effectuées deux mois après la mise en contact de l'échantillon avec la solution.

La masse de chlorures fixés est calculée par la relation (2.9) :

$$m_b = (C_{initiale} - C_{finale}) \times \left(\frac{V}{M}\right) \times (M_{mol}) \quad (2.9)$$

Où:

mb : la masse de chlorures fixés par unité de masse de solide sec en (g/kg)

$C_{initiale}$: la concentration initiale en chlorures libres dans la solution en (mol/l)

C_{finale} : la concentration finale en chlorures libres dans la solution en (mol/l)

M_{mol} : la masse molaire des chlorures (égale à 35,5 g/mol)

3.3.6 Électrodifusion des ions chlorures

Des essais de diffusion accélérée ont été effectués en utilisant une cellule d'électrodifusion (figure 2.12) [Loche, 01]. La cellule est reliée à un potentiostat de type Solartron Instruments 1285 ou 1287 à quatre électrodes pour l'application du champ électrique. Des électrodes de références sont placées au contact des deux faces de l'échantillon pour maintenir la constance du champ électrique appliqué.

Avant sa mise en place dans la cellule, l'échantillon est entouré d'une résine et saturé avec une solution basique (KOH : 4,65 g/l ; NaOH : 1g/l). Il est ensuite placé dans le porte échantillon entre les deux compartiments de la cellule, l'un des deux contient une solution basique et l'autre une solution basique et du NaCl (30g/l), cette dernière a été choisie pour se rapprocher de la concentration d'eau de mer en chlorures. Un champ électrique d'une valeur limite de 300 V/m est appliqué pour accélérer le transfert des ions chlorures. Cette valeur a été choisie afin de minimiser l'élévation de température due à l'effet Joule [Amiri, 01b].

La quantité de chlorures traversant le matériau est déterminée par dosage titrimétrique toutes les 24 heures, jusqu'à l'obtention d'un flux constant. La courbe de concentration cumulée des chlorures dans le compartiment aval est tracée en fonction du temps, la pente de la courbe ($\Delta C/\Delta t$) est déterminée et le flux est calculé par la relation suivante :

$$J = \frac{\Delta C}{\Delta t} \frac{V}{S} [\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}] \quad (2.10)$$

Avec :

- V: Le volume du compartiment aval (l)

- S: La section de l'échantillon (m²)

Le coefficient de diffusion effectif des chlorures est calculé en utilisant la relation 2.12.

$$D_{eff} = \frac{RTJ}{ZFEC_0} \left(1 - e^{-\frac{ZFU}{RT}} \right) [\text{m}^2.\text{s}^{-1}] \quad (2.11)$$

Où:

- R: la constante des gaz parfaits, égale à $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- F: la constante de Faraday, égale à $96487 \text{ J.V}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- T: la température (K)
- Z: la valence de l'ion chlorure égale à (-1)
- E : champ électrique appliqué aux bornes de l'échantillon égale à 300 V/m
- C_0 : la concentration en NaCl dans le compartiment amont égale à 30 g/l

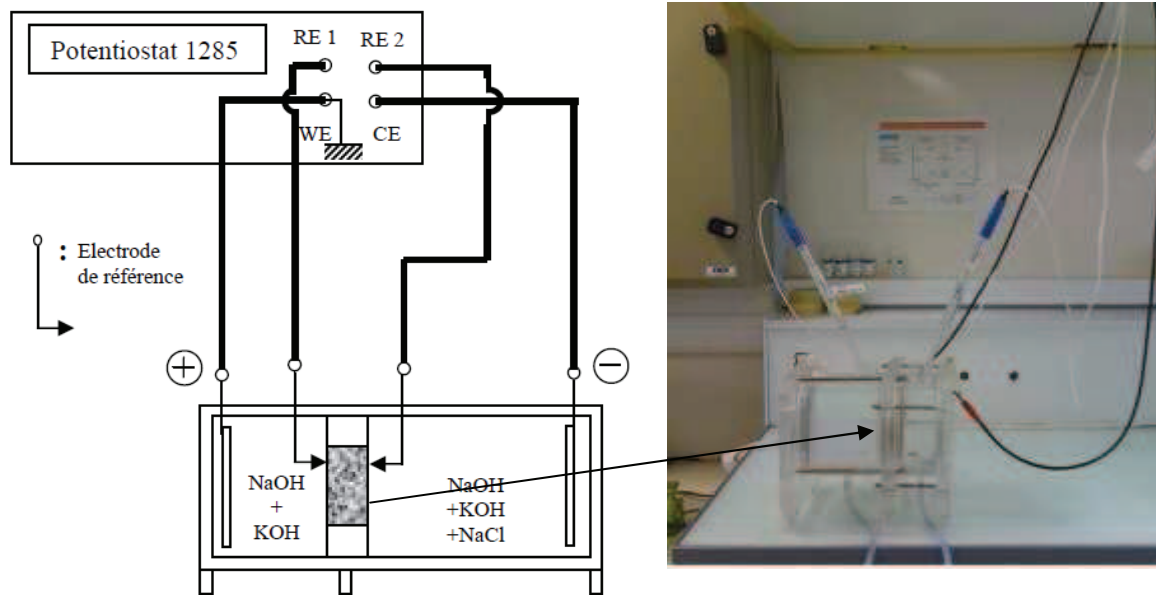


Figure 2.12: Photographie et schéma du dispositif expérimental pour l'essai d'électrodifusion

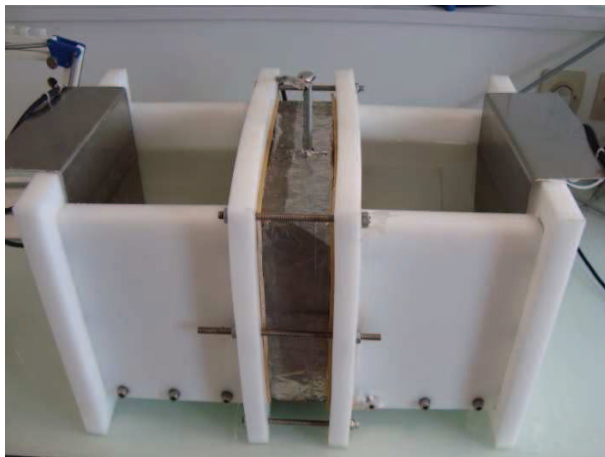
[Loche, 01]

3.4 Etude de l'initiation de la corrosion

L'étude de l'initiation de la corrosion a été réalisée par deux méthodes électrochimiques. La première est une méthode classique de mesure de potentiel de corrosion, [ASTM, 91], où le principe est de mesurer la différence de potentiel électrique entre l'armature noyée dans une solution électrolytique (solution interstitielle du béton) et une électrode de référence. C'est une méthode rapide mais elle ne donne qu'une information qualitative de l'état électrochimique de l'armature et dépend beaucoup de la qualité de mise en œuvre du dispositif expérimental [Gonzalez, 04]. C'est pourquoi les résultats de cette méthode ont été couplés avec une deuxième méthode expérimentale, la spectrométrie d'impédance électrochimique (S.I.E).

C'est une méthode qui a été développée au sein du laboratoire par Poupard [Poupard, 01] [Aït-Mokhtar, 06] puis optimisée par M. Tahlaiti [Tahlaiti, 10]. C'est une méthode nettement moins développée que la précédente mais elle présente la particularité d'être plus précise dans le suivi de l'état de passivation des armatures métalliques. Au terme de chaque essai, des mesures chimiques sont réalisées afin de déterminer le profil en chlorures dans le matériau d'enrobage et ainsi connaître la concentration critique en chlorures au droit de l'armature nécessaire à l'amorçage de la corrosion. L'utilisation de ces deux techniques a prouvé son efficacité, toutefois la lenteur du processus de diffusion des chlorures nous a amené à coupler les mesures électrochimiques avec un essai d'électrodifusion. Nous utilisons donc la méthode proposée par Tahlaiti [Tahlaiti, 10].

Placés dans la cellule d'électrodifusion (figure 2.13), les échantillons subissent une alternance de migration sous champ électrique et des mesures impédanciennes et de potentiel jusqu'à ce qu'un état de corrosion soit détecté (jusqu'à la dépassivation de l'armature).



L'échantillon est placé entre deux compartiments contenant une solution basique et une solution saline. La polarisation est assurée par deux plaques en acier inox. La surface de l'échantillon en contact avec la solution est de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

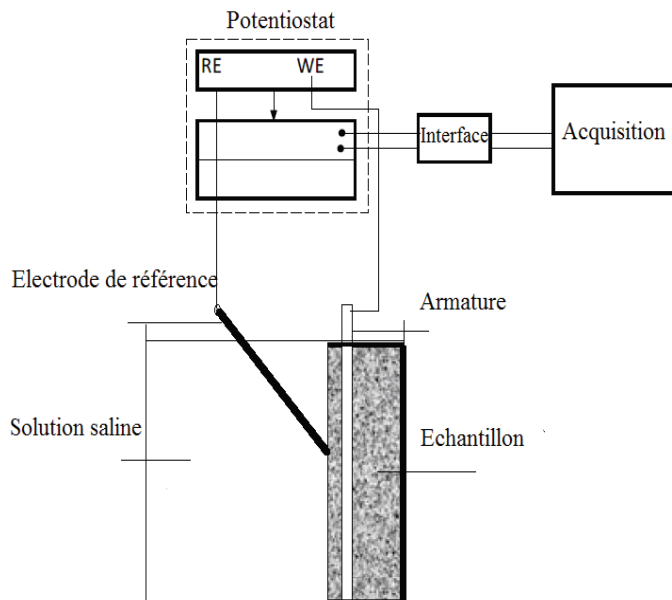
Figure 2.13 : Cellule de l'essai de corrosion accélérée

3.4.1 Mesure du potentiel de corrosion

Les mesures ont été effectuées d'après la norme américaine ASTM 876 [ASTM, 91]. Le principe de cet essai consiste à mesurer la différence de potentiel entre une électrode de référence plongée dans une solution et placée sur la surface du béton, et l'armature. L'électrode utilisée est une électrode au calomel saturée en KCl (ESC). L'armature et l'électrode ont été reliées au Potentiostat Solarton 1285. Le montage du dispositif expérimental est présenté sur la figure 2.14. Les relevés du potentiel électrochimique permettent d'estimer le niveau de corrosion d'après le tableau 2.4.

<i>Valeurs du potentiel (mV vs.SCE)</i>	<i>Niveau de corrosion</i>
< -426	<i>Corrosion sévère</i>
< -276	<i>Fort risque de corrosion</i>
-126 à -275	<i>Risque de corrosion intermédiaire</i>
> -125	<i>Faible risque de corrosion</i>

Tableau 2.4 : Probabilité de corrosion d'après les relevés de potentiel [ASTM, 91]



L'échantillon est maintenu dans la cellule de corrosion, l'électrode de référence ESC est placée à la surface du matériau immergé dans une solution saline. L'armature et l'électrode sont reliées au potentiostat pour les mesures.

Figure 2.14 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la mesure du potentiel électrochimique

3.4.2 Spectrométrie d'impédance électrochimique

Le principe de cette méthode consiste à engendrer une perturbation sinusoïdale de tension de faible amplitude ΔE à un système électrochimique dans un intervalle de fréquence très large et d'enregistrer, à chaque fréquence, la réponse de l'intensité de courant obtenue ΔI . L'impédance électrochimique Z est définie par :

$$Z = \Delta E / \Delta I \quad (2.12)$$

Avec :

$$\Delta E = |\Delta E| \sin(\omega t) \quad (2.13)$$

$$\Delta I = |\Delta I| \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.14)$$

Où:

$|\Delta E|$ et $|\Delta I|$ sont les amplitudes du courant et de la différence de potentiel, ω est la fréquence angulaire et φ le déphasage entre la sollicitation en potentiel et la réponse du système en courant.

L'impédance électrochimique est analysée sous forme d'impédance complexe et peut être décomposée en une partie réelle et une partie imaginaire :

$$Z(\omega) = \text{Re}\{Z(\omega)\} + j \text{Im}\{Z(\omega)\} \quad (2.15)$$

Où la composante réelle de l'impédance est $\text{Re}[Z] = |Z(\omega)| \cos \varphi$ et la partie imaginaire $\text{Im}[Z] = |Z(\omega)| \sin \varphi$. Le module de l'impédance est donné par la relation suivante :

$$|Z(\omega)| = \sqrt{\{[\text{Re}|Z|]^2 + [\text{Im}|Z|]^2\}} \quad (2.16)$$

Les résultats expérimentaux peuvent être exprimés grâce à deux modes de représentations graphiques:

- plan complexe de Nyquist ($\text{Re}|Z(\omega)|$, $-\text{Im}|Z(\omega)|$).
- plan de Bode ($\log |Z(\omega)|$ et φ en fonction de $\log f$), où f est la fréquence.

Les spectres d'impédance d'un système acier-béton selon le plan complexe de Nyquist sont généralement caractérisés par différentes zones distinctes selon les intervalles de fréquence (figure 2.15). Le graphe complexe prenant en compte les phénomènes de diffusion près de l'interface de l'électrode (armature) permet d'estimer différents paramètres qui sont caractéristique de la réponse en fréquence du système :

- la résistance de l'électrolyte R_e .
- la résistance de transfert de charges R_{tc} , donnée par le diamètre du cercle des hautes fréquences.
- la résistance de polarisation R_p obtenue à partir de la limite en basses fréquences.

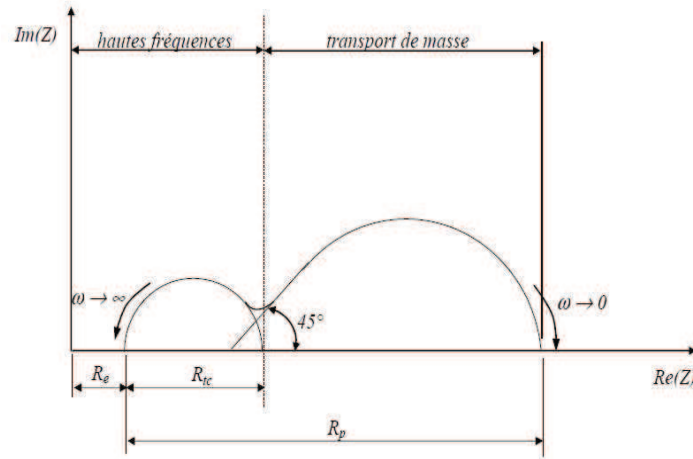
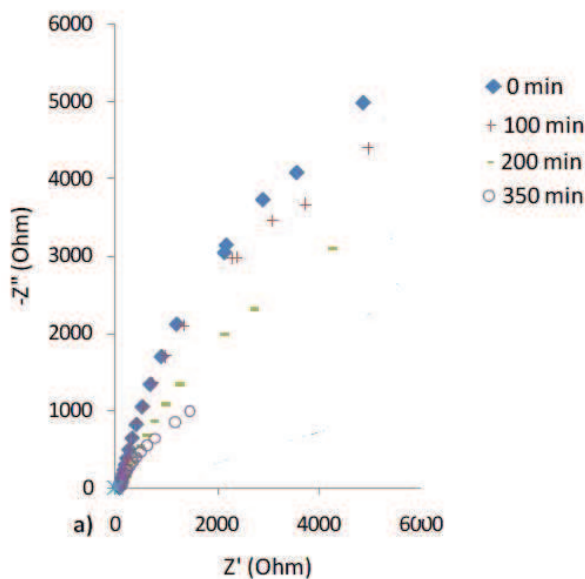


Figure 2.15: Diagramme de Nyquist type

Le cercle correspondant à la réponse en basses fréquences caractérise l'état électrochimique de la surface de l'acier. Une chute de cet arc correspond au passage d'un état passif vers un état actif de l'armature [Poupard, 04], [Tahlaiti, 10].

La plupart du temps, l'analyse des graphes d'impédance électrochimique conduit à une modélisation reposant sur des circuits électriques équivalents afin de pouvoir prédire le comportement des systèmes étudiés lorsqu'ils sont soumis à d'autres conditions expérimentales. Cependant, les électrolytes solides et liquides ne se comportent pas forcément comme des circuits électriques composés exclusivement de résistances et de capacités pures. Tracés sur des graphes complexes, les arcs d'impédance propres aux systèmes réels ne montrent souvent que la partie supérieure d'un arc de cercle [Loche, 01] (figure 2.16).



Un système acier-béton est soumis à une diffusion accélérée des chlorures. Les mesures impédanciennes sont effectuées après chaque polarisation jusqu'à la chute de l'arc (dépassivation de l'acier). Le temps d'initiation de la corrosion est estimé à 350 min dans ce cas. Les valeurs 0, 100, 200 et 350 min correspondent au temps de polarisation.

Figure 2.16 : Réponse impédancielle en basses fréquences [Tahlaiti, 10]

Les mesures d'impédances ont été effectuées au moyen d'un analyseur de réponse en fréquence de type Solarton SI 1260 couplé à un potentiostat de type Solarton SI 1287 (figure 2.17) avec un montage à deux électrodes (plaque en acier inox et armature). L'amplitude de la perturbation sinusoïdale est de 50 mV avec une gamme de fréquence allant de 1,3 MHz à 0,001 mHz.

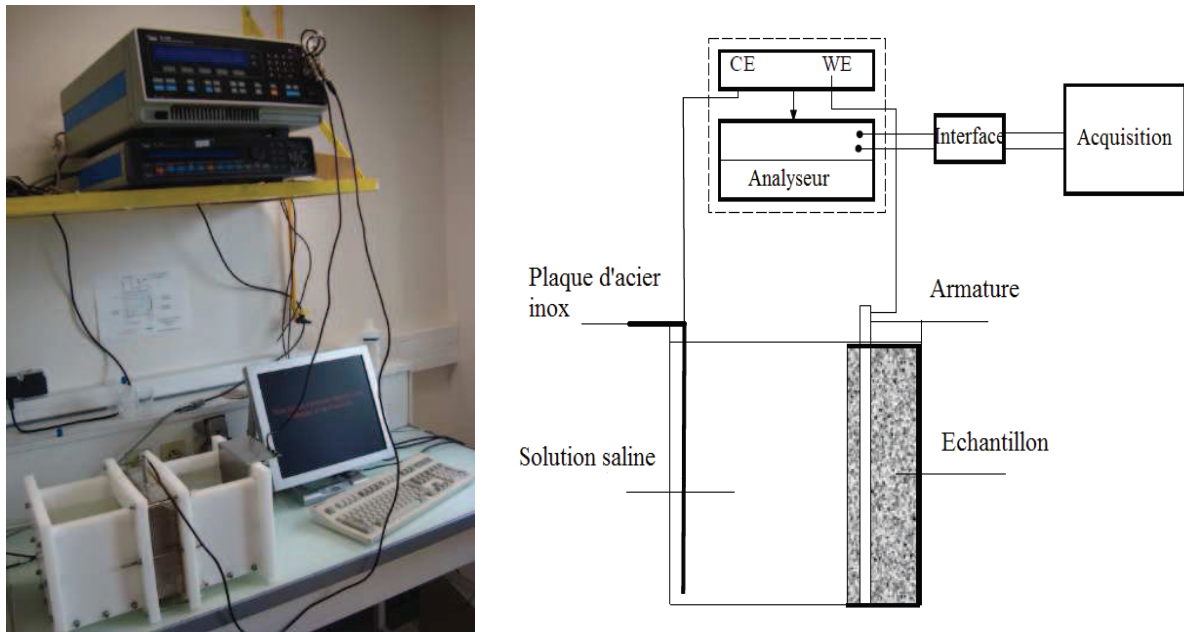


Figure 2.17 : Photographie et schéma du dispositif expérimental de la S.I.E

3.4.3 Profils en chlorures et concentrations critiques en chlorures

Après les mesures d'impédance et l'observation de la chute de l'arc en basses fréquences (dépassivation de l'armature), des profils en chlorures ont été déterminés par dosage titrimétrique après grignotage de l'échantillon sur toute la profondeur de l'enrobage. La procédure utilisée est celle préconisée par Grandubé [Arliguie, 07]. Les prélèvements de poudre ont été effectués tous les 2 mm sur une épaisseur de 18 ou 20 mm. La concentration en chlorures (g/g de poudre) a été calculée en utilisant la relation suivante :

$$C = \frac{M_{mol} \cdot C_{Ag} \cdot V_e \cdot V_{f_{i0e}}}{M_{pe} \cdot V_{prélevé}} \quad (2.17)$$

Où :

C_{Ag} : la concentration de la solution de nitrate d'argent utilisée pour le dosage (mol/l)

V_e : le volume de nitrate d'argent ajouté (ml)

$V_{\text{prélevé}}$: le volume du filtrat prélevé (ml)

M_{pe} : la masse de la poudre (g)

M_{mol} : la masse molaire des chlorures (g/mol)

4 Caractérisation préliminaire des mortiers de réparation

Les mortiers de réparation présentés dans la première partie de ce chapitre ont la particularité d'être des mortiers industriels préformulés en usine et prêts à être gâchés à l'eau. La problématique qui se pose avec de tels matériaux est que leur formulation n'est pas disponible. La détermination de leurs compositions s'avère donc être une étape nécessaire dans nos travaux de recherche pour mieux comprendre leur fonctionnement et appréhender leur comportement vis-à-vis de la durabilité.

Rappelons que les mortiers de réparation étudiés appartiennent à deux familles qui sont les mortiers mono-composant (notés PB), où le polymère est présent dans le mortier sous forme de poudre et les mortiers bi-composant (notés BC), où le polymère est sous forme d'une solution laiteuse. Il faut rappeler aussi que ces polymères peuvent améliorer certaines propriétés physiques et mécaniques des mortiers de réparation. Ceci a fait l'objet d'une étude bibliographique dans le premier chapitre. Il est donc indispensable de quantifier la quantité de ces ajouts pour mieux comprendre les modifications qu'ils apportent au sein du matériau.

L'estimation de la proportion des constituants des mortiers de réparation a été réalisée à l'aide des techniques physico-chimiques décrites dans la partie (3.2) de ce chapitre. Comme première étape de caractérisation, les essais de granulométrie par tamisage ont été effectués. Ces essais ont permis de séparer le sable, les fibres et les particules passantes à 80 μm (liant équivalent).

La deuxième étape de caractérisation était l'analyse du liant équivalent par ATG. Cette dernière a permis d'estimer les proportions de polymère et de calcaire. Ces deux proportions ont été soustraites de celle du liant équivalent pour déterminer la proportion de ciment. Enfin l'analyse infrarouge a été utilisée pour déterminer la nature des polymères et l'analyse au MEB pour l'investigation de la microstructure des mortiers de réparation. Le détail des différentes étapes de caractérisation est présenté dans la section suivante. Le récapitulatif de la composition des mortiers en proportion massique des constituants est présenté dans le tableau 2.6.

4.1 Granulométrie par tamisage

Les pourcentages en masse de sable, de liant équivalent et de fibres dans les mortiers de réparation sont présentés dans le tableau 2.5.

<i>Mortiers</i>	<i>% de Sable</i>	<i>% de Liant équivalent (passant à 80µm)</i>	<i>% de Fibres</i>	<i>Module de finesse (FM)</i>
<i>PB1</i>	<i>46,21</i>	<i>53,70</i>	<i>0,10</i>	<i>1,00</i>
<i>PB2</i>	<i>59,02</i>	<i>40,81</i>	<i>0,10</i>	<i>1,47</i>
<i>PB3</i>	<i>55,29</i>	<i>44,62</i>	<i>0,10</i>	<i>1,45</i>
<i>PB4</i>	<i>58,22</i>	<i>41,69</i>	<i>0,10</i>	<i>1,12</i>
<i>PB5</i>	<i>63,25</i>	<i>36,66</i>	<i>0,10</i>	<i>1,25</i>
<i>PB6</i>	<i>68,40</i>	<i>31,60</i>	<i>Pas de fibres</i>	<i>1,33</i>
<i>BC1</i>	<i>44,40</i>	<i>55,60</i>	<i>Pas de fibres</i>	<i>0,51</i>
<i>BC2</i>	<i>58,85</i>	<i>41,15</i>	<i>Pas de fibres</i>	<i>1,08</i>

Tableau 2.5 : Pourcentage en masse des constituants

Les valeurs du module de finesse montrent la présence d'un sable assez fin de classe granulaire 0/1. Le module de finesse varie entre 0,51 et 1,47. Le sable du mortier BC1 se caractérise par une finesse plus élevée. Le sable des mortiers PB2 et PB3 se caractérise par des grains plus gros par rapport aux autres mortiers. La quantité de fibres dans les mortiers de réparation est de 0,1% avec une absence de fibres dans les mortiers BC et PB6. La proportion du liant équivalent (fines < 80 µm) varie entre 30 et 56%. Les mortiers PB5 et PB6 ont la proportion la plus faible en liant équivalent alors que les mortiers BC1 et BC2 la plus élevée. Il est difficile de tirer des conclusions de ces proportions de liant équivalent car ce dernier est un matériau multiphasique qui contient du ciment, des polymères, des additions minérales et les fines du sable. Pour étudier la composition de ce liant équivalent, nous avons eu recours à l'analyse ATG.

Nous supposons que toute la poudre du polymère est contenue dans le liant équivalent. La méthode de détermination de la quantité de calcaire et de polymère est présentée dans la partie 4.2.

4.2 Analyses thermogravimétriques (ATG)

L'analyse thermogravimétrique est généralement utilisée dans nos domaines pour quantifier les produits d'hydratation du ciment à partir des pertes de masse due à la libération d'eau ou au dégagement du dioxyde de carbone. La figure 2.18 présente le résultat typique d'un essai ATG effectué sur une pâte de ciment (ne contenant pas de polymère).

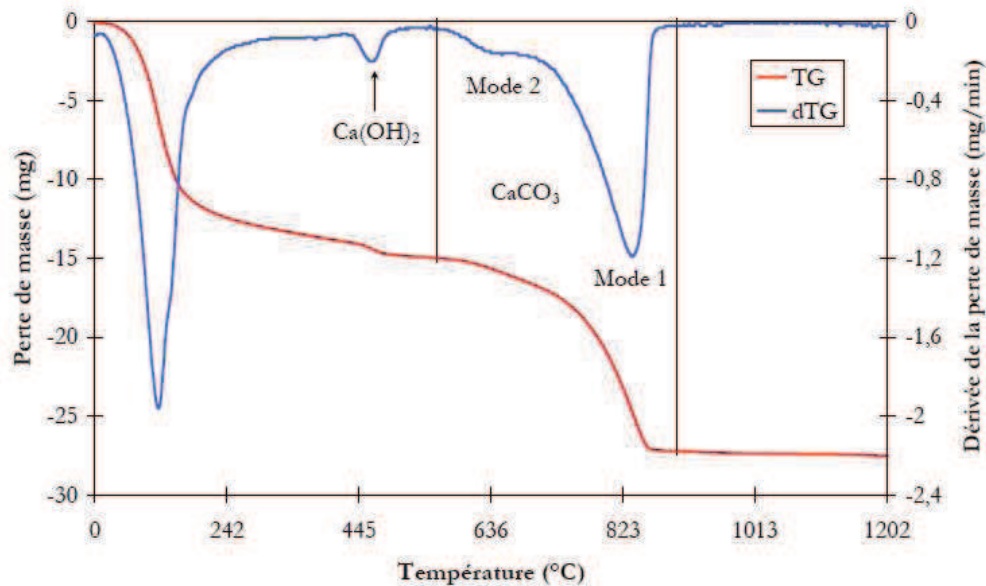
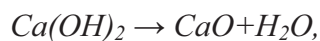


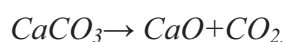
Figure 2.18 : Résultat d'une analyse ATG sur une pâte de ciment [Hamami, 09]

On peut apercevoir trois pics de décomposition :

- le premier entre 50 et 200°C, qui correspond à l'évaporation d'eau et la déshydratation des hydrates de C-S-H et de l'ettringite,
- le deuxième entre 400 et 500°C, qui correspond à la déshydroxylation de la portlandite selon la réaction :



- le troisième entre 600 et 800°C, qui correspond à la décarbonatation de la calcite selon la réaction :



Les données de la littérature concernant les analyses thermogravimétriques réalisées sur des matériaux cimentaires contenant des polymères montrent que l'ajout du polymère conduit à l'apparition de nouveaux pics de décomposition, ces derniers se situent à des températures comprises entre 200 et 450°C et correspondent à la pyrolyse du polymère.

Les études réalisées par Almeida [Almeida, 06] montrent l'apparition d'un pic à une température comprise entre 340 et 430°C pour un copolymère styrène-acrylate (SA). Ollitrault-Fichet [Ollitrault, 98] obtient une température comprise entre 280 et 330°C pour un polymère acrylique. Quant à Gomes et Betioli [Gomes, 05], [Betioli, 09], ils ont obtenu une température de décomposition comprise entre 200 et 400°C pour un polymère vinyle acétate (EVA). Il faut signaler que ces études ont été effectuées sur du ciment hydraté et que la pyrolyse du polymère donne lieu à des produits secondaires qui peuvent par la suite se décomposer à des intervalles de températures encore inconnues. On présente dans la figure 2.19, une analyse ATG réalisée sur un polymère éther de cellulose. La température de décomposition est comprise entre 220 et 250°C.

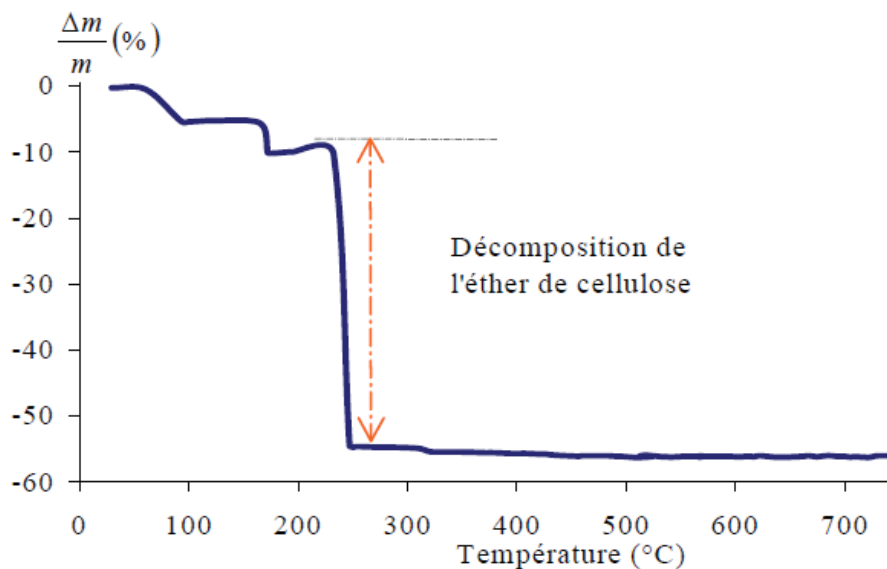
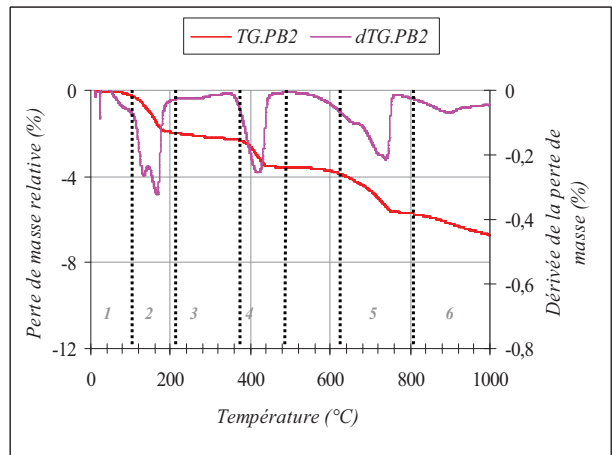
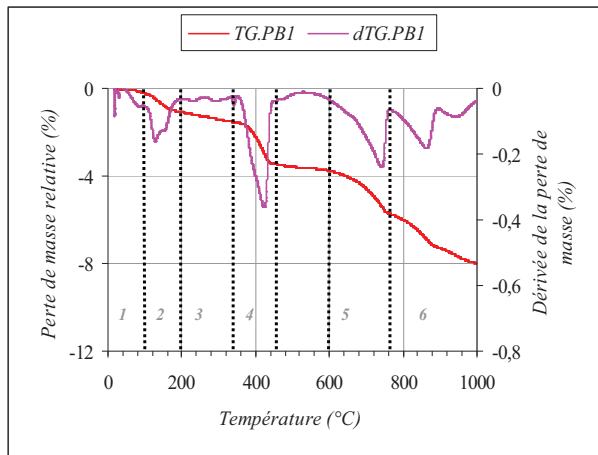
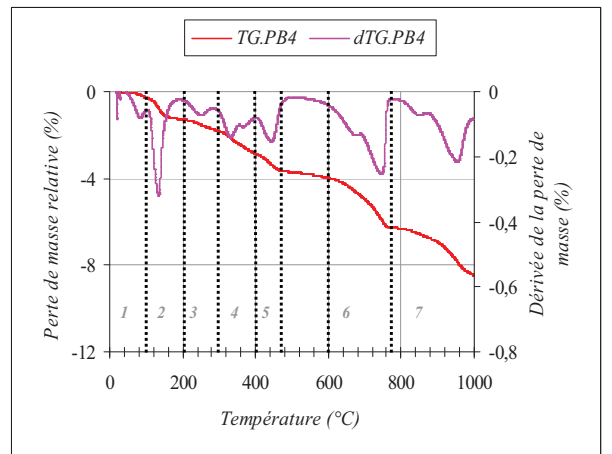
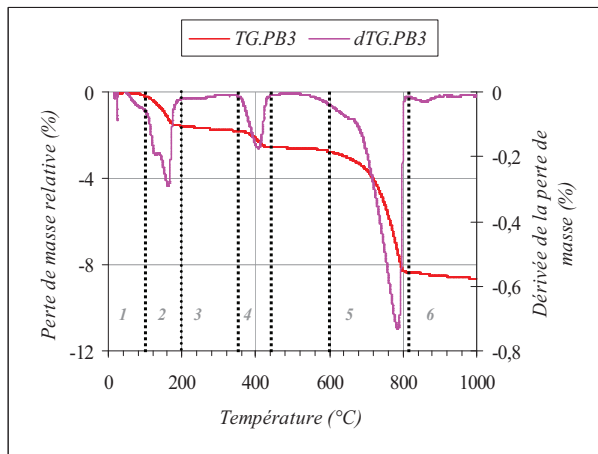


Figure 2.19 : Thermogramme d'ATG de l'éther de cellulose [Omrikine, 06]

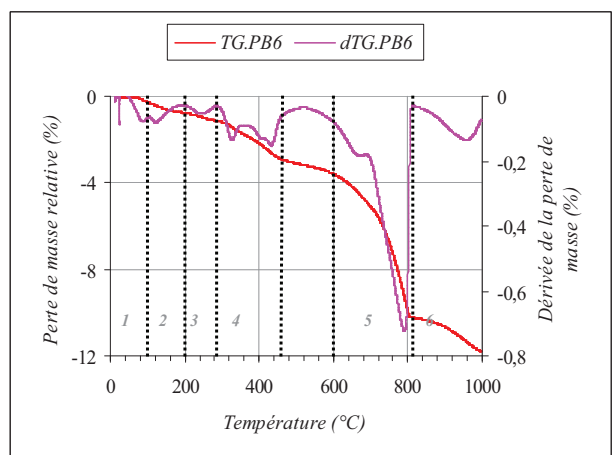
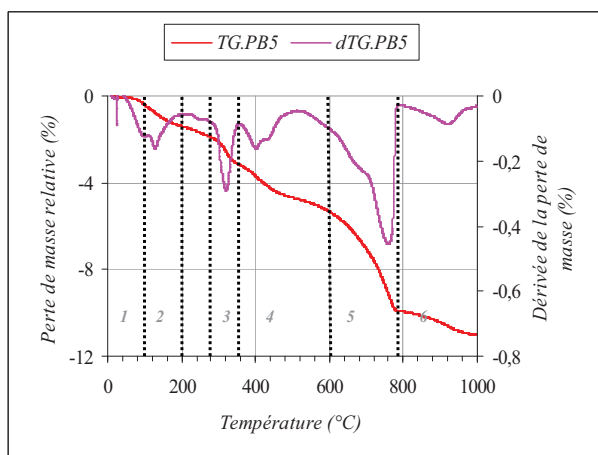
Afin de confronter ces résultats à ceux de nos mortiers, des analyses ATG ont été effectuées sur le liant équivalent des mortiers de réparation obtenu après le tamisage. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les figures 2.20 à 2.23. Les intervalles de décomposition ont été identifiés par des traits discontinus.



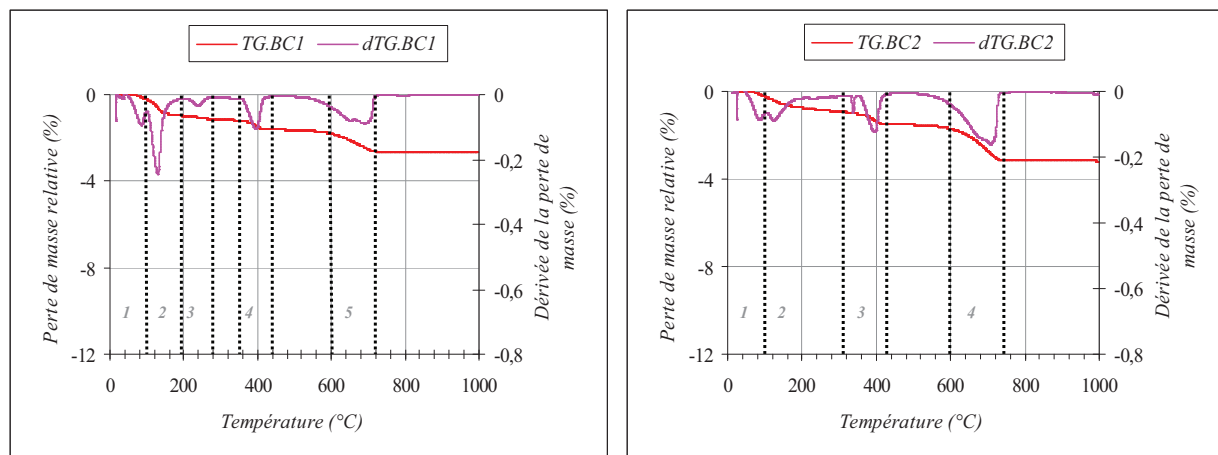
Figures 2.20 : Courbes TG-dTG pour les liants équivalents des mortiers PB1 et PB2



Figures 2.21 : Courbes TG-dTG pour les liants équivalents des mortiers PB3 et PB4



Figures 2.22 : Courbes TG-dTG pour les liants équivalents des mortiers PB5 et PB6



Figures 2.23 : Courbes TG-dTG pour les liants équivalents des mortiers BC

À travers ces courbes, on peut distinguer les pics du séchage (évaporation d'eau) entre 25 et 100°C, la décomposition du calcaire entre 600 et 800°C ainsi que d'autres pics entre 100 et 600°C et entre 800 et 1000°C. Les liants équivalents PB présentent cinq intervalles de décomposition, à savoir, [25, 100], [100, 200], [340, 450], [600, 800] et [800,1000]°C avec l'apparition de nouveaux pics pour le liant équivalent PB4 entre 200 et 300°C et entre 400 et 500°C. Quant aux liants équivalents BC, ils ont presque les mêmes intervalles avec la disparition des pics entre 800 et 1000°C.

En comparant nos résultats à ceux trouvés dans la littérature [Ollitrault, 98], [Gomes, 05], [Almeida, 06], on peut dire que les pics qui se situent entre 200 et 450°C correspondent bien à une décomposition du polymère.

Pour confirmer ces résultats et identifier les autres pics de décomposition, d'autres analyses ATG ont été effectuées cette fois sur les solutions polymériques des mortiers BC. Avant les essais, les solutions ont été séchées à 100°C pour éliminer l'eau. A la fin de l'analyse, le résidu restant dans le creuset avait une masse négligeable, ce qui signifie qu'une décomposition totale du polymère s'est produite. Sur la figure 2.24 sont présentées les courbes ATG/DTG de la solution polymérique du mortier BC1 à trois intervalles de température [25, 300], [300, 500] et [500, 1000] °C. Ces trois intervalles ont été choisis afin de mettre en évidence les pics de décompositions de la solution polymérique, et de les comparer avec ceux obtenus des analyses ATG effectuées sur les liants équivalents des mortiers de réparation.

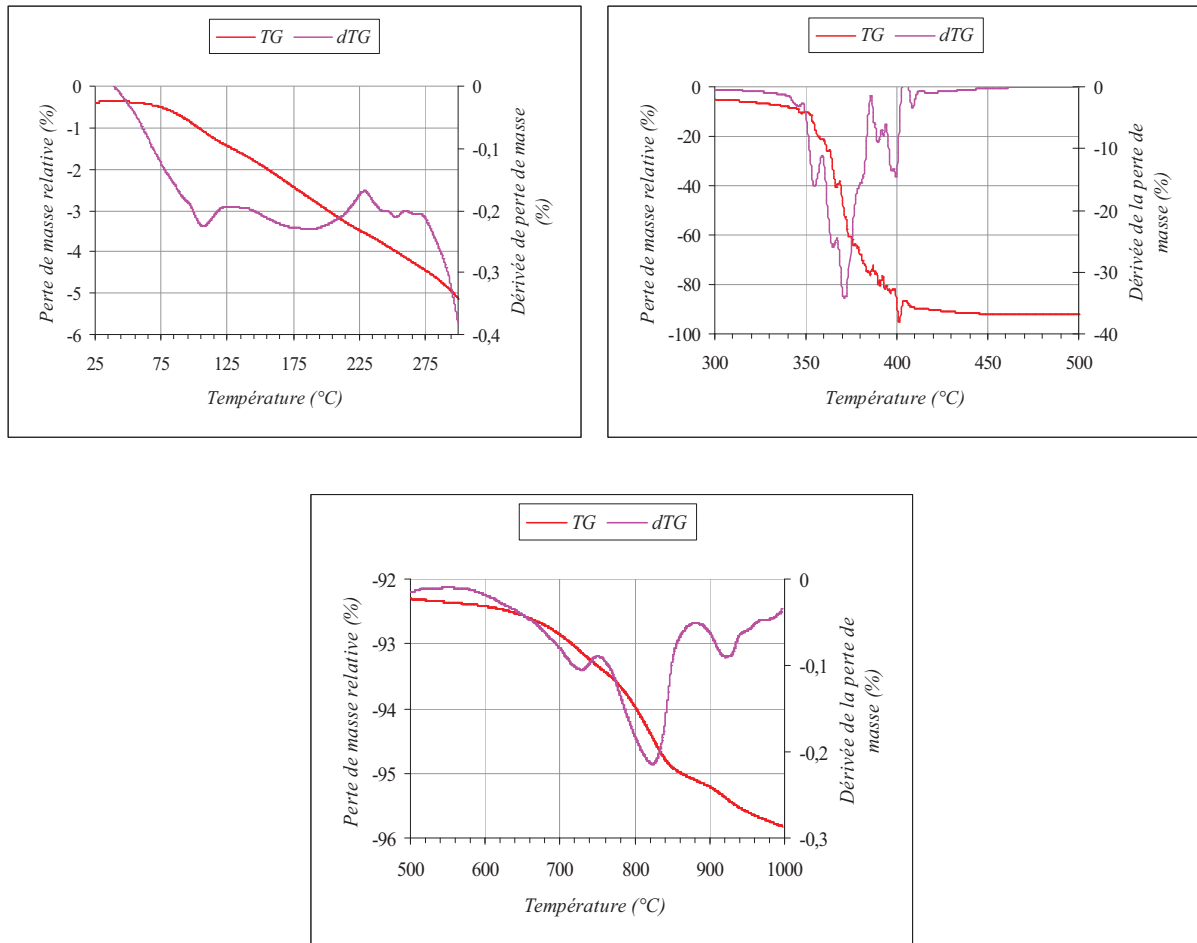


Figure 2.24: Analyse ATG/DTG de la solution polymérique du mortier BC1

On peut distinguer à travers la première figure, une perte de masse entre 25 et 100°C. Cette perte est certainement due à l'évaporation de l'eau restante dans l'échantillon (même après le séchage). On peut aussi distinguer une grande perte de masse entre 350 et 450°C qui est estimée ainsi que des pertes secondaires entre 750 et 1000°C et entre 150 et 300°C. Il faut souligner qu'à la fin de l'analyse, la masse de l'échantillon restant dans le creuset était presque négligeable par rapport à la masse initiale. Ceci indique qu'une décomposition presque totale s'est produite.

Afin de confirmer ces intervalles de décomposition du polymère, d'autres analyses ATG ont été effectuées sur la solution polymérique du mortier BC2. Les mêmes températures de décomposition ont été obtenues pour la deuxième solution. Les résultats sont présentés sur la figure 2.25.

Il faut rappeler que ces essais ont été effectués sur les solutions polymériques après un séchage à 100°C pendant 4 jours.

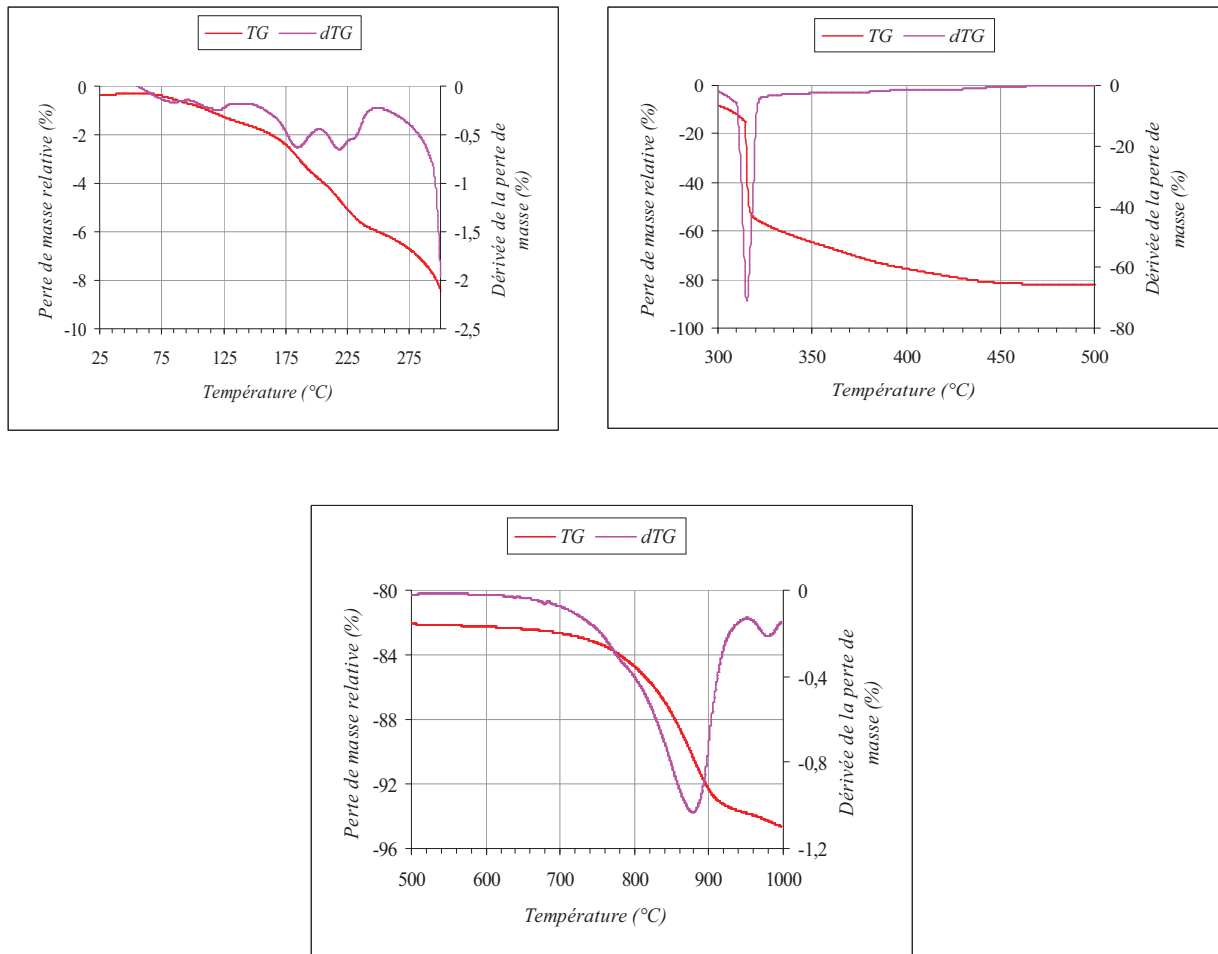


Figure 2.25 : Analyse ATG de la solution polymérique du mortier BC2

On peut observer des pics de décomposition entre 150 et 350°C et entre 750 et 1000°C. Ceci rejoint les résultats obtenus pour la solution polymérique du mortier BC1. On peut dire à travers ces résultats d'ATG que la décomposition du polymère se fait en plusieurs étapes à des températures comprises entre 150 et 450°C et entre 750 et 1000°C.

En conclusion, les proportions de polymères dans les liants équivalents des mortiers mono-composants a été calculée en faisant la somme des pertes de masses entre 150 et 450°C et entre 800 et 1000°C tout en supposant qu'une décomposition totale s'est produite. La proportion de polymères dans les mortiers bi-composants a été prise comme étant la masse du solide obtenu après séchage de la solution polymérique. Il faut signaler que les analyses ATG effectuées sur les liants équivalents des mortiers BC ont révélé la présence de polymères sous forme de poudre. Cette proportion a été rajoutée à la masse du solide de la solution polymérique.

La proportion de calcaire a été calculée à partir de la quantité de CO₂ dégagée lors de la décomposition entre 600 et 800°C.

Les proportions de polymères et de calcaire exprimées en pourcentage massique sont données dans le tableau 2.5. Ces valeurs représentent la moyenne de trois résultats pour chaque matériau.

<i>Mortiers</i>	<i>% de Polymères</i>	<i>% de calcaire</i>
<i>PB1</i>	$2,80 \pm 0,51$	$2,62 \pm 0,15$
<i>PB2</i>	$1,80 \pm 0,43$	$1,94 \pm 0,20$
<i>PB3</i>	$1,38 \pm 0,33$	$5,81 \pm 0,41$
<i>PB4</i>	$2,41 \pm 0,28$	$2,41 \pm 0,38$
<i>PB5</i>	$2,48 \pm 0,12$	$4,39 \pm 0,23$
<i>PB6</i>	$1,69 \pm 0,18$	$4,96 \pm 0,14$
<i>BC1</i>	$11,50 \pm 0,65$	$1,29 \pm 0,13$
<i>BC2</i>	$8,36 \pm 0,19$	$1,49 \pm 0,10$
<i>BC1*</i>	$0,75 \pm 0,08$	$1,29 \pm 0,20$
<i>BC2*</i>	$0,54 \pm 0,07$	$1,49 \pm 0,20$

Tableau 2.5 : Pourcentage en masse des polymères et du calcaire

Au regard de ces résultats, on peut conclure que le pourcentage massique des polymères dans les mortiers de réparation est compris entre 1,5 et 12%. Les mortiers BC se caractérisent par un taux élevé de polymères, ce dernier est 4 à 5 fois plus grand que celui des mortiers PB. Le mortier BC1 présente le taux le plus élevé contrairement au mortier PB3 qui présente le taux le plus faible. Les mortiers PB présentent des taux de polymères assez proches qui ne dépassent pas 3%. Le taux de calcaire dans les mortiers de réparation est compris entre 1 et 6 %. Le mortier PB3 se distingue par le taux le plus élevé, le mortier BC1 quant à lui présente le taux le plus faible. Le tableau 2.6 résume les formules des mortiers de réparation.

<i>Mortiers</i>	<i>E/C</i>	<i>S/C</i>	<i>P/C</i>	<i>Cc/C</i>
<i>PB1</i>	0,48	0,96	0,06	0,05
<i>PB2</i>	0,43	1,60	0,05	0,05
<i>PB3</i>	0,35	1,48	0,04	0,16
<i>PB4</i>	0,43	1,58	0,07	0,07
<i>PB5</i>	0,50	2,13	0,08	0,15
<i>PB6</i>	0,51	2,74	0,07	0,20
<i>BC1</i>	0,19	0,80	0,21	0,02
<i>BC2</i>	0,21	1,50	0,21	0,04
<i>BC1*</i>	0,42	0,80	0,01	0,02
<i>BC2*</i>	0,43	1,50	0,01	0,04

E / C : Eau/ ciment, P/C : Polymère/ ciment, S/C : Sable sur ciment : Cc/C : Calcaire/ciment

Tableau 2.6: Proportions massiques des constituants

Le rapport E/C dans les mortiers de réparation est compris entre 0,2 et 0,51. Les mortiers BC se caractérisent par des rapports E/C très faibles, ceci est dû à leur taux élevé de polymère qui joue le rôle d'un superplastifiant. Quant aux mortiers PB1, PB5 et PB6, ils ont les rapports E/C les plus élevés. Le mortier autoplaçant PB3 présente le plus faible rapport E/C des mortiers PB, ceci est dû à l'ajout du superplastifiant. Les mortiers PB2 et PB3 ont le même rapport. Le remplacement de la solution polymérique par de l'eau conduit à un rapport E/C semblable à celui des mortiers PB2 et PB4.

Concernant les rapports P/C, ils sont compris entre 4 et 21%. Les mortiers BC qui se caractérisent par les plus faibles rapports E/C, présentent les rapports P/C les plus élevés. Les mortiers PB ont des rapports compris entre 4 et 8%.

Les rapports S/C sont compris entre 0,8 et 2,8 avec des valeurs plus élevées pour les mortiers PB5 et PB6 et les valeurs les plus faibles pour les mortiers BC1 et PB1. Quant aux rapports Cc/C, ils sont compris entre 2 et 20% avec les valeurs les plus élevées obtenues pour les mortiers PB3, PB5 et PB6.

4.3 Analyses par spectroscopie infrarouge

L'identification d'un échantillon à partir de son spectre infrarouge consiste à comparer son propre spectre à ceux contenus dans une base de données préalablement identifiée.

La base de données spectrale peut comporter la position ainsi que l'intensité des pics principaux. L'identification des spectres obtenus après analyses a été effectuée avec le logiciel OMNIC (base de données).

Les spectres infrarouges des deux solutions polymériques sont présentés sur les figures 2.26 et 2.27.

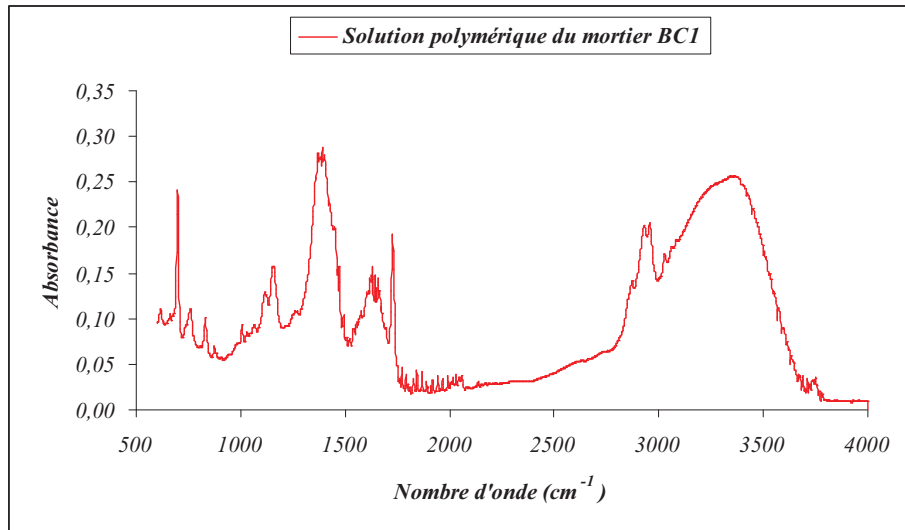


Figure 2.26 : Spectre infrarouge de la solution polymérique du mortier BC1

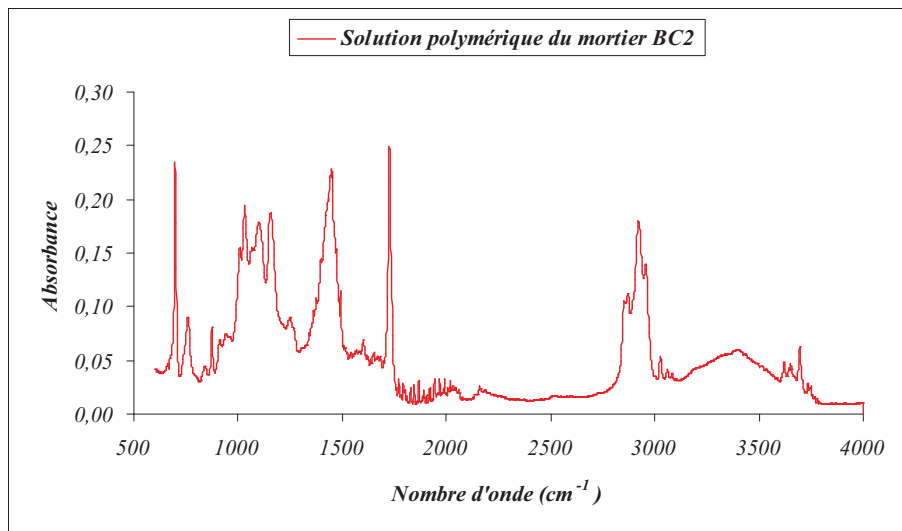


Figure 2.27 : Spectre infrarouge de la solution polymérique du mortier BC2

On constate que les deux solutions polymériques ont presque les mêmes spectres avec une différence dans l'intensité des pics. Ceci indique que les deux solutions appartiennent à la même famille de polymères.

La comparaison avec la base de données montre que le spectre le plus proche est celui de l'acrylamide styrène-acrylate d'éthyle. Sa composition chimique est donnée dans la figure 2.28.

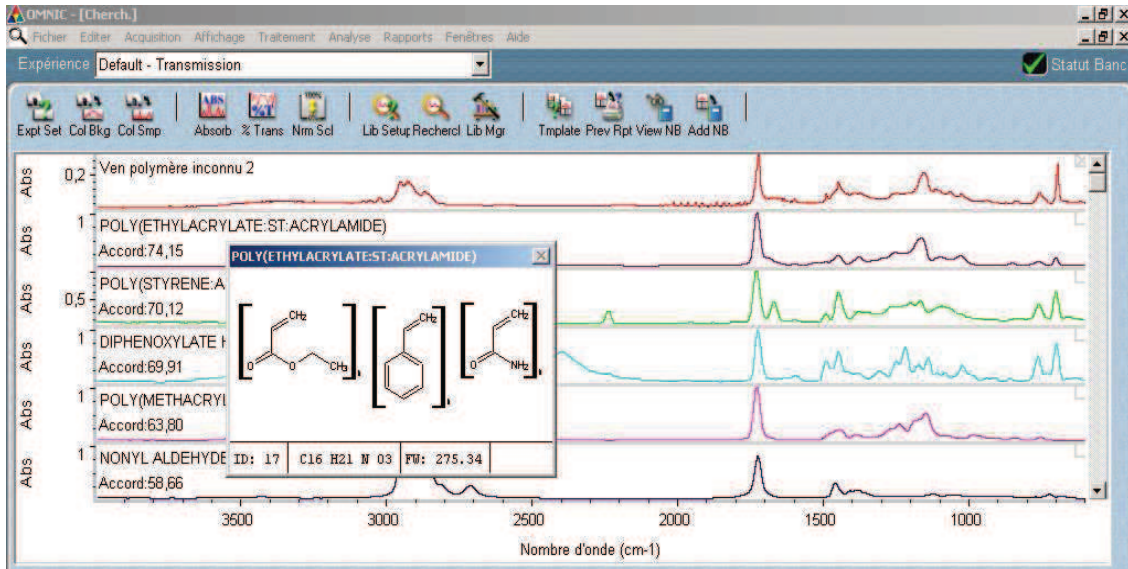


Figure 2.28 : Analyse qualitative avec le logiciel OMNIC

L'analyse infrarouge des liants équivalents des mortiers mono-composant n'a pas permis de retrouver la nature des polymères sous forme de poudre. Ceci est dû à la présence de groupements fonctionnels dans le ciment qui ne permettent pas de distinguer ceux du polymère. On présente dans la figure 2.29 deux exemples de spectres infrarouges obtenus sur les liants équivalents des mortiers PB1 et PB4.

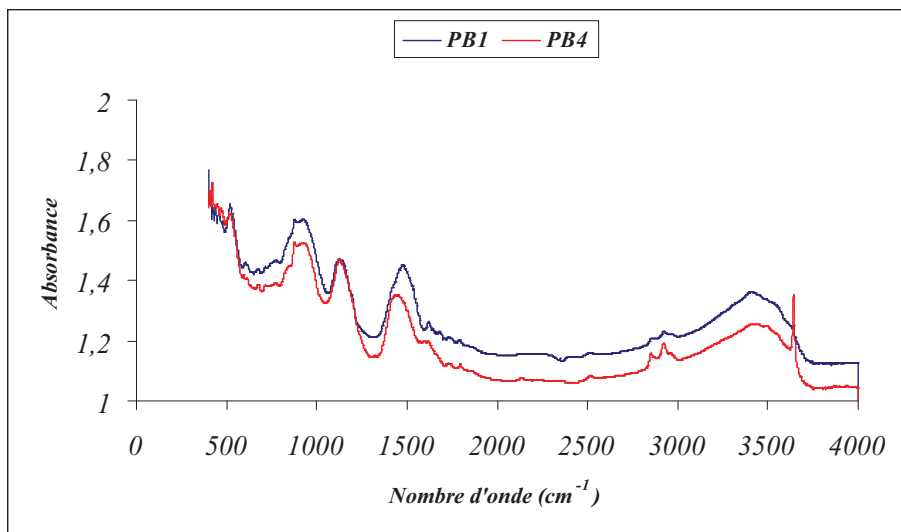


Figure 2.29 : Spectres infrarouges des liants équivalents PB1 et PB4

Les spectres obtenus ont été comparés à celui obtenu par Silva [Silva, 02]. Ce dernier a effectué des analyses infrarouges sur du ciment portland et sur des polymères. La figure 2.30 présente le spectre infrarouge du ciment portland ainsi que les groupes fonctionnels associés.

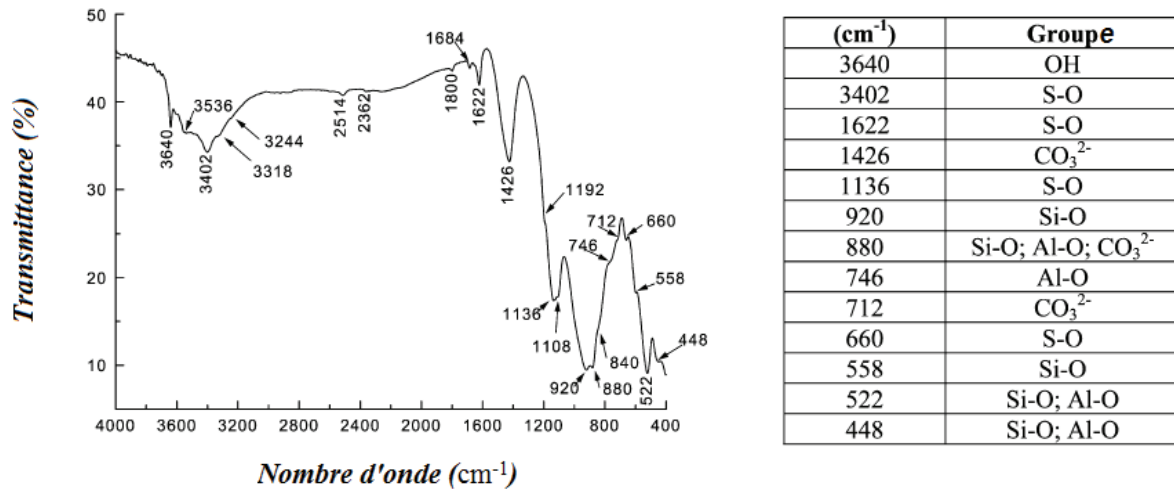


Figure 2.30 : Spectre infrarouge du ciment portland [Silva, 02]

On remarque que ce spectre a la même allure que ceux obtenus sur les liants équivalents PB1 et PB4 avec la présence des mêmes groupements. On peut dire alors que l'analyse infrarouge ne permet pas d'identifier la nature d'un polymère sous forme de poudre mélangé au ciment.

4.4 Observations au MEB

Dans cette partie, une description générale de la microstructure des mortiers de réparation est présentée par des images au MEB. Une description aussi des polymères sous forme de poudre a été effectuée ainsi qu'une identification des additions minérales présentes dans la poudre de liant. Pour commencer, un ensemble d'observations est présenté sur les figures 2.31 à 2.34 sur la distribution des fibres dans le matériau durci. Les images (a) sont celles prises en mode électron rétrodiffusé (BSE) et les images (b) sont celles prises en mode électron secondaire (SE).

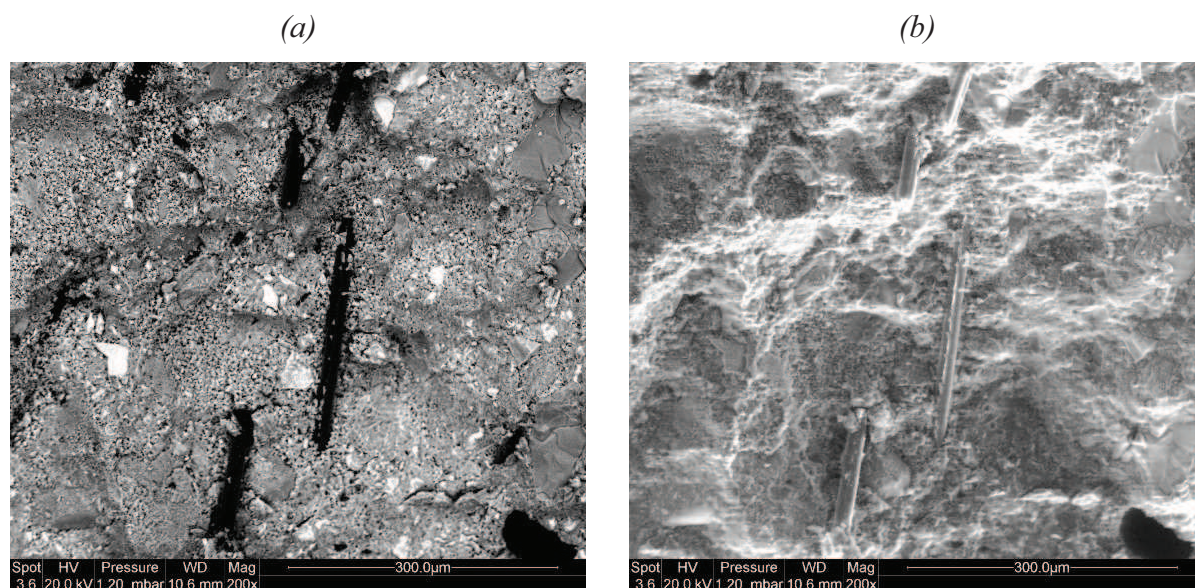


Figure 2.31 : Exemple de distribution de fibres dans le mortier PB4 (images SE et BSE),
grossissement 200×

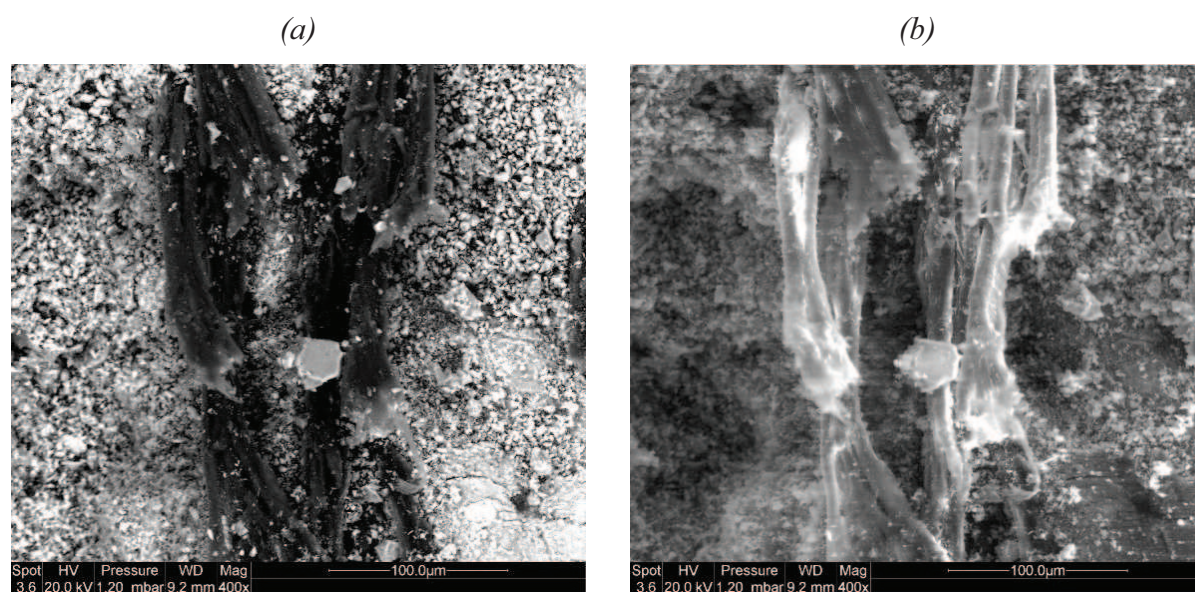


Figure 2.32 : Exemple de distribution de fibres dans le mortier PB2 (images SE et BSE,
grossissement 400×

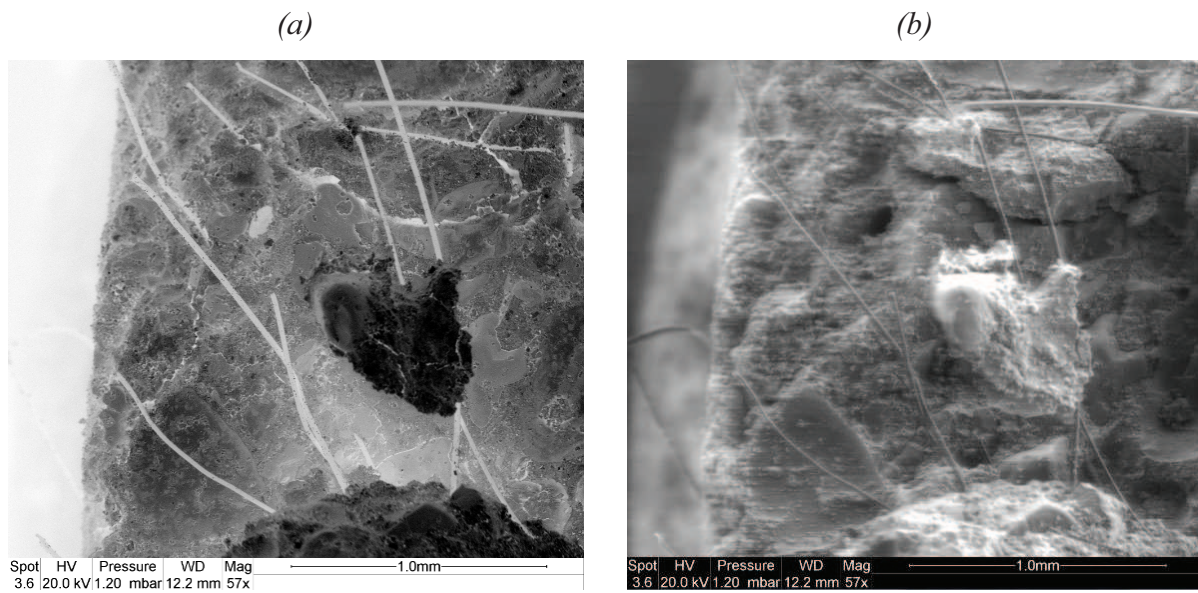


Figure 2.33 : Exemple de distribution de fibres dans le mortier PB5 (images SE et BSE), grossissement 57×

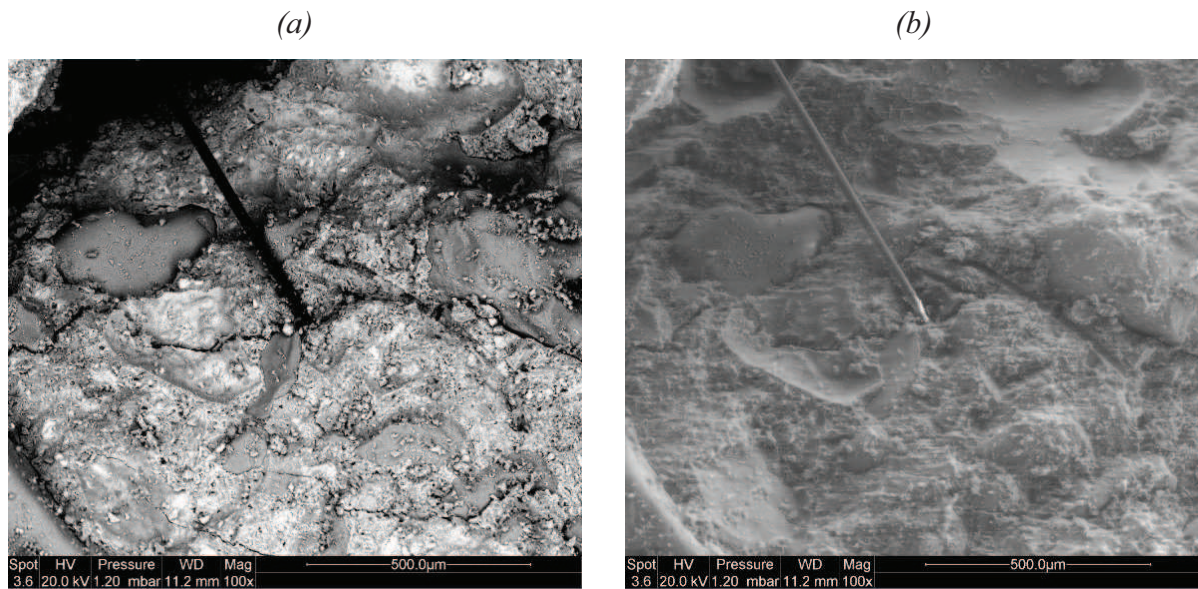


Figure 2.34 : Autre exemple de distribution de fibres dans le mortier PB5 (images SE et BSE), grossissement 100×

On peut observer que les fibres synthétiques sont des fibres droites et qui peuvent être courtes ou longues. Elles sont réparties d'une manière aléatoire horizontalement ou verticalement dans la matrice cimentaire. Elles peuvent se présenter sous la forme de groupements de fibres. L'introduction des fibres dispersées dans le mortier de réparation a pour objectif de contrôler la fissuration du matériau.

Leur rôle est de reprendre les efforts de traction dus au phénomène de retrait dans la matrice cimentaire afin de retarder l'initiation puis la propagation des fissures. [Sivakumar, 07], [Banthia, 06], [Sanjuh, 97].

La description générale de la microstructure des mortiers PB et BC est présentée dans les figures 2.35 à 2.38. Ces images ont été obtenues sur des échantillons polis. Les images (a) sont celles prises en mode électron rétrodiffusé (BSE) et les images (b) sont celles prises en mode électron secondaire (SE)

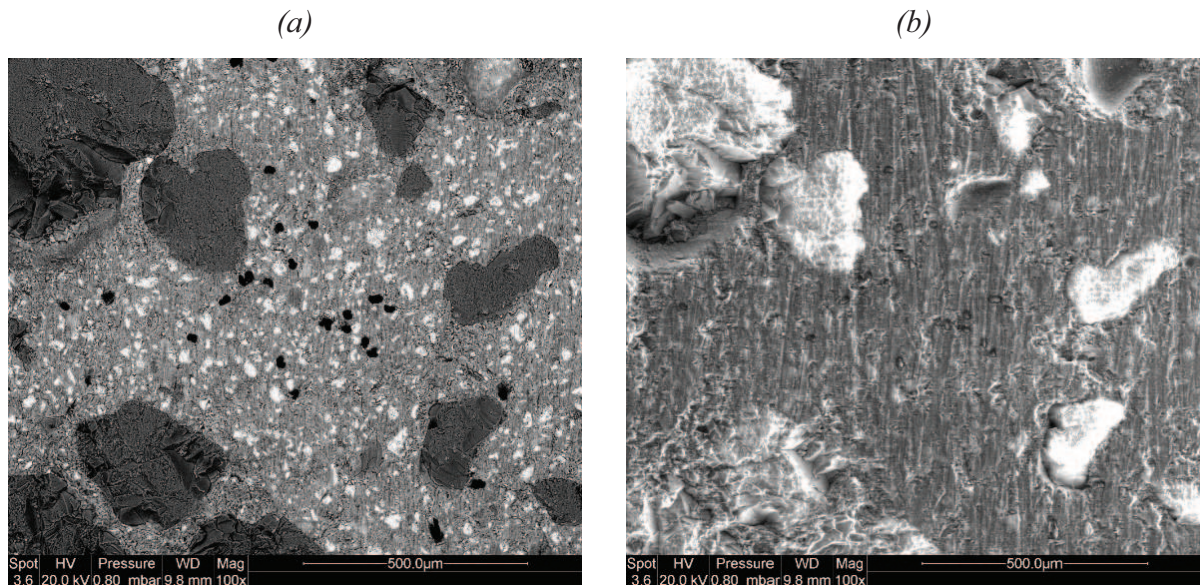


Figure 2.35 : Images SE et BSE de la microstructure du mortier PB3,
Grossissement 100×

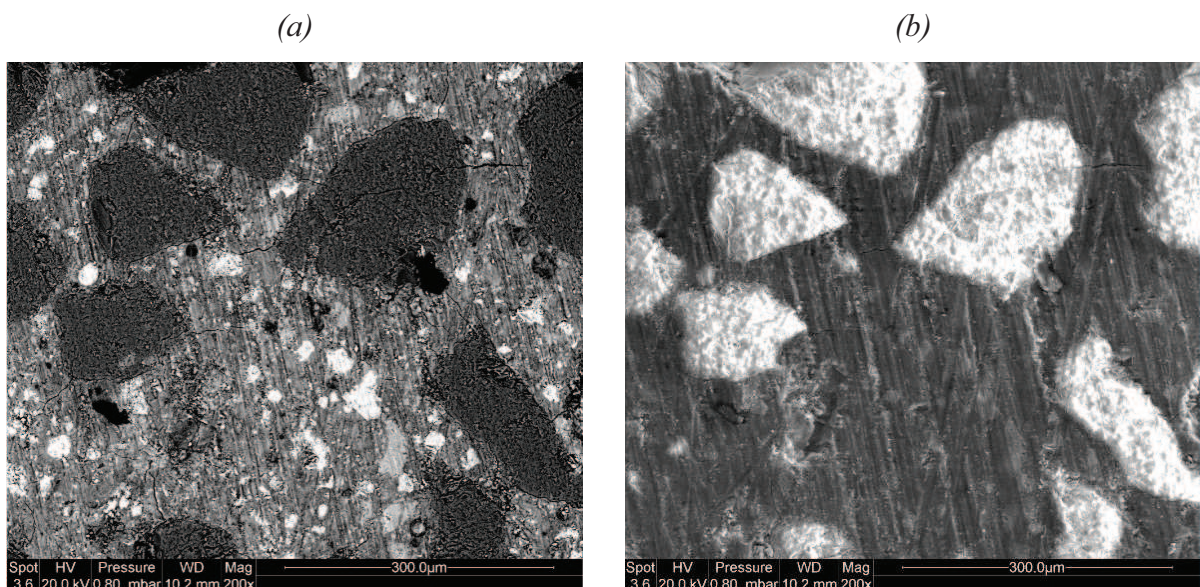


Figure 2.36 : Images SE et BSE de la microstructure du mortier PB4,
Grossissement 200×

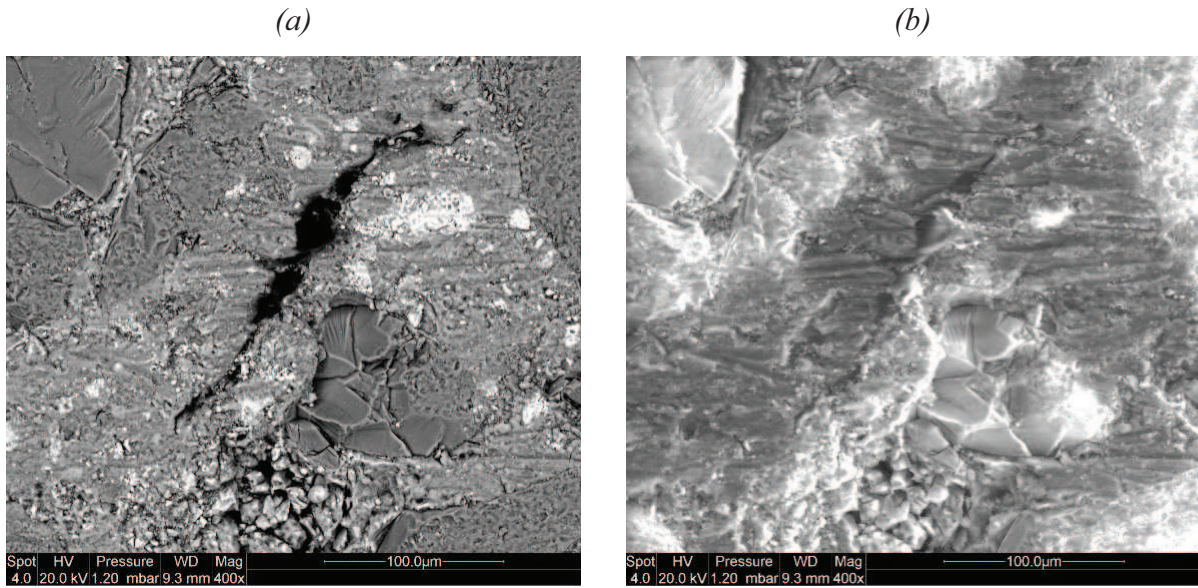


Figure 2.37 : Images SE et BSE de la microstructure du mortier PB6,
grossissement 400×

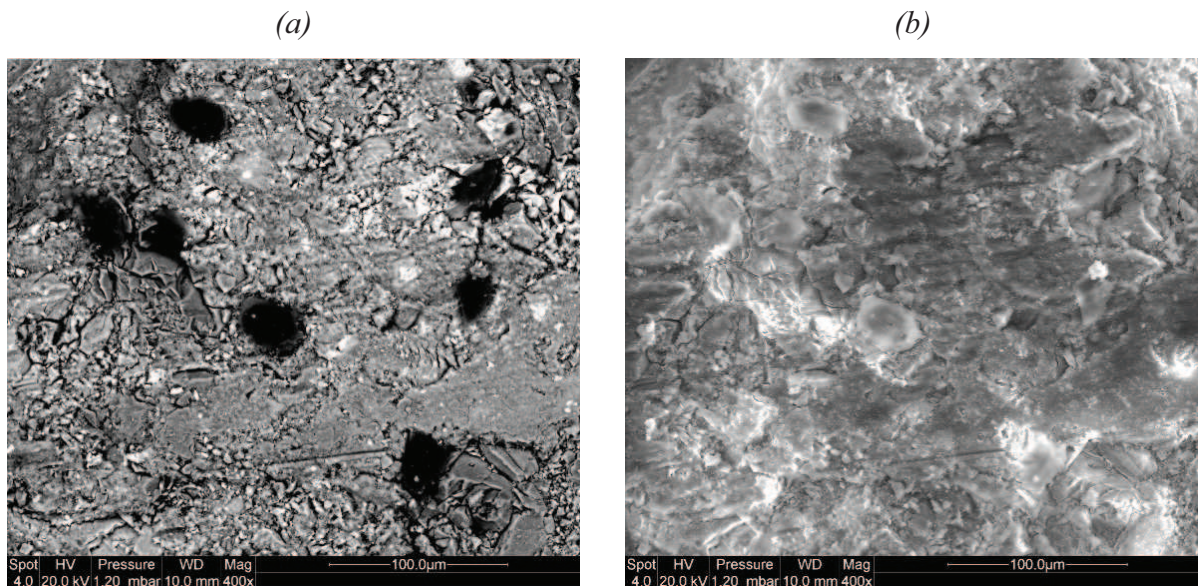


Figure 2.38 : Images SE et BSE de la microstructure du mortier BC1,
Grossissement 400×

On peut observer sur les images en mode d'électrons rétrodiffusés la présence de parties de ciment non hydraté qui apparaissent en blanc, les hydrates en gris moyen, les granulats en gris sombre et les polymères en noir. Les polymères sont sous forme de particules rondes qui se dispersent dans toute la matrice cimentaire. Pour approfondir nos observations sur la structure des hydrates formés, des analyses au MEB ont été effectuées sur des échantillons fracturés. La figure 2.39 et 2.40 présente des exemples d'images pour les mortiers BC1 et BC1*.

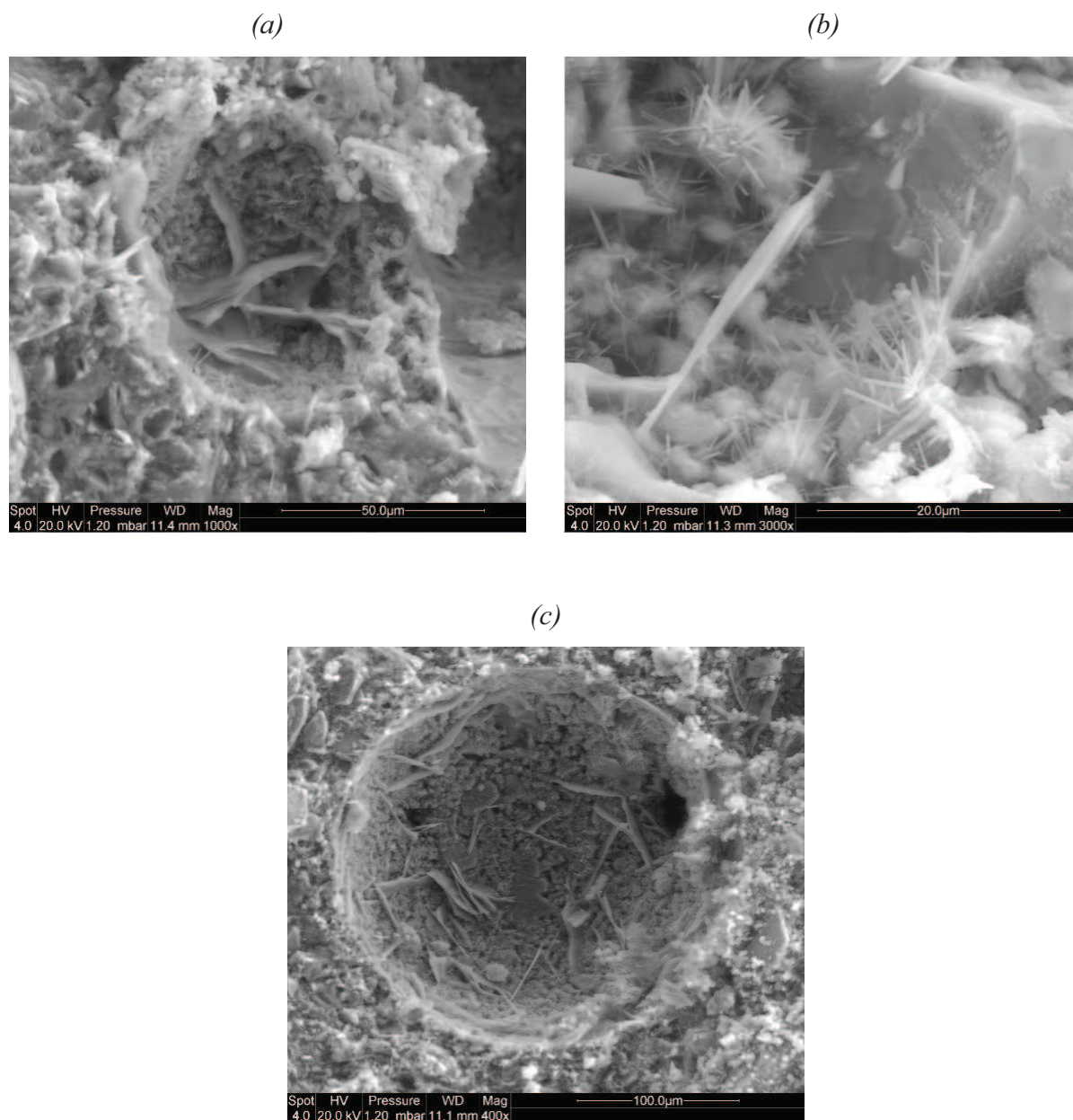


Figure 2.39 : Exemples de structures d'hydrates dans le mortier BCI*

Image (a) : Formation de portlandite - Grossissement : 1000×

Image (b) : Formation de portlandite et d'ettringite - Grossissement : 3000×

Image (c) : Formation de portlandite - Grossissement : 400×

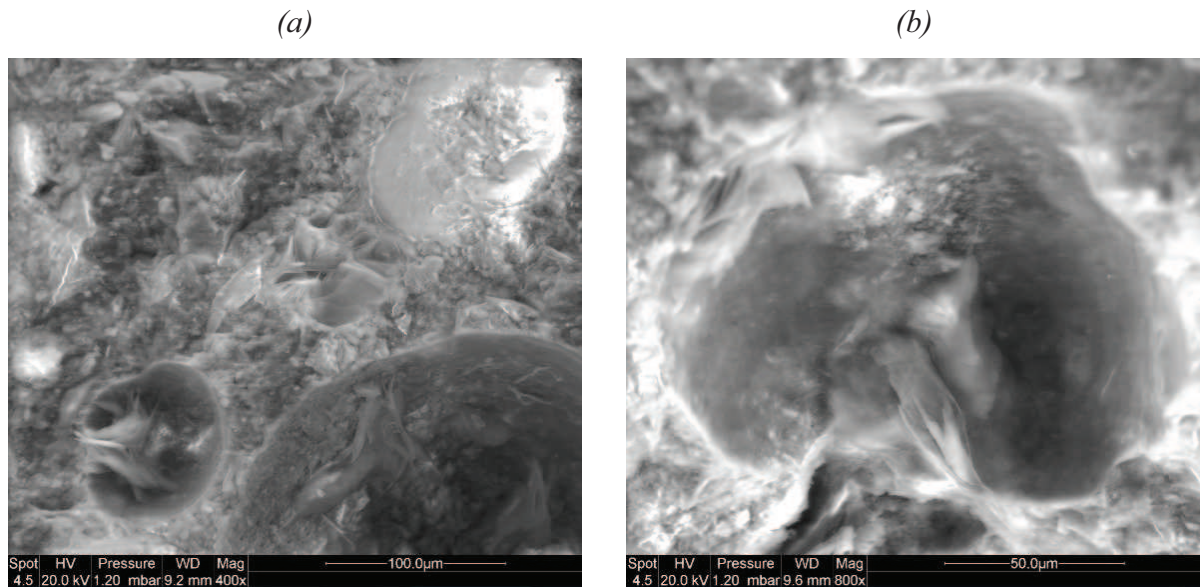


Figure 2.40 : Exemples de structures d'hydrates dans le mortier BC1

Image (a) : grossissement 400×

Image (b) : grossissement 800×

On observe une structure d'hydrates plus dense pour les mortiers BC avec une couche de recouvrement qui pourrait être le polymère. L'analyse chimique des hydrates a montré un taux de carbone plus élevé pour les hydrates des mortiers BC, ce qui laisse penser qu'une liaison chimique s'est produite entre le polymère et l'hydrate changeant ainsi la morphologie de ce dernier. D'autres analyses MEB ont été effectuées sur les poudres des liants équivalents des mortiers mono-composant. Les figures 2.41 à 2.43 présentent des exemples d'observations MEB sur les particules de polymères sous forme de poudre.

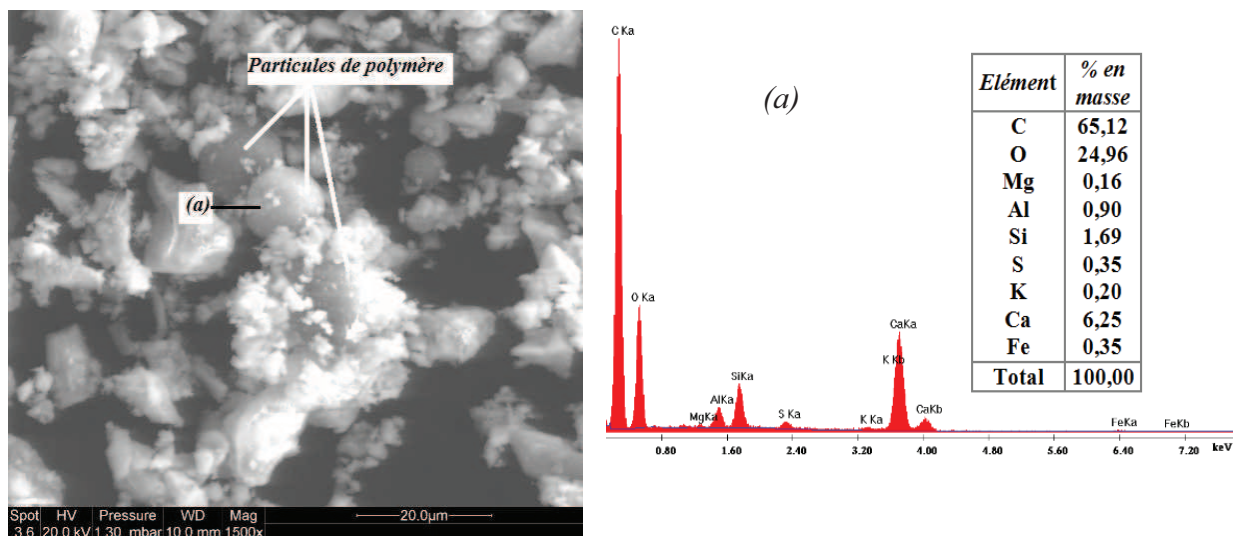


Figure 2.41 : Image MEB et analyse chimique du polymère dans le liant PB4, grossissement 1500×

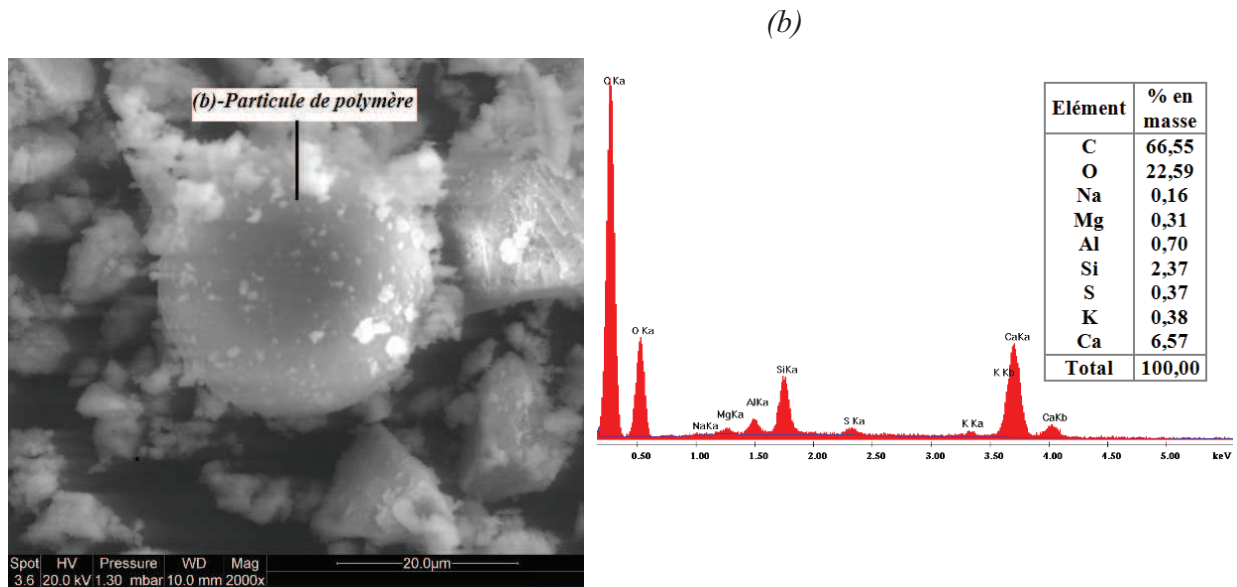


Figure 2.42 : Image MEB et analyse chimique du polymère dans le liant PB, grossissement 2000×

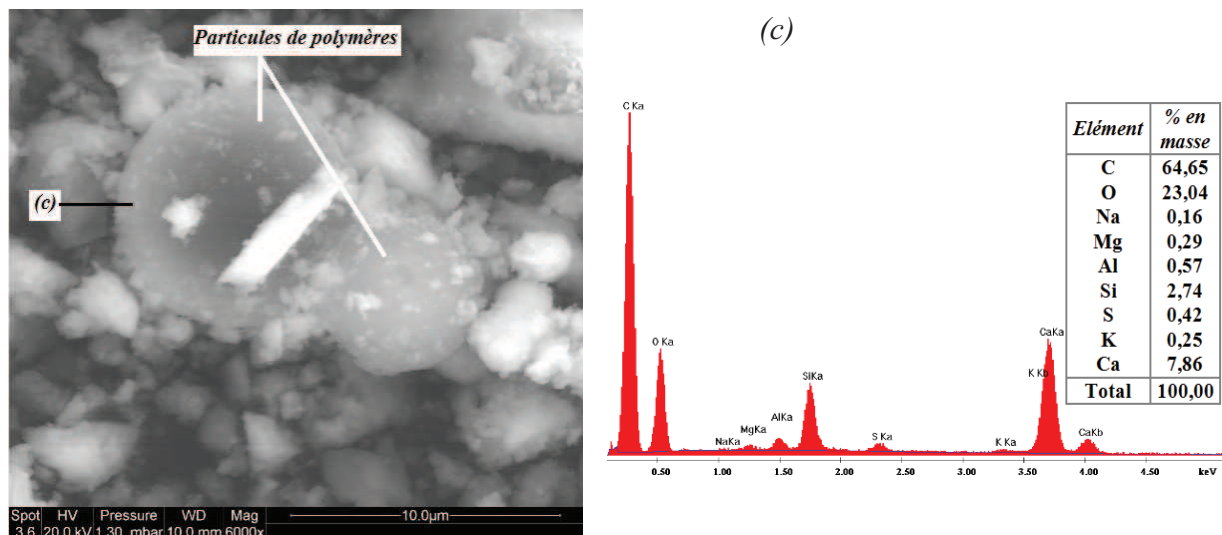


Figure 2.43 : Image MEB et analyse chimique du polymère dans le liant PB6, grossissement 6000×

Les polymères se présentent sous forme de particules rondes de différentes tailles, entre 5 et 20 μm . Ces particules peuvent être isolées ou former un amas de particules. L'analyse chimique (EDS) a révélé la présence d'un taux de carbone supérieur à 60%, ceci confirme la présence du polymère.

L'analyse au MEB des liants PB1 et BC2 a révélé la présence d'autres particules rondes mais de composition chimique différente de celle des polymères. Les images de ces particules sont présentées dans les figure 2.44 et 2.45.

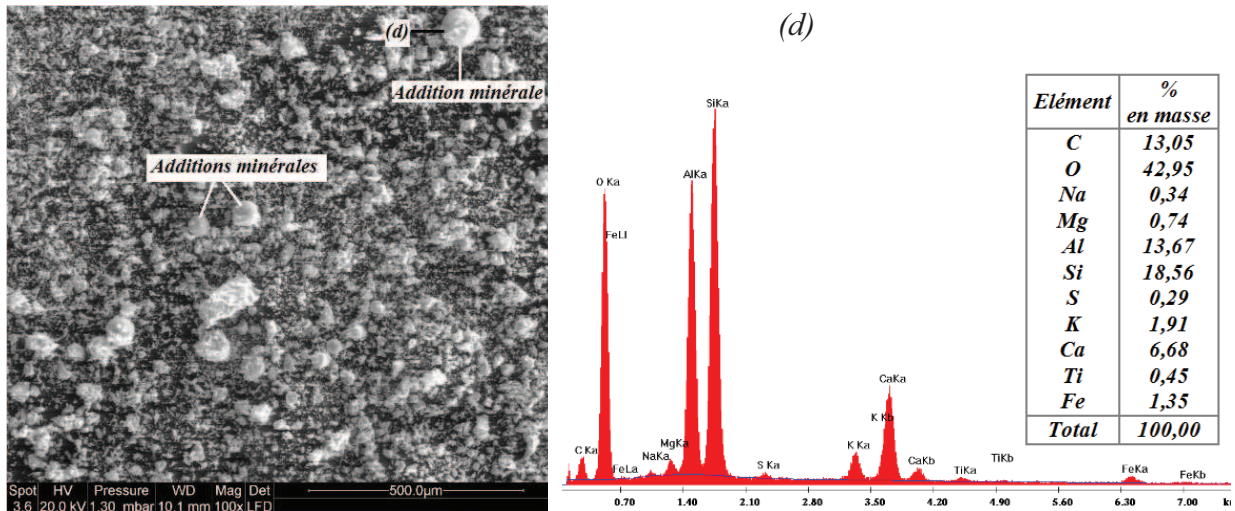


Figure 2.44 : Image MEB et analyse chimique des additions minérales dans le liant PB1, grossissement 100×

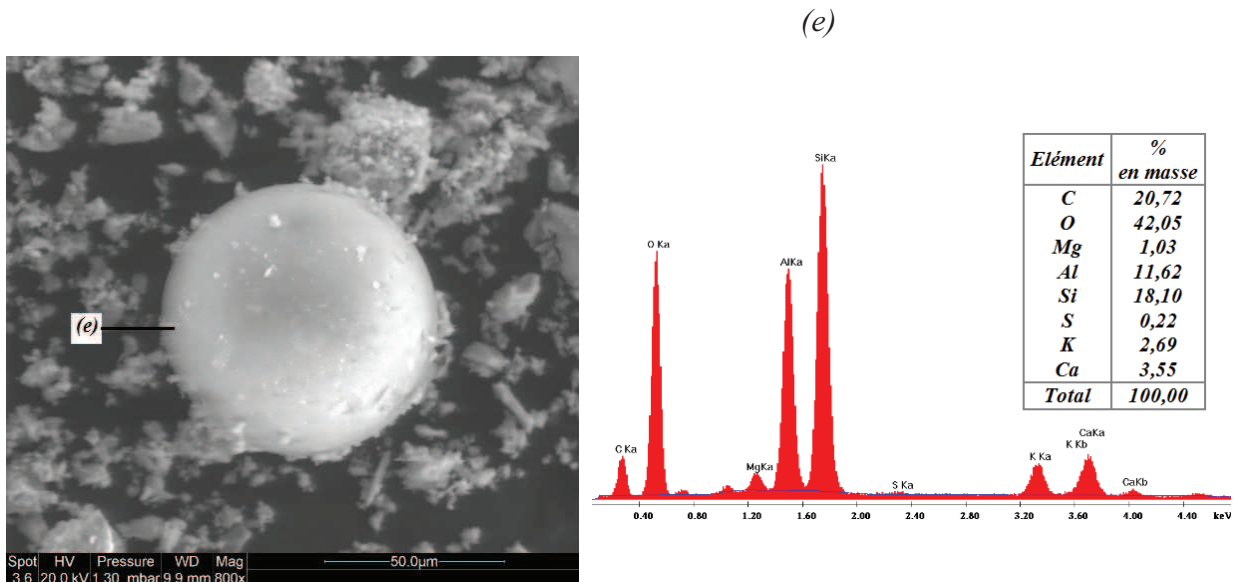


Figure 2.45 : Image MEB et analyse EDS de l'addition minérale dans le liant BC2, grossissement 800×

L'analyse chimique de ces particules révèle la présence de silicium et d'oxygène en grande partie ainsi que la présence d'autres éléments (Al, Mg, Na, K...). Ceci semble révéler la présence de la fumée de silice.

5 Résistances mécaniques

5.1 Résistance à la flexion

On présente sur la figure 2.46 les résistances à la flexion à 28 jours des mortiers étudiés. L'évolution de la résistance en fonction de l'âge est donnée dans l'annexe 4.

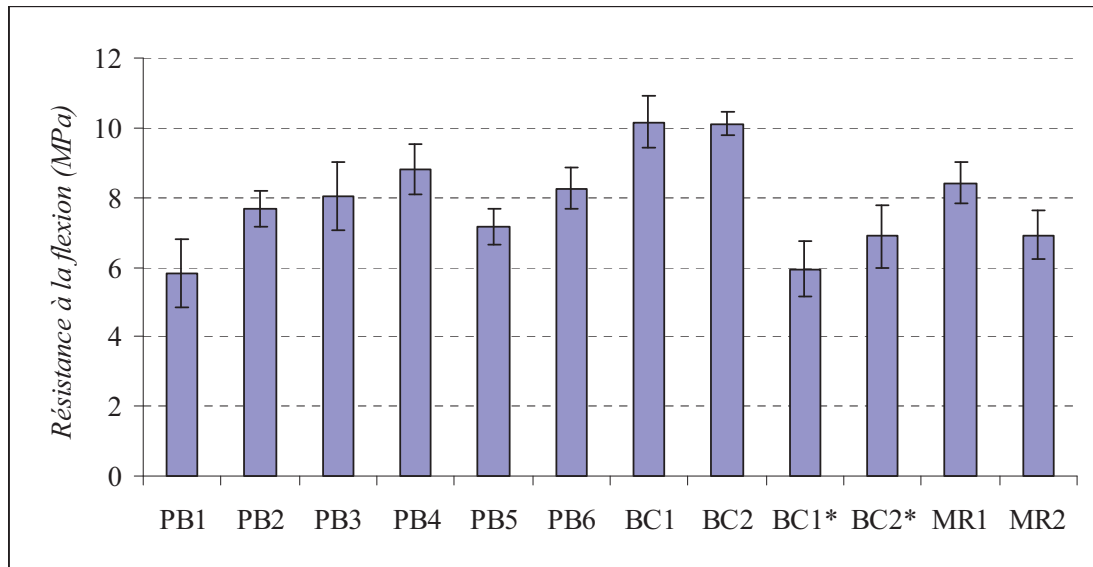


Figure 2.46 : Résistances à la flexion à 28 jours des mortiers étudiés

On constate à travers la figure 2.46 que les résistances à la flexion des mortiers de réparation sont comprises entre 6 et 10 MPa. Les mortiers BC se caractérisent par les résistances les plus élevées et le mortier PB1 présente la résistance la plus faible. Les mortiers témoins présentent des résistances assez proches de celles des mortiers PB. Enfin, le remplacement de la solution polymérique par de l'eau dans les mortiers BC conduit à une diminution de la résistance à la flexion de 25 à 40%.

5.2 Résistance à la compression

On présente sur la figure 2.47 les résistances à la compression à 28 jours des mortiers étudiés. L'évolution de la résistance en fonction de l'âge est donnée dans l'annexe 5.

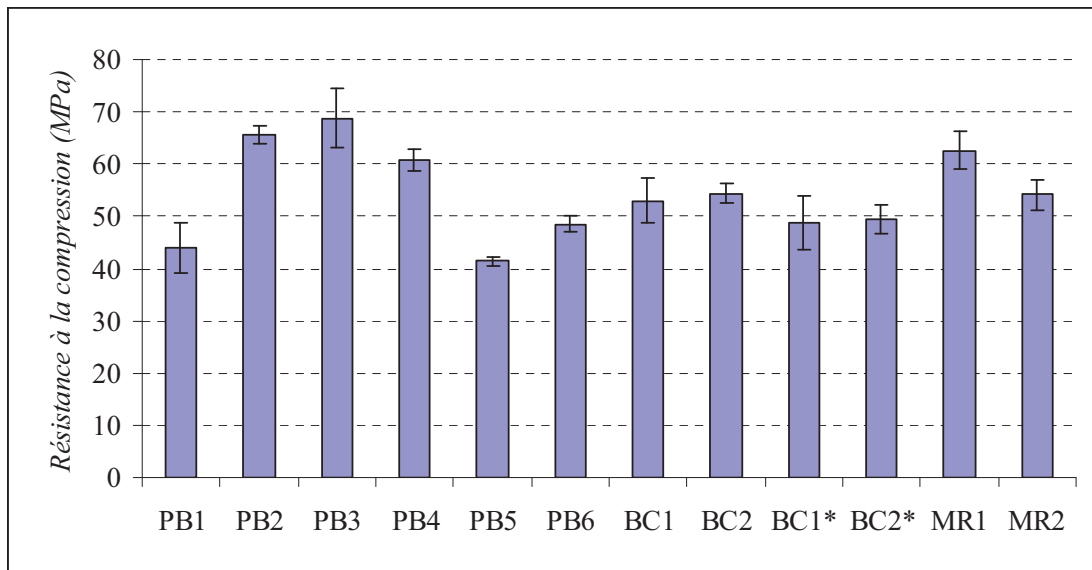


Figure 2.47 : Résistances à la compression à 28 jours des mortiers étudiés

On constate à travers la figure 2.47 que les résistances à la compression des mortiers de réparation sont comprises entre 40 et 70 MPa. Le mortier PB3 présente la résistance la plus élevée et le mortier PB5 la plus faible. Les mortiers témoins présentent des résistances assez proches de celles des mortiers PB. Enfin, le remplacement de la solution polymérique par de l'eau dans les mortiers BC ne conduit pas à une modification de la résistance à la compression.

6 Conclusion

La caractérisation préliminaire des mortiers de réparation a permis d'estimer la quantité des différents constituants, à savoir, les quantités de polymères, de fibres, de calcaire et de ciment. Les mortiers BC ont la particularité d'avoir une composition très différente de celle des mortiers PB. Ces derniers ont des compositions qui ne varient pas considérablement d'un matériau à un autre. La quantité de fibres dans les mortiers de réparation est de 0,10%. Le rapport P/C varie entre 4 et 21%. Quant au rapport E/C, il varie entre 0,19 et 0,52. Une valeur inférieure à 0,2 pour les mortiers BC peut être insuffisante pour l'hydratation du ciment. Les résultats des résistances mécaniques montrent que la résistance à la flexion est influencée par le rapport P/C et que la résistance à la compression est influencée par le rapport E/C. L'influence de la composition des mortiers sur les propriétés de transfert sera étudiée dans le chapitre suivant. Une analyse comparative et performantielle sera ainsi réalisée entre les différents matériaux sélectionnés.

**Chapitre 3: Propriétés de Transfert et Analyse
Performantielle de la Durabilité des Mortiers de
Réparation**

Chapitre 3: Propriétés de Transfert et Analyse Performantielle de la Durabilité des Mortiers de Réparation

1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une analyse performantielle de la durabilité des mortiers de réparation. Pour arriver à cette fin, une approche expérimentale a été réalisée. Elle est basée sur la mesure des principaux indicateurs de durabilité (porosité, absorption capillaire, perméabilité au gaz et coefficient de diffusion effectif). L'intérêt de cette démarche est de pouvoir comparer les performances des mortiers analysés afin de fournir des outils d'aide à la décision quant au choix de ce type de matériaux lors de travaux de réparation. Un autre intérêt et non des moindres est de caractériser le comportement d'une interface mortier-béton support vis-à-vis de la diffusion des chlorures et de l'absorption capillaire.

Ce chapitre est articulé en deux parties. Dans un premier temps, les résultats des propriétés de transferts sont présentés et analysés. Une attention particulière est apportée à l'influence des polymères sur la microstructure. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation et l'analyse des résultats issus des essais d'indentification des propriétés de transferts à l'interface mortier-béton

2 Propriétés de transfert des mortiers de réparation

Les propriétés de transfert des mortiers de réparation ont été étudiées expérimentalement à travers des mesures de porosité et de distribution de la taille des pores, d'absorption capillaires, de perméabilités au gaz et de coefficient de diffusion des chlorures. Cette étude est essentielle pour appréhender et prédire l'amorçage de la corrosion pour les ouvrages réparés, point qui sera abordé dans le quatrième chapitre.

En guise d'introduction, le tableau 3.1 synthétise les principaux résultats. Les valeurs de perméabilités intrinsèques et des coefficients d'absorption capillaire ont été obtenus après un séchage à 80°C pendant deux mois. Les coefficients de diffusion et d'absorption capillaire ont été déterminés sur un seul échantillon de chaque matériau. Pour les porosités et les perméabilités à l'air, les essais ont été réalisés sur trois échantillons de chaque matériau.

Matériaux :	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	PB6	BC1	BC2	MR1	MR2	C30	C15
<i>Porosité accessible à l'eau (%)</i>	26,90 ±	17,70 ±	14,10 ±	17,10 ±	18,20 ±	17,90 ±	17,20 ±	16,20 ±	16,33 ±	17,21 ±	12,80 ±	15,80 ±
	1,89	0,60	0,10	0,50	0,60	0,50	1,40	1,70	0,50	0,50	1,20	0,70
<i>Porosité au mercure (%)</i>	22,70 ±	13,60 ±	12,30 ±	15,80 ±	16,80 ±	17,04 ±	17,10 ±	14,90 ±	11,13 ±	11,86 ±	9,44 ±	15,60 ±
	0,70	0,30	0,40	1,00	0,90	0,70	0,70	1,00	0,50	0,50	1,30	0,60
<i>Coefficient d'absorption capillaire (kg/m²/h^{1/2})</i>	0,35	0,33	0,16	0,63	0,39	0,34	0,07	0,07	0,51	1,45	1,61	2,78
	3,00 ±	7,00 ±	1,00 ±	3,00 ±	6,00 ±	1,00 ±	0,30 ±	0,20 ±	2,00 ±	6,00 ±	5,63 ±	40,00 ±
<i>Perméabilité à l'air (10⁻¹⁷ m²)</i>	0,12	0,15	0,30	0,10	0,14	0,10	0,05	0,06	0,50	0,60	0,70	0,80
<i>Coefficient de diffusion effectif (10⁻¹² m²/s)</i>	2,32	1,26	1,2	1,13	2,47	3,36	0,22	0,29	1,16	2,20	1,94	8,00

Tableau 3.1 : Résultats des indicateurs de durabilité des matériaux étudiés

2.1 La porosité

Nous présentons dans ce qui suit les porosités obtenues par porosimétrie à l'eau et au mercure pour les mortiers et les bétons à 40 jours d'âge après une cure de 28 jours dans la salle humide et un séchage à 45°C pendant deux mois. Les résultats ont été obtenus sur trois échantillons pour chaque matériau. Les valeurs moyennes ainsi que les écarts types de porosités sont présentées dans la figure 3.1.

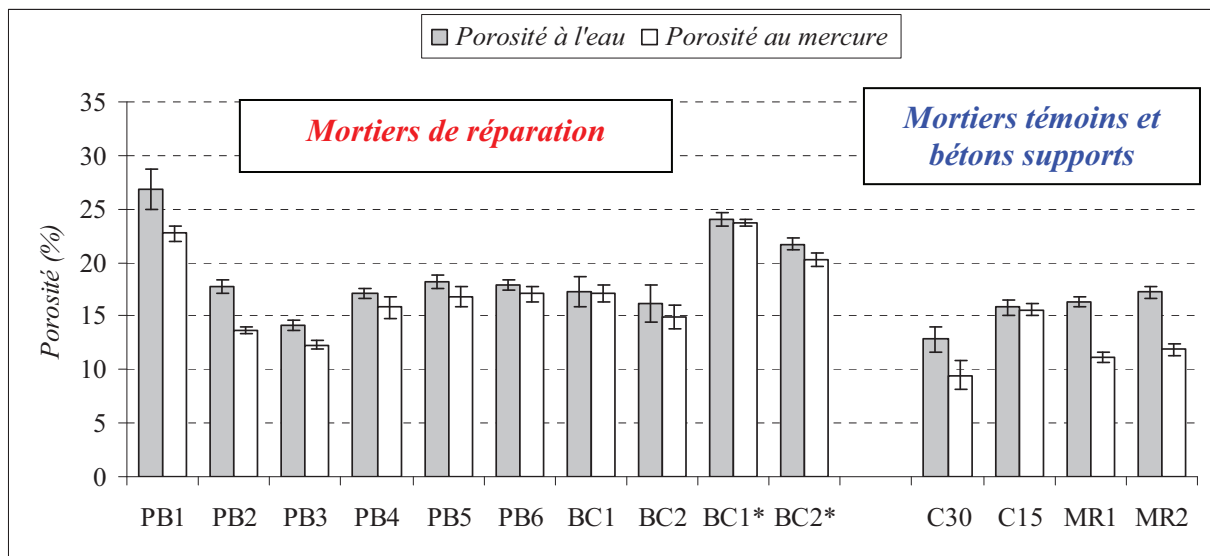


Figure 3.1 : Porosité à l'eau et au mercure des matériaux étudiés

Observations

On peut observer que les porosités obtenues par porosimétrie à l'eau sont plus élevées que celles obtenues par porosimétrie au mercure. Ceci peut être expliqué par la différence de diamètre des pores accessibles par les molécules d'eau et les molécules de mercure. L'application d'une pression de 400 MPa ne permet pas d'investiguer tout le réseau poreux du matériau [Galle, 01].

Par comparaison avec le C30, on constate que toutes les porosités des mortiers de réparation sont supérieures à celle de ce béton. Cette observation est relative car en recalculant la porosité de la pate de ciment et du sable dans le C30 en tenant compte de la fraction volumique et de l'absorption capillaire du sable, on se rend compte que la porosité est équivalente à celle des mortiers avec une valeur de 19,5%. Quant au C15, la porosité globale de ce béton est équivalente à celle des mortiers de réparation.

Sur l'ensemble des mortiers, un seul présente une porosité au dessus, le PB1 avec une porosité de 25%, supérieure de 10% par rapport à la moyenne des porosités.

En comparant les mortiers de réparation et les mortiers témoins, on trouve qu'il n'y a pas de différence notable entre les deux familles de matériaux. Enfin, le remplacement de la solution polymérique par de l'eau dans les mortiers BC a conduit à augmenter la porosité de 6%.

Analyses

Les porosités des mortiers de réparation sont conditionnées par le rapport E/C ainsi que la proportion de polymère (figure 3.2). Dans le cas des mortiers PB où la proportion de polymère est peu variable (P/C entre 4 et 8%), la porosité est fonction du rapport E/C, à savoir plus le rapport E/C est faible plus la porosité est faible. Il faut noter tout de même le cas particulier du PB1. Ce dernier présente une porosité de 26% sans pour autant avoir le rapport E/C le plus élevé (E/C= 0,48). Concernant les mortiers BC, ces derniers présentent une forte porosité dépassant les 16% malgré un faible rapport E/C, ceci s'explique par l'effet entraîneur d'air dû à une forte teneur en polymères [Meishan, 02].

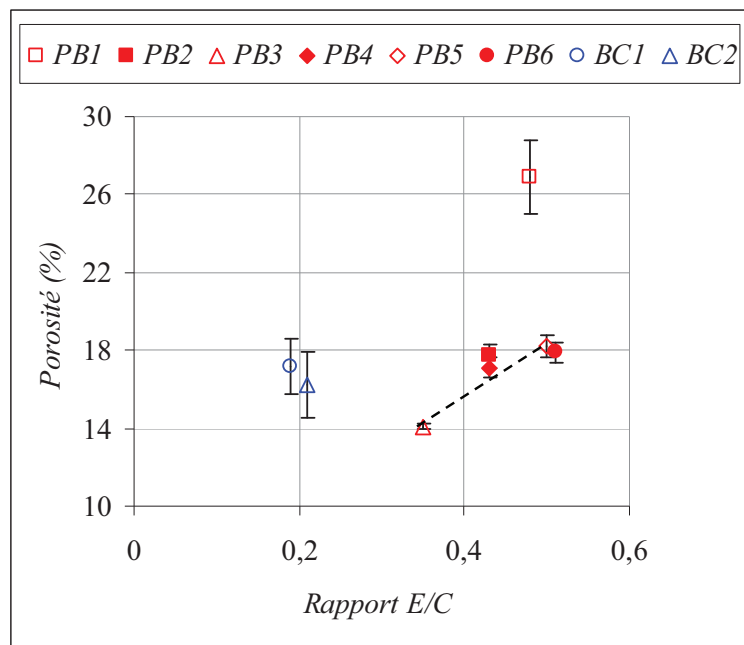


Figure 3.2 : Relation entre la porosité et le rapport E/C des mortiers de réparation

Dans la détermination de la performance de ces mortiers de réparation vis-à-vis de la durabilité, la porosité est un indicateur majeur mais il est tout aussi nécessaire d'observer la distribution porale car la structure du réseau poreux peut conditionner les processus de transfert dans les matériaux.

Dans la figure 3.3 sont présentées les distributions porales pour les mortiers de réparation mono-composant, bi-composants et les matériaux témoins (bétons support et mortiers normalisés). Ces courbes sont des courbes moyennées de trois échantillons par matériau.

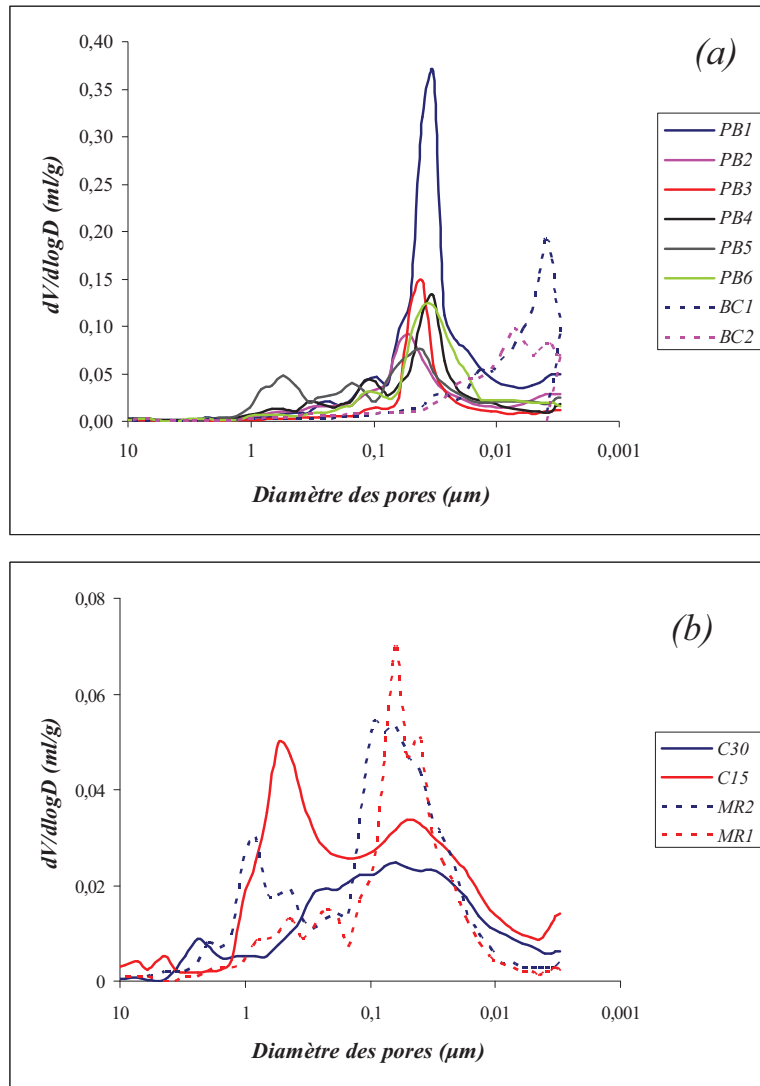


Figure 3.3 : Distributions porales des matériaux étudiés : a) mortiers de réparation – b) mortiers témoins et bétons supports

Observations

Tous les mortiers de réparation présentent une distribution porale monomodale sauf le PB5 qui présente une répartition multimodale. Globalement, les mortiers BC présentent la structure poreuse la plus fine des matériaux étudiés, suivis par les mortiers PB. Quant aux matériaux témoins (figure 3.3. b), ils présentent une structure poreuse grossière avec une distribution porale polymodale.

Pour les mortiers BC*, le remplacement de la solution polymérique par de l'eau conduit à un décalage de la distribution porale vers les gros pores (figure 3.4). La distribution porale de ces derniers se rapproche de celles des mortiers mono-composants.

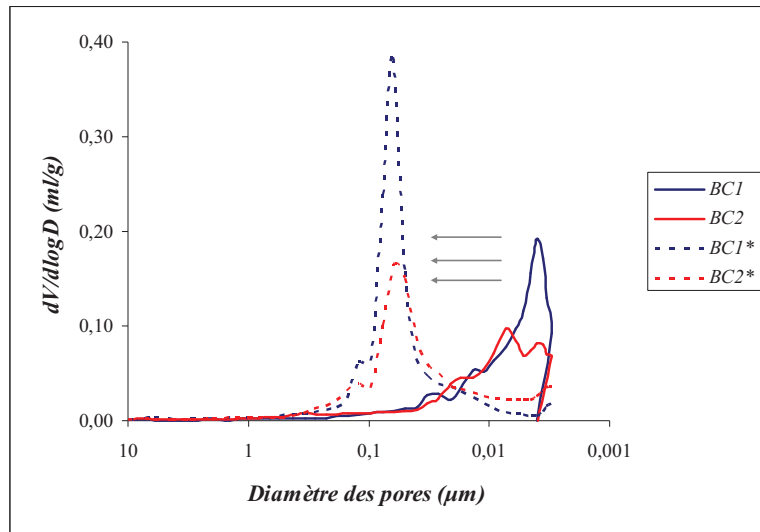


Figure 3.4 : distribution porale des mortiers BC et BC*

Concernant le diamètre moyen des pores, pas de différence notable entre les mortiers PB. Les mortiers BC ont un diamètre moyen des pores au moins dix fois plus petit que les mortiers PB comme l'illustre le tableau 3.2. Pour le mortier PB5 qui présente une distribution porale multimodale, le diamètre moyen a été pris comme étant le diamètre du principal mode porale.

Mortiers	Diamètre moyen des pores (μm)
PB1	0,0324
PB2	0,0626
PB3	0,0403
PB4	0,0324
PB5	0,0404
PB6	0,0324
BC1	0,0040
BC2	0,0073
BC1*	0,0626
BC2*	0,0624

Tableau 3.2 : Diamètres moyens des pores des mortiers de réparation

Analyses

Au regard de ces résultats, on peut dire que le polymère joue un rôle majeur mais pas unique dans la taille des pores puisque, comme l'atteste la structure poreuse des mortiers BC*, la distribution porale reste monomodale malgré la présence d'une très faible quantité de polymère.

On constate à travers la figure 3.5 que pour des rapports P/C supérieurs à 20%, le diamètre moyen des pores diminue de dix fois par rapport à des rapports P/C quatre fois inférieur. Pour des rapports P/C compris entre 4 et 8%, on ne constate pas une très grande différence dans le diamètre moyen des pores des différents mortiers de réparation.

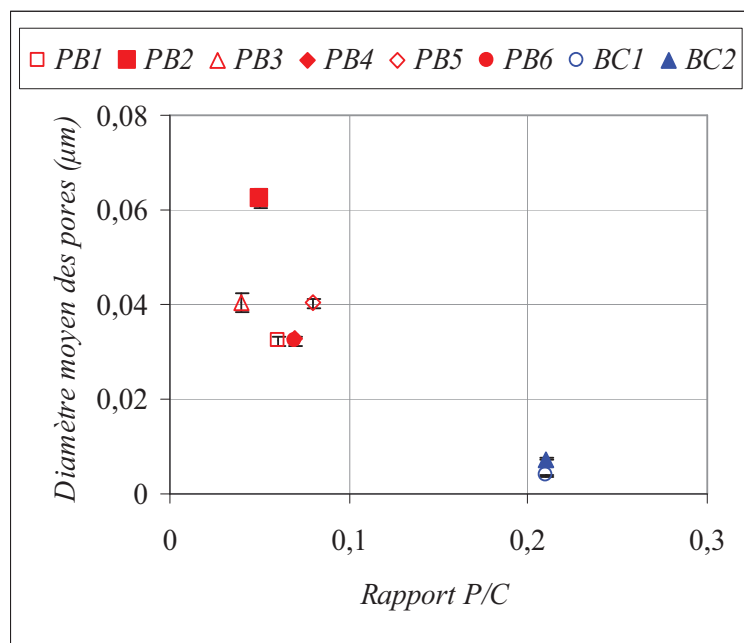


Figure 3.5 : Influence du rapport P/C sur le diamètre moyen des pores

Pour mieux comprendre la réduction de la taille moyenne des pores et de ces distributions porales, il faut compléter l'étude de la microstructure de ces mortiers par d'autres outils d'investigation. Le microscope électronique à balayage nous permet de mettre en lumière les relations existantes entre les polymères présents dans les mortiers de réparation et la matrice cimentaire ou le squelette granulaire. Les essais réalisés sur des échantillons de mortier fracturés nous ont permis de constater que les polymères ont un effet de remplissage des pores : soit en recouvrant les parois internes des pores soit en remplissant totalement les pores. Sur les figures 3.6 à 3.12 sont présentées des exemples d'images au MEB du mode de remplissage du polymère avec les analyses chimiques (EDS).

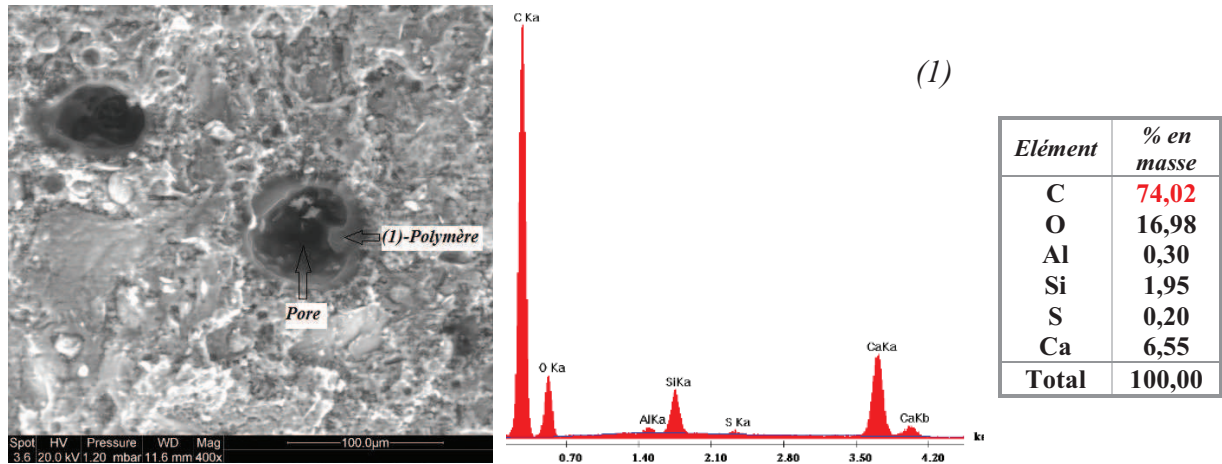


Figure 3.6 : Image MEB avec analyse chimique (EDS) d'un échantillon fracturé du mortier PB1, grossissement 400×

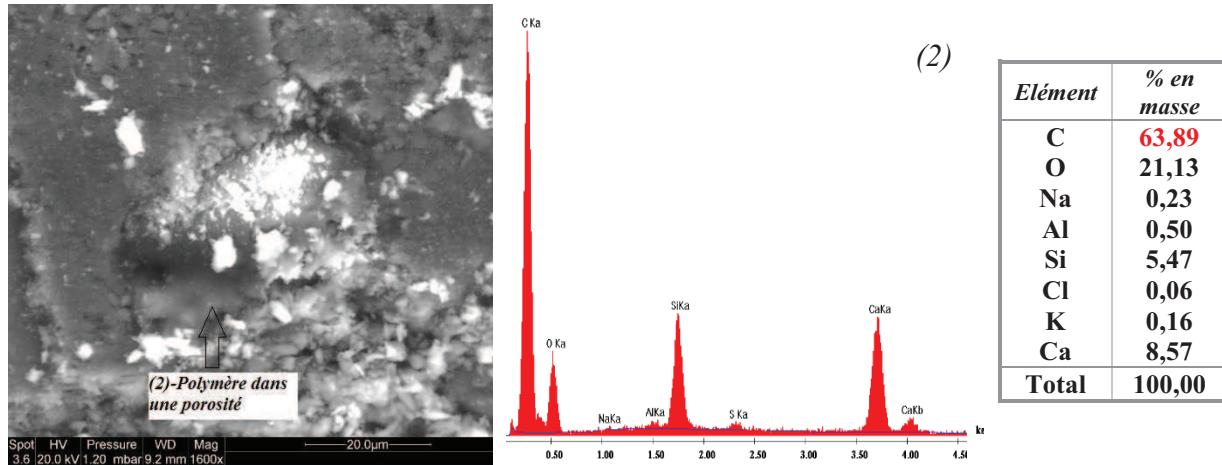


Figure 3.7 : Image MEB avec analyse chimique (EDS) d'un échantillon fracturé du mortier PB2, grossissement 1600×

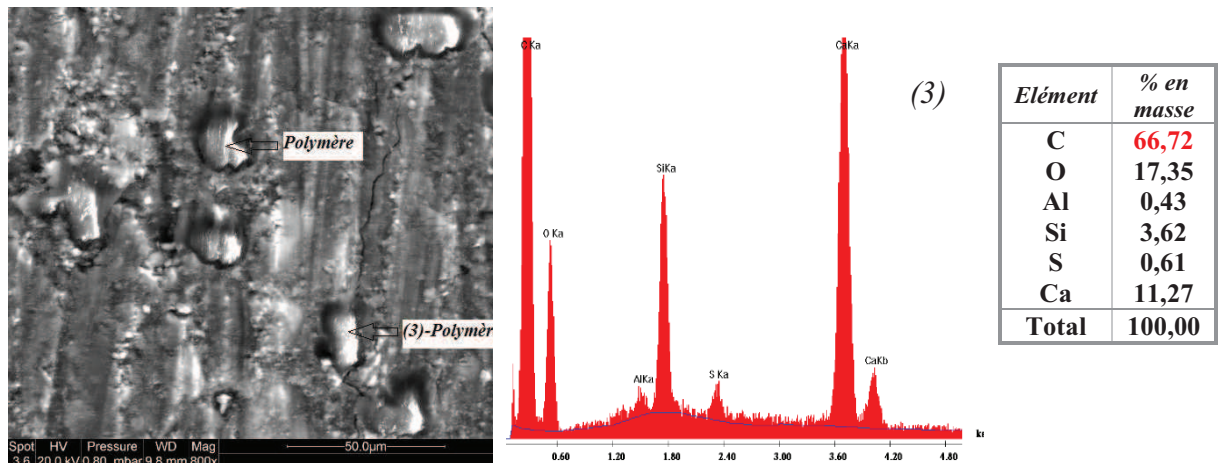


Figure 3.8 : Image MEB avec analyse chimique (EDS) d'un échantillon non fracturé du mortier PB3, grossissement 800×

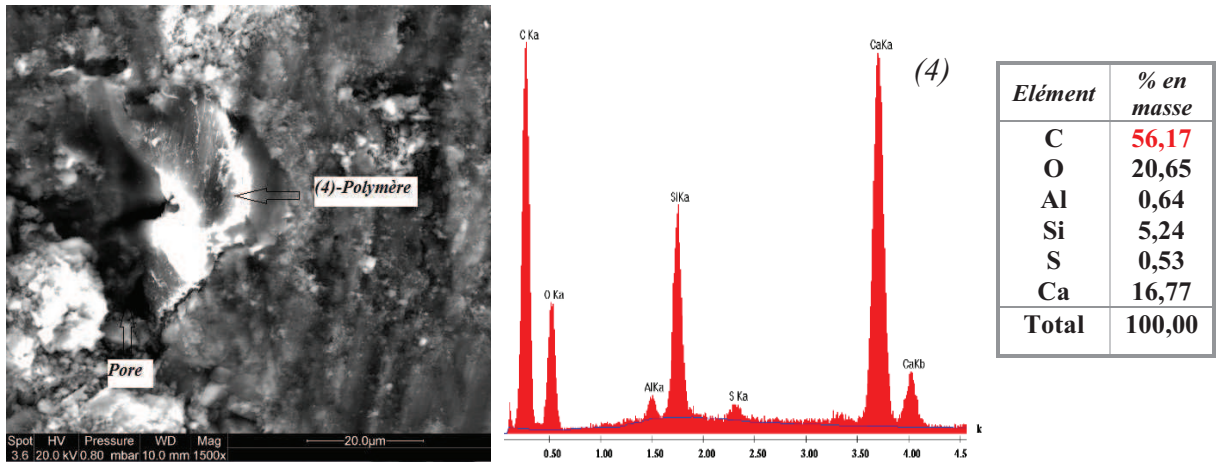


Figure 3.9 : Image MEB avec analyse chimique (EDS) d'un échantillon fracturé du mortier PB4, grossissement 1500×

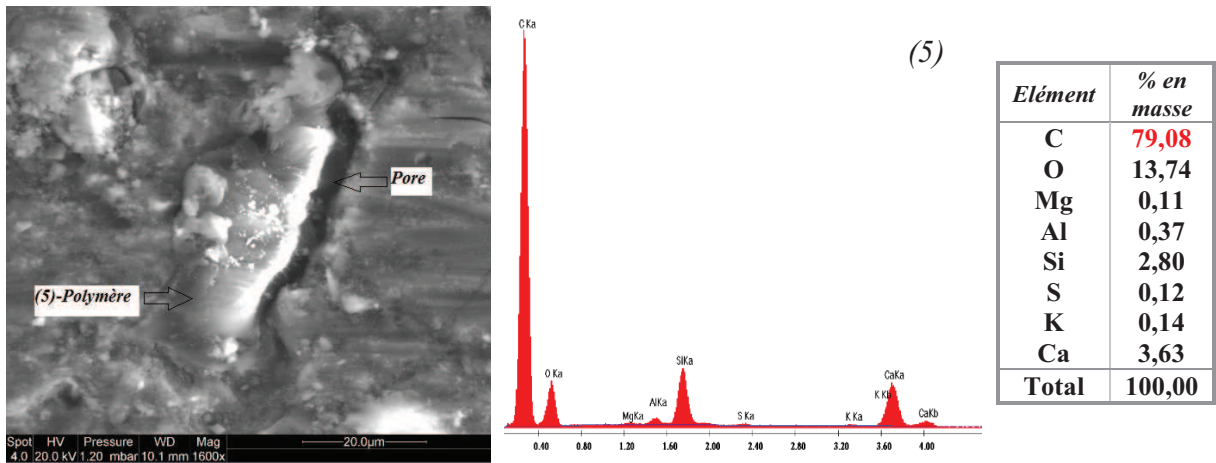


Figure 3.10 : Image MEB avec analyse chimique (EDS) d'un échantillon fracturé du mortier PB5, grossissement 1600×

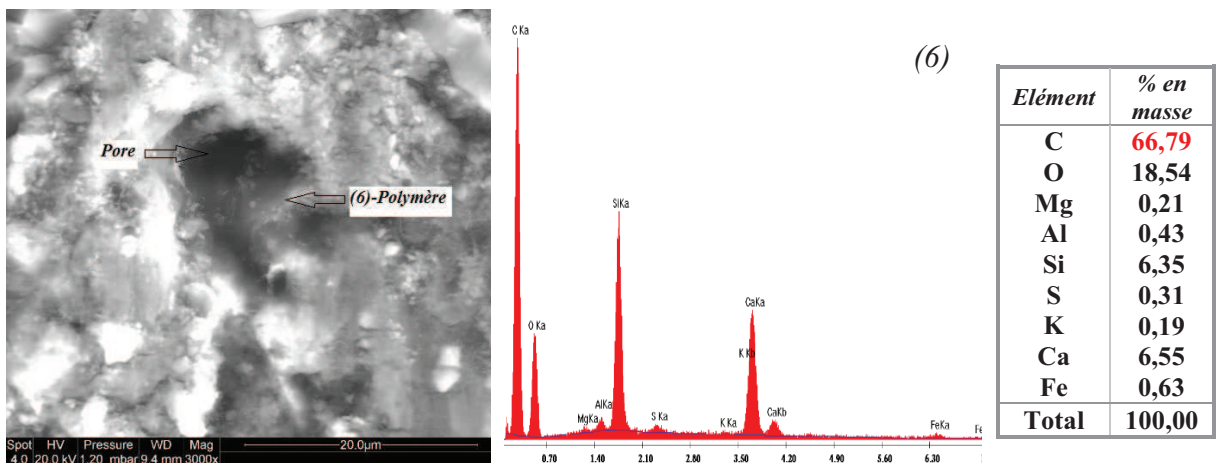


Figure 3.11 : Image MEB avec analyse chimique (EDS) d'un échantillon fracturé du mortier PB6, grossissement 3000×

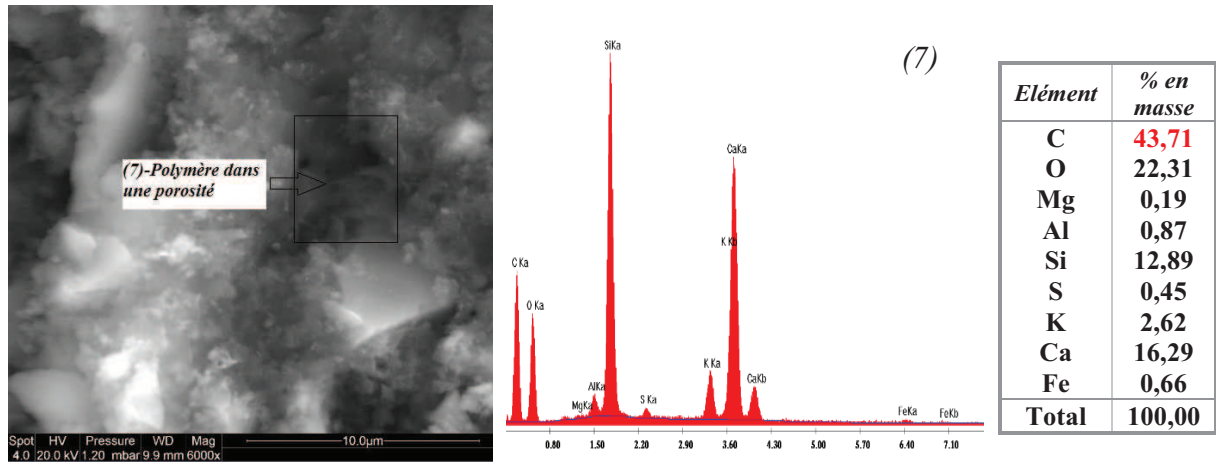


Figure 3.12 : Image MEB avec analyse chimique (EDS) d'un échantillon fracturé du mortier BC1, grossissement 600×

On peut observer que les polymères peuvent remplir les pores partiellement ou totalement. Les analyses chimique (EDS) de ces polymères ont révélé la présence d'un taux de carbone supérieur à 40% avec un taux de calcium faible. Ceci laisse à penser que les polymères n'ont pas réagi avec les hydrates mais qu'ils se sont juste déposés dans les pores.

D'autres analyses au MEB ont révélé que les polymères dans les mortiers BC peuvent réagir avec les hydrates et modifier leurs morphologies. Dans les figures 3.13 et 3.14 sont présentées des images de comparaison entre le mortier BC1 et le mortier BC1* ainsi que les analyses chimiques associées.

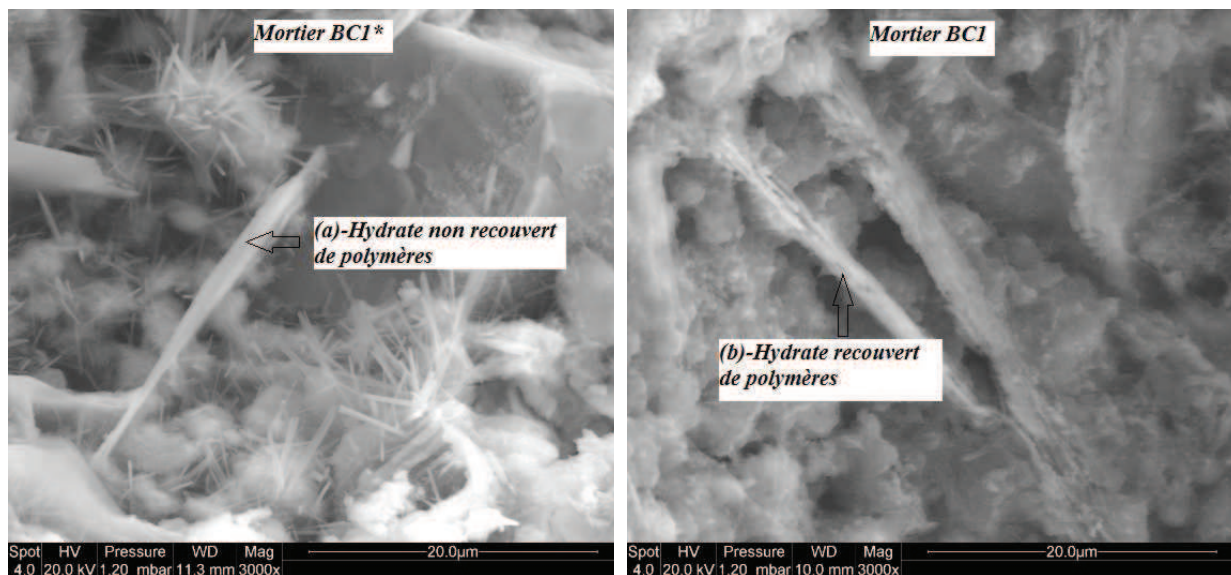


Figure 3.13: Images MEB d'échantillons fracturés des mortiers BC1* et BC1, grossissement 3000×

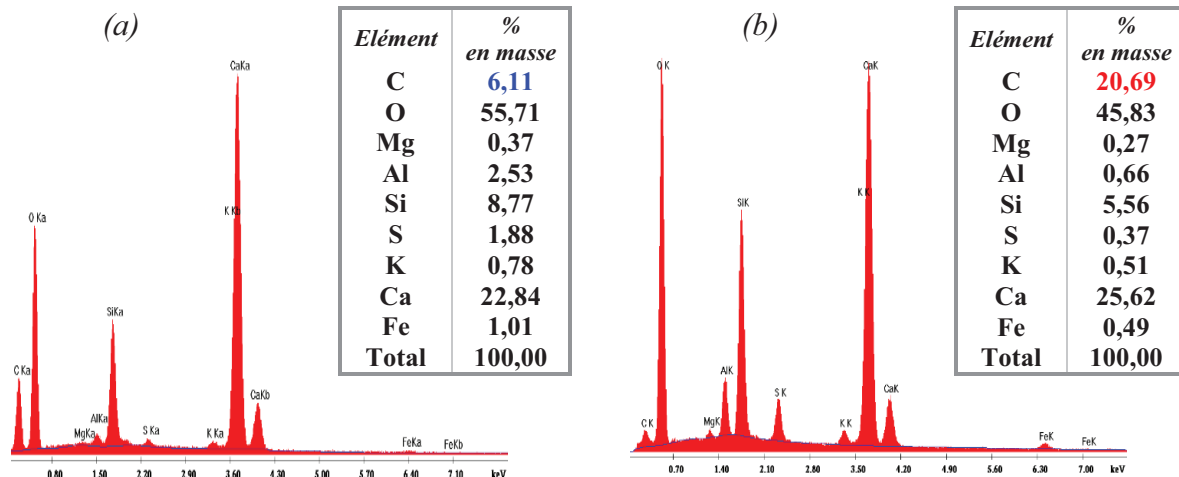


Figure 3.14 : Analyses chimiques (EDS) des hydrates recouverts et non recouverts par le polymère

En effet, on constate que les polymères viennent recouvrir les hydrates de portlandite ou bien les aiguilles d'ettringite. L'analyse chimique de ces hydrates recouverts révèle la présence d'un taux de carbone supérieur à 25% en masse alors que pour les hydrates non recouverts, le taux de carbone ne dépasse pas 10% en masse. Ceci permet de dire que les polymères utilisés dans les mortiers BC ont deux effets : le premier est celui du remplissage de la porosité et le deuxième est le recouvrement ou l'interaction chimique avec les hydrates de portlandite et d'ettringite. Cet effet de recouvrement peut dépendre du type de polymères mais aussi de sa quantité.

Rappelons que les mortiers BC ont un taux de polymères nettement supérieur à celui des mortiers PB et que ces polymères se présentent sous forme liquide contrairement aux mortiers PB où le polymère est sous forme de poudre. Ces deux facteurs ont donc une influence sur l'affinité des polymères avec les hydrates.

Conclusion

En conclusion de cette partie sur la porosité, on pourrait penser qu'au regard des fortes porosités des mortiers de réparation, celles-ci pourraient avoir un effet négatif sur les propriétés de transfert. Cependant, l'étude sur la microstructure a révélé que ces porosités étaient plus fines et monomodales ce qui, au contraire de la remarque précédente, pourrait avoir un effet bénéfique.

Pour s'en persuader, nous présentons dans ce qui suit les résultats des essais relatifs aux propriétés de transfert dans les mortiers de réparation, à savoir l'absorption capillaire, la perméabilité au gaz et la diffusion des chlorures.

2.2 Absorption capillaire

Les phénomènes d'absorption capillaire dans les matériaux cimentaires sont très bien connus de la littérature. En réalité, trois phases caractérisent l'absorption capillaire. La première, appelée aussi absorption initiale, traduit le remplissage des gros pores capillaires durant les deux premières heures de l'essai [Hall, 89], [Balayssac, 92]. La seconde, appelée aussi absorptivité, traduit le remplissage des plus petits capillaires. Enfin, la troisième phase caractérise la remontée capillaire atteignant la face supérieure des échantillons et se traduit sur la courbe par une asymptote horizontale. De plus, d'après les recommandations de l'AFREM, la durée d'un essai n'excède pas 24 heures, considérant qu'au terme de cette durée, un régime permanent est atteint. Dans le cadre de nos essais, nous observons bien ce phénomène avec les bétons et mortiers de référence. Par contre, il est difficile de juger de la pertinence de ce temps d'essai sur les mortiers de réparation.

En effet, à 24h, la quantité d'eau absorbée par les mortiers de réparation est nettement inférieure à ce qu'ils pourraient absorber à saturation comme l'atteste le tableau 3.3 où l'on présente le pourcentage d'eau absorbée à 24h par rapport à la quantité d'eau absorbée théorique, déduite de la porosité à l'eau du matériau.

Matériaux	Masse d'eau théorique	Masse d'eau	% de masse d'eau
	Absorbée (kg/m ²)	Absorbée à 24h (kg/m ²)	absorbée à 24h
PB1	13,10	3,14	24,0
PB2	8,85	3,87	43,8
PB3	6,90	2,18	31,6
PB4	8,50	5,52	65,0
PB5	9,10	2,91	32,0
PB6	9,30	2,89	31,1
BC1	8,60	0,48	5,6
BC2	8,10	0,79	9,8
MR1	6,40	3,07	48,0
MR2	8,40	7,90	94,0
C30	7,80	6,24	80,0
C15	8,60	8,25	96,0

Tableau 3.3 : Masse d'eau absorbée par unité de surface théorique et expérimentale des mortiers de réparation et des matériaux témoins

Masse d'eau théorique absorbée par unité de surface est :

$$\frac{M_w}{A} = H \times \rho_w \times P \quad (\text{Eq 3.1})$$

Avec :

M_w : masse d'eau absorbée(kg), A : surface de l'échantillon(m^2), H : hauteur de l'échantillon (m), ρ_w : masse volumique de l'eau (kg/m^3) et P : la porosité à l'eau.

On peut constater qu'à 24h, à l'exception du mortier PB4, les échantillons n'atteignent au maximum que 43% à l'inverse des matériaux de référence comme dit précédemment. Pour le mortier PB4, la masse d'eau absorbée est de 65% de la masse. C'est pour cette raison que nous n'avons pas stoppé nos essais à 24h. La cinétique d'absorption capillaire des mortiers de réparation est beaucoup plus lente par comparaison avec les matériaux de référence.

En d'autres termes, nous avons atteint au maximum une durée de 51 jours d'absorption pour un des mortiers de réparation étudiés (mortier PB3). D'une manière globale, nous présentons sur les figures 3.15 et 3.16 les courbes d'absorption capillaire des mortiers de réparation, mortiers témoins et bétons support.

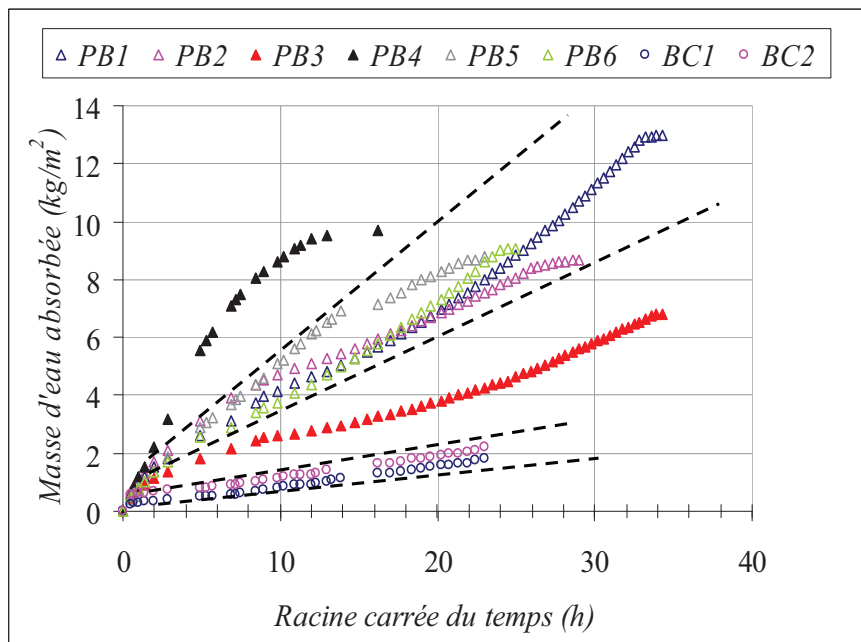


Figure 3.15 : Courbes de la masse d'eau absorbée en fonction du temps pour les mortiers de réparation

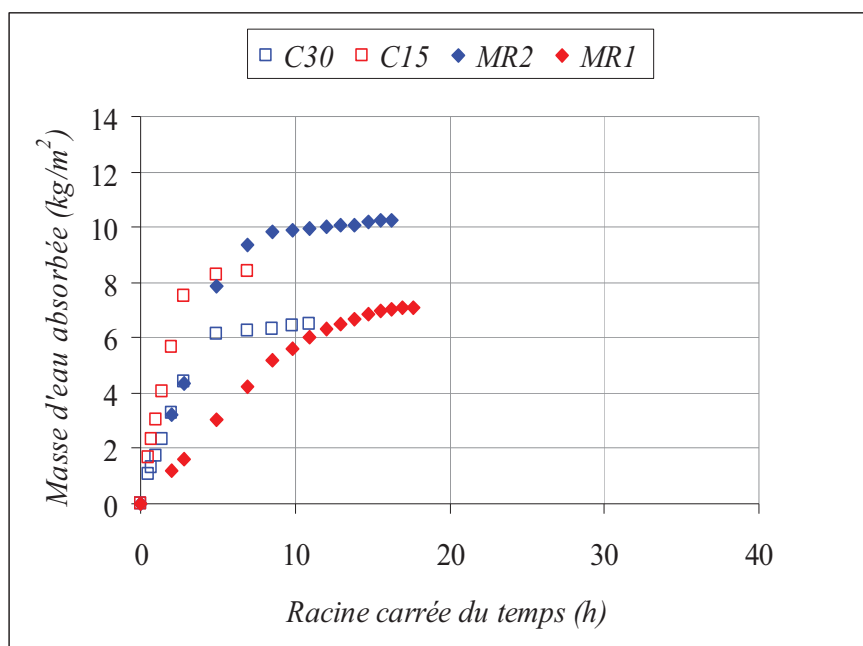


Figure 3.16 : Courbes de la masse d'eau absorbée en fonction du temps pour les matériaux de référence

Observations

Globalement, on peut décomposer les mortiers de réparation selon leurs cinétiques d'absorption d'eau en deux familles (figure 3.15), à savoir, la famille des mortiers PB1, PB2, PB5 et PB6 qui ont presque la même cinétique d'absorption et la famille des mortiers BC. Pour ces derniers, la cinétique d'absorption est très lente, la quantité d'eau absorbée n'est que de 2 kg/m^2 après 22 jours d'immersion. Hormis ces deux familles, on peut distinguer deux mortiers. Le mortier PB4 qui présente la cinétique la plus rapide des mortiers de réparation et le mortier PB3 qui présente la cinétique la plus lente des mortiers mono-composant.

Par comparaison avec les mortiers témoins et les bétons support (figure 3.16), on constate que la cinétique d'absorption de ces derniers est beaucoup plus rapide que celles des mortiers de réparation. Néanmoins, la cinétique d'absorption d'eau du mortier PB4 se rapproche de celle du mortier MR1.

Pour présenter nos résultats, nous avons choisi de comparer, dans le tableau 3.4, des coefficients d'absorption capillaire définis en réalisant une régression linéaire des courbes de masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction du temps. Nous observons que le coefficient d'absorption capillaire du béton de référence est jusqu'à vingt fois supérieur à l'ensemble des mortiers de réparation.

Nous pouvons aussi différencier le comportement des mortiers de réparation PB des mortiers de type BC ou les coefficients d'absorption capillaire sont jusqu'à trois fois inférieurs.

<i>Matériaux</i>	<i>Coefficient d'absorption capillaire (kg. m⁻². h^{1/2})</i>
<i>PB1</i>	<i>0,35</i>
<i>PB2</i>	<i>0,33</i>
<i>PB3</i>	<i>0,16</i>
<i>PB4</i>	<i>0,63</i>
<i>PB5</i>	<i>0,39</i>
<i>PB6</i>	<i>0,34</i>
<i>BC1</i>	<i>0,07</i>
<i>BC2</i>	<i>0,07</i>
<i>MR1</i>	<i>0,61</i>
<i>MR2</i>	<i>1,45</i>
<i>C30</i>	<i>1,61</i>
<i>C15</i>	<i>2,78</i>

Tableau 3.4 : Coefficients d'absorption capillaire des mortiers de réparation et des matériaux de référence

Analyses

Nous avons trois explications du comportement des mortiers de réparation vis-à-vis de l'absorption capillaire. Comme nous l'avons noté pour la porosité, les distributions porales des mortiers sont plus fines que celles des matériaux de référence, avec en plus, des répartitions monomodales (figure 3.3). Cette propriété physique est une cause principale d'un plus faible débit volumique des matériaux. En effet, on constate d'après la loi de Hagen-Poiseuille (équation 3.2) que le débit volumique d'absorption est fonction à la fois du rayon moyen des pores r_c et de la pression capillaire ΔP . Plus le rayon moyen des pores est faible, plus le débit est faible et par voie de conséquence le coefficient d'absorption capillaire est faible.

D'autre part, il existe des travaux qui font état du caractère hydrophobe des polymères présents dans les mortiers [Ohama, 96], [Saija, 95]. Cette caractéristique tend à diminuer la pression capillaire car la mouillabilité est modifiée à l'interface liquide-solide. Cette diminution entraîne une diminution du débit volumique et donc, comme nous l'avons précisé précédemment, réduit le coefficient d'absorption capillaire.

La loi de Hagen-Poiseuille :

$$Q = \frac{\pi.r_c^4}{8.\eta.h}.\Delta P \quad (\text{Eq 3.2})$$

Avec :

Q : le débit volumique (m^3/s)

r_c : le rayon moyen des pores (m)

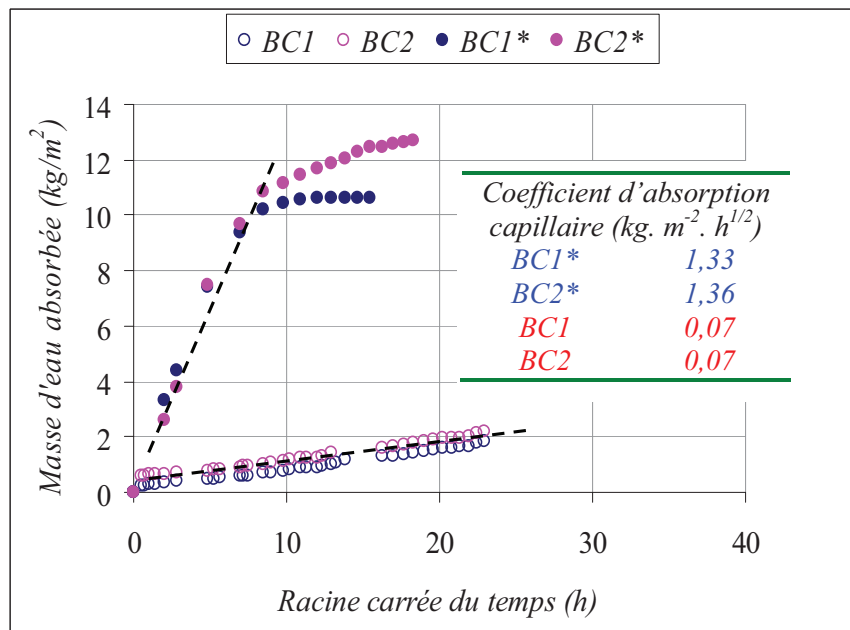
η : la viscosité de l'eau ($Pa.s$)

h : la hauteur capillaire (m)

ΔP : la pression capillaire (Pa)

Enfin, il est possible que la proportion de polymère puisse être un facteur réduisant le coefficient d'absorption autant que ses propriétés hydrophobiques.

Ces deux dernières hypothèses semblent être confirmées, puisque au regard de la figure 3.17, les cinétiques d'absorption sont plus conséquentes dans les mortiers BC*. Ces derniers ont des coefficients d'absorption d'eau 20 fois plus élevés que ceux des mortiers BC.



Figures 3.17 : Absorption capillaire des mortiers BC et BC*

Les données de la littérature montrent que l'ajout du polymère contribue à diminuer l'absorption capillaire des mortiers de réparation [Saija, 95], [Ohama, 96], [Wang, 11], [Ramli, 12] par la formation d'un film polymère à caractère hydrophobe (figure 3.18).

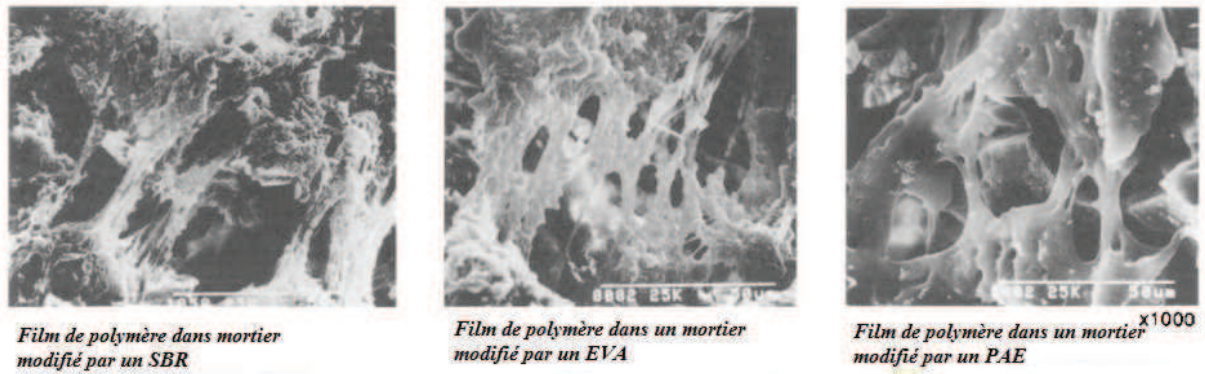


Figure 3.18 : Images au MEB de la formation du film polymère [Ohama, 96]

Pour mieux comprendre l'effet du polymère sur le processus d'absorption capillaire, on a eu recours au MEB afin d'observer la formation du film polymère. L'analyse des mortiers PB n'a révélé aucune formation du film polymère, par contre dans les mortiers BC on a observé la présence du film polymère dans quelques zones du matériau. On présente sur la figure 3.19 un exemple de ces observations.

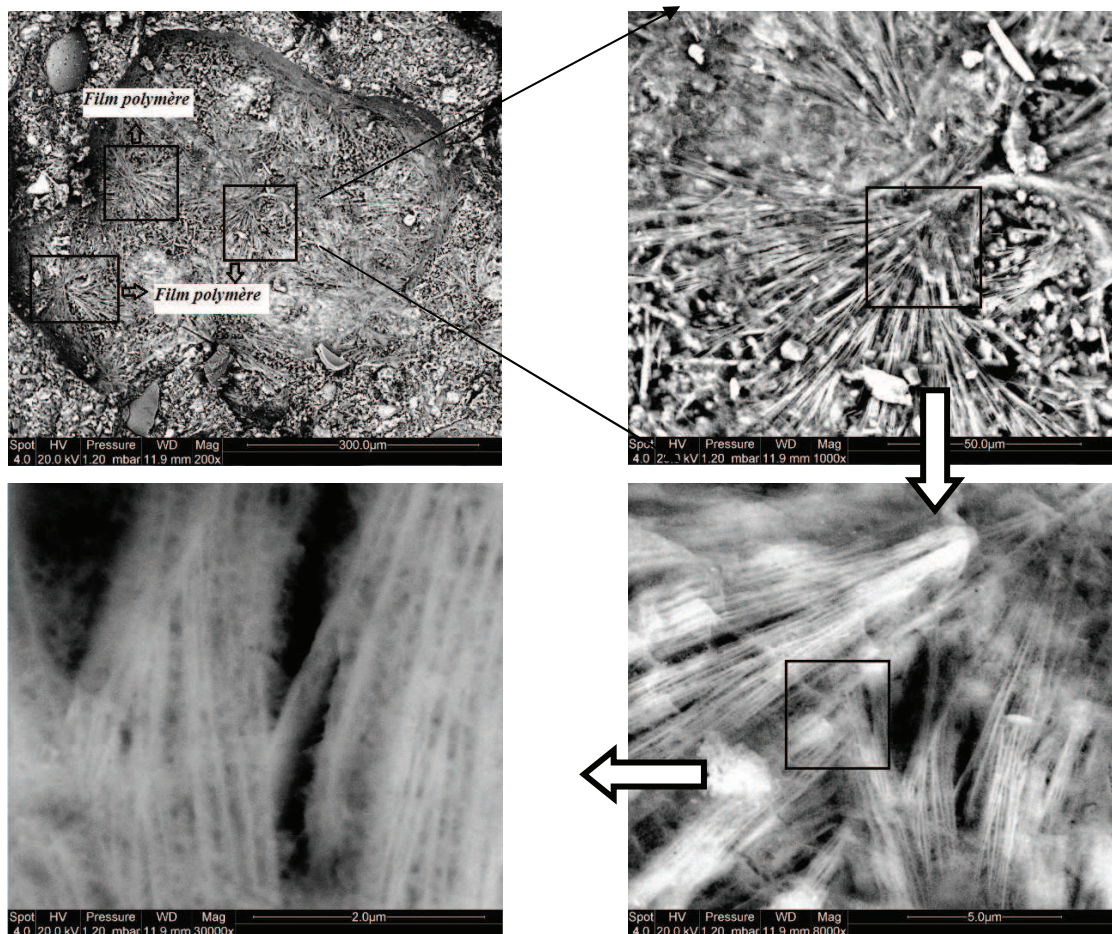


Figure 3.19 : Images MEB de la formation du film polymère dans le mortier BC2 avec un grossissement allant de 200 à 30000 fois

Il faut rappeler que ces images ont été prises sur des échantillons fracturés après 28 jours de cure dans une salle humide et que sur toutes les zones analysées on a constaté la présence du film polymère. Ce dernier se présente sous forme de filaments qui se déposent sur la matrice cimentaire.

On peut donc dire que l'utilisation d'un copolymère acrylamide styrène-acrylate d'éthyle avec une proportion de 20% par rapport à la masse du ciment, permet la formation d'un film polymère. Ce dernier peut être l'un des facteurs qui sont à l'origine de la diminution de l'absorption capillaire dans les mortiers BC.

On a pu observer précédemment, à travers la figure 3.15, que les mortiers PB3 et PB4 ont des cinétiques d'absorption différentes de celles des autres mortiers mono-composant. Un rapport E/C plus faible dans le mortier PB3 peut expliquer une cinétique plus lente de ce dernier. En effet, on constate à travers la figure 3.20 que plus le rapport E/C augmente plus le coefficient d'absorption capillaire augmente aussi.

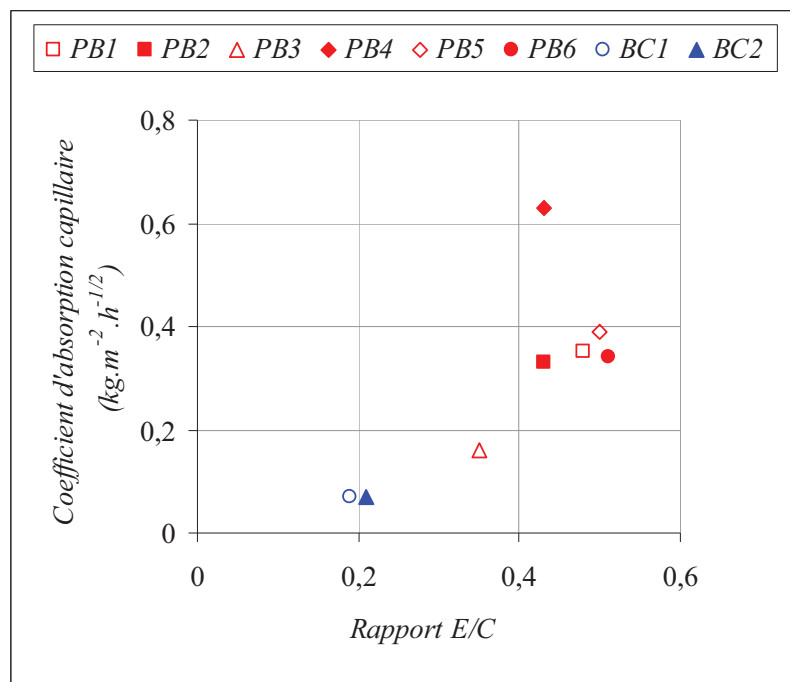


Figure 3.20 : Relation entre coefficient d'absorption capillaire est rapport E/C

Une augmentation du rapport E/C peut contribuer à augmenter le degré d'interconnexion des pores. En conséquence, l'absorption capillaire augmente aussi.

En ce qui concerne le mortier PB4, la nature du polymère dans ce dernier peut être à l'origine de l'augmentation de l'absorption d'eau.

En effet, certains polymères comme le PVAC (polymère acétate de polyvinyle) gonflent en présence d'eau et présentent une mauvaise résistance à la pénétration de l'eau [Ohama, 98]. Ceci conduirait à augmenter la cinétique d'absorption capillaire.

Conclusion

L'absorption capillaire des mortiers de réparation est influencée par la structure poreuse et le taux de polymère. Ce dernier peut contribuer à une diminution de l'absorption d'eau par la formation d'un film polymère et la réduction de la pression capillaire. Ces effets dépendent de la nature et de la quantité du polymère. L'utilisation d'un copolymère acrylamide styrène-acrylate d'éthyle avec un taux de 20% par rapport à la masse du ciment contribue à ralentir considérablement le processus d'absorption d'eau.

2.3 Perméabilité au gaz

La perméabilité au gaz est une propriété de transfert fréquemment utilisée pour caractériser la durabilité des matériaux cimentaires. Les essais de perméabilité effectués au laboratoire dépendent fortement de la pression appliquée. Ainsi, pour caractériser la perméabilité au gaz de nos matériaux indépendamment de la pression d'essai, nous avons utilisé l'approche de Klinkenberg. Cette méthode a fait l'objet d'une présentation dans le chapitre deux.

D'après les données de la littérature, la perméabilité des matériaux cimentaires dépend fortement de leur état de saturation. De nombreuses recherches ont montré que la perméabilité au gaz d'une éprouvette de béton augmente quand le taux de saturation moyen diminue, parmi ces travaux de recherches on peut citer : [Parrot, 94], [Jacobs, 98], [Abbas, 99], [Villain, 01], [Care, 11].

En effet, plus le degré de saturation du réseau de pores s'accroît, plus le passage du gaz est difficile. Un réseau de pores proche de la saturation est pratiquement imperméable aux gaz. Ainsi, pour étudier l'influence de ce paramètre sur la perméabilité intrinsèque, nous avons testé nos matériaux après un séchage à différentes températures.

Nous avons commencé par une température de séchage de 45°C pendant un mois. Cependant pour cette température, il était presque impossible de déterminer la perméabilité intrinsèque des matériaux. Nous avons donc augmenté progressivement la température de séchage tout en veillant sur l'état de fissuration. Aussi, il a été convenu de travailler à 65, 80 et 105°C afin d'observer l'évolution du degré de saturation global des mortiers de réparation.

Il faut rappeler que le séchage a été réalisé sur des échantillons cylindriques de 6,5 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur, entourés d'une résine de 1,2 cm d'épaisseur.

On présente sur la figure 3.21, les degrés de saturation associés aux différentes températures de séchage. Ces valeurs représentent la moyenne de trois degrés de saturation pour trois échantillons de chaque matériau. On considère qu'à 105°C, le degré de saturation est égal à zéro après un mois de séchage. Avant la période de séchage, les échantillons étaient conservés en salle humide (HR= 90%, température ambiante 20 ± 2 °C) pendant 40 jours.

Les échantillons ont été séchés pendant un mois aux températures 65 et 80°C. Le degré de saturation a été déterminé en utilisant l'équation 2.8 présentée dans le chapitre 2, après une semaine de saturation dans l'eau. On rappelle que les degrés de saturation n'ont pas été déterminés sur les mortiers MR.

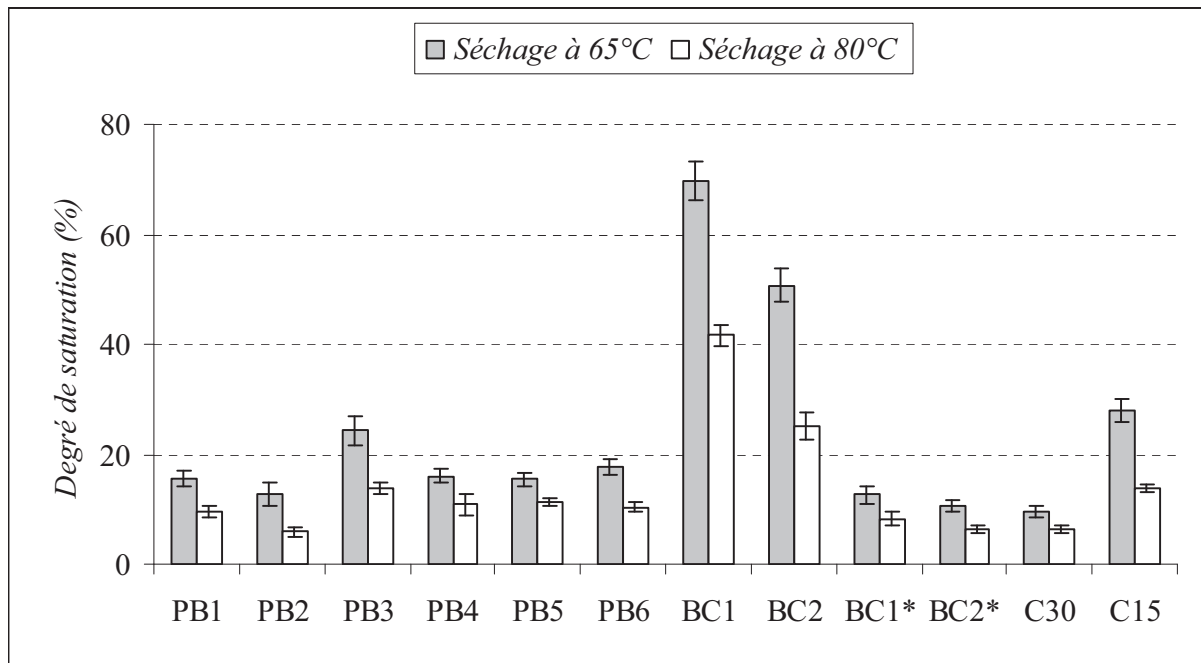


Figure 3.21 : Degré de saturation des échantillons après un séchage à 60 et 80°C

Globalement, on constate que les matériaux ont des degrés de saturation assez proches. Les valeurs sont comprises entre 10 et 28% après un séchage à 65°C et entre 6 et 14% après un séchage à 80°C. Cependant, on constate que les mortiers BC présentent des degrés de saturation assez élevés. Ces derniers sont compris entre 50 et 70% après un séchage à 65°C et pour un séchage à 80°C, les valeurs sont comprises entre 25 et 41%. Ces valeurs sont deux à cinq fois plus grandes que celle des mortiers PB et des bétons témoins.

Les données disponibles dans la littérature montrent que les polymères ont une rétention d'eau nettement améliorée par rapport à un mortier ordinaire [Ohama, 98]. Plus le rapport P/C augmente plus la rétention d'eau augmente aussi. On peut donc attribuer ce fort degré de saturation à une forte rétention d'eau du polymère. En effet, au regard des mortiers BC*, on constate que le remplacement de la solution polymérique par de l'eau conduit à une très forte baisse dans le degré de saturation. On peut donc dire que le fort taux de polymère explique ces degrés de saturation élevés.

Il faut signaler que la température de séchage a une influence sur les valeurs du degré de saturation. En effet, lors du calcul de ce dernier, la masse sèche a été prise comme étant la masse obtenue après un séchage à 105°C, cette température peut altérer les produit d'hydratation du ciment tels que l'ettringite ou encore les C-S-H [Lea, 70].

En plus de l'altération des produits d'hydratation, une température de 105°C peut aussi provoquer une décomposition du polymère présent dans le mortier de réparation, ou encore une perte de masse dans la résine qui entoure l'échantillon. Tous ces facteurs peuvent donc fausser les résultats du degré de saturation.

On présente sur les figures 3.22 à 3.24, la variation de la perméabilité à l'air obtenue selon l'approche Klinkenberg en fonction du degré de saturation. Cette étude n'a pas été faite sur les mortiers témoins (les degrés de saturations n'ont pas été déterminés).

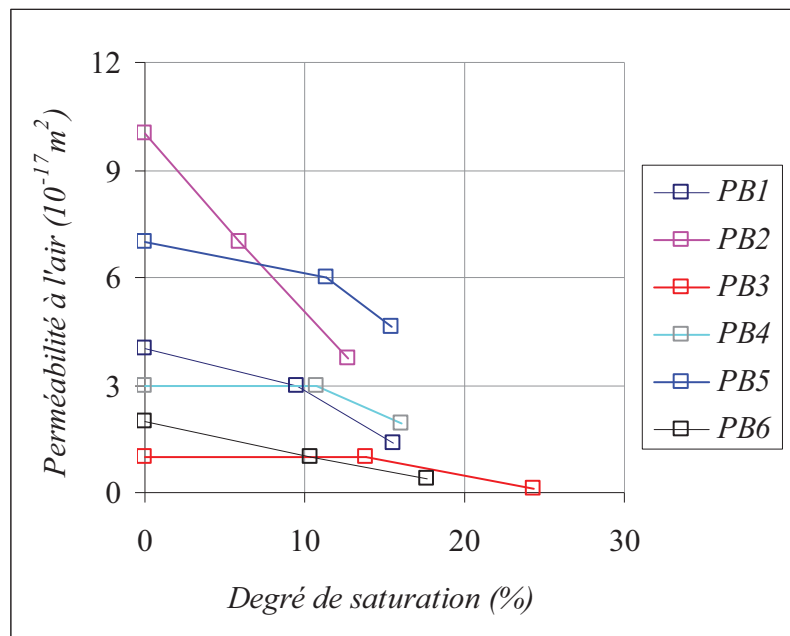


Figure 3.22 : Perméabilité à l'air en fonction du degré de saturation pour les mortiers PB

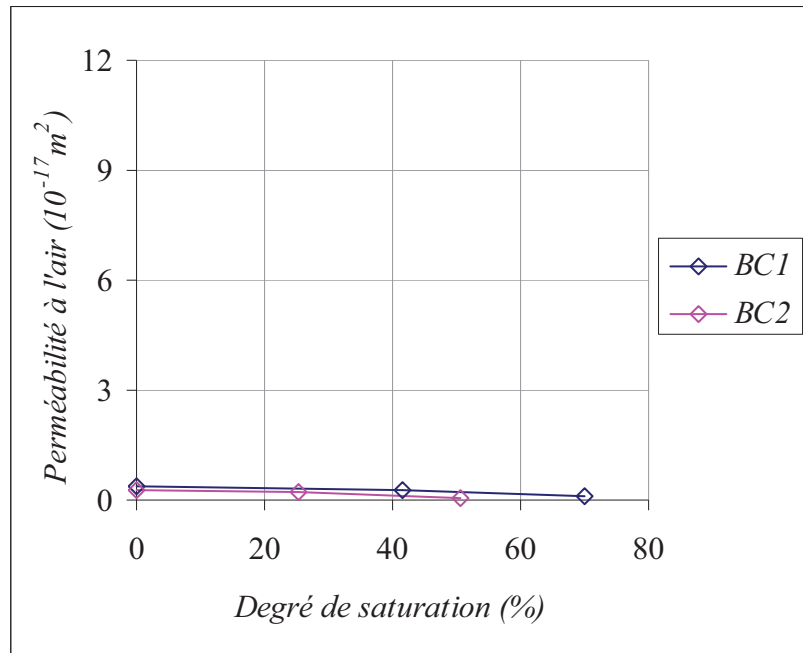


Figure 3.23 : Perméabilité à l'air en fonction du degré de saturation pour les mortiers BC

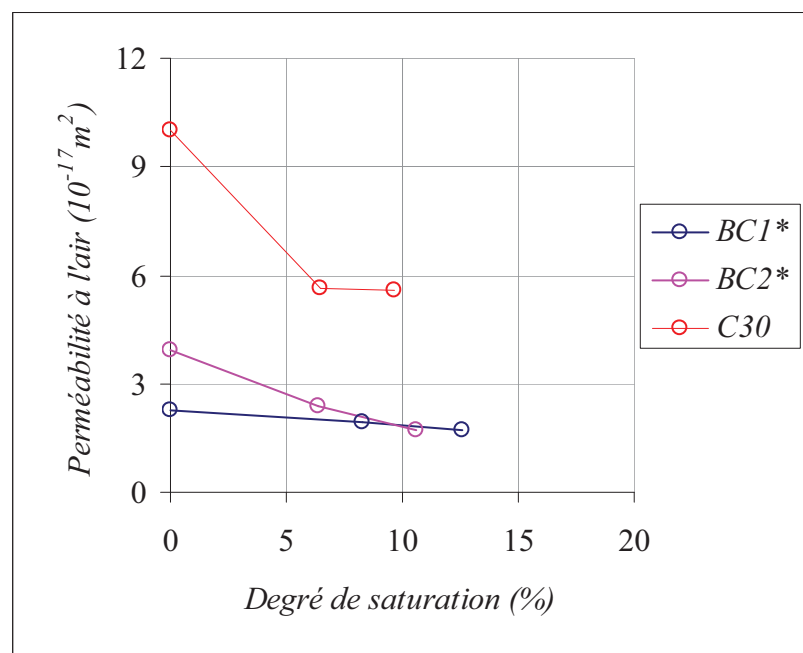


Figure 3.24 : Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation des matériaux témoins

Au regard de ces courbes, on constate que plus le degré de saturation augmente et plus la perméabilité à l'air diminue. Néanmoins, pour certains matériaux, l'augmentation du degré de saturation ne conduit pas à une diminution de la perméabilité, c'est le cas par exemple des mortiers PB3 et PB4 pour lesquels on ne constate pas une variation de la perméabilité pour une variation du degré de saturation (entre 13 et 0%).

C'est aussi le cas du béton C30 qui ne présente pas de variation de la perméabilité pour un degré de saturation qui varie de 9 à 6%. On peut aussi constater que la perméabilité des mortiers PB3, PB6 et BC2 varie d'un ordre de grandeur entre deux degrés de saturation alors que pour le reste des matériaux, la perméabilité varie mais dans le même ordre de grandeur.

La variation de la perméabilité entre les différentes températures est attribuée à une baisse du degré de saturation mais peut être due aussi à l'apparition de microfissures qui favorisent la perméabilité à l'air.

Pour s'affranchir du degré de saturation dans la suite de notre étude, nous avons choisi de travailler avec la perméabilité mesurée pour un degré de saturation supposé égal à 0 (après un séchage à 105°C). On présente sur la figure 3.25 les perméabilités intrinsèques de l'ensemble des matériaux étudiés.

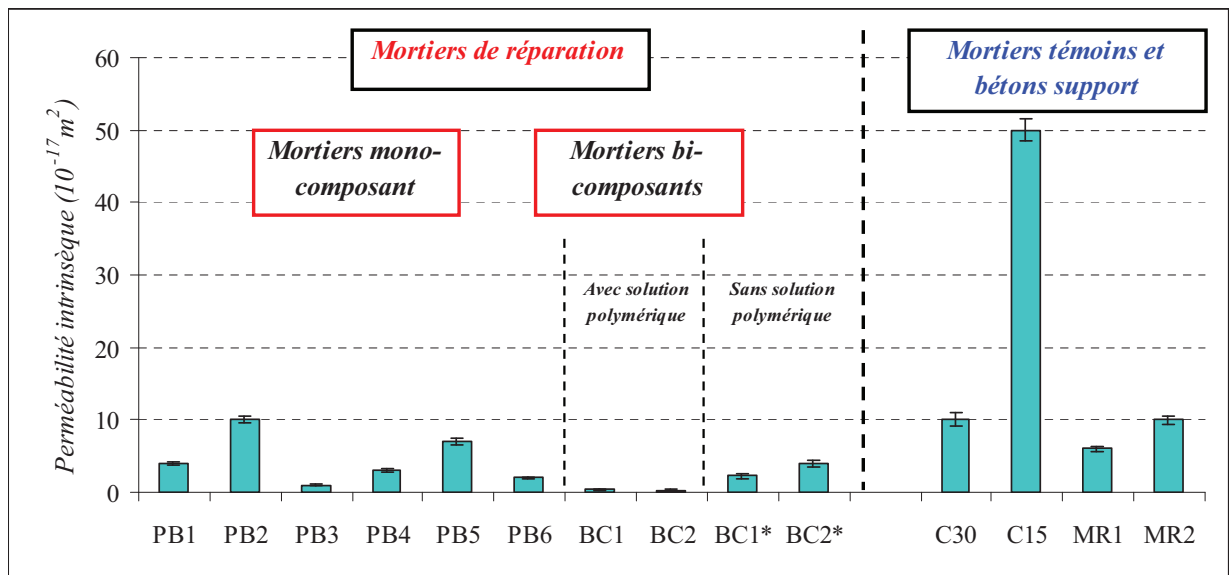


Figure 3.25 : Perméabilité intrinsèque des matériaux étudiés

Observations

En comparant les deux familles de mortier, on peut dire que les perméabilités intrinsèques des mortiers BC sont inférieures à celles des mortiers PB d'un ordre de grandeur. Les mortiers BC1 et BC2 ont des perméabilités intrinsèques estimées à $0,4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ alors que pour les mortiers PB elles varient entre $1 \cdot 10^{-17}$ et $10 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Les mortiers PB3 et PB6 présentent les plus faibles perméabilités des mortiers PB alors que les mortiers PB2 et PB5 les plus élevées. Les perméabilités des mortiers BC* et MR se rapprochent de celles des mortiers PB. Quant au béton C15, il présente la perméabilité intrinsèque la plus élevée des matériaux étudiés avec une valeur supérieure de un à deux ordres de grandeurs.

Analyses

Au regard des résultats, on constate que les perméabilités intrinsèques des mortiers de réparation sont liées à leurs structures poreuses. En effet, les mortiers BC qui se caractérisent par une structure poreuse très fine présentent les plus faibles perméabilités intrinsèques. Le béton C15 qui a la structure poreuse la plus grossière présente une perméabilité intrinsèque très élevée. Enfin, les valeurs intermédiaires de perméabilité intrinsèque ont été obtenues pour les mortiers PB et les mortiers de référence.

Les données disponibles dans la littérature montrent que la perméabilité intrinsèque est liée au produit de la porosité et de la racine carré du diamètre moyen des pores [Garboczi, 91], [Aït-Mokhtar, 99], [Amiri, 05], [Hamami, 12]. Pour mettre en évidence la relation qui puisse exister entre porosité, taille des pores et perméabilité, nous avons étudié l'évolution de la perméabilité intrinsèque en fonction du produit pD^2 , où p représente la porosité au mercure et D le diamètre moyen des pores (figure 3.26). On constate qu'une relation linéaire lie la perméabilité intrinsèque et le produit pD^2 . Plus ce dernier augmente et plus la perméabilité intrinsèque augmente aussi. On peut observer aussi que certains points s'écartent de la courbe de tendance. Ceci explique que la perméabilité intrinsèque est liée à d'autres facteurs qui caractérisent la structure poreuse comme la tortuosité et le degré d'interconnexion des pores.

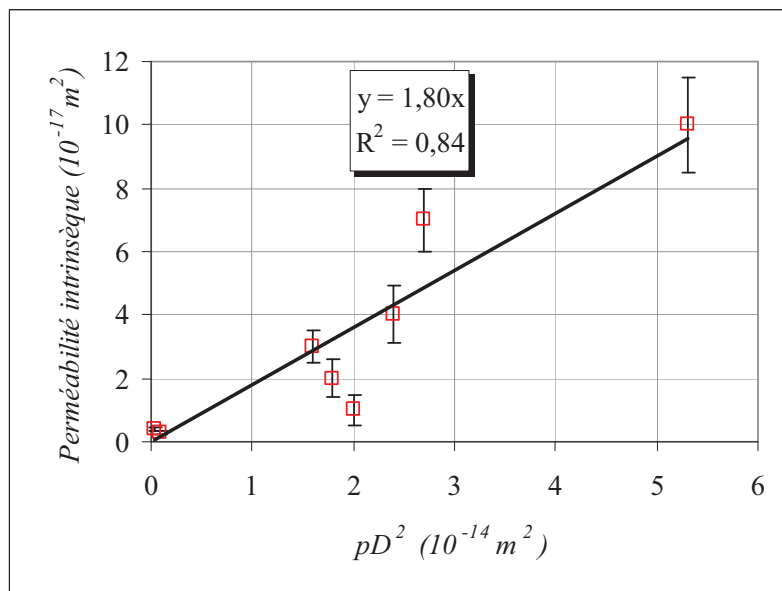


Figure 3.26 : Évolution de la perméabilité intrinsèque des mortiers de réparation en fonction du produit de la porosité par le diamètre moyen des pores.

Conclusion

A travers cette étude, on constate que les mortiers PB ont un comportement similaire au béton C30 et aux mortiers témoins vis-à-vis de la perméabilité à l'air. A l'inverse, les mortiers BC présentent une très bonne résistance à la pénétration de l'air. Cette performance est due, rappelons-le, au fort taux de polymères qui contribue à affiner la structure poreuse et la rendre géométriquement plus complexe.

2.4 Diffusion des chlorures

Les essais de migration ont été réalisés sur des échantillons saturés après 40 jours de cure en salle humide. Les coefficients de diffusion effectifs ont été déterminés en régime stationnaire en utilisant l'équation 2.11 du chapitre 2.

Les résultats des essais de migration pour tous les matériaux étudiés sont présentés dans la figure 3.27.

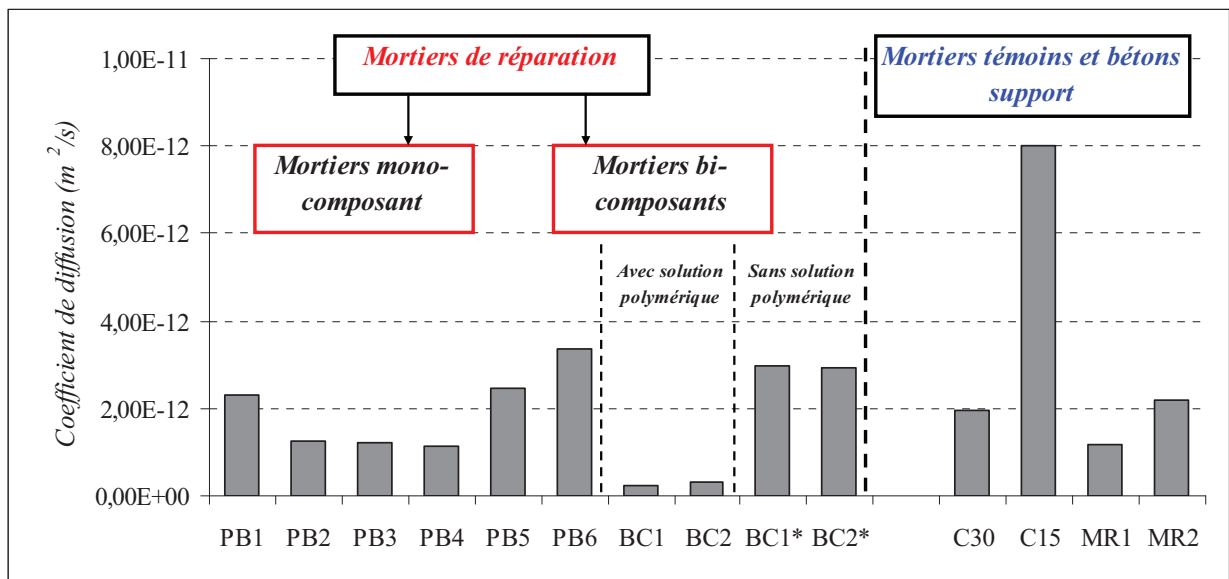


Figure 3.27 : Coefficients de diffusion effectifs des matériaux étudiés

Observations

On peut constater que les mortiers bi-composants présentent des coefficients de diffusion plus faibles d'un ordre de grandeur que ceux des mortiers mono-composants. Les coefficients de diffusion de ces derniers peuvent être séparés en deux catégories. La première catégorie est celle des mortiers PB2, PB3 et PB4 qui ont presque les mêmes coefficients de diffusion.

La deuxième catégorie est celle des mortiers PB1, PB5 et PB6 où le coefficient de diffusion est deux à trois fois plus élevé que celui des matériaux de la première catégorie.

On peut constater que le remplacement de la solution polymérique par de l'eau a conduit à une augmentation du coefficient de diffusion de dix fois (mortiers BC*).

Nous n'avons pas enregistré de grande différence entre les mortiers de réparation mono-composants et les mortiers témoins. Le mortier MR2 se caractérise par un coefficient de diffusion presque identique à celui du mortier PB1. Le mortier MR1 présente quant à lui le même coefficient de diffusion que les derniers mortiers PB2, PB3 et PB4.

Concernant les bétons, le béton C15 présente le plus grand coefficient de diffusion des matériaux étudiés. Quant au béton C30, son coefficient de diffusion se trouve dans la même plage des mortiers PB (mono-composant).

Analyses

Le coefficient de diffusion effectif des mortiers de réparation à l'état saturé est très influencé par le rapport E/C, comme le montre la figure 3.28.

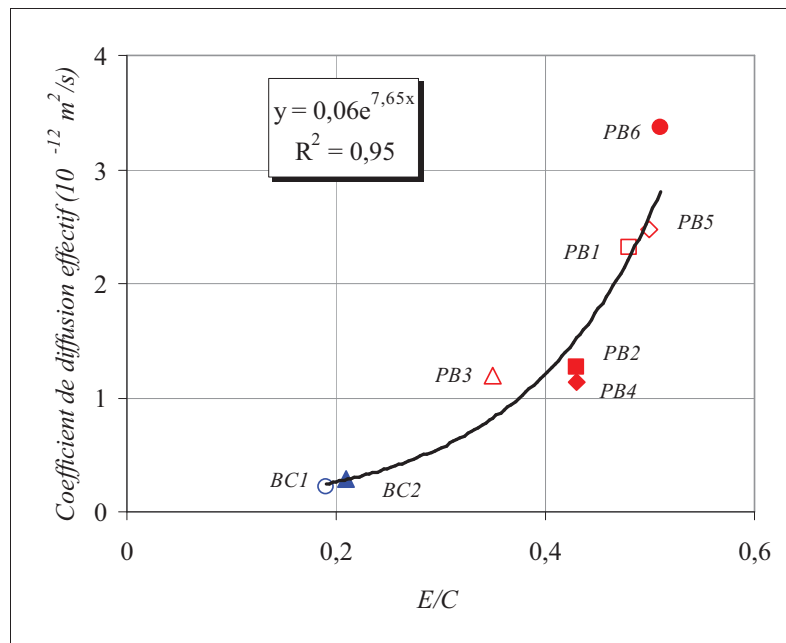


Figure 3.28 : Relation entre coefficient de diffusion effectif et le rapport E/C

On constate que le rapport E/C et le coefficient de diffusion effectif sont corrélés par une relation exponentielle. Pour un rapport E/C autour de 0,2 le coefficient de diffusion est faible et atteint un ordre de grandeur de 10^{-13} .

Pour un rapport E/C compris entre 0,35 et 0,43, les mortiers ont presque le même coefficient de diffusion avec un ordre de grandeur de 10^{-12} . Enfin, à partir d'un rapport E/C égal à 0,48, le coefficient de diffusion augmente de deux fois.

Concernant l'influence du rapport P/C, la figure 3.29 montre la relation entre coefficient de diffusion et rapport P/C.

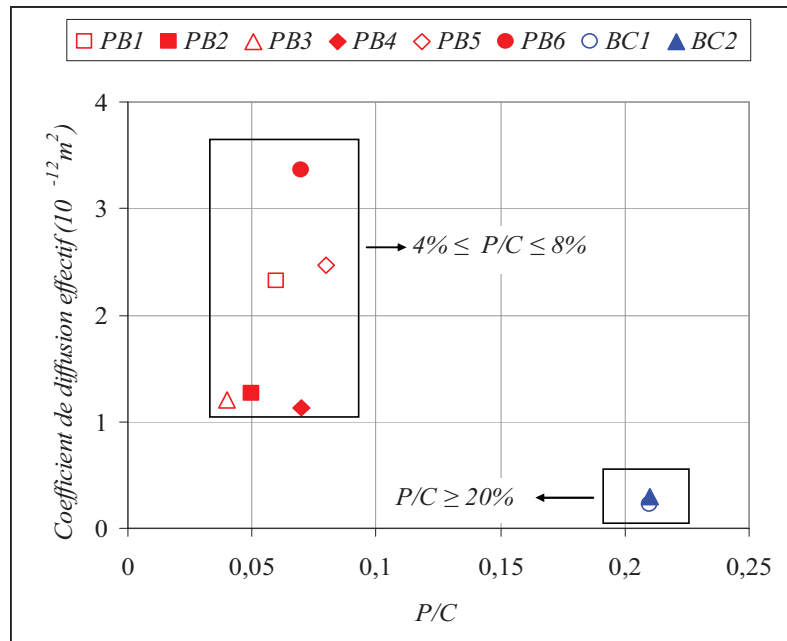


Figure 3.29 : Relation entre coefficient de diffusion effectif et le rapport P/C

On peut constater que des valeurs du rapport P/C supérieures à 20% contribuent à ralentir la diffusion des chlorures. Par contre, les valeurs comprises entre 4 et 8% n'ont pas une grande influence sur le coefficient de diffusion effectif et c'est le rapport E/C qui a une influence prédominante sur le coefficient de diffusion (figure 3.28).

On peut observer à travers la figure 3.30 qu'il n'y a pas de relation directe entre la porosité et le coefficient de diffusion effectif. Pour une même porosité on peut avoir des coefficients de diffusion différents. A titre d'exemple, les mortiers PB2, PB3, PB5 et PB6 ont des porosités proches mais des coefficients de diffusion différents. Ou encore, les mortiers BC ont des porosités proches de celles des mortiers PB mais leurs coefficients de diffusion effectifs sont plus faibles d'un ordre de grandeur.

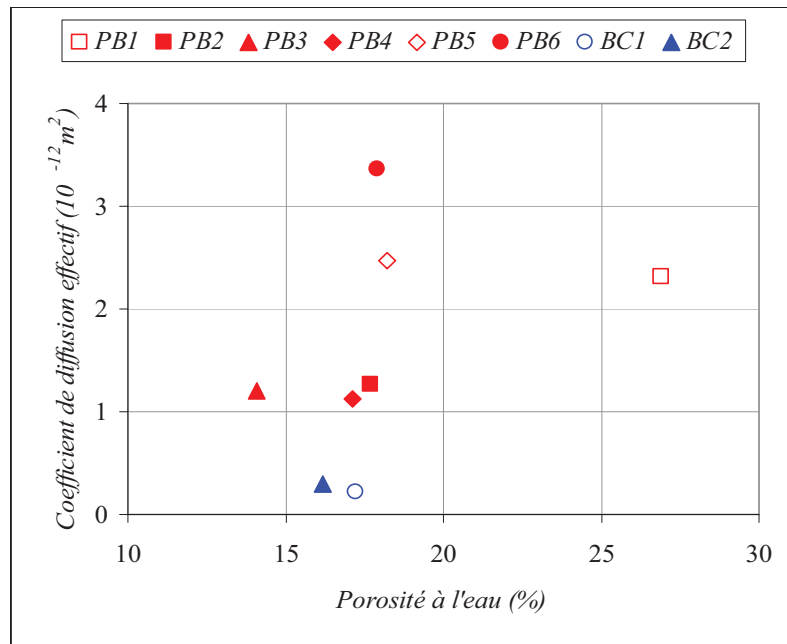


Figure 3.30 : Relation entre coefficient de diffusion effectif et porosité à l'eau

Cette différence est expliquée par l'influence d'autres paramètres qui caractérisent la structure poreuse comme la taille des pores et leurs géométries. En effet, au regard du diamètre moyen des pores (figure 3.31), on peut constater une meilleure corrélation avec le coefficient de diffusion et la taille des pores. En général, plus le diamètre moyen des pores augmente plus la diffusion des chlorures augmente. Cependant, les matériaux PB présentent presque la même famille de pores mais certains d'entre eux ont un coefficient de diffusion différent. Ceci s'explique par l'entrée en jeu d'un autre paramètre qui est le degré d'interconnexion du réseau poreux. A titre d'exemple le mortier PB6 présente le même diamètre moyen que les mortiers PB2, PB3 et PB4 mais son coefficient de diffusion est 3 fois plus grand.

Cette différence est due à un rapport E/C plus élevé qui contribue à augmenter le degré d'interconnexion.

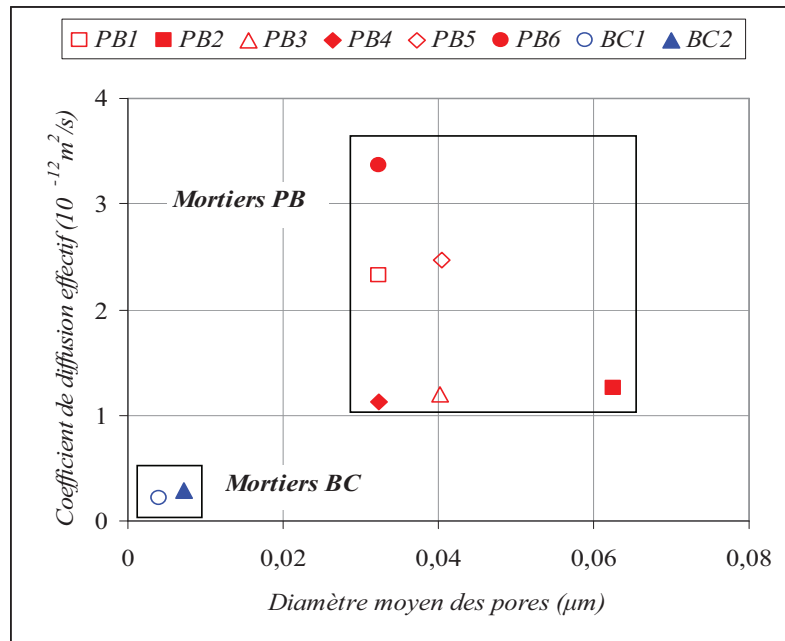


Figure 3.31 : Relation entre coefficient de diffusion effectif et les caractéristiques de la structure poreuse

Conclusion

Au regard de ces résultats, on peut dire que la structure poreuse a une grande influence sur la diffusion des chlorures en milieu saturé. Une diminution de dix fois du diamètre moyen des pores conduit à diminuer le coefficient de diffusion d'un ordre de grandeur. On peut dire aussi qu'un taux de polymère compris entre 4 et 8% ne permet pas d'obtenir une grande diminution de la diffusion des chlorures en milieu saturé.

Il faut surtout noter que les paramètres étudiés (taux de polymères et rapport E/C) agissent sur la porosité et le diamètre moyen des pores en plus de leur action sur la sorptivité hydrique de ce type de mortier. Cet ensemble influence les propriétés de transfert, au premier desquelles se trouve le coefficient de diffusion des chlorures.

2.5 Synthèse des propriétés de transfert et index de durabilité

Nous avons mis en évidence à travers cette étude que les propriétés physiques, mécaniques et les indicateurs de durabilité des mortiers de réparation variaient principalement en fonction de la quantité et la nature des solutions polymériques.

Présents dans le réseau poreux des mortiers, les polymères affinent le réseau poreux et réduisent la pression capillaire, ce qui influence les propriétés de transferts de ces matériaux. Nous avons vu aussi que la complexité des formulations de ces matériaux rendait toute interprétation délicate tant les paramètres pouvant influencer les propriétés physiques et de transferts interagissent les uns sur les autres.

Les indicateurs de durabilité obtenus à travers ces essais nous permettent de conclure que les mortiers bi-composants sont les plus performants car ils présentent un faible coefficient de diffusion effectif, une faible absorption capillaire et une bonne perméabilité au gaz.

Ceci est dû en grande partie à leur taux élevé de polymère qui est quatre fois plus grand que celui des mortiers mono-composant. Un taux élevé en polymère conduit à réduire le diamètre moyen des pores et diminuerait peut être leur connectivité.

Concernant les mortiers mono-composant, le mortier auto plaçant (PB3) se différencie des autres par une faible absorption capillaire et une faible perméabilité intrinsèque. Cependant, son coefficient de diffusion des chlorures reste semblable à celui des mortiers PB2 et PB4. L'amélioration de certaines propriétés est certainement due à l'association du polymère avec un super plastifiant. Enfin, les résultats ne permettent pas de tirer des conclusions sur le mortier le moins performant.

Aussi, pour quantifier les plus values ou les moins values des mortiers de réparation par rapport au béton de référence C30 et au mortier normalisé MR1, nous avons réalisé une approche performantielle en introduisant des index de durabilité [Kaid, 09]. Ces index représentent les rapports entre les indicateurs de durabilité des mortiers de réparation et ceux du béton et du mortier normalisé, et ils sont définis comme suit : I_{AC} , I_P , I_{Cl} , respectivement index d'absorption capillaire, index de perméabilité et index de diffusion des chlorures. Ils sont calculés en utilisant l'équation 3.3 :

$$I_D = \frac{I_{référence}}{I_{mortier}} \quad (Eq\ 3.3)$$

Où :

I_D : l'index de durabilité (I_{CA} , I_P ou I_{Cl})

$I_{référence}$: l'indicateur de durabilité du matériau référence

$I_{mortier}$: l'indicateur de durabilité du mortier de réparation

Ces index sont définis de telle façon que plus ils sont élevés, plus les performances des mortiers de réparation sont meilleures par rapport à la référence.

On présente ainsi sur les figures 3.32 et 3.33 les résultats des index de durabilité pour chaque mortier de réparation par rapport au béton C30 et au mortier MR1.

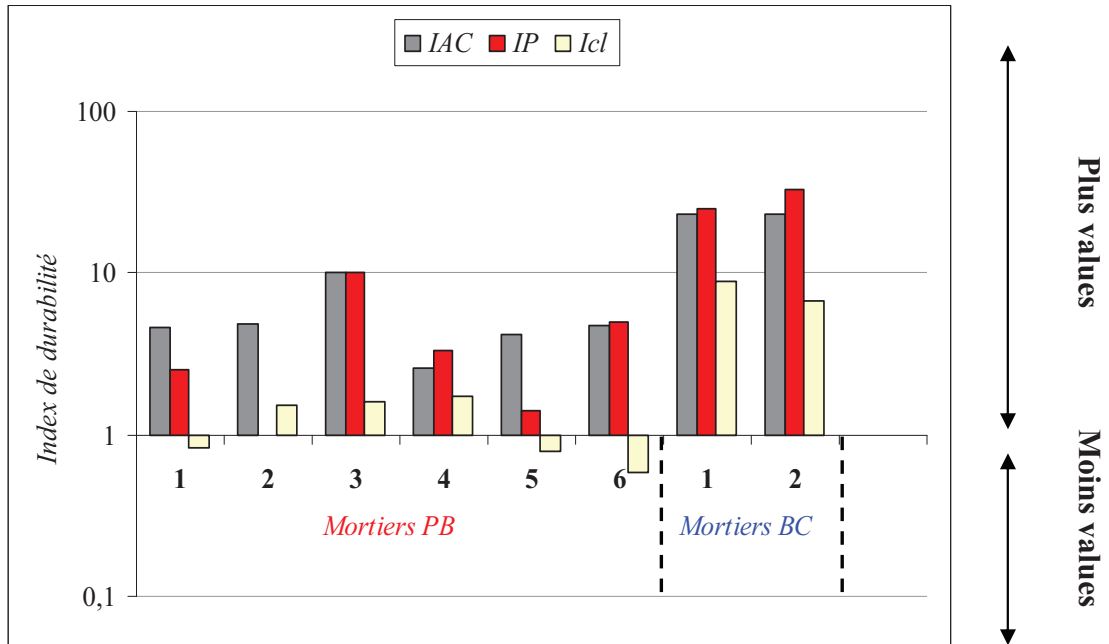


Figure 3.32 : Index de durabilité des mortiers de réparation par rapport au béton C30

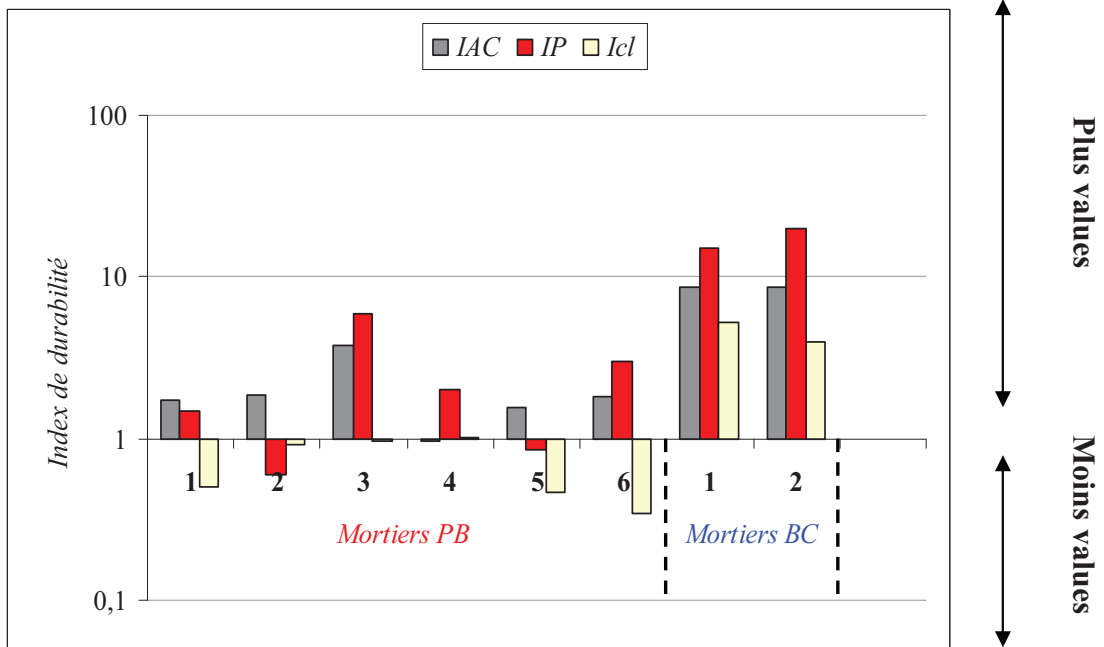


Figure 3.33 : Index de durabilité des mortiers de réparation par rapport au mortier MR1

Les résultats de cette approche performantielle nous montre que les mortiers BC, PB3 et PB4 sont plus performants que le béton de référence C30 puisque tous leurs index sont supérieurs à l'index de référence.

Concernant les autres mortiers, on trouve que les mortiers PB1, PB5 et PB6 ont un index de chlorures plus faible que celui du béton référence. Le mortier PB2 présente un indice de perméabilité équivalent à la référence.

Le faible index des chlorures du mortier PB1 est certainement dû à sa forte porosité qui est de 27% comparée à celle du béton qui est égale à 12%. Pour les mortiers PB5 et PB6, un faible index de chlorures peut être attribué à une plus grande porosité qui est de 18% pour ces deux mortiers et aussi à un plus grand E/C pour le mortier PB6. En ce qui concerne le mortier PB2, vu sa distribution porale plus fine que celle du béton et son plus faible rapport E/C (qui est de 0,43 comparé à celui du béton qui est de 0,5), le faible index de perméabilité peut être attribué à l'apparition de microfissures lors du séchage.

Au regard maintenant de la figure 3.33 on constate que seuls les mortiers BC et PB3 sont plus performants que le mortier MR1 car leurs index sont supérieurs à l'index de référence. On constate aussi que tous les mortiers de réparation présentent un index d'absorption capillaire supérieur à l'index de référence. Ceci est dû en grande partie à la présence du polymère qui contribue à réduire la pression capillaire. Concernant les autres index, les mortiers PB2 à PB4 présentent des performances équivalentes quant à la diffusion des chlorures. En revanche, les PB2 et PB5 sont légèrement plus perméables que le mortier de référence.

En comparant les deux familles de mortiers de réparation (PB et BC) et au regard des index de diffusion de chlorures et de perméabilité au gaz, on constate une différence nette de comportement entre les PB et les BC. Pour ces derniers, on constate que la microstructure et donc l'apport massif de polymère a un effet substantiel sur ces deux indicateurs de durabilité. De la même manière, les index d'absorption capillaire sont aussi marqués par de meilleures performances des mortiers BC ou la fine distribution porale et la réduction des pressions capillaires induite par une forte proportion de polymère réduisent fortement l'absorption de l'eau. Il faut noter aussi le bon comportement du mortier PB3 vis à vis de l'absorption d'eau. Ceci est dû à l'association d'un super-plastifiant et du polymère qui contribuent à réduire la porosité et le degré d'interconnexion des pores.

En résumé, les mortiers de réparation BC et PB3 présentent de bonnes performances intéressantes dans la protection des armatures contre la corrosion. Les performances des autres mortiers peuvent être améliorées par une révision de leur formulation, notamment par la diminution de la quantité d'eau et par l'emploi d'un super-plastifiant. Au regard des résultats et des formulations des mortiers, on peut conclure qu'il est préférable d'opter pour

des mortiers fortement dosés en polymères. Ces derniers modifient les propriétés de transferts en les réduisant par des actions physiques.

3 Propriétés de transfert à l'interface mortier-support

L'étude précédente a bien montré que les mortiers de réparation avaient des propriétés suffisantes pour ralentir de façon notable le processus de diffusion et donc de corrosion. Cependant, il ne faut pas occulter le fait qu'un bon mortier de réparation n'est pas performant s'il n'adhère pas efficacement à la structure.

Autrement dit, il est fort probable que l'interface mortier/béton soit un facteur de risque dans la durabilité de la réparation par la création de chemins préférentiels. C'est pourquoi, nous avons voulu évaluer ce risque à travers des essais d'absorption capillaire et de migration, complétés d'analyses par microscopie électronique pour analyser l'état d'interface mortier/béton.

Pour des raisons de temps d'essai et d'analyses, quatre des huit mortiers ont été choisis selon des critères de performances, à savoir un des mortiers les plus performants (BC1), un autre des moins performants (PB5), un mortier intermédiaire (PB4) et enfin le mortier autoplaçant (PB3), tout en utilisant deux bétons supports C15 et C30. La procédure de fabrication des échantillons mortier/béton a fait l'objet d'une présentation dans le chapitre deux.

Chaque échantillon a été fabriqué avec un mortier et un béton support (les surfaces des deux matériaux étaient identiques). A la fin, huit échantillons différents (mortier-béton) ont été confectionnés. Pour tous les échantillons de béton à réparer, nous avons pris le parti de travailler avec une surface rugueuse unique et identique.

3.1 Diffusion des chlorures

Dans la figure 3.34 sont présentés les coefficients de diffusions effectifs déterminés expérimentalement, et ceux déterminés théoriquement à l'aide de l'équation 3.4. Il faut rappeler que la surface du béton est égale à celle du mortier.

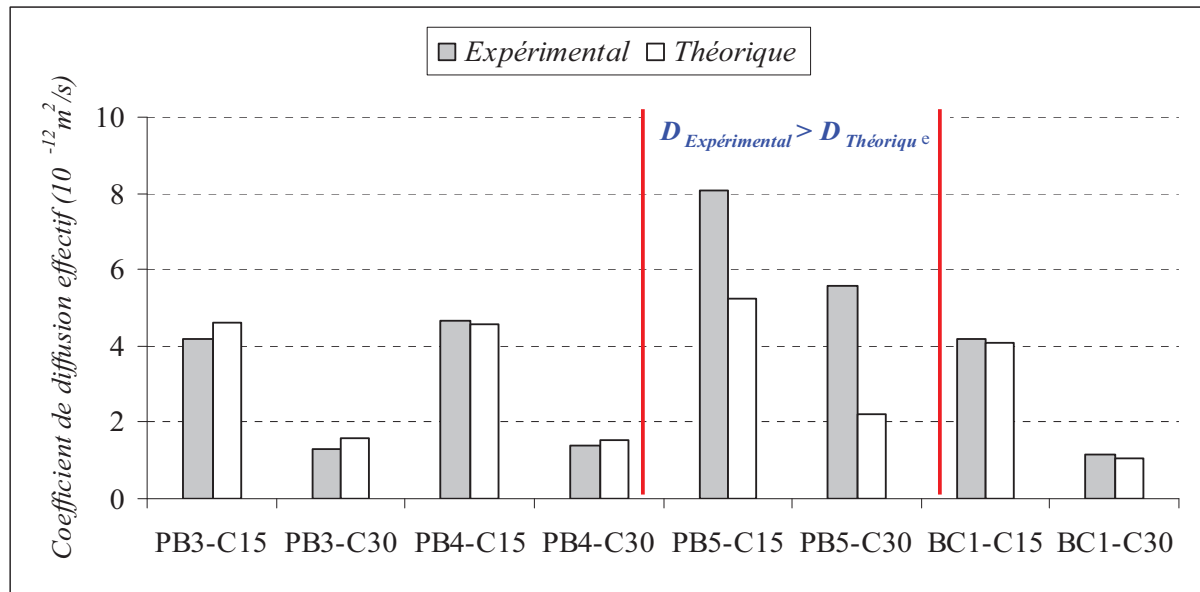
$$D_{Théorique} = \frac{D_{béton} + D_{mortier}}{2} \quad (Eq\ 3.4)$$

Avec :

$D_{Théorique}$: le coefficient de diffusion effectif théorique (m^2/s)

$D_{béton}$: le coefficient de diffusion effectif du béton (m^2/s)

$D_{mortier}$: le coefficient de diffusion effectif du mortier de réparation (m^2/s)



Figures 3.34 : Coefficients de diffusion effectifs des échantillons mortier-béton

Observations

On peut constater que les résultats théoriques et expérimentaux sont assez proches pour les échantillons fabriqués avec les mortiers PB3, PB4 et BC1. Ceci laisse penser que la migration s'est faite seulement à travers le béton et le mortier, sans qu'il y ait un autre chemin de migration dans la zone d'interface. Contrairement aux autres échantillons, l'ensemble béton-mortier PB5 présente un écart entre résultats théoriques et expérimentaux. Cette différence laisse penser que la migration s'est faite aussi dans la zone d'interface.

Analyses

La migration dans les échantillons avec interface se fait à travers trois zones comme le montre la figure 3.35. À travers le béton, à travers le mortier et peut aussi se faire à travers la zone d'interface. Dans ce cas, la migration peut être la conséquence d'une mauvaise adhérence entre béton support et mortier de réparation. Une mauvaise adhérence est à l'origine de l'apparition de fissurations dans la zone d'interface, ceci pourrait favoriser d'avantage la migration des chlorures. La différence entre résultats théoriques et expérimentaux pour les échantillons béton/PB5 peut donc être attribuée à l'apparition de fissurations dans la zone d'interface.

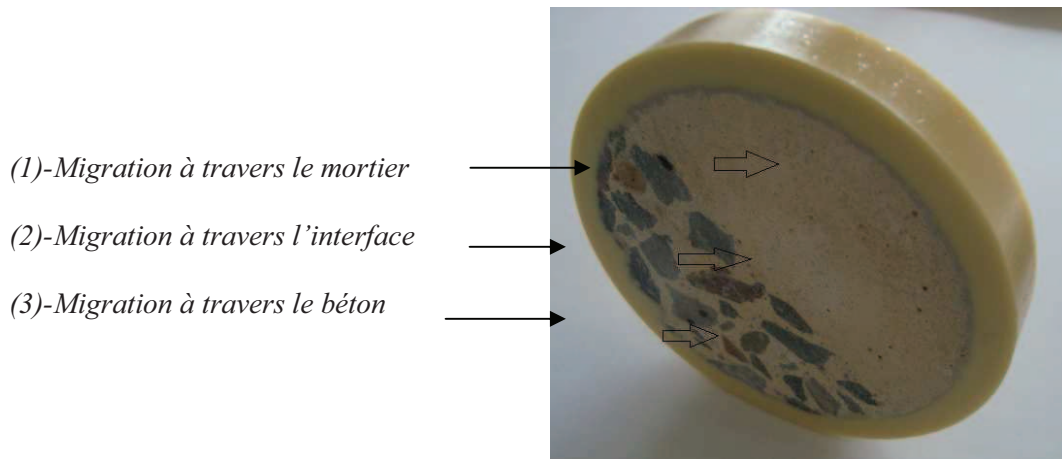


Figure 3.35 : Echantillon béton-mortier de réparation pour l'essai de migration

Pour observer l'état d'interface dans les échantillons fabriqués avec le mortier PB5, on a eu recours à la microscopie électronique à balayage. Pour faciliter l'identification de l'interface, nous avons découpé les disques en utilisant une scie circulaire. Un exemple des échantillons obtenus est présenté sur la figure 3.36. L'échantillon à analyser a été poli et la zone d'interface a été identifiée en utilisant le microscope optique et du ruban adhésif. Cette procédure a été choisie car il était difficile d'identifier l'interface avec la méthode présentée dans le chapitre 2 (voir figure 2.5).

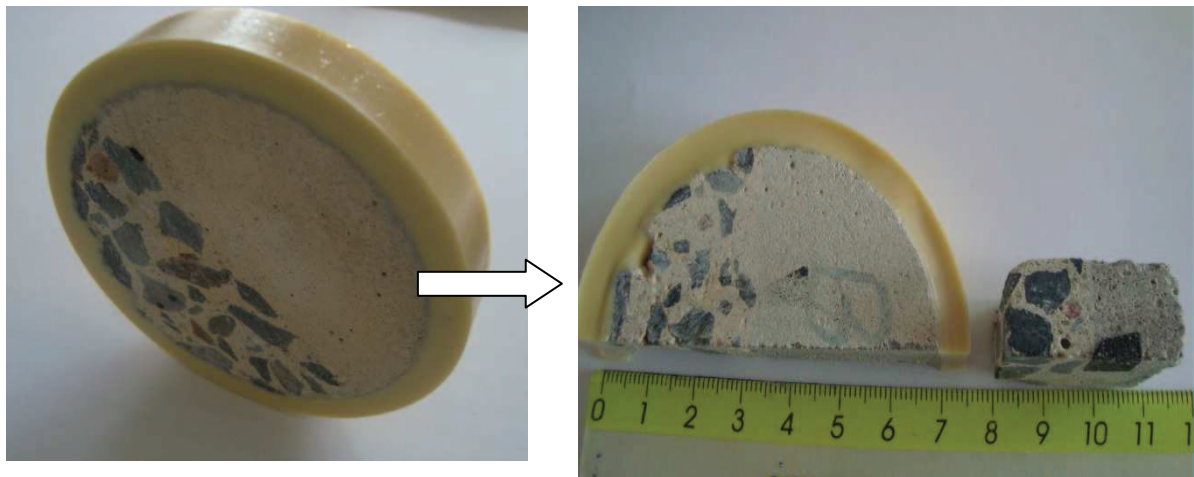


Figure 3.36 : Préparation de l'échantillon pour l'analyse au MEB de l'interface

L'analyse au MEB des échantillons PB5-C30 et PB5-C15 a révélé la présence de fissures sur toute la zone d'interface. On présente sur les figures 3.37 et 3.38 des exemples d'observations.

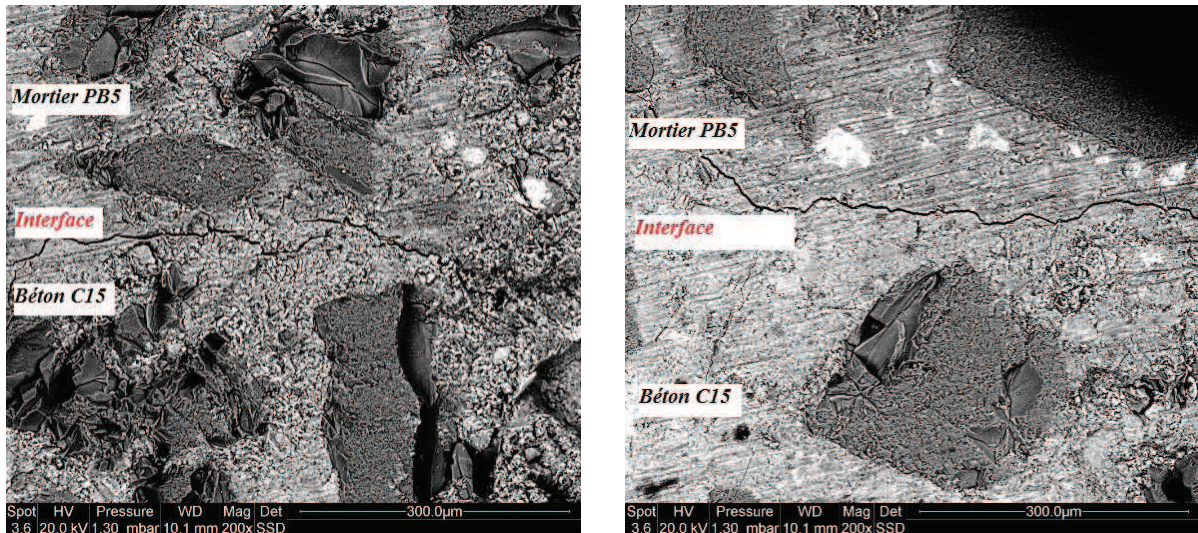


Figure 3.37 : Images MEB de deux zones d'interface dans l'échantillon PB5-C15, grossissement 200×

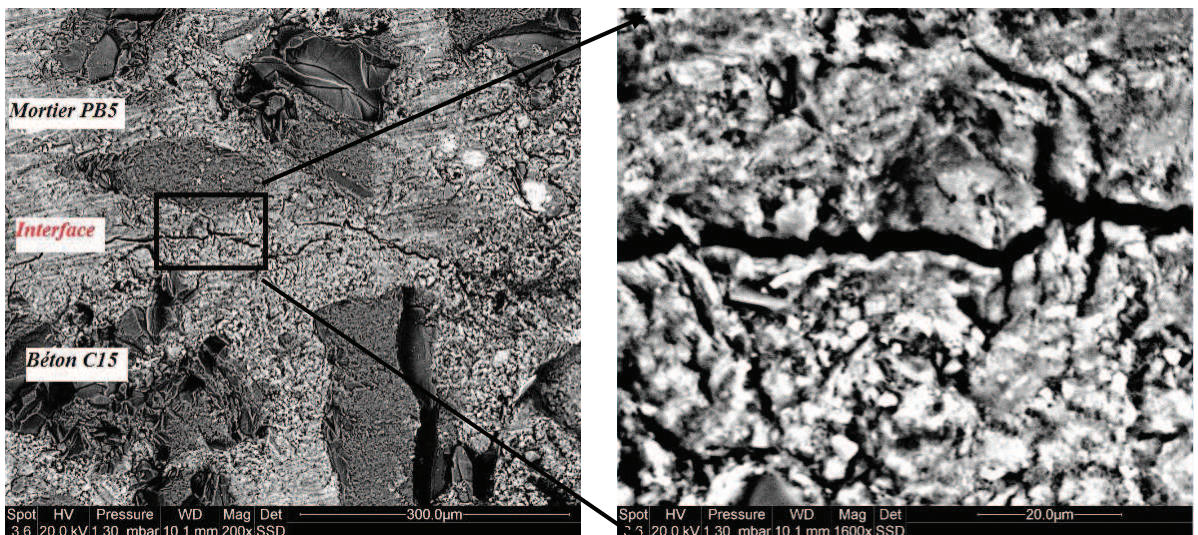


Figure 3.38: Image MEB d'une zone interface dans l'échantillon PB5-C15, grossissement 200 et 1600×

La présence de fissures au niveau de l'interface PB5/ béton explique l'écart entre résultats expérimentaux et théoriques. Ces fissures contribuent donc à accélérer la diffusion des chlorures. Au regard de la figure 3.38, on peut mesurer l'épaisseur de la fissure qui est estimée à 5 µm. Cette valeur est largement supérieure aux diamètres des pores présents dans les deux bétons (C15 et C30) et dans le mortier PB5. Ces fissures sont donc un chemin préférentiel pour la diffusion des chlorures.

D'après Do [Do, 03], la présence du polymère dans le mortier de réparation, contribue à améliorer son adhérence avec le béton support.

La principale raison de l'amélioration de l'adhérence provient des dispersions polymériques qui pénètrent dans les couches superficielles du béton support et créent ainsi une adhésion mécanique avec le support (figure 3.39) ou bien, par la création de liaisons chimiques et mécaniques grâce à la formation d'un film polymère à l'interface mortier de réparation-béton support.

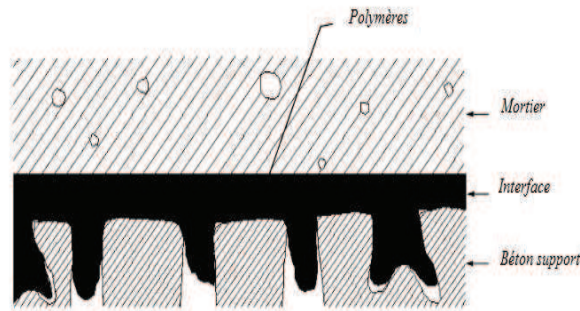


Figure 3.39 : Illustration de l'adhérence entre un mortier modifié par des polymères et un béton support [Do, 03]

Pour analyser l'état d'interface des autres échantillons et mieux comprendre l'effet du polymère sur l'interface mortier/béton, d'autres échantillons ont été préparés et analysés au MEB. Contrairement aux échantillons précédents (PB5/ béton), nous n'avons pas observé la présence de fissurations au niveau de l'interface. Nous avons aussi constaté la présence de particules polymériques tout au long de l'interface et parfois dans les pores de la zone d'interface. On présente sur les figures 3.40 à 3.43 des exemples d'images au MEB obtenues sur les échantillons PB3-C15 et BC1-C30, avec les analyses chimiques associées.

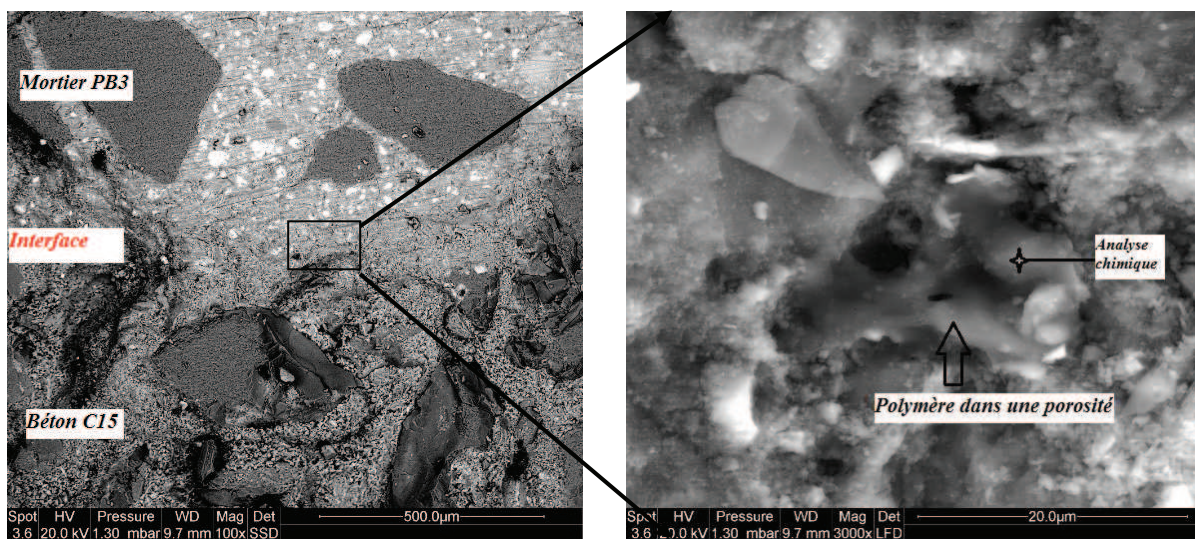
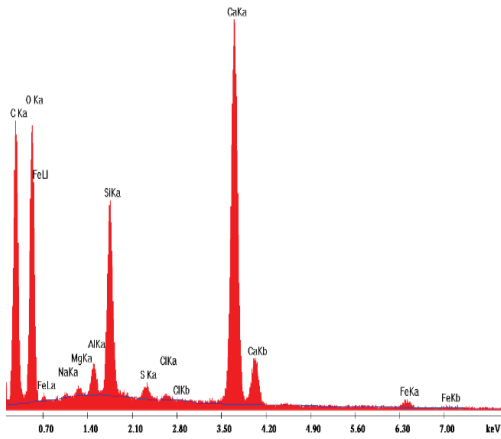


Figure 3.40 : Image au MEB d'une zone d'interface de l'échantillon PB3-C15 avec un effet de remplissage du polymère, grossissement 100 et 3000×



<i>Elément</i>	<i>% en masse</i>
C	42,68
O	34,30
Na	0,18
Mg	0,27
Al	0,86
Si	4,91
S	0,42
Cl	0,18
Ca	15,35
Fe	0,86
Total	100,00

Figures 3.41: Analyse chimique (EDS) du polymère dans l'échantillon PB3-C15

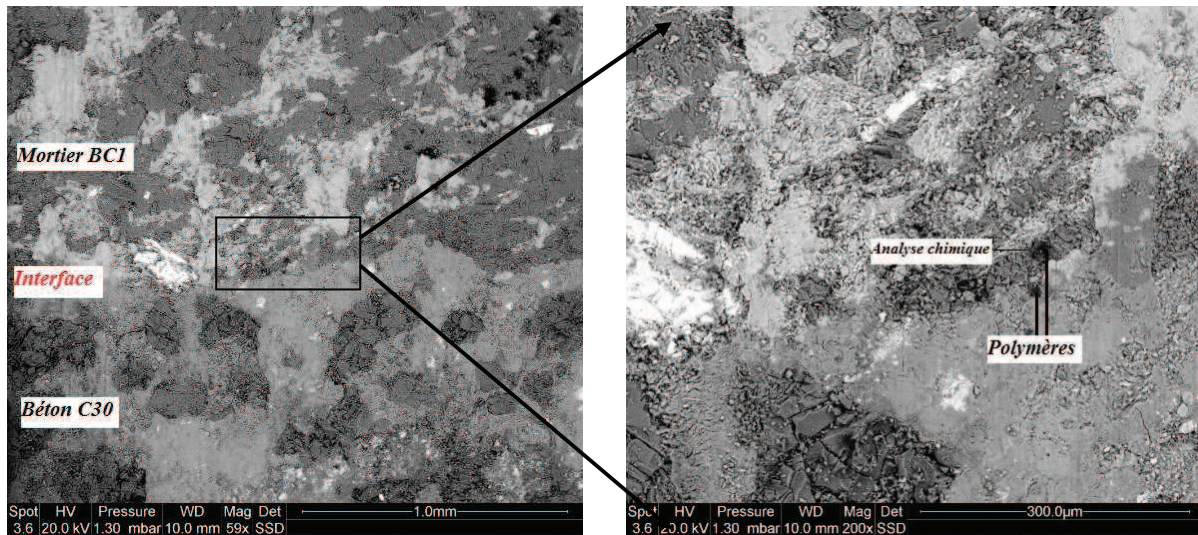
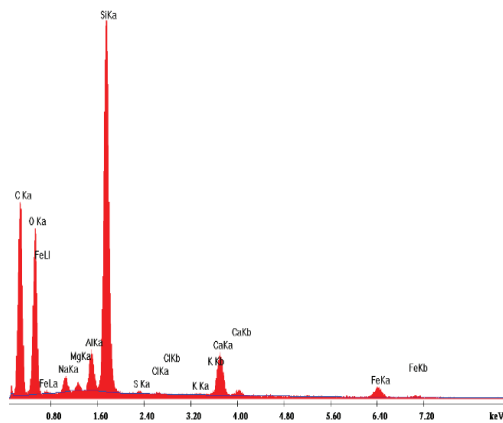


Figure 3.42 : Image au MEB d'une zone d'interface de l'échantillon BC1-C30 avec présence du polymère, grossissement 59 et 200×



<i>Elément</i>	<i>% en masse</i>
C	54,17
O	25,89
Na	0,83
Mg	0,31
Al	1,44
Si	12,92
S	0,12
Cl	0,10
K	0,12
Ca	2,43
Fe	1,67
Total	100,00

Figure 3.43: Analyse chimique du polymère dans l'échantillon BC1-C30

Sur toutes les interfaces analysées, nous avons observé la présence de polymères. Ces derniers pourraient donc renforcer l'adhérence entre le béton support et le mortier de réparation. Ils pourraient aussi colmater certaines régions des fissures par leur effet de remplissage.

Conclusion

La présence de fissures au niveau de l'interface PB5/béton explique l'écart entre résultats expérimentaux et théoriques. La présence de fissures contribue à accélérer la diffusion des chlorures. Cependant la présence des polymères, contribue à colmater certaines régions de la fissure et ralentir la diffusion des chlorures. Pour étudier l'influence de l'interface sur l'absorption d'eau, des essais d'absorption capillaires ont été effectués sur les mêmes matériaux. Les résultats sont présentés dans la partie 3.2.

3.2 Absorption capillaire

Les essais d'absorption capillaire ont été effectués après un séchage à une température de 80°C. Les échantillons sont des cylindres de 11 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur. Ils ont été fabriqués avec les bétons C15 et C30 et les mortiers PB3, PB4, PB5 et BC1. Les échantillons sont composés d'une partie de béton et d'une partie de mortier avec des surfaces égales comme le montre la figure 3.44. L'absorption capillaire se fait donc dans le mortier et dans le béton au même temps.



Figure 3.44 : Photographie d'un échantillon avec interface pour l'essai d'absorption capillaire

On présente sur les figures 3.45 à 3.48 les courbes d'absorption capillaire pour les mortiers, les bétons et l'association mortier-béton. Il faut signaler que ces essais ont été arrêtés au bout de 20 jours car l'absorption d'eau devenait trop lente.

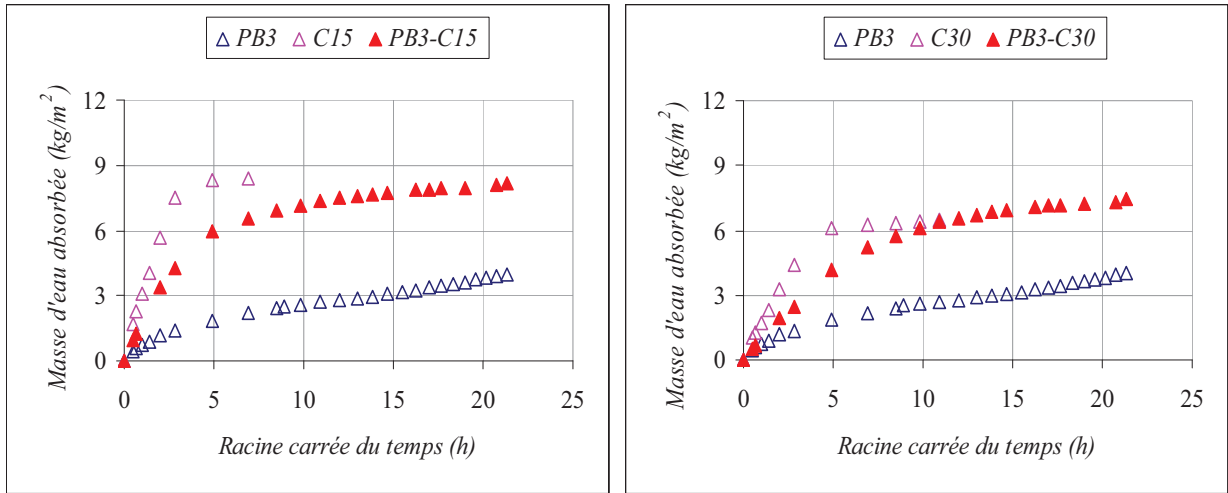


Figure 3.45 : Courbes de la masse d'eau absorbée en fonction du temps pour les échantillons PB3-béton

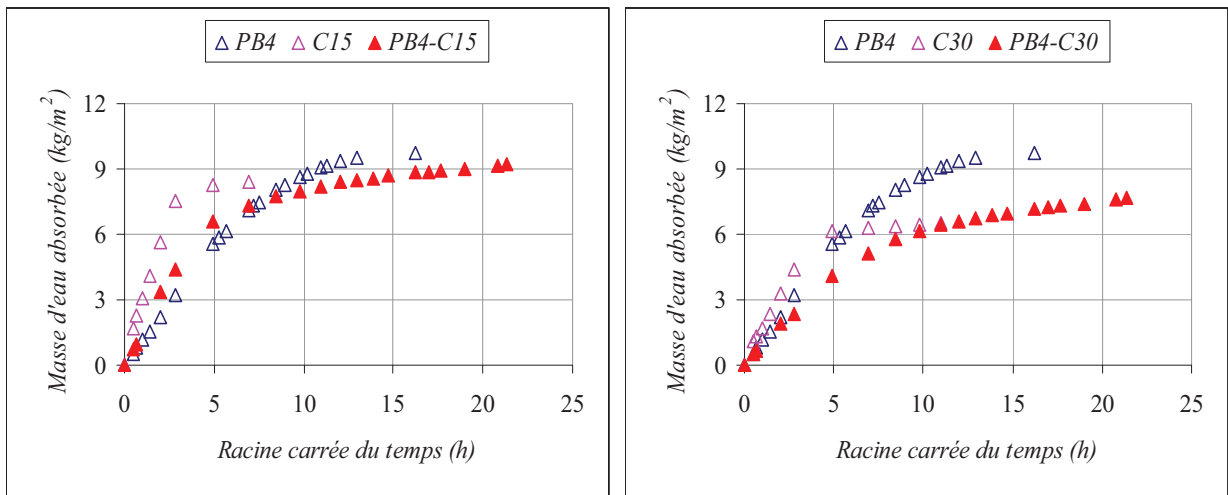


Figure 3.46 : Courbes de la masse d'eau absorbée en fonction du temps pour les échantillons PB3-béton

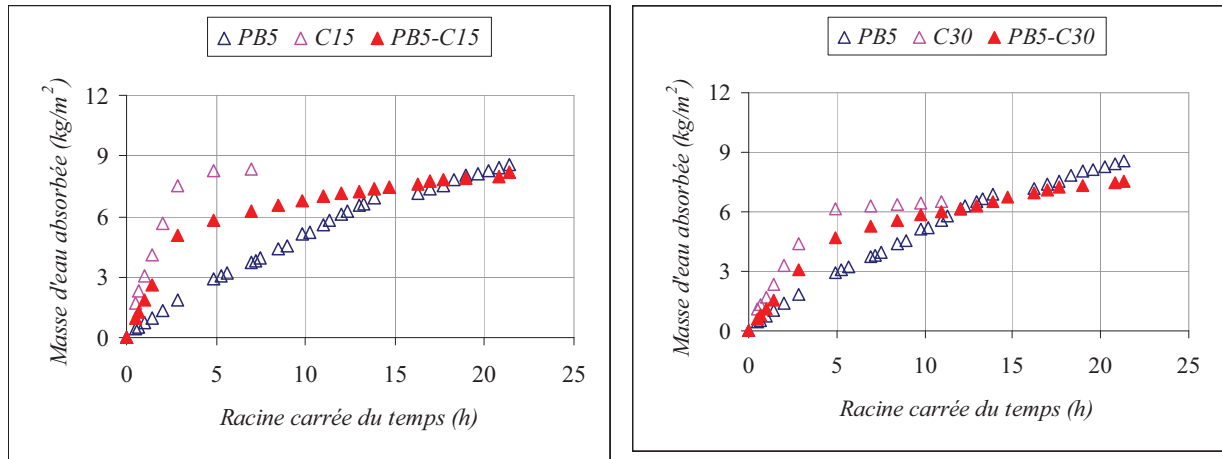


Figure 3.47 : Courbes de la masse d'eau absorbée en fonction du temps pour les échantillons PB3-béton

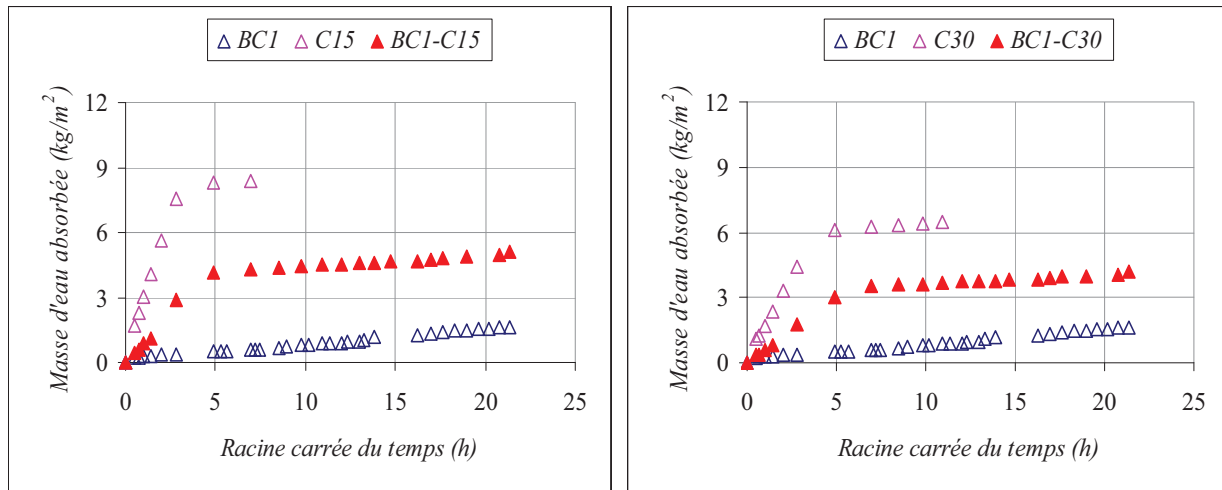


Figure 3.48 : Courbes de la masse d'eau absorbée en fonction du temps pour les échantillons PB3-béton

Observations

On peut constater que les courbes d'absorption d'eau des échantillons mortier-béton se situent entre les courbes du mortier et celles du béton. En général, ces courbes peuvent être décomposées en deux phases. Une première où l'absorption d'eau est rapide et une deuxième où l'absorption d'eau diminue de vitesse. Pour tous les échantillons, à l'exception de l'échantillon PB5-béton, la première phase dure 24 h pour les échantillons fabriqués avec le béton C15 et 72 h pour ceux fabriqués avec le béton C30. Pour l'échantillon PB5-C15, la première phase dure 8h alors que pour l'échantillon PB5-C30, elle dure 5 h.

Pour mieux comprendre le comportement de ce type de matériau mixte vis-à-vis de l'absorption capillaire, nous avons déterminé le coefficient d'absorption capillaire correspondant à chaque phase. Nous avons ensuite comparé ces coefficients à ceux des mortiers et des bétons.

Pour ce faire, les courbes d'absorption d'eau ont été modélisées en deux segments linéaires. Pour chaque segment, nous avons déterminé une pente. Cette dernière caractérise le coefficient d'absorption d'eau. Les courbes d'absorption d'eau modélisées en segments linéaires sont présentées sur les figures 3.49 à 3.52.

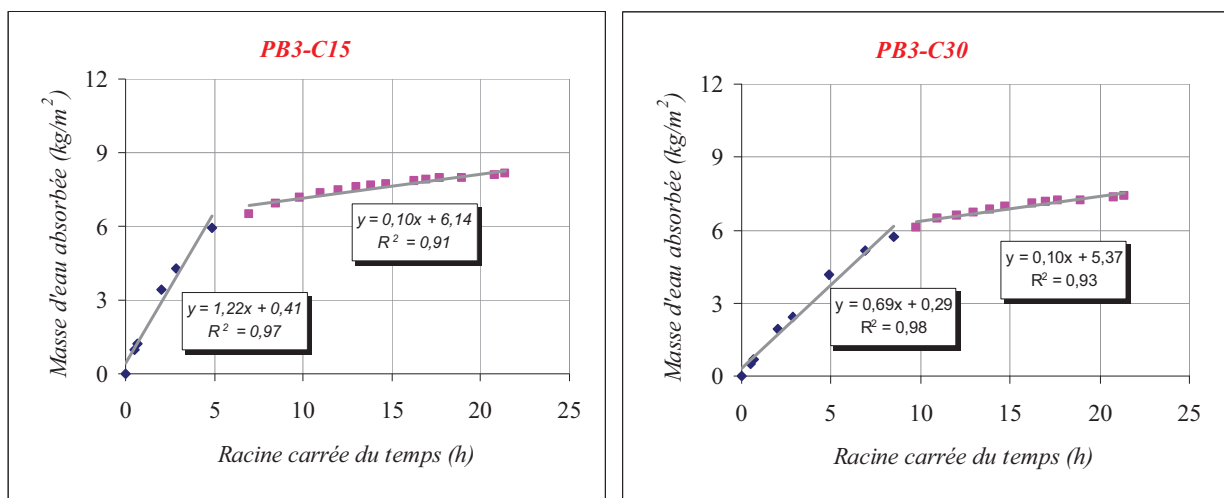


Figure 3.49 : Absorption capillaire des échantillons PB3-C15 et PB3-C30

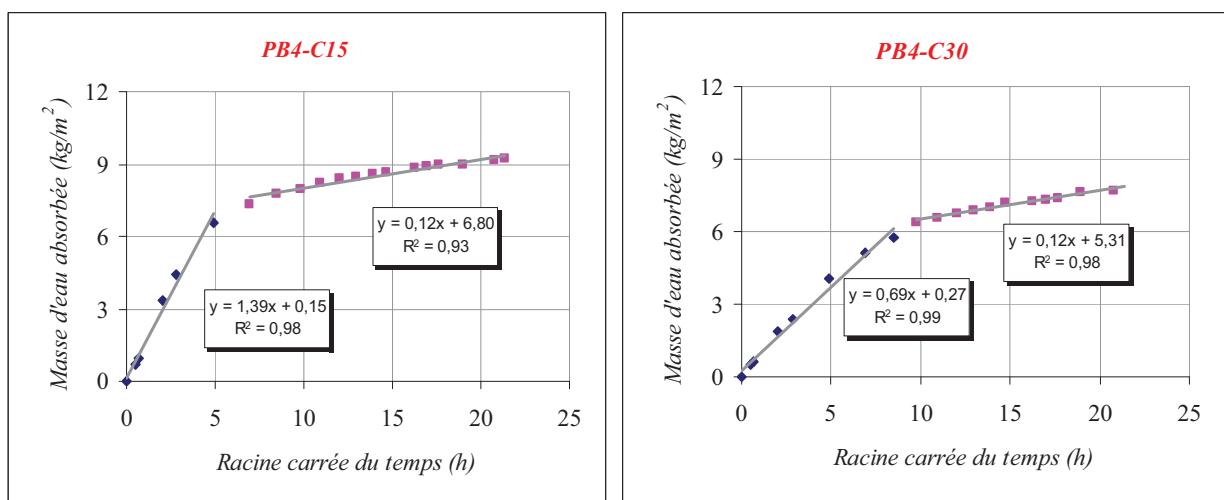


Figure 3.50 : Absorption capillaire des échantillons PB4-C15 et PB4-C30

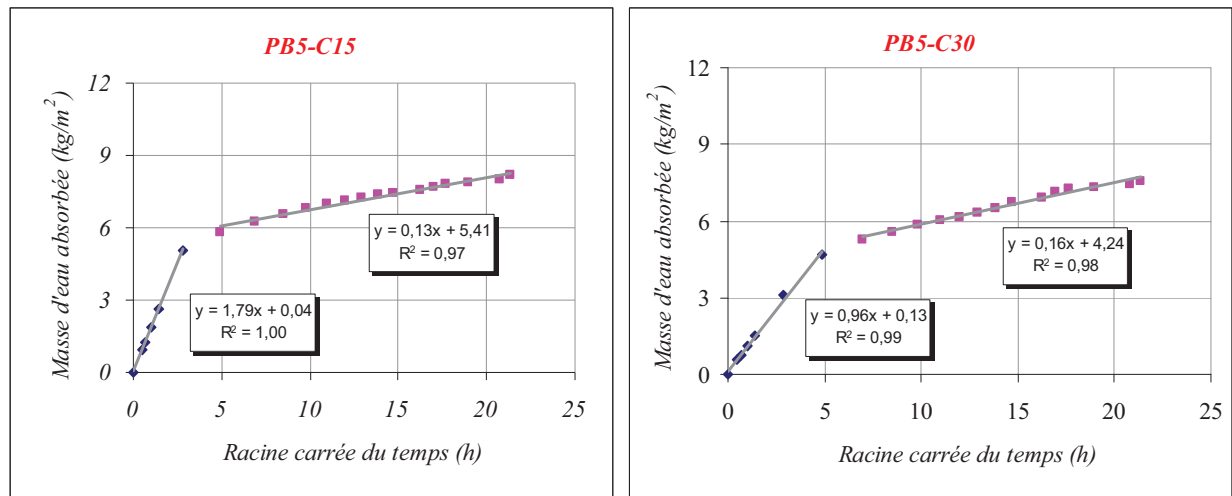


Figure 3.51 : Absorption capillaire des échantillons PB5-C15 et PB5-C30

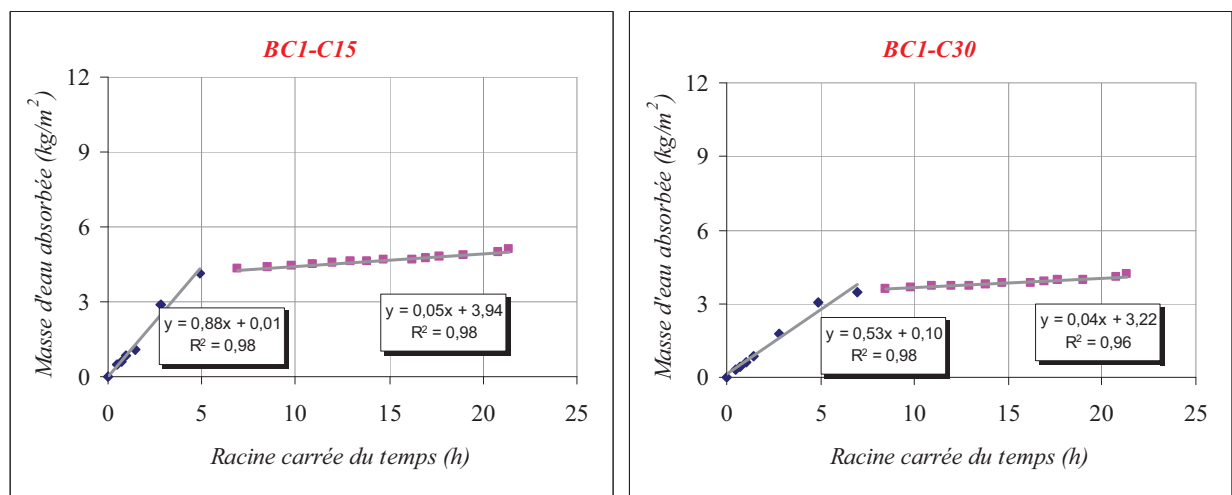


Figure 3.52 : Absorption capillaire des échantillons BC1-C15 et BC1-C30

Analyses

On peut constater que pour chaque échantillon du même mortier, l'utilisation d'un béton différent, ne conduit pas à un changement dans la cinétique d'absorption d'eau lors de la deuxième phase. On constate aussi que les échantillons PB3-C15 et PB4-C15, ont presque la même cinétique d'absorption d'eau lors de la première étape. Il en est de même pour les échantillons PB3-C30 et PB4-C30. En comparant tous les échantillons, on constate que les échantillons fabriqués avec le mortier PB5 ont la cinétique d'absorption d'eau la plus rapide lors de la première phase. Quant aux échantillons fabriqués avec le mortier BC1, ils ont la cinétique la plus lente.

On présente sur la figure 3.53, les coefficients d'absorption capillaire associés à chaque phase.

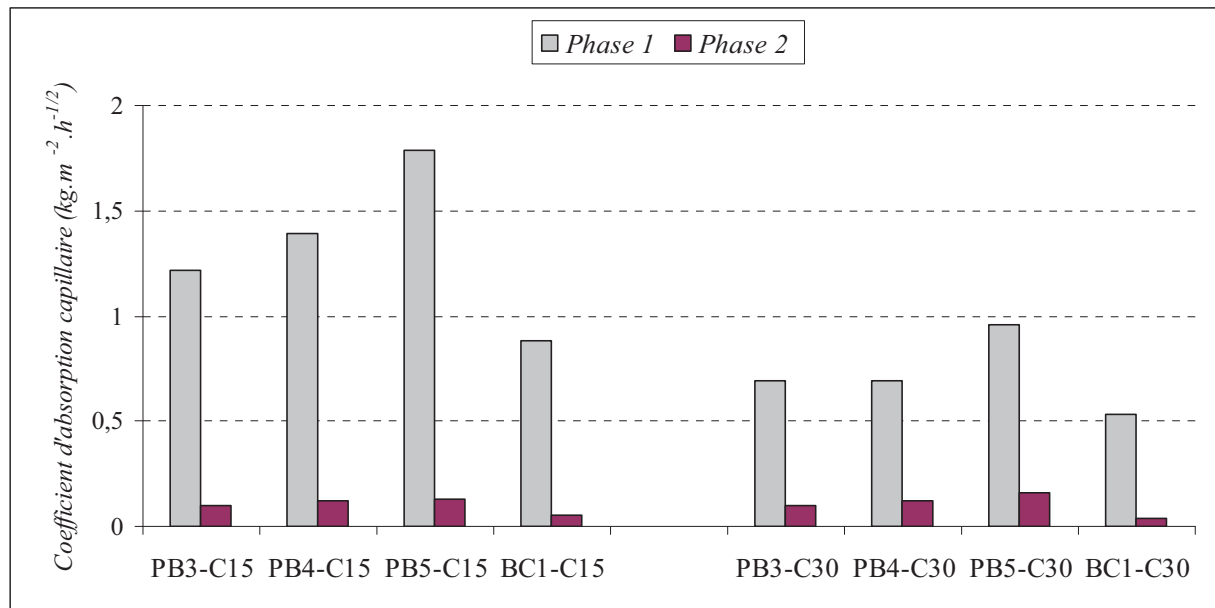


Figure 3.53 : Coefficients d'absorption capillaire des échantillons avec interface

On constate que les coefficients d'absorption capillaire de la première phase représentent presque la moitié des coefficients d'absorption capillaire des bétons. Il en est de même pour les coefficients d'absorption capillaire de la deuxième phase, où ces derniers représentent presque la moitié des coefficients d'absorption capillaire des mortiers. Néanmoins, on constate que pour les échantillons PB5, les coefficients d'absorption de la première phase sont légèrement plus élevés que ceux des autres échantillons. À la différence de cela, les coefficients d'absorption qui caractérisent la première phase d'absorption dans les échantillons BC1 sont plus faibles que ceux des autres échantillons. A travers ces données, on peut dire que la première phase de l'absorption d'eau se rapproche plus du comportement du béton et que la deuxième phase se rapproche de l'absorption capillaire du mortier. La présence de fissures dans les échantillons PB5 peut être due à l'origine de l'augmentation de la cinétique d'absorption dans la première phase. Enfin, la diminution de la cinétique d'absorption capillaire de la première phase dans les échantillons BC1 peut être due à la présence du polymère à l'interface.

Conclusion

En conclusion de cette partie sur les propriétés de transfert à l'interface, on peut dire que la présence de fissures à l'interface mortier-béton favorise et accélère la diffusion des chlorures et peut contribuer à augmenter l'absorption capillaire.

Du fait de leur faible granulométrie et de la présence de polymères, les mortiers de réparation testés ont une bonne capacité à pénétrer dans le support au travers de la porosité ou bien de la rugosité, assurant ainsi une bonne adhésion au support. La réalisation d'autres essais de transfert à l'interface sur des bétons moins poreux s'avère donc une démarche intéressante pour évaluer la performance de ces mortiers vis-à-vis des propriétés de durabilité.

Enfin, l'adhérence du mortier PB5 peut être améliorée par l'application d'un primaire d'accrochage [Strres, 08].

4 Conclusion

Cette étude expérimentale nous a permis de faire une étude comparative et performantielle sur les deux familles de mortiers de réparations. Les mortiers bi-composants présentent un meilleur comportement vis-à-vis de l'absorption capillaire, de la perméabilité au gaz et de la diffusion des chlorures en milieu saturé. Ceci est la conséquence d'un fort taux de polymères qui contribue à affiner la structure poreuse et la rendre plus complexe. Il permet aussi la formation film polymère qui conduit à ralentir considérablement l'absorption capillaire.

Pour évaluer la performance des mortiers de réparation vis-à-vis de la protection des armatures contre la corrosion, on présente dans le chapitre 4 les résultats et analyses de l'amorçage de la corrosion.

**Chapitre 4 : Etude de l'Initiation de la Corrosion et
Modélisation de la Pénétration des Chlorures dans les
Mortiers de Réparation**

Chapitre 4 : Etude de l'Initiation de la Corrosion et Modélisation de la Pénétration des Chlorures dans les Mortiers de Réparation

1 Introduction

Ce dernier chapitre de thèse présente une évaluation de la performance des mortiers de réparation appliqués sur un béton support. Le but de cette démarche est d'évaluer la capacité de ces matériaux à protéger les armatures contre la corrosion induite par la diffusion des ions chlorures quand ils sont appliqués sur un matériau support. Pour cela, une procédure de fabrication d'éprouvettes a été mise en place, allant du coulage du béton armé à la réparation par mortier. Cette procédure a d'ailleurs fait l'objet d'une présentation dans le chapitre 2. Ainsi après avoir fabriqué les éprouvettes de béton armé, des investigations sur l'initiation de la corrosion en milieu saturé ont été effectués par spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) et des mesures du potentiel de corrosion. Ces investigations nous ont permis d'estimer un temps d'initiation de la corrosion et de déterminer par la suite la concentration critique en chlorures responsable de la dépassivation de l'armature. Il faut préciser que ces essais ont été effectués sur des échantillons qui se composent d'un mortier de réparation et du béton support C30. Au terme de cette étude expérimentale, une modélisation simplifiée de la diffusion des chlorures à travers les mortiers de réparation a été réalisée. La simulation numérique a été faite en se basant sur un modèle de diffusion ionique dans le milieu saturé. Les paramètres d'entrée de ce modèle sont ceux déterminés expérimentalement. Il s'agit des propriétés de transferts ainsi que des résultats de l'amorçage de la corrosion.

2 Etude de l'initiation de la corrosion

2.1 Amorçage de la corrosion en milieu infini

L'amorçage de la corrosion en milieu infini concerne les essais de corrosion accélérée réalisés sur les échantillons présentés dans le chapitre 2. Pour rappel, le principe de l'essai est de combiner un essai de migration (pour accélérer la diffusion des chlorures) avec les techniques de spectroscopie d'impédance électrochimique et de mesure de potentiel pour l'investigation de l'initiation de la corrosion.

2.1.1 Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les réponses impédanciennes en fonction du temps de polarisation dans les domaines hautes et basses fréquences sont présentées sur les figures 4.1 à 4.7. Les figures (a) correspondent aux réponses basses fréquences et les figures (b) correspondent aux réponses hautes fréquences.

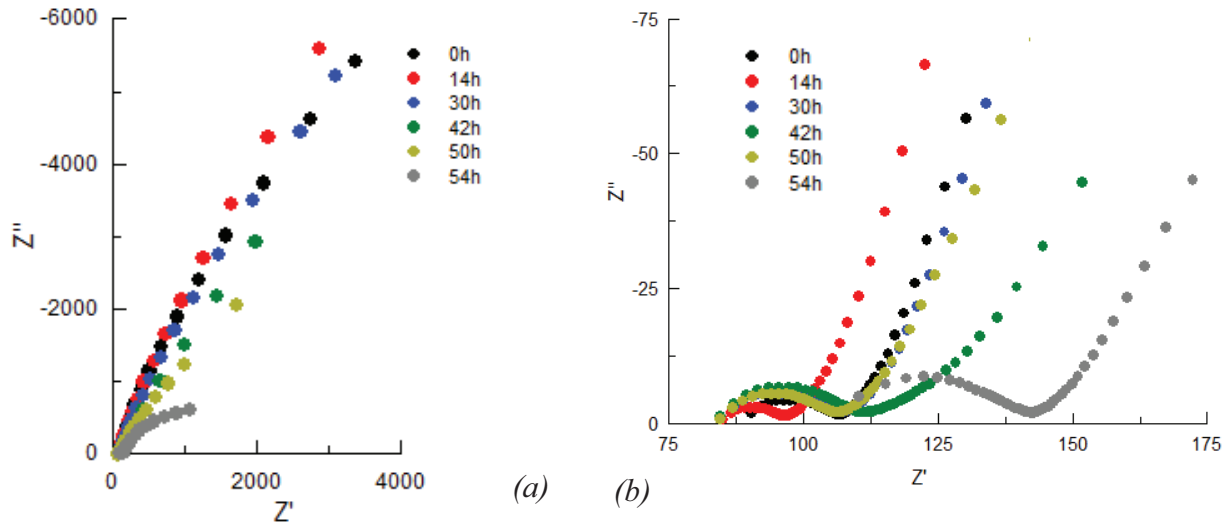


Figure 4.1 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon PB1-C30 en fonction du temps de polarisation

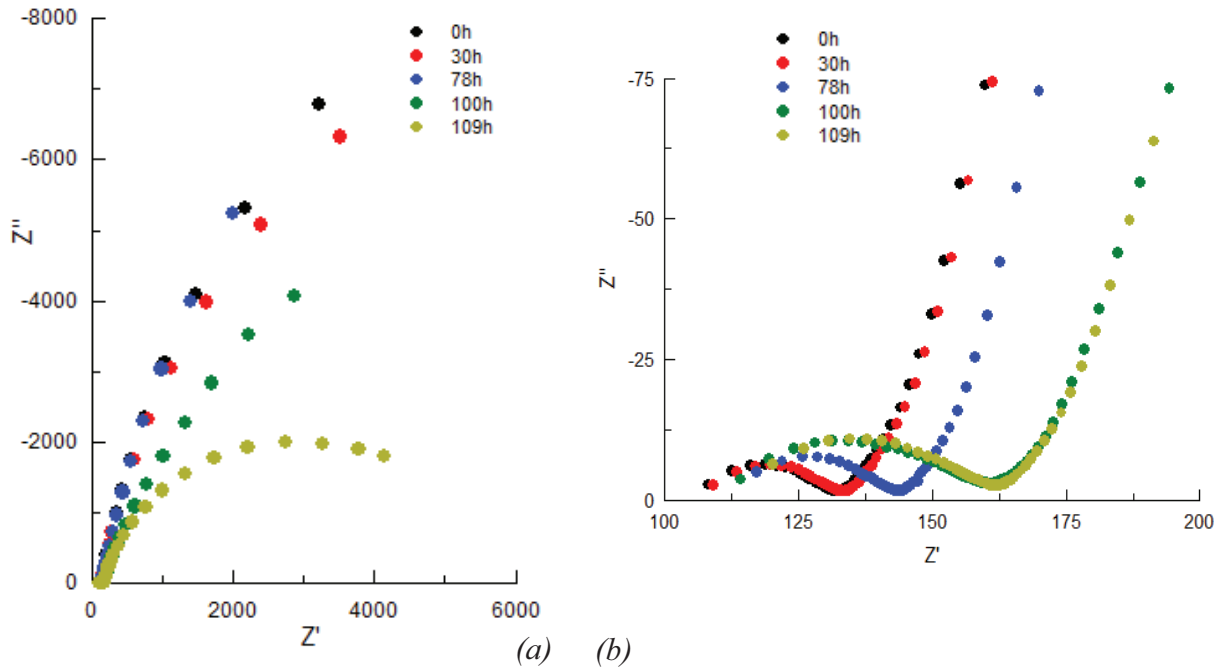


Figure 4.2 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon PB2-C30 en fonction du temps de polarisation

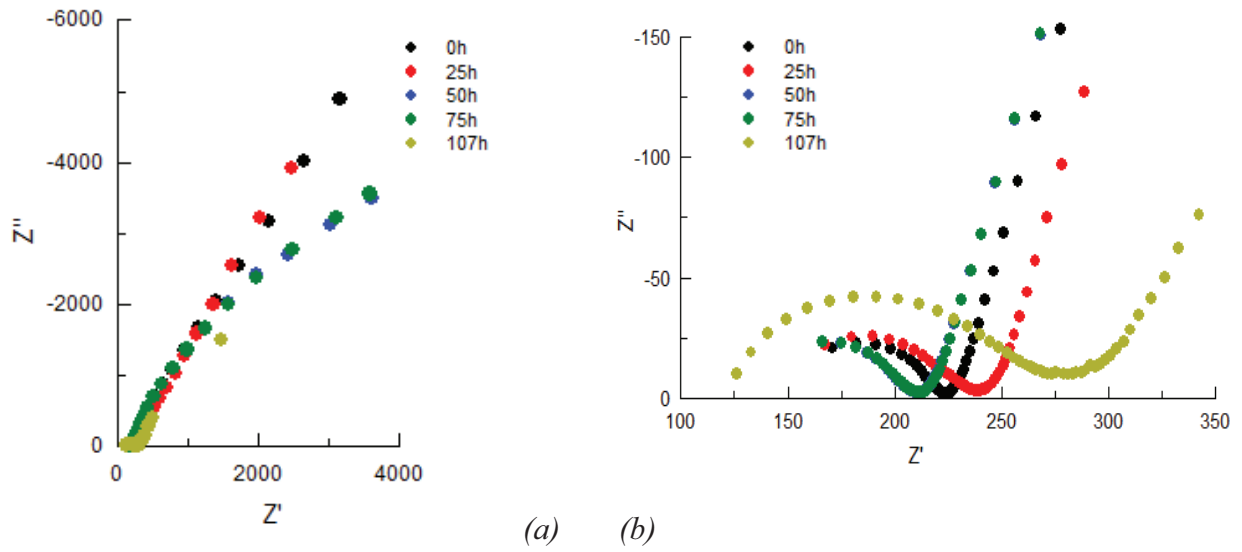


Figure 4.3 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon PB3-C30 en fonction du temps de polarisation

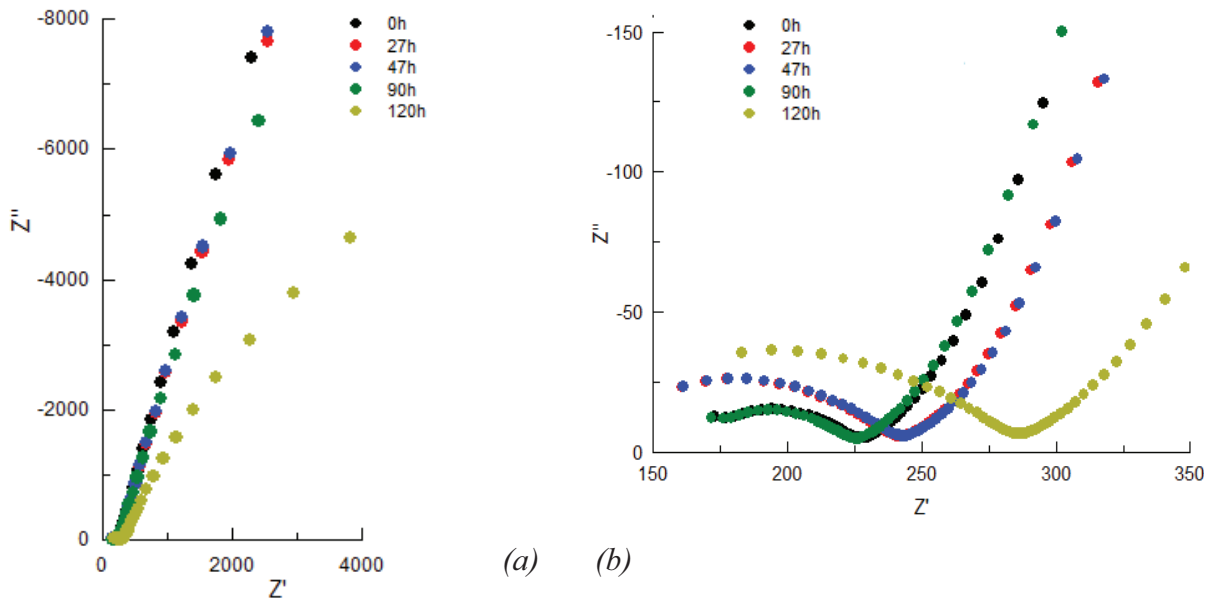


Figure 4.4 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon PB4-C30 en fonction du temps de polarisation

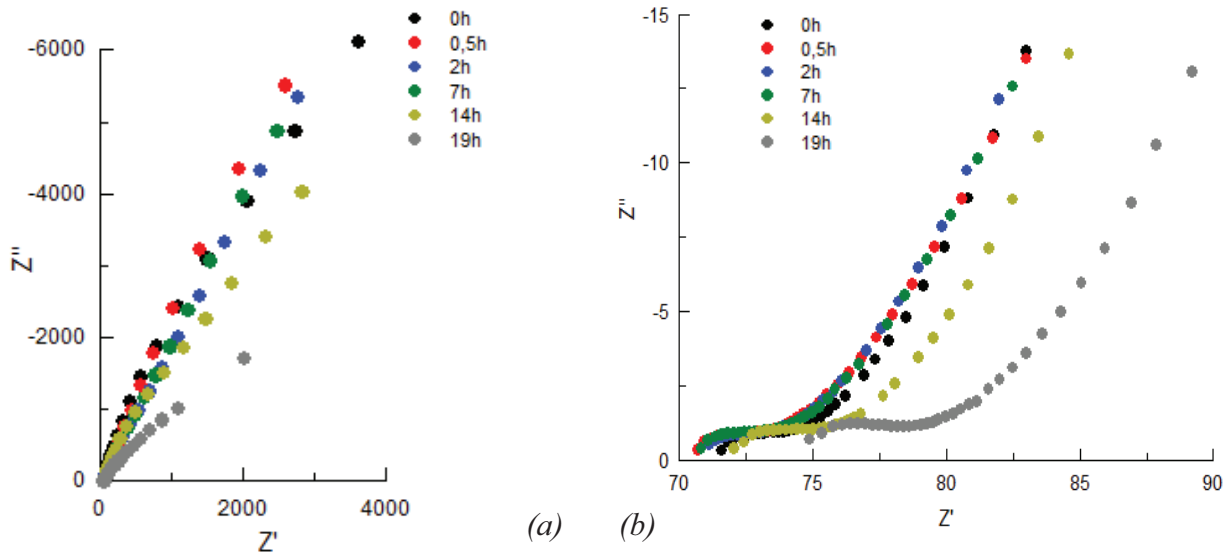


Figure 4.5 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon PB5-C30 en fonction du temps de polarisation

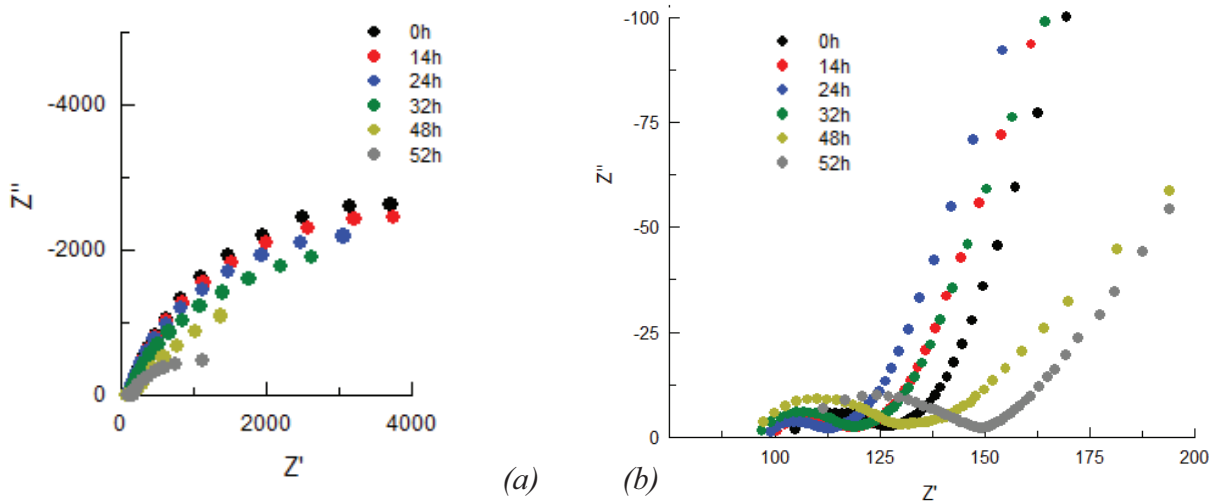


Figure 4.6 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon PB6-C30 en fonction du temps de polarisation

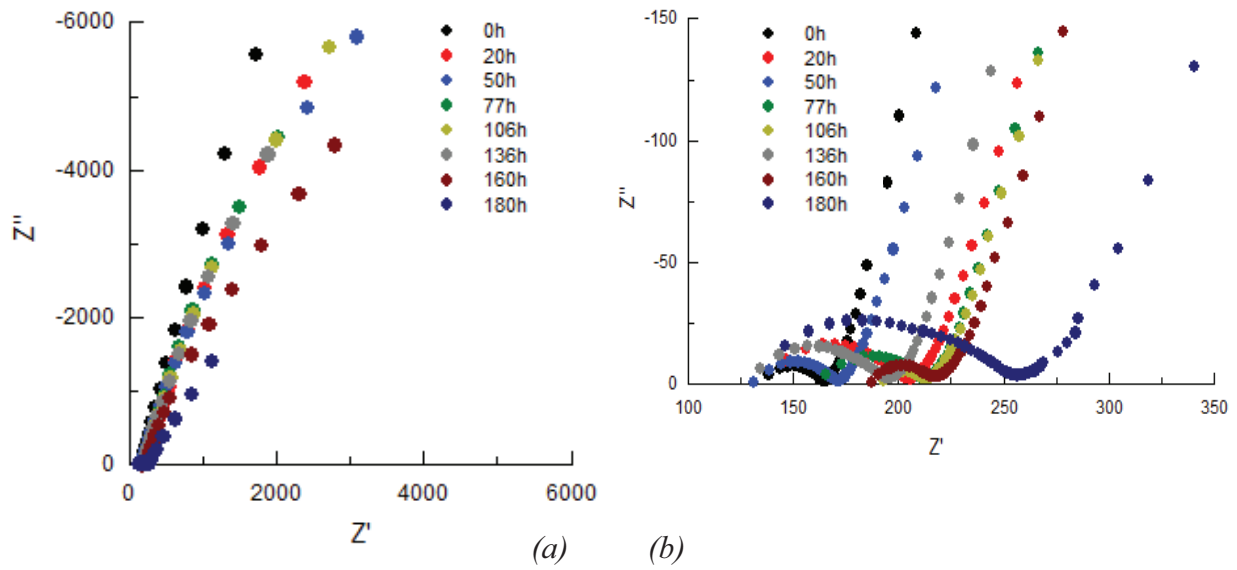


Figure 4.7 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon BC1-C30 en fonction du temps de polarisation

Observations

On peut constater que les diagrammes de Niquist peuvent être décomposés en deux domaines, le domaine des hautes fréquences (figure a) et le domaine des basses fréquences (figure b), selon la figure 4.8.

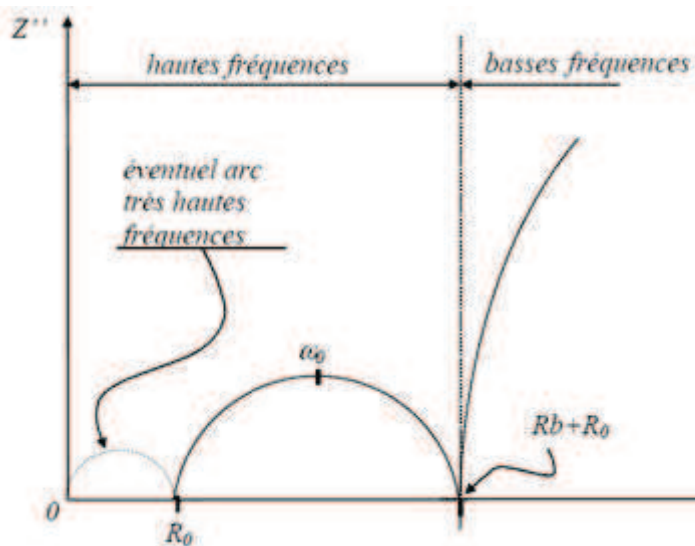


Figure 4.8 : Représentation schématique du diagramme de Niquist [Loche, 05]

À haute fréquence ($f > 1$ KHz), un premier demi-cercle se forme. Cet arc correspond à l'impédance du matériau poreux étudié. Son impédance est liée à sa porosité, à la géométrie de ses pores et à la conductivité de la solution interstitielle [Wenger, 86], [Song, 02], [Aït-Mokhtar, 06]. Ce spectre d'impédance à hautes fréquences fournit deux données physiques R_0 et R_b .

D'après les données de la littérature, le point R_0 correspondant à l'intersection entre l'arc de hautes fréquences et l'axe des composantes réelles, caractérise la résistance totale équivalente de la phase liquide et de la phase solide [Gu, 93], [Xu, 93a] et serait directement lié à la conductivité de la phase liquide et à la géométrie des pores [Xu, 93b], [Gu, 97]. Quant à la valeur R_b , elle correspond à la résistance du matériau d'enrobage.

Le domaine des basses fréquences correspond aux phénomènes qui se développent à l'interface acier-béton. La dimension et la taille de ce demi-cercle sont associées aux conditions de surface de l'armature étudiée c'est-à-dire l'état passif et l'état actif (initiation de la corrosion) [Ford, 98]. Le premier cas (état passif) est caractérisé par un demi-cercle de grande dimension [Andrade, 95]. Le diamètre du demi-cercle dans le cas où l'acier est dans un état passif peut diminuer suite à la présence de chlorures sur la surface de l'acier. Une diminution du diamètre peut être observée en fonction du temps d'exposition à une solution saline [Shamsad, 03]. Les études réalisées dans notre laboratoire ont montré aussi que la diminution du diamètre de l'arc correspond au passage de l'état passif à l'état actif de l'armature [Poupard, 01], [Poupard, 03], [Poupard, 04], [Tahlaiti, 10].

Ainsi, dans notre étude, le temps de l'initiation de la corrosion a été choisi comme étant le temps d'exposition nécessaire pour atteindre la chute du diamètre de l'arc dans le domaine des basses fréquences. Les différents temps d'initiation de la corrosion sont présentés dans la figure 4.9. Il faut rappeler que le pas de temps initial appliqué lors de la polarisation a été fixé à 30 min puis il a été augmenté progressivement selon l'évolution de la réponse impédancielle. Dès qu'un changement de la réponse impédancielle à basses fréquences était observé, le pas de temps était diminué jusqu'à l'observation de la chute du diamètre de l'arc (initiation de la corrosion). Le temps de l'initiation de la corrosion a donc été estimé comme étant le temps total (cumulé) de polarisation. Pour des raisons de temps et de mise en œuvre, les essais ont été effectués sur les six mortiers mono-composant PB (1 à 6) et un seul mortier bi-composant qui est le BC1. Le temps de l'initiation de la corrosion a été déterminé sur un seul échantillon pour chaque matériau. Il a été déterminé avec la précision de l'heure.

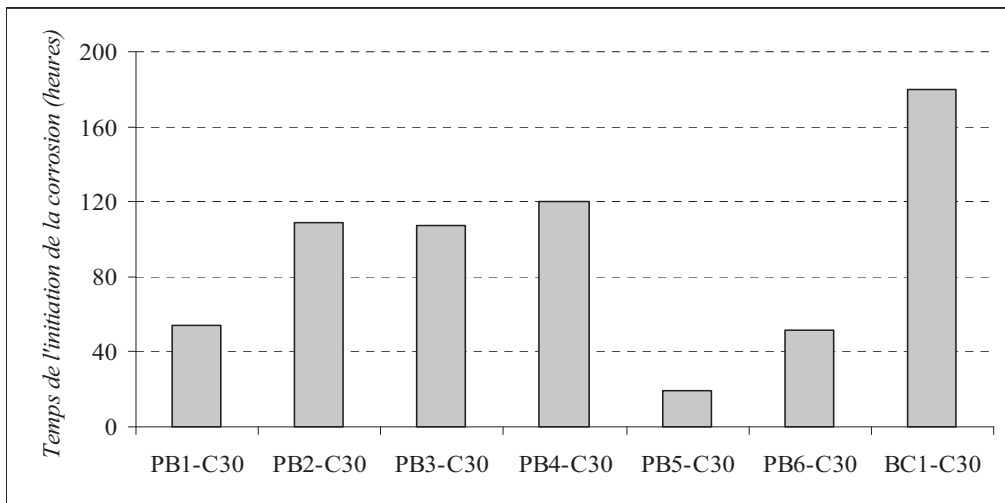


Figure 4.9 : Temps de l'initiation de la corrosion pour les différents échantillons déterminés par la méthode SIE

On constate que l'échantillon BC1 présente le temps le plus long (180 heures) et l'échantillon PB5-C30 le temps le plus court (19 heures). Les échantillons fabriqués avec les mortiers PB2, PB3 et PB4 ont des temps assez proches. Enfin, les échantillons PB1-C30 et PB6-C30 ont presque le même temps d'initiation de la corrosion.

Analyses

Le coefficient de diffusion des mortiers de réparation est un facteur qui peut influencer le temps de l'initiation de la corrosion comme le montre la figure 4.10.

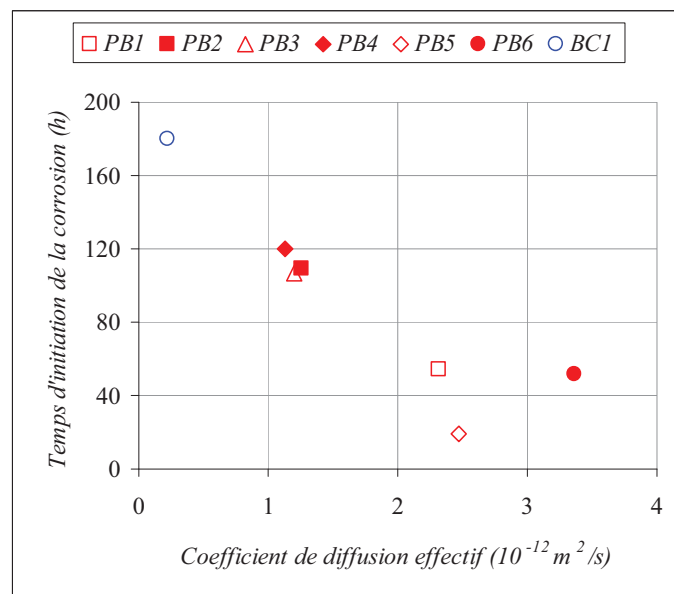


Figure 4.10 : Relation entre coefficient de diffusion et temps d'initiation de la corrosion pour les différents mortiers de réparation

On peut constater que plus le coefficient de diffusion est faible et plus le temps de l'initiation de la corrosion sera plus long, ce qui est cohérent. Cependant, pour le mortier PB5, on observe un temps assez court comparé aux autres mortiers. Ceci est certainement dû à une mauvaise adhérence avec le béton support. Cette mauvaise adhérence conduit à l'apparition de fissurations à l'interface mortier et béton et à créer un chemin privilégié pour la diffusion des chlorures. Il faut rappeler que ce problème d'adhérence entre le mortier PB5 et le béton C30 a été observé au MEB dans le précédent chapitre (figures 3.37 et 3.38).

Concernant le mortier PB6, même s'il présente le plus grand coefficient de diffusion des mortiers de réparation ($3,36 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), son temps d'initiation de la corrosion est presque le même que celui du mortier PB1. Ce dernier présente un coefficient de diffusion plus faible ($2,32 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Il faut rappeler que l'initiation de la corrosion dépend non seulement des chlorures mais aussi du pH du matériau d'enrobage. Plus le pH est élevé et plus la protection contre la corrosion sera meilleure [Hausmann, 67], [Gouda, 70]. Une différence de pH des mortiers PB1 et PB6 pourrait expliquer cette égalité du temps de l'initiation de corrosion malgré une différence dans le coefficient de diffusion des chlorures.

2.1.2 Potentiel de corrosion

Les mesures du potentiel ont été réalisées selon la norme ASTM C 876. Les évolutions du potentiel en fonction du temps d'exposition aux chlorures sont présentées sur la figure 4.11.

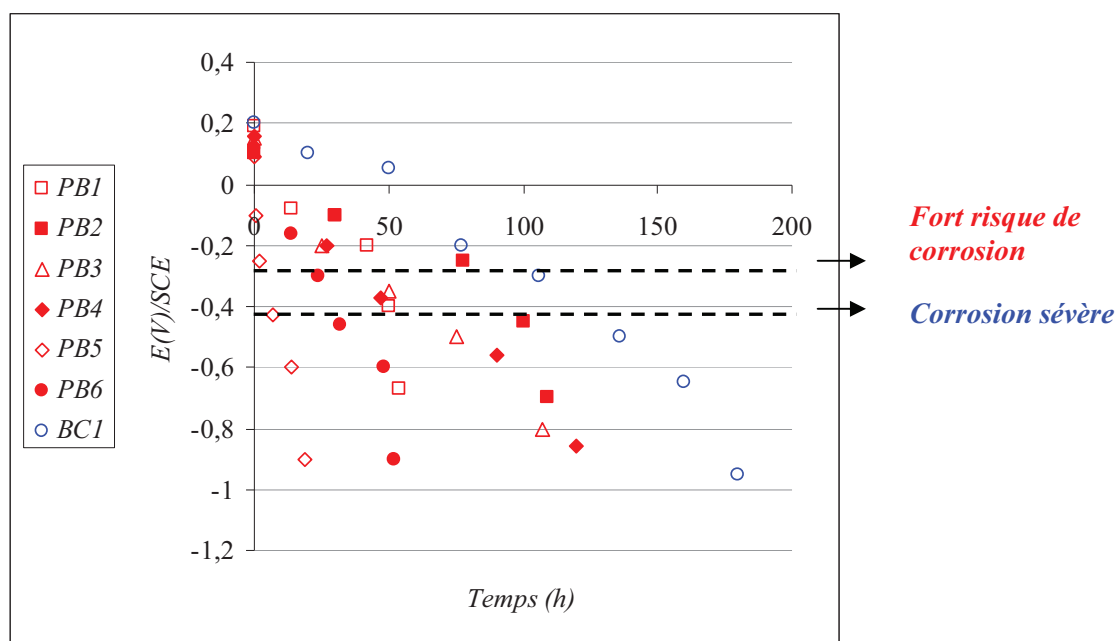


Figure 4.11 : Evolution du potentiel de corrosion en fonction du temps d'exposition aux chlorures

On peut observer que plus le temps d'exposition aux chlorures augmente et plus le potentiel de corrosion diminue. En se référant au tableau 2.4 du chapitre 2, des valeurs de potentiel inférieures à -276 mV caractérisent un fort risque de corrosion alors que des valeurs inférieures à -426 mV caractérisent une corrosion sévère. Dans la figure 4.12 sont présentés les temps d'initiation de la corrosion pour un fort risque de corrosion et pour une corrosion sévère, déterminés par les relevés du potentiel.

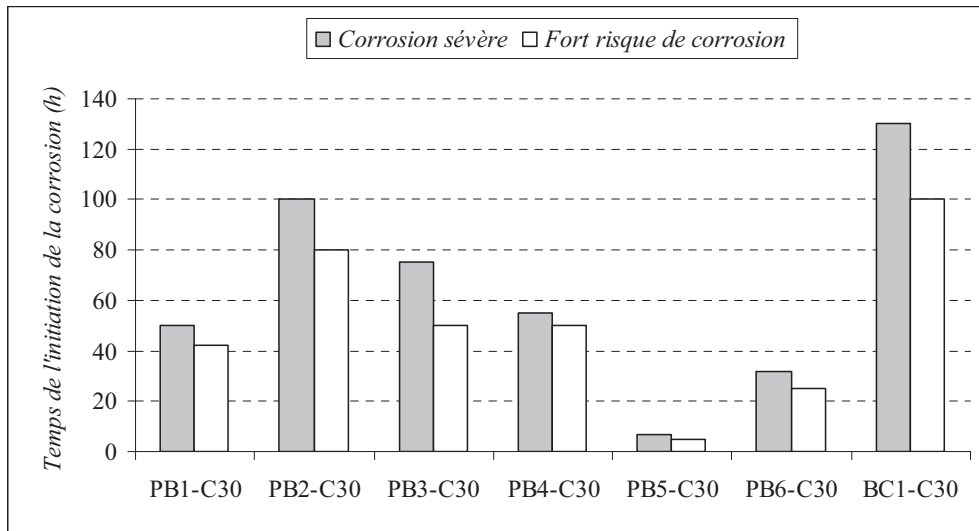


Figure 4.12 : Temps d'initiation de la corrosion pour les différents échantillons déterminés par la mesure du potentiel de corrosion

La figure 4.13 présente une comparaison entre les temps d'initiation de la corrosion déterminés à partir la méthode SIE et la mesure du potentiel.

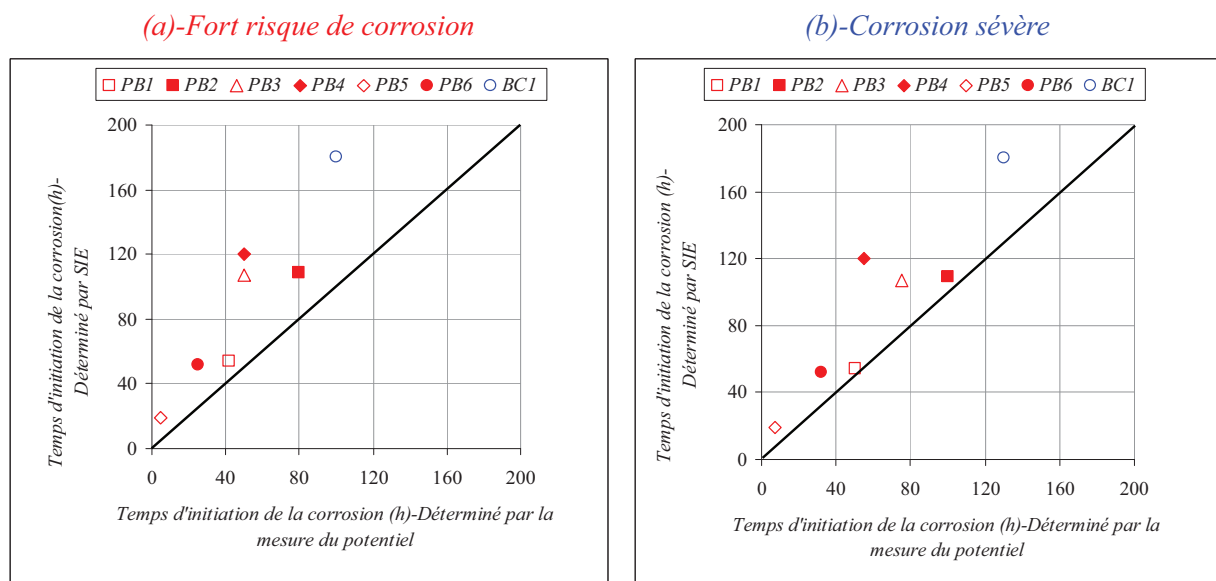


Figure 4.13 : Comparaison entre temps d'initiation de la corrosion déterminés par la mesure du potentiel et la SIE

On constate que dans les deux cas, les temps de l'initiation de la corrosion donnés par SIE sont plus élevés. On constate aussi que l'évolution du temps est identique pour les deux méthodes. La différence du temps d'initiation de la corrosion entre les deux méthodes peut être due à l'effet de polarisation. En effet, la polarisation effectuée pour accélérer la diffusion des chlorures conduit à abaisser le potentiel de l'armature vers des valeurs négatives. Pour tous les échantillons, une polarisation de 30 minutes seulement a conduit à un passage du potentiel d'une valeur positive vers une valeur négative, qui dans certains cas avoisine 0,2 V. Plus le temps de polarisation est grand et plus le potentiel diminue. Pour minimiser cet effet, les mesures ont été effectuées 5h après la polarisation. La baisse du potentiel peut être due à une production d'hydrogène (hydrolyse), provoquée par la polarisation [Velivasakis, 97], [Loche, 01]. Ainsi, nous estimons que la SIE est la mieux adaptée pour déterminer le temps d'initiation de la corrosion car la polarisation n'a pas d'effet sur la réponse impédancielle.

2.1.3 Teneur critique en chlorures

Juste après la fin de l'essai de la corrosion accélérée, des prélèvements de poudre ont été effectués par grignotage sur toute l'épaisseur de l'enrobage avec un pas de prélèvement de 2 mm. Pour certains échantillons l'épaisseur d'enrobage est de 2 cm alors que pour d'autres elle est de 1,8 cm. Ceci est dû à la précision de fabrication. Des profils en chlorures ont été ensuite déterminés d'après la procédure décrite dans le chapitre 2. L'évolution des concentrations en chlorures libres et totaux, exprimés en pourcentage par rapport à la masse du mortier sont présentées dans les figures 4.14 et 4.15.

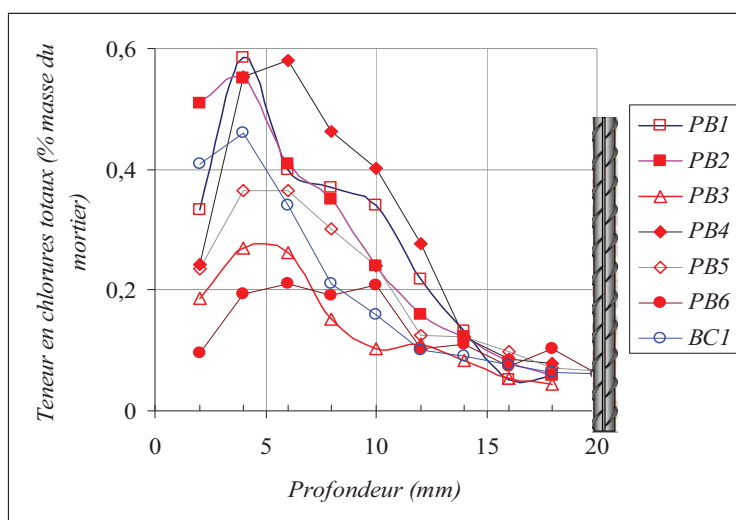


Figure 4.14 : Profils en chlorures totaux des échantillons étudiés

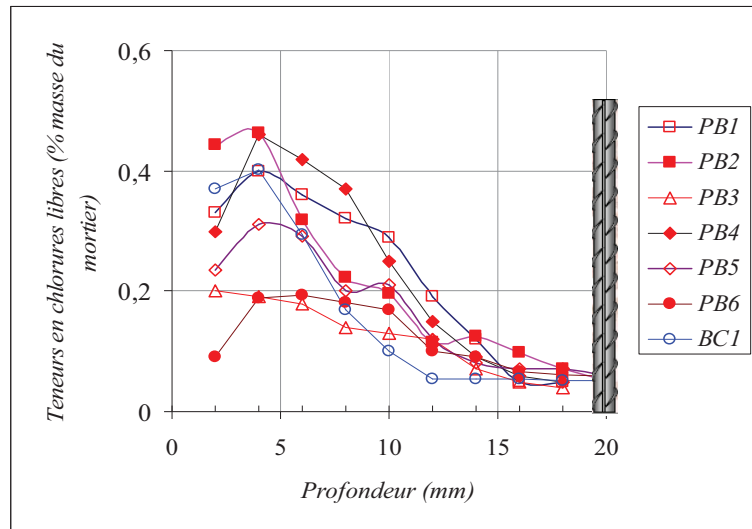


Figure 4.15 : Profils en chlorures libres des échantillons étudiés

En général, les courbes concentrations-profondeur peuvent être décomposées en deux parties. Une partie croissante entre 2 et 4 mm, et une partie décroissante entre 4 et 20 mm. La partie croissante est due à un séchage de la surface supérieure de l'échantillon, favorisé par une grande porosité (bulles d'air). En effet, lors de la fabrication des échantillons, on a constaté la présence d'une grande porosité à la surface de l'échantillon. Cette porosité conduit à un séchage rapide et une perte de chlorures par écoulement, lors du transport de l'échantillon de la cellule de corrosion à la salle de grignotage. On peut donc attribuer la faible concentration en chlorures dans les premiers millimètres à une perte de chlorures. Dans la deuxième partie des profils, on constate que la concentration en chlorures diminue avec la profondeur de l'échantillon. Ceci traduit une migration des chlorures dans le réseau poreux constamment saturé. Cette migration conduit à une accumulation des chlorures au droit de l'armature, atteignant ainsi une concentration critique, responsable de l'initiation de la corrosion. Nous présentons dans la figure 4.16 les concentrations en chlorures (par masse de mortier) au droit de l'armature obtenues après dosage. Il faut signaler que ces valeurs représentent la moyenne de trois dosages effectués sur chaque solution.

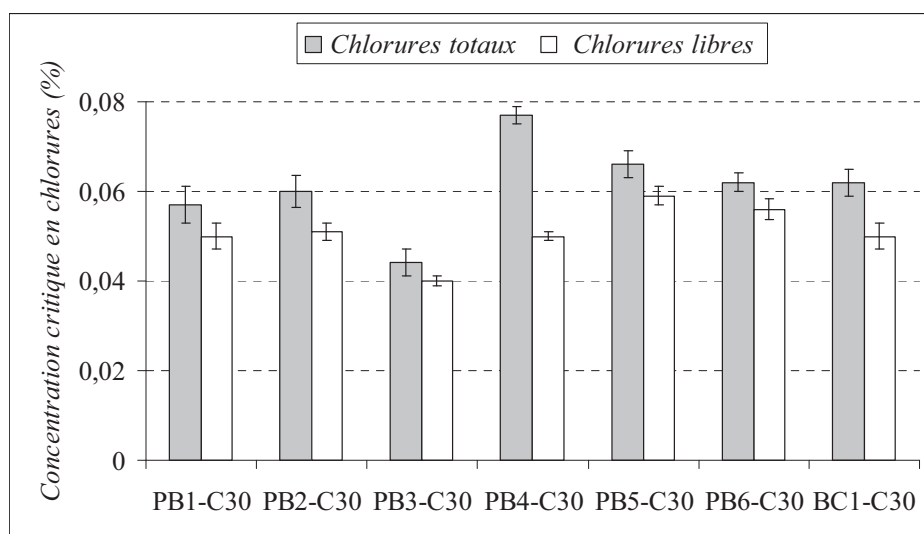


Figure 4.16 : Concentrations critiques en chlorures totaux et en chlorures libres au droit de l'armature

On constate que les concentrations critiques en chlorures totaux sont comprises entre 0,044 et 0,07% de la masse du mortier. L'échantillon PB3-C30 présente la concentration la plus faible alors que l'échantillon PB4-C30 présente la concentration la plus élevée. La différence dans la concentration critique est due à l'influence de nombreux paramètres. Les plus importants sont : l'état d'interface acier-mortier, la concentration des ions hydroxyles (pH), l'état de surface de l'acier et le potentiel de l'acier [Glass, 97]. Pour nos échantillons, les seuls paramètres qu'on puisse prendre en compte pour comparer les concentrations en chlorures sont l'état d'interface et le pH. En effet, d'après les mesures du potentiel, on constate que tous les échantillons présentent presque le même potentiel avant initiation de la corrosion. Aussi, en ce qui concerne l'état de surface de l'acier, toutes les armatures ont subi le même traitement qui est un brossage électrique. On peut donc écarter les deux derniers facteurs (potentiel et état de surface de l'armature). Concernant le pH, certains chercheurs considèrent que le rapport molaire des ions chlorures aux ions hydroxyles $[Cl^-]/[OH^-]$ est le facteur critique qui gouverne l'initiation de la corrosion [Hausmann, 67], [Gouda, 70], [Goni, 90], [Page, 91], [Hussain, 95]. Une variation dans la concentration des ions hydroxydes a donc une influence sur la concentration critique en chlorures.

L'autre paramètre qui peut être à l'origine d'une variation de la concentration critique est la quantité de portlandite présente à l'interface acier-matériau.

Des études expérimentales ont montré qu'une zone d'interface acier-béton riche en portlandite, contribue à une meilleure protection de l'armature contre la corrosion [Page, 91]. La présence de bulles d'air et de fissures à l'interface peut aussi avoir une influence sur la concentration critique [Glass, 01], [Horn, 07].

Pour comparer les valeurs de concentration critique obtenues à celles disponibles dans la littérature, nous les avons exprimées en pourcentage par rapport à la masse du ciment. On présente sur la figure 4.17 les concentrations critiques en chlorures totaux.

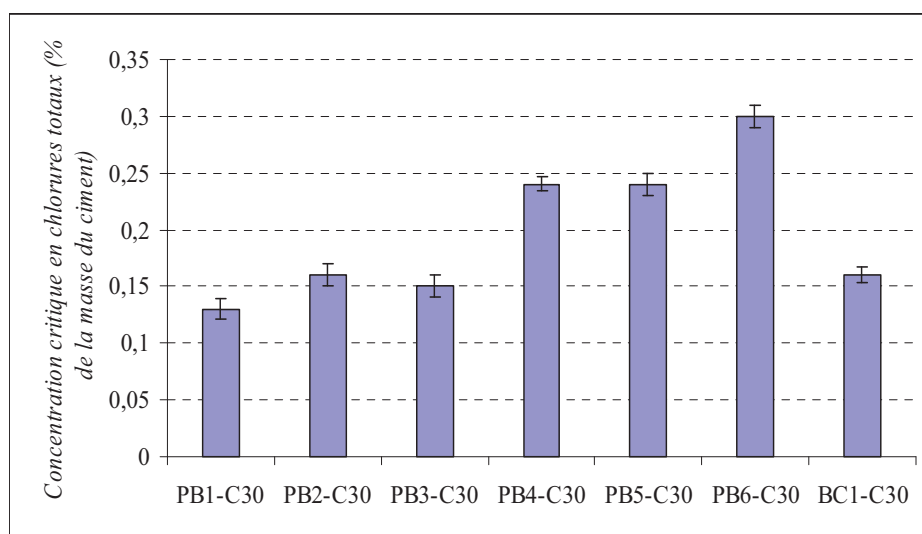


Figure 4.17 : Concentration critique en chlorures totaux par rapport à la masse du ciment au droit de l'armature

Les concentrations critiques en chlorures totaux sont comprises entre 0,13 et 0,3% de la masse du ciment. Ces valeurs se rapprochent de celles préconisées par la norme EN 206-1 où les seuils sont de 0,2% et 0,4% par rapport à la masse du ciment, respectivement pour le béton précontraint et le béton armé.

De nombreux chercheurs se sont intéressés à déterminer la concentration critique en chlorures. Cependant, en dépit de ces recherches, il n'existe pas d'accord entre les différentes valeurs obtenues, qui varient dans un large intervalle. Cette différence notable est due en grande partie aux méthodes utilisées et aux conditions d'essais effectués pour étudier la corrosion des armatures. Certains utilisent les méthodes électrochimiques telles que la mesure du potentiel, du courant de corrosion et de la résistance de polarisation, alors que d'autres s'appuient sur des inspections visuelles et des pertes de masse. D'après Glass [Glass, 97], les valeurs de concentration critiques données dans la littérature peuvent varier entre 0,15 et 2,5 % de la masse du ciment.

Page [Page, 91] a obtenu une concentration critique de 0,4% par rapport à la masse du ciment sur des échantillons de pâte, alors que Thomas [Thomas, 96] a obtenu des valeurs comprises entre 0,5 et 0,7% pour des bétons exposés à des conditions naturelles (in situ).

Nous présentons dans le tableau 4.1 des exemples de concentrations critiques données dans la littérature, obtenues avec différentes méthodes de détection de la corrosion.

<i>Concentration critique en chlorures totaux (% masse de ciment)</i>	<i>Méthode de détection de la corrosion</i>	<i>Référence</i>
0,25-0,5	Spectroscopie d'impédance électrochimique	[Elsner, 86]
0,08-0,19	Spectroscopie d'impédance électrochimique	[Hope, 89]
0,2-0,7	Perte de masse	[Thomas, 96]
0,5-1,5	Potentiel de corrosion	[Bamforth, 99]
0,22	Résistance de polarisation	[Alonso, 02]
0,78-0,93	Potentiel de corrosion	[Oh, 03]
0,26-0,3	Spectroscopie d'impédance électrochimique	[Tahlaiti, 10]

Tableau 4.1 : Concentrations critiques en chlorures totaux

On constate que les valeurs de concentration critique obtenues par la méthode de spectroscopie d'impédance électrochimique sont plus faibles par rapport à celles obtenues par les mesures de perte de masse et de mesure du potentiel. Ces dernières sont moins précises que les mesures d'impédance qui sont sensibles à la moindre piqûre sur la surface de l'acier. Ceci peut donc expliquer cette différence de concentration.

Nous avons employé la même méthode que celle utilisée par Tahlaiti [Tahlaiti, 10] sur les bétons C15 et C30. Il a obtenu des concentrations critiques comprises entre 0,26 et 0,3% par rapport à la masse du ciment. Les concentrations critiques obtenues dans notre étude (0,16 à 0,3%) sont donc proches de celles obtenues pour des bétons classiques.

2.1.4 Observations au MEB

À la fin de l'essai réalisé sur l'échantillon PB5-C30 et après grignotage de celui-ci, on a constaté la présence de très petites piqures sur la surface de l'armature. Cette dernière a été conservée pendant une semaine à l'air libre. L'armature a été ensuite retirée de l'échantillon afin de faire une inspection visuelle et microscopique. Dans la figure 4.18 est présentée la photographie de l'armature corrodée.

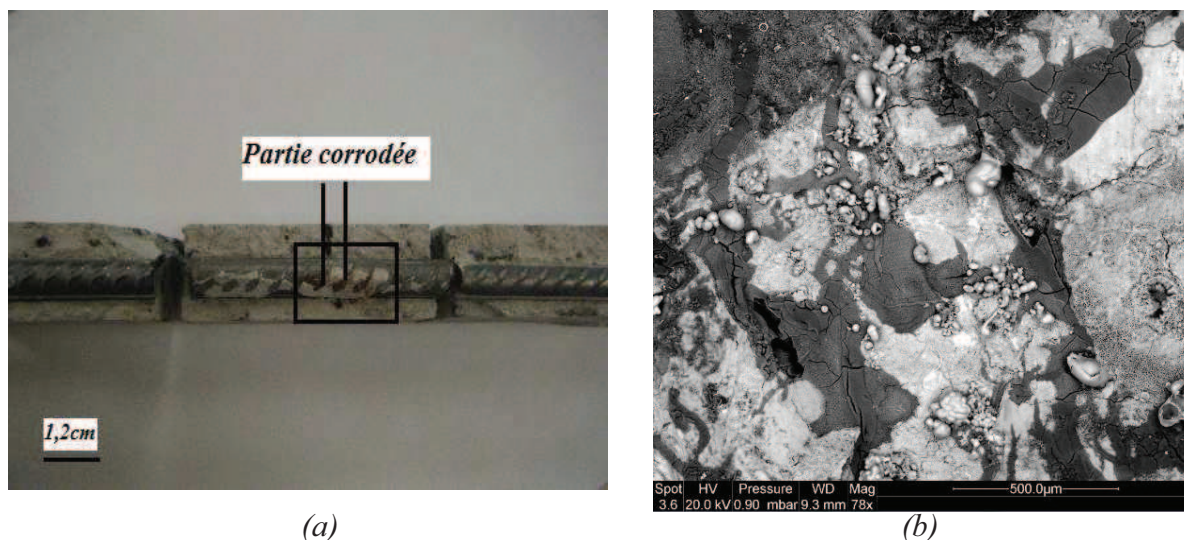


Figure 4.18 : (a) : Photographie de la zone corrodée et (b) : Image au MEB de la zone corrodée, grossissement 78×

Afin de vérifier l'état réel du développement de la corrosion et de juger si cette corrosion a été provoquée par les chlorures, des analyses chimiques (EDS) ont été effectuées sur les différentes zones de la figure 4.18.b. Ceci est présenté dans ce qui suit.

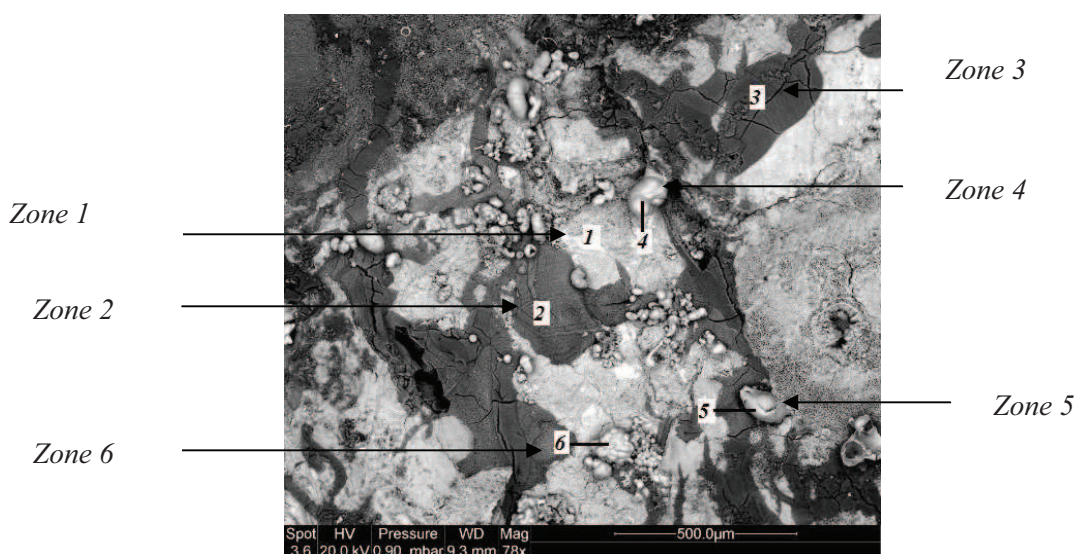


Figure 4.19 : Identification des différents produits de corrosion de la zone corrodée

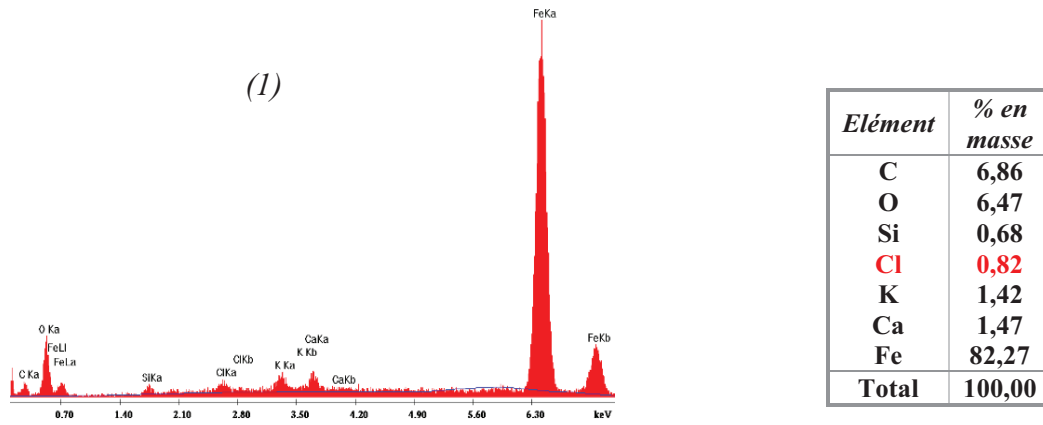


Figure 4.20 : Analyse chimique (EDS) de la zone 1

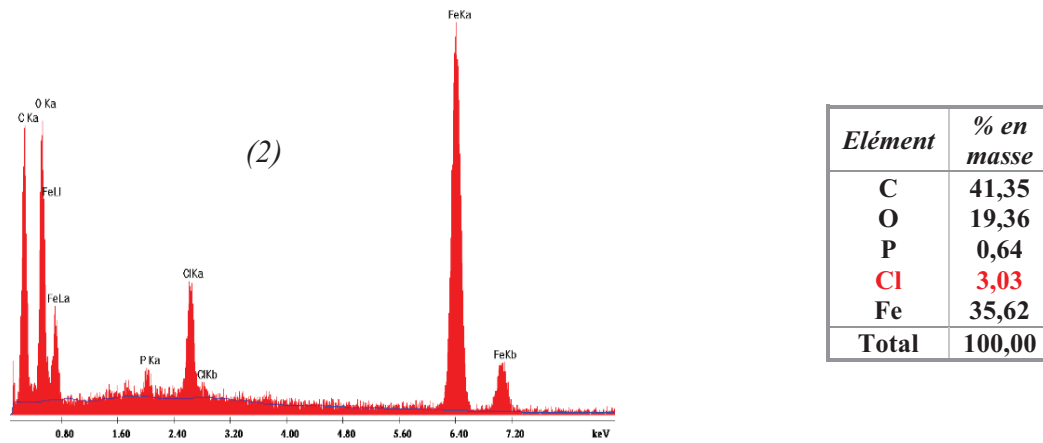


Figure 4.21 : Analyses chimiques (EDS) de la zone 2

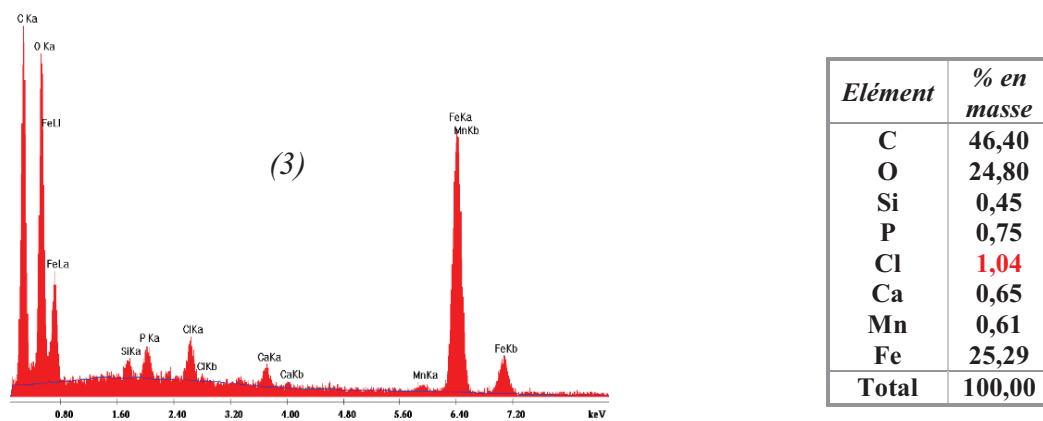
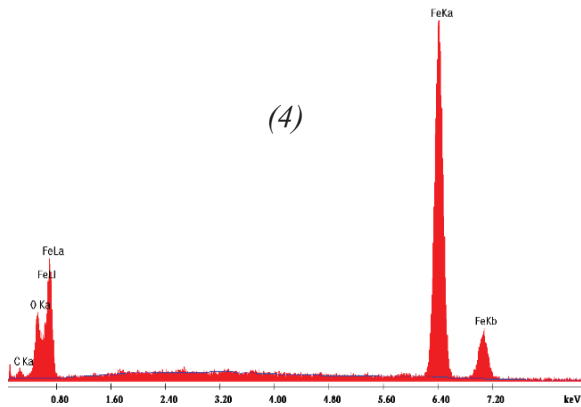
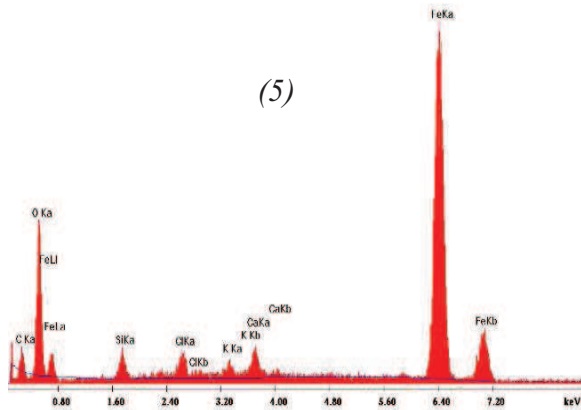


Figure 4.22 : Analyse chimique (EDS) de la zone 3



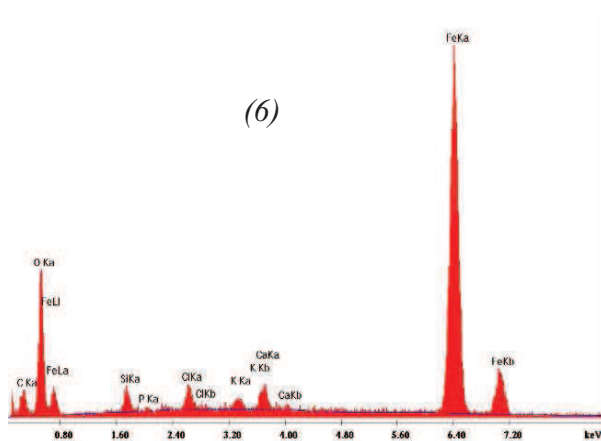
Elément	% en masse
C	5,6
O	7,46
Fe	86,94
Total	100,00

Figure 4.23 : Analyse chimique (EDS) de la zone 4



Elément	% en masse
C	5,68
O	28,60
Cl	5,99
Fe	59,72
Total	100,00

Figure 4.24 : Analyse chimique (EDS) de la zone 5



Elément	% en masse
C	11,50
O	15,31
Si	1,49
P	0,19
Cl	1,39
K	0,76
Ca	1,66
Fe	67,69
Total	100,00

Figures 4.25 : Analyse chimique (EDS) de la zone 6

Pour toutes les zones analysées, on constate la présence de chlorures dans les produits de corrosion.

Afin d'analyser une autre zone corrodée, une coupe transversale a été effectuée au niveau de l'armature. Le découpage de l'armature a été réalisé avec une scie à eau.

Ceci peut donc occasionner des pertes de chlorures. On présente sur la figure 4.26 une photographie ainsi qu'une image au MEB après découpage.

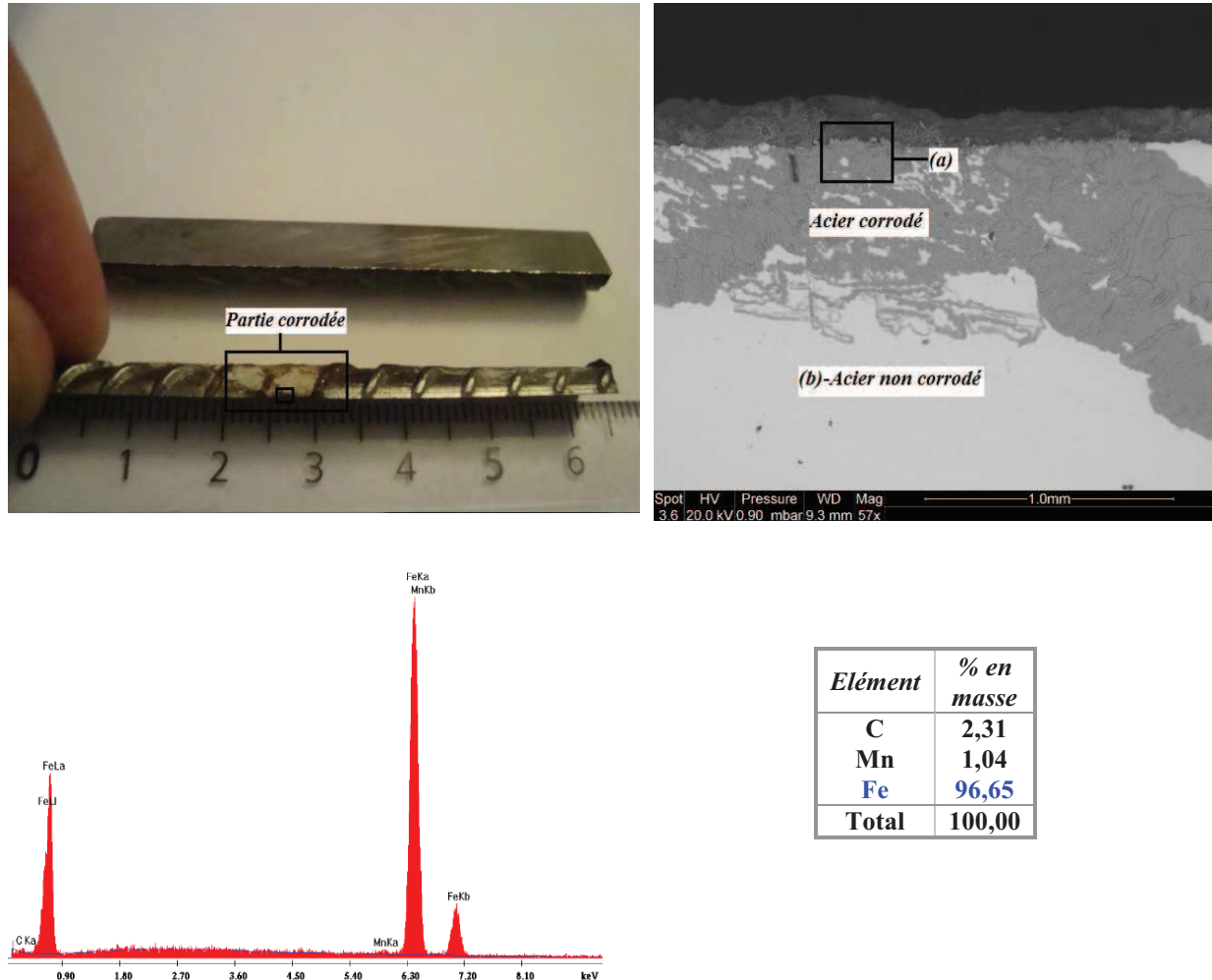


Figure 4.26 : Photographie, Image MEB (grossissement 57x) et analyse élémentaire de la partie non corrodée après une coupe transversale

Les différentes zones ont aussi été analysées. On présente sur la figure 4.27 l'identification des différentes zones et sur les figures 4.28 à 4.30 les analyses chimiques des produits de corrosion de la zone (a) dans la figure 4.26.

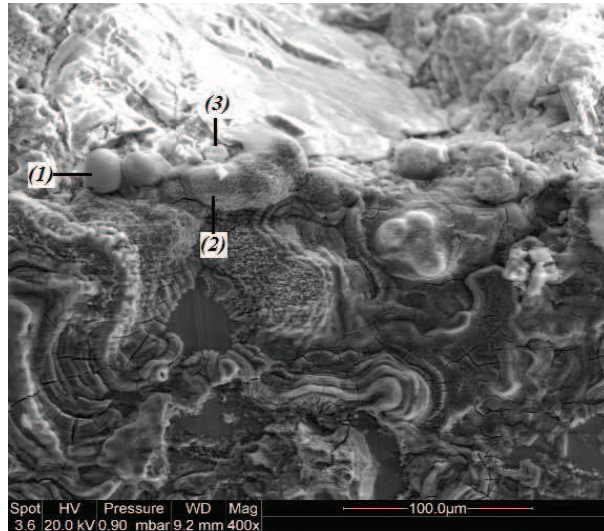
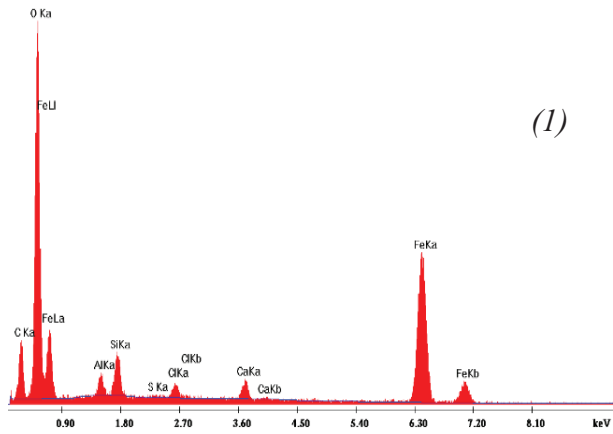
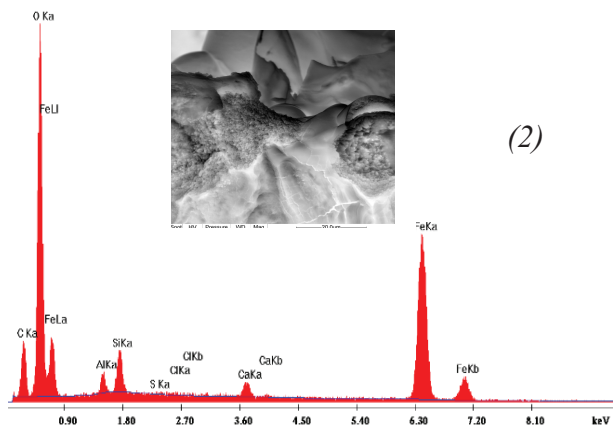


Figure 4.27 : Image MEB de la partie corrodée



Elément	% en masse
C	20,81
O	41,57
Al	1,44
Si	2,47
S	0,13
Cl	0,84
Ca	1,28
Fe	31,45
Total	100,00

Figure 4.28 : Analyse chimique (EDS) de la zone 1



Elément	% en masse
C	20,49
O	39,86
Al	1,32
Si	2,45
S	0,05
Cl	0,17
Ca	1,13
Fe	34,53
Total	100,00

Figure 4.29 : Analyse chimique (EDS) de la zone 2

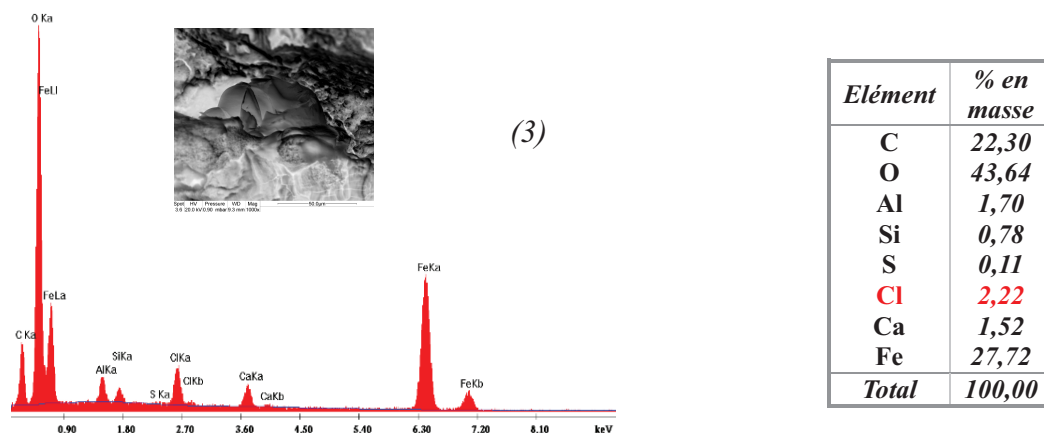


Figure 4.30 : Analyse chimique de la zone 3

Dans tous les produits de corrosion analysés, nous avons constaté la présence de chlorures avec un taux généralement compris entre 1 et 6%. L'apparition de piqûre n'a été observée que sur une petite surface localisée de l'armature alors que le reste est resté sain. Ceci indique que cette corrosion a été induite par les chlorures.

2.2 Amorçage de la corrosion en milieu semi infini

Afin d'étudier l'influence de l'interface sur la corrosion des armatures. Deux échantillons avec interface ont été fabriqués en utilisant deux mortiers. Le choix s'est porté sur un des mortiers les plus performants qui est le BC1 et un autre moins performant qui est le PB4. Le but de cette étude est de reproduire en laboratoire une réparation d'une structure en passant par les trois étapes qui sont l'enlèvement du béton, le sablage du support et enfin l'application du mortier de réparation. Pour suivre cette démarche, les échantillons ont été fabriqués en trois étapes. D'abord des échantillons de béton armé ont été fabriqués puis conservés dans une salle humide pendant 6 mois. Ensuite la partie centrale du béton a été grignotée jusqu'à l'armature puis sablés, afin de garantir une rugosité identique à celle employée pour l'étude des propriétés de transfert à l'interface. Enfin, le mortier a été appliqué à la truelle puis vibré à l'aide de la table vibrante. Une photographie d'un échantillon avec interface est présentée dans la figure 4.31. Les échantillons sont des prismes de dimension 20 x 20 x 5,5 cm, avec un enrobage de 2 cm.

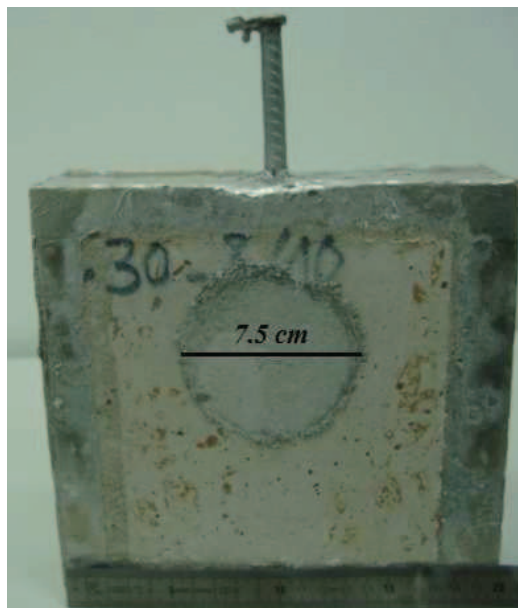


Figure 4.31 : Echantillon avec interface pour l'essai d'initiation de la corrosion

Après la procédure de fabrication, les échantillons ont été conservés dans la salle humide pendant 40 jours puis saturés sous vide. Les essais de corrosion accélérée ont ensuite été réalisés en suivant la même procédure que précédemment (pour les échantillons sans interface).

L'évolution de l'impédance en fonction du temps d'exposition aux chlorures pour les deux échantillons est présentée sur les figures 4.32 et 4.33.

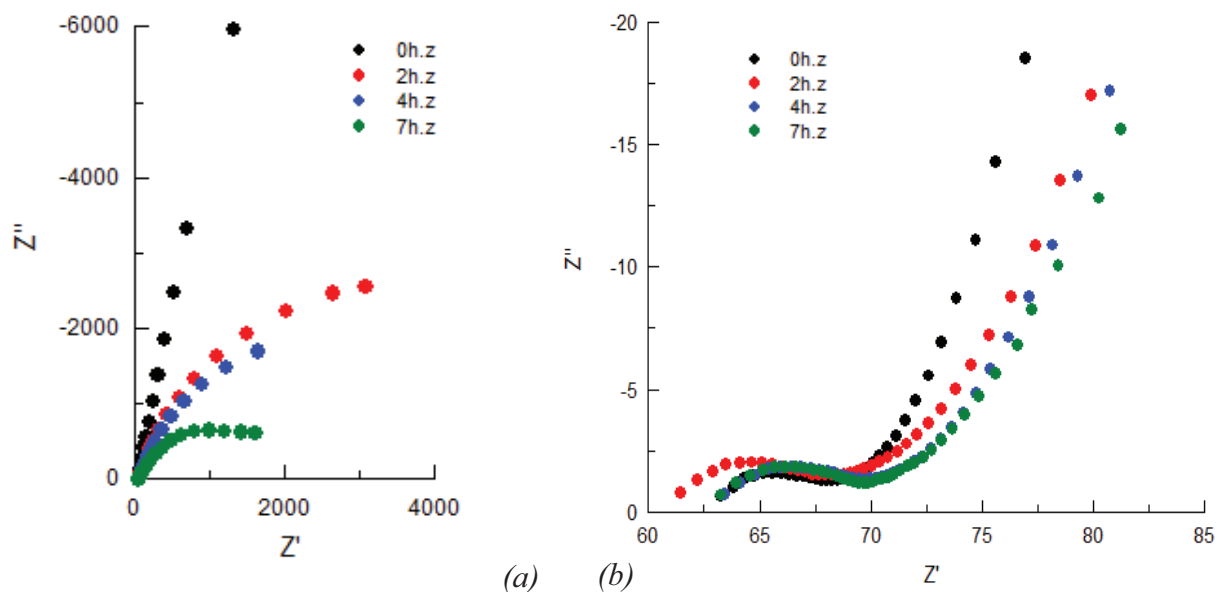


Figure 4.32 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon PB4-C30 en fonction du temps de polarisation (a) : basses fréquences et (b) : hautes fréquences

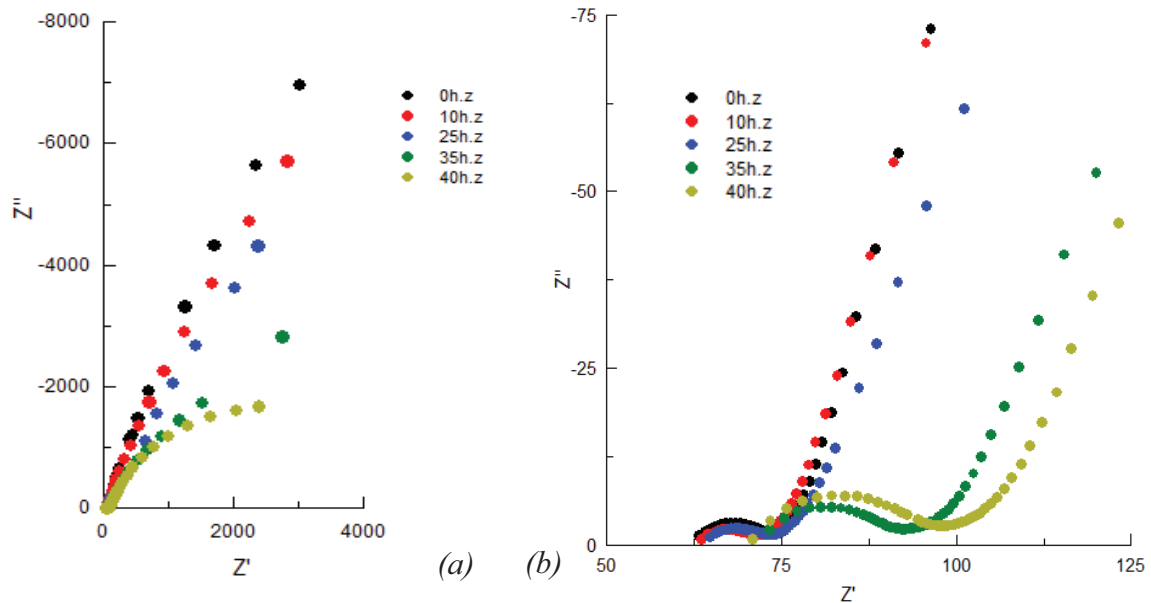


Figure 4.33 : Spectroscopie d'impédance pour l'échantillon BC1-C30 en fonction du temps de polarisation (a) : basses fréquences et (b) : hautes fréquences

Observations

On constate que le temps d'initiation de la corrosion pour l'échantillon PB4 est assez court, il est déterminé égal à 7h. On déduit de cela que la diffusion des chlorures s'est effectuée en grande partie à travers l'interface. En effet, une inspection visuelle de cet échantillon permet de constater la présence de fissures tout au long de l'interface, due certainement au phénomène de retrait de dessiccation. Un exemple photographique est présenté sur la figure 4.34. Ces résultats ne sont pas cohérents avec ceux obtenus dans les essais de transfert à l'interface. Car dans le cas précédent, nous n'avons pas eu une diffusion à l'interface et l'analyse microscopique n'a pas révélé la présence de fissures alors que pour cet échantillon, les fissures sont visibles à l'œil nu.

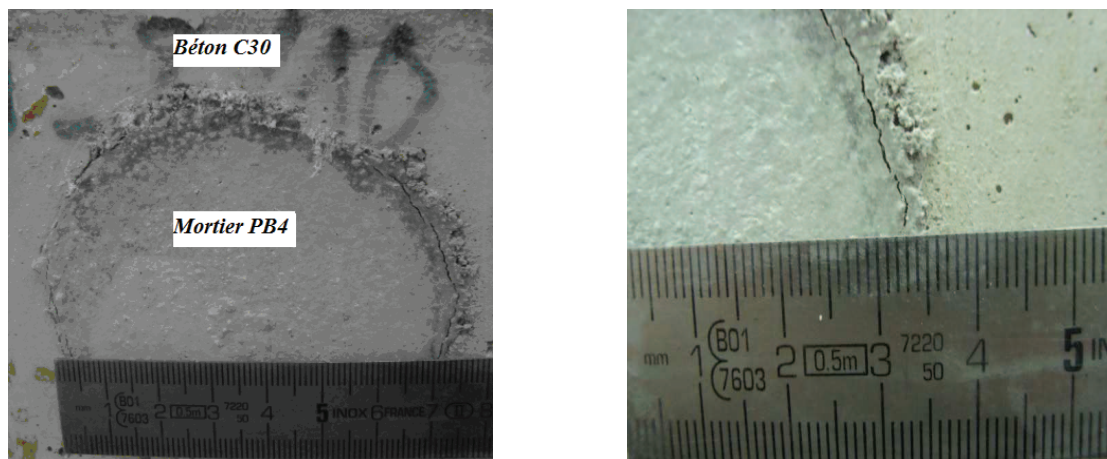


Figure 4.34 : Photographie de l'interface mortier/béton-Echantillon PB4-C30

Concernant l'échantillon BC1-C30, nous constatons que le temps d'initiation de la corrosion est plus long que celui de l'échantillon PB4-C30. Ce temps est déterminé égal à 40h. L'inspection visuelle de cet échantillon n'a pas révélé la présence d'aucune fissure comme nous le montre la figure 4.35.

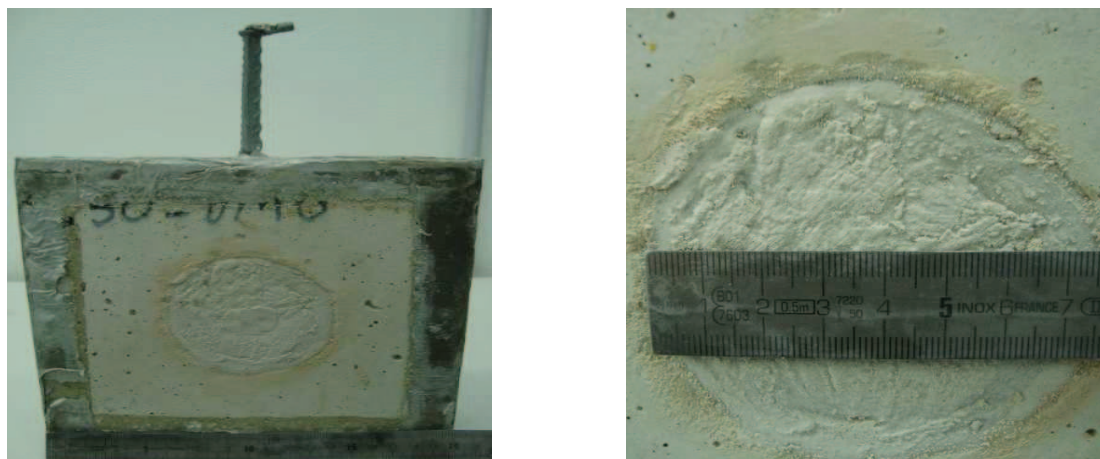


Figure 4.35 : Inspection visuelle de l'interface mortier/béton-Echantillon BC1-C30

Analyses

La présence de fissures dans l'échantillon PB4-C30 traduit une perte d'adhérence entre le mortier de réparation et le béton support qui peut être attribuée à deux facteurs. Le premier facteur est la mauvaise rugosité du béton support. Le deuxième facteur est le retrait de dessiccation lié au départ de l'eau du mortier par absorption capillaire du béton support.

En effet, dès sa mise en place sur un support poreux, le mortier subit une diminution de sa quantité d'eau de gâchage [Bissonnette, 99] par l'absorption d'eau du béton. Cette dessiccation conduit à une faible hydratation du mortier de réparation.

Il faut rappeler que le phénomène de fissuration dans le mortier PB4 n'a pas été observé lors de la fabrication des premiers échantillons avec interface (étude des propriétés de transfert). On peut donc attribuer cette différence au changement dans la procédure de fabrication. En effet, lors de la fabrication des échantillons destinés à l'étude des propriétés de transfert à l'interface, le mortier a été coulé dans un moule en carton 24 heures après le coulage du béton. Ce dernier avait une assez bonne rugosité obtenue grâce à l'utilisation d'une face de coffrage en silicone. Aussi, il se caractérisait par un degré de saturation élevé vu son jeune âge. Ceci diminue le retrait par dessiccation et permet une bonne adhérence entre les deux matériaux.

En revanche, pour les échantillons destinés à l'étude de la corrosion, le mortier a été appliqué à la truelle sur un béton ayant 6 mois d'âge avec une rugosité plus faible. Le béton support dans ce cas avait un degré de saturation plus faible que dans le premier cas (au jeune âge), donc une tendance plus grande à l'absorption d'eau. De plus, ses cinétiques d'absorption capillaire sont plus importantes. Ceci a fait l'objet d'une étude dans le chapitre 3. Ces deux facteurs (absorption capillaire élevée et degré de saturation faible) favorisent l'absorption d'eau du mortier par le béton.

Pour l'échantillon fabriqué avec le mortier BC1, nous n'avons pas observé de fissurations à l'interface et nous avons constaté un bon comportement de l'interface vis-à-vis de la corrosion. Ceci est attribué à une bonne adhérence du mortier BC1 au béton support et à une grande rétention d'eau du mortier BC1 due à la présence d'un taux élevé de polymère. Cette rétention d'eau est bénéfique pour l'interface puisque elle diminue le retrait par dessiccation.

2.3 Conclusion

L'étude de l'initiation de la corrosion a permis de confirmer que les mortiers BC1, PB2, PB3 et PB4 ont une bonne résistance à la pénétration des chlorures et donc une bonne capacité à protéger les armatures contre la corrosion induite par les chlorures. A la différence de cela, les mortiers PB1 et PB6 sont moins performants quant à la protection des armatures contre la corrosion. Enfin, le mortier PB5 ne peut pas être appliqué sur une structure marine en raison de son incompatibilité avec le béton support (problème d'adhérence).

L'humidification du béton support avant l'application du mortier de réparation est une étape très importante lors de travaux de réparation. En effet, cette humidification contribue à minimiser le retrait de dessiccation engendré par des transferts à l'interface entre béton support et mortier de réparation. Cette pathologie provoque des fissurations à l'interface béton-mortier qui favorisent la pénétration des chlorures.

Enfin, les concentrations critiques responsables de l'initiation de la corrosion sont comprises entre 0,13 et 0,3% de la masse du ciment. Ces valeurs sont proches de celles définies par la norme EN 206 et celles obtenues sur des bétons classiques qui sont comprises entre 0,2 et 0,4% de la masse du ciment.

3 Simulation numérique de la pénétration des chlorures

L'objectif de cette étude est de simuler l'évolution de la concentration en chlorures dans les mortiers de réparation sous un champ électrique, en vue de prédire le comportement des mortiers de réparation dans une situation réelle. Les profils théoriques en chlorures sont confrontés à ceux obtenus expérimentalement après l'essai de corrosion accélérée. Le modèle utilisé est celui développé dans les travaux de Friedman [Friedman, 03], réalisés à l'université de La Rochelle.

Ce modèle se base sur l'équation de Nernst-Planck et permet de prédire le transfert des espèces ioniques à travers les milieux poreux saturés. Il prend en compte les interactions entre les chlorures et la matrice cimentaire et peut simuler par une approche multi-espèces le transport de quatre espèces ioniques : sodium, potassium, chlorure et hydroxyde (Na^+ , K^+ , Cl^- et OH^-). Les équations du modèle, les données d'entrée ainsi que les conditions initiales et aux limites sont présentées dans la suite de ce chapitre.

3.1 Présentation du modèle

Le modèle est basé sur une approche de transfert ionique tenant compte de leurs interactions chimique avec la matrice cimentaire à travers les isothermes d'interactions sans prendre en compte les interactions électrocapillaires. La modélisation consiste à résoudre un système d'équations : équations de conservation de masse et équations de Nernst-Planck.

3.1.1 Equation de la conservation en milieu saturé

Cette loi décrit l'évolution de la concentration de l'espèce ionique. Elle s'écrit comme suit :

$$\text{div} \vec{J}_k + \varepsilon_L \frac{\partial c_k}{\partial t} = -\varepsilon_L \frac{\partial c_{b,k}}{\partial t} \quad (4.1)$$

Avec :

\vec{J}_k : flux de l'espèce ionique k ($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) considérée,

ε_L : porosité du milieu poreux saturé, (prise égale à la mesure de la porosité à l'eau)

c_k : la concentration molaire de l'espèce ionique (mol/m^3) considérée,

$c_{b,k}$: la concentration de l'espèce ionique liée chimiquement au matériau poreux (mol/m^3),

L'expression de la concentration d'une espèce ionique liée $c_{b,k}$ s'écrit selon le modèle de Langmuir :

$$c_{b,k} = \frac{\alpha_L c_k}{1 + \beta_L c_k} \quad (4.2)$$

α_L et β_L étant des paramètres déterminés expérimentalement par les essais des isothermes d'interactions chimiques.

3.1.2 Equation de diffusion ionique : Nernst-Planck et l'équation d'électro-neutralité

Le flux de l'espèce ionique k est donné par l'équation de Nernst-Planck [Friedman, 03], [Friedman, 08] :

$$\vec{J}_k = -QD_k \overrightarrow{\text{grad}c_k} + z_k \frac{F}{RT} c_k QD_k E \quad (4.3)$$

D_k : le coefficient de diffusion effectif de l'espèce ionique k ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),

z_k : la valence de l'espèce ionique k,

F : la constante de Faraday, égale à $96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$,

R : la constante des gaz parfaits, égale à $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

E : le champ électrique ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$),

Q : la diffusibilité du milieu poreux. Elle est calculée à partir de l'équation 4.4 [Friedman, 08],

$$Q = \frac{iRT}{F^2 (D_{OH} c_{OH} + D_K c_K + D_{Na} c_{Na}) E} \quad (4.4)$$

Où c_{OH} , c_K et c_{Na} sont les concentrations des ions OH^- , K^+ et Na^+ dans les solutions de base des deux compartiments amont et aval.

i : la densité de courant ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)

Les conditions d'électro-neutralité sont exprimées par l'équation 4.5

$$\sum_k z_k c_k = 0 \quad (4.5)$$

3.1.3 Isothermes d'interactions chimiques

Les isothermes d'interactions chimiques ont été déterminées expérimentalement pour tous les mortiers de réparation, d'après la procédure GranDuBé [Arliguie, 07]. Les concentrations initiales en chlorures étaient de 140, 280 et 564 mol/m³.

On présente sur la figure 4.36 un exemple d'isotherme d'interaction (courbe des concentrations en chlorures fixés en fonction des concentrations initiales). Les courbes des autres mortiers sont présentées dans l'annexe 6.

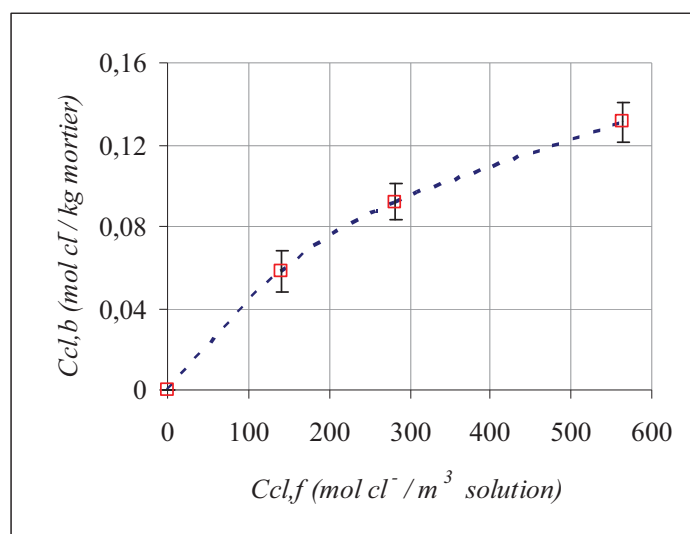


Figure 4.36 : Exemple d'isotherme d'interaction pour le mortier PB1

La relation de Langmuir a été choisie car elle s'adapte mieux aux résultats expérimentaux. Les coefficients α_L et β_L sont les constantes ajustées en fonction des résultats expérimentaux. Les valeurs pour tous les matériaux sont présentées dans le tableau 4.1.

	$\alpha_L(10^{-4})$	$\beta_L(10^{-3})$
PB1	5,4	2,3
PB2	6,6	4,1
PB3	7,6	6,3
PB4	2,1	1,8
PB5	1,8	1,6
PB6	5,4	4,3
BC1	8,9	5,0

Tableau 4.1 : Coefficients d'ajustement de l'isotherme d'interactions chimiques de Langmuir

3.2 Mise en œuvre numérique

La détermination des concentrations critiques en ions chlorure au sein de l'échantillon est l'un des objectifs principaux de la résolution des équations du modèle présenté précédemment. Cette résolution dépend des conditions initiales ainsi que des conditions aux limites de l'échantillon. On présente dans ce qui suit la méthode de résolution, les conditions initiales et aux limites ainsi que les entrées expérimentales du modèle.

3.2.1 Méthode de résolution

Le problème de la corrosion accélérée par électrodifusion est considéré ici comme unidimensionnel. La méthode numérique retenue pour résoudre le système d'équation est la méthode d'éléments finis. Les simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel de calcul par élément finis Comsol. L'échantillon d'épaisseur 5,5 cm est découpé en 3480 éléments. La discrétisation des équations dans le temps se fait en introduisant un pas de temps, ce dernier a été fixé à 900 secondes.

3.2.2 Conditions initiales et aux limites

Les concentrations des espèces ioniques Na^+ , K^+ , et OH^- présentes dans les compartiments amont et aval sont connues car les solutions ont été préparées au laboratoire. Celles de l'échantillon sont aussi connues puisque l'échantillon a été initialement saturé avec une solution de NaOH et KOH. La concentration en chlorures dans le compartiment amont et celle de la solution saline. Le tableau 4.2 présente les conditions initiales et aux limites.

Compartiment amont (mol. m^{-3})				Echantillon (mol. m^{-3})				Compartiment aval (mol. m^{-3})			
C_{Na^+}	C_{K^+}	C_{OH^-}	C_{Cl^-}	C_{Na^+}	C_{K^+}	C_{OH^-}	C_{Cl^-}	C_{Na^+}	C_{K^+}	C_{OH^-}	C_{Cl^-}
525	83	108	500	25	83	108	0	25	83	108	0

Tableau 4.2 : Conditions initiales et aux limites des concentrations dans les solutions amont et aval et conditions initiales dans l'échantillon

3.2.3 Les entrées expérimentales du modèle

- Coefficients de diffusion des espèces ioniques :

Les coefficients de diffusion des espèces ionique Na^+ , K^+ et OH^- sont déterminés à partir du coefficient de diffusion effectif des chlorures en utilisant la relation suivante [Friedman, 03] :

$$De_k = \pi \times Di_k = \frac{De_{Cl^-}}{Di_{Cl^-}} \times Di_k \quad (4.7)$$

Avec :

- De_k : le coefficient de diffusion de l'espèce ionique k (m^2/s)

- Di_k : le coefficient de diffusion moléculaire correspondant à une solution infiniment diluée (m^2/s)

- π est un paramètre qui intègre la géométrie de la microstructure poreuse à travers la porosité, la tortuosité et la constrictivité [Sleiman, 08], [Hocine, 09].

Les valeurs des coefficients Di_k disponibles dans la littérature sont présentées dans le tableau 4.3.

	Na^+	K^+	OH^-	Cl^-
$Di (10^{-9} m^2 .s^{-1})$	1,334	1,957	5,260	2,032

Tableau 4.3 : Coefficient de diffusion Di d'une espèce ionique i dans une solution infiniment diluée à une température de 25°C [Friedman, 03]

Les coefficients de diffusion de Na^+ , K^+ , OH^- et Cl^- sont calculés à partir de l'équation 4.7, ils sont donnés dans le tableau 4.4.

Matériaux	De_{Cl^-} ($10^{-12} m^2/s$)	π	De_{Na^+} ($10^{-12} m^2/s$)	De_{K^+} ($10^{-12} m^2/s$)	De_{OH^-} ($10^{-12} m^2/s$)
PB1	2,32	0,0011	1,52	2,23	6,00
PB2	1,26	0,0006	0,83	1,21	3,26
PB3	1,20	0,0005	0,79	1,15	3,10
PB4	1,13	0,0005	0,74	1,09	2,92
PB5	2,47	0,0012	1,62	2,37	6,40
PB6	3,36	0,0016	2,20	3,23	8,69
BC1	0,22	0,0001	0,14	0,21	0,57

Tableau 4.4 : Coefficients de diffusion à l'état saturé des espèces ioniques

- *Champ électrique et intensité de courant :*

Le champ électrique imposé aux bornes de chaque échantillon pour accélérer la diffusion des chlorures est égale à 350 V/m. Cette valeur a été appliquée à l'épaisseur de l'enrobage qui est comprise entre 1,8 et 2 cm, on obtient ainsi un potentiel électrique de 6,3 et 7 V.

La densité de courant est la valeur moyenne du courant généré par l'application du champ électrique lors de la polarisation, les valeurs pour chaque échantillon sont données dans le tableau 4.5.

<i>Echantillons</i>	<i>Densité de courant (A. m⁻²)</i>
<i>PB1-C30</i>	<i>6,5 ± 0,8</i>
<i>PB2-C30</i>	<i>4,5 ± 0,5</i>
<i>PB3-C30</i>	<i>4,0 ± 0,7</i>
<i>PB4-C30</i>	<i>4,0 ± 0,4</i>
<i>PB5-C30</i>	<i>9,0 ± 1,0</i>
<i>PB6-C30</i>	<i>6,0 ± 0,8</i>
<i>BC1-C30</i>	<i>3,0 ± 0,2</i>

Tableau 4.5 : Densité de courant pour les différents échantillons

- *Porosité et masse volumique absolue :*

Les porosités sont les porosités à l'eau présentées dans le chapitre 3. Les masses volumiques absolues ont été calculées à partir de la relation suivante :

$$\rho_s = \frac{\rho_a}{1 - \varepsilon_L} \quad (4.8)$$

Où :

ρ_s : la masse volumique absolue (kg/m³), ρ_a : la masse volumique apparente déterminée à partir de l'essai de porosité à l'eau et ε_L : la porosité à l'eau.

<i>Matériaux</i>	<i>Porosité (%)</i>	<i>Masse volumique apparente ρ_a (kg/m³)</i>	<i>Masse volumique absolue ρ_s (kg/m³)</i>
<i>PB1</i>	<i>26,9</i>	<i>1620</i>	<i>2216</i>
<i>PB2</i>	<i>17,7</i>	<i>2000</i>	<i>2430</i>
<i>PB3</i>	<i>14,1</i>	<i>2100</i>	<i>2444</i>
<i>PB4</i>	<i>17,1</i>	<i>2000</i>	<i>2412</i>
<i>PB5</i>	<i>18,2</i>	<i>1980</i>	<i>2420</i>
<i>PB6</i>	<i>17,9</i>	<i>1990</i>	<i>2423</i>
<i>BC1</i>	<i>17,2</i>	<i>2300</i>	<i>2777</i>

Tableau 4.6 : Porosités et masses volumiques des matériaux

- Temps de mesure :

Le temps de mesure est le temps nécessaire à l'initiation de la corrosion déterminé expérimentalement. Les temps d'initiation de la corrosion sont donnés dans le tableau 4.7. Ils sont obtenus à partir du suivi par spectroscopie d'impédance électrochimique en observant le début de la chute du diamètre de l'arc en basses fréquences.

<i>Echantillons</i>	<i>Temps (h)</i>
<i>PB1-C30</i>	<i>54</i>
<i>PB2-C30</i>	<i>109</i>
<i>PB3-C30</i>	<i>107</i>
<i>PB4-C30</i>	<i>120</i>
<i>PB5-C30</i>	<i>19</i>
<i>PB6-C30</i>	<i>52</i>
<i>BC1-C30</i>	<i>180</i>

Tableau 4.7 : Temps de mesures pour les différents échantillons

3.3 Simulations

La modélisation s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- les pores des matériaux sont saturés. En effet, les essais de migration réalisés dans la cellule de corrosion accélérée ont été effectués sur des échantillons préalablement saturés sous vide.
- le phénomène de convection est négligé. Le matériau étant saturé, la convection due aux phénomènes de capillarité est absente.

- la température est considérée constante et uniforme, égale à 25°C.
- la modélisation est faite en ne prenant en compte que le mortier de réparation.

Les paramètres d'entrée et de sortie du modèle sont présentés dans le schéma suivant :

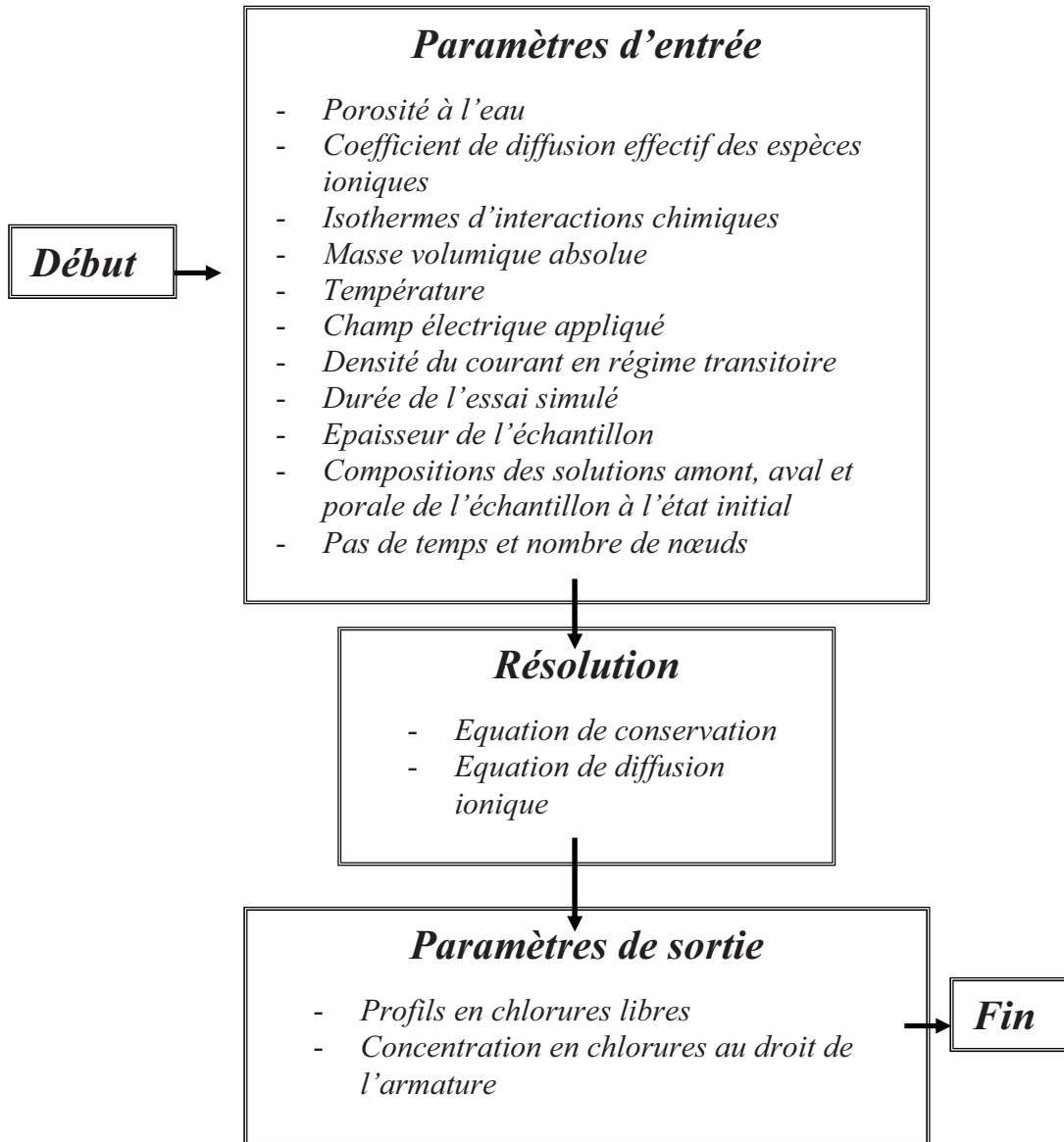


Figure 4.37 : Schéma de simulations selon le modèle utilisé

Les simulations réalisées donnent le profil de concentration des chlorures libres dans l'échantillon. Les résultats obtenus ont été confrontés à ceux obtenus expérimentalement. Les profils en chlorures issus de la modélisation et de la partie expérimentale sont présentés dans les figures 4.38 à 4.44.

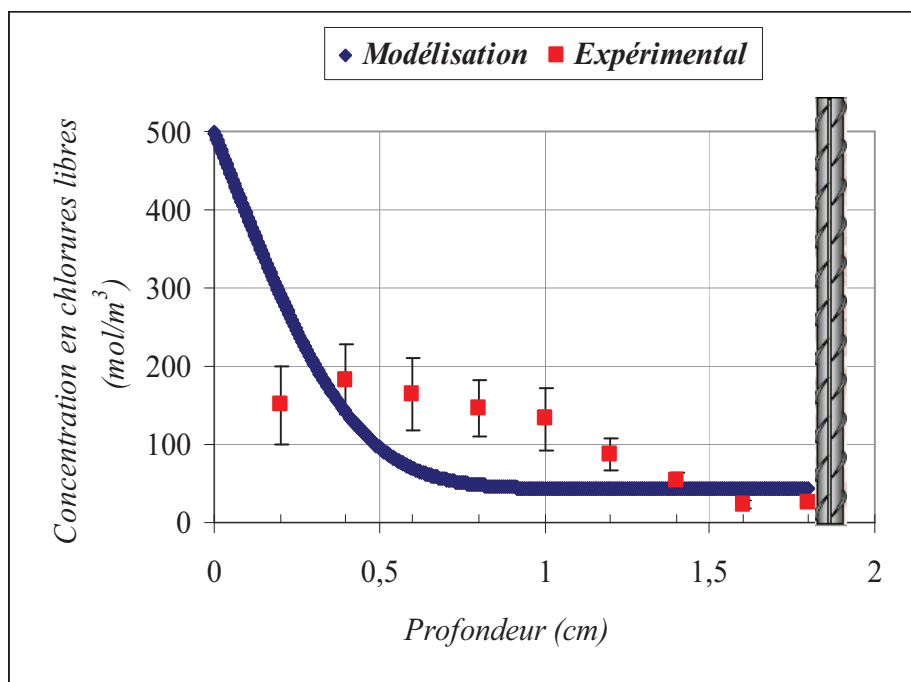


Figure 4.38 : Profils en chlorures de l'échantillon PB1-C30

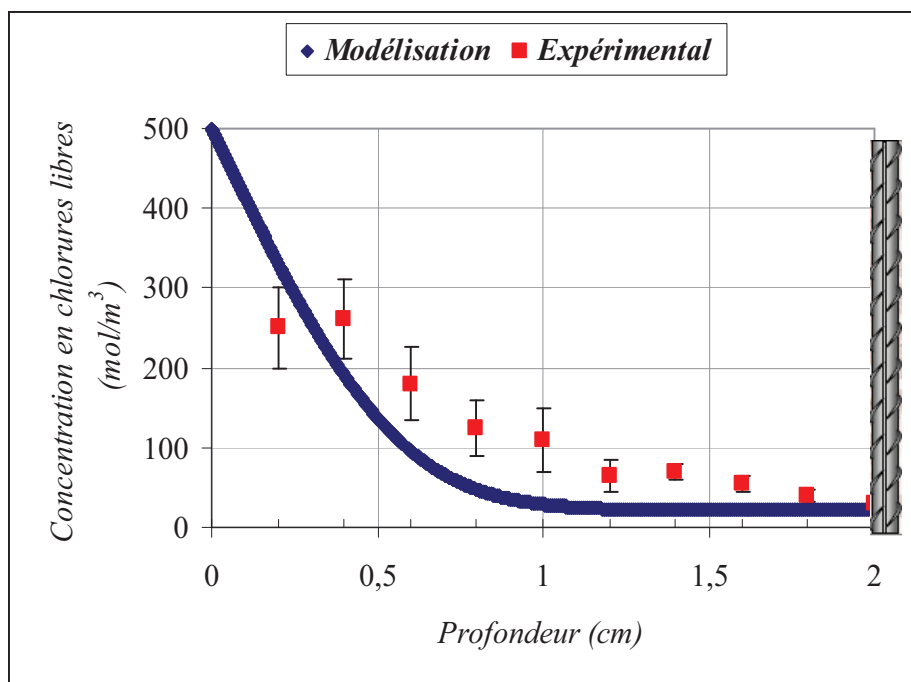


Figure 4.39 : Profils en chlorures de l'échantillon PB2-C30

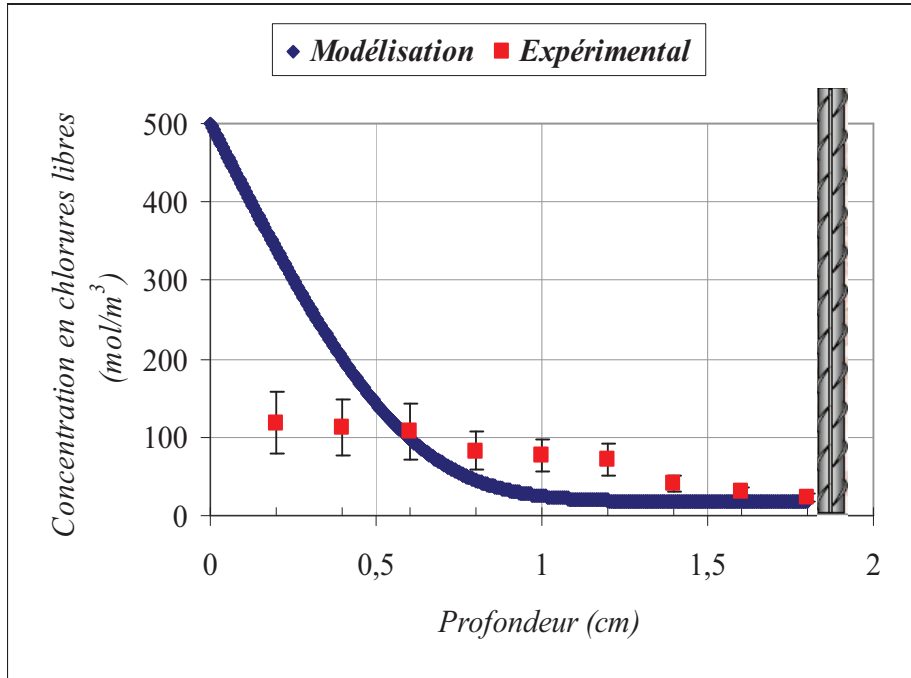


Figure 4.40 : Profils en chlorures de l'échantillon PB3-C30

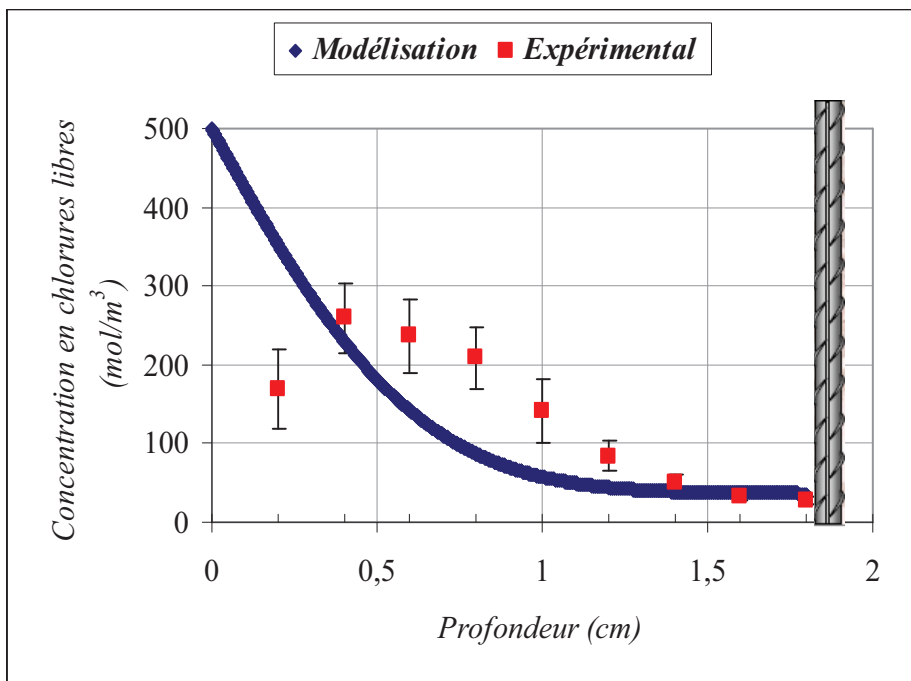


Figure 4.41 : Profils en chlorures de l'échantillon PB4-C30

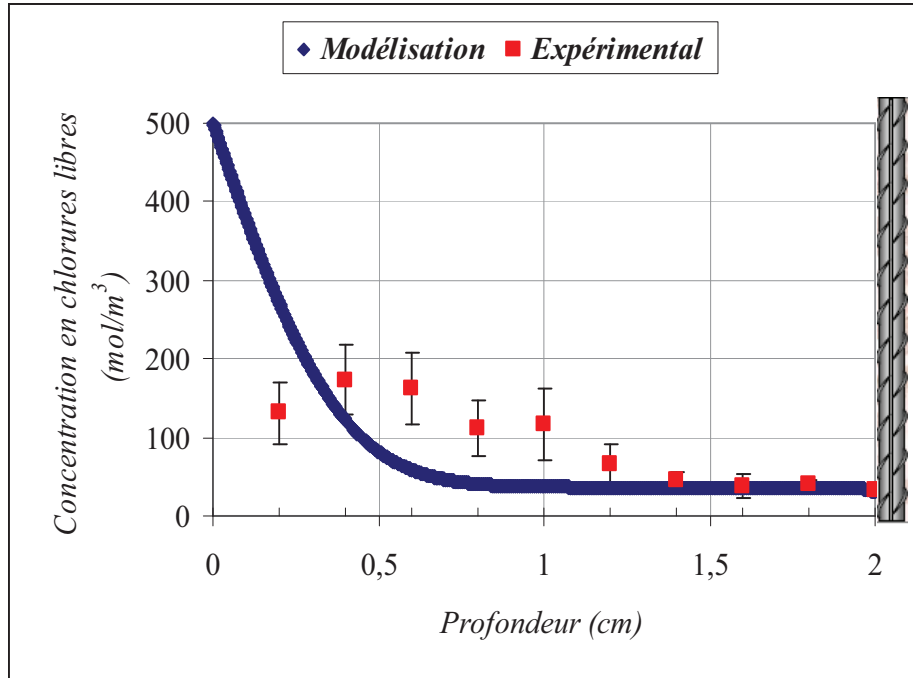


Figure 4.42 : Profils en chlorures de l'échantillon PB5-C30

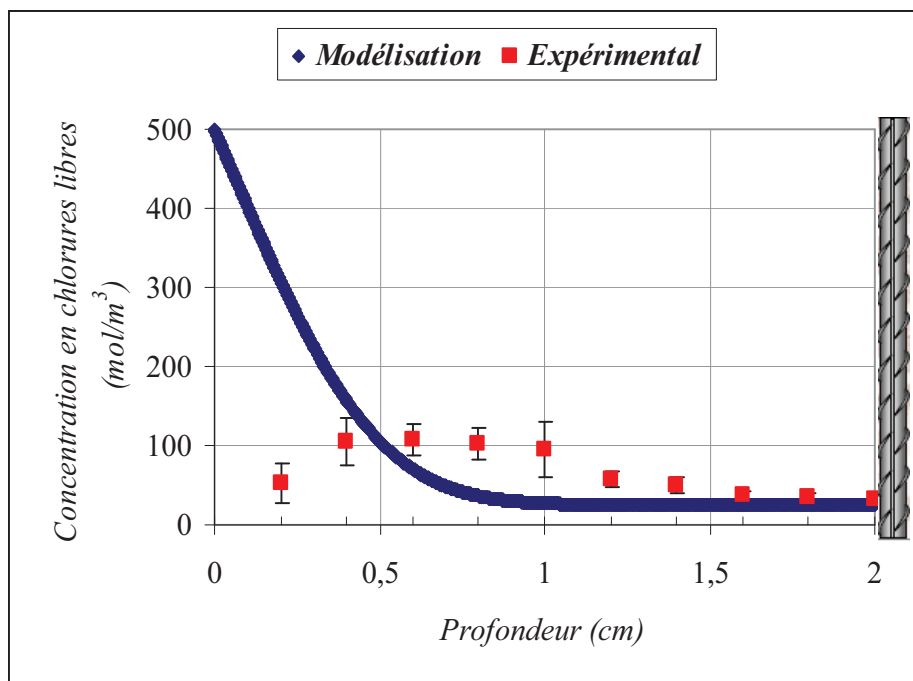


Figure 4.43 : Profils en chlorures de l'échantillon PB6-C30

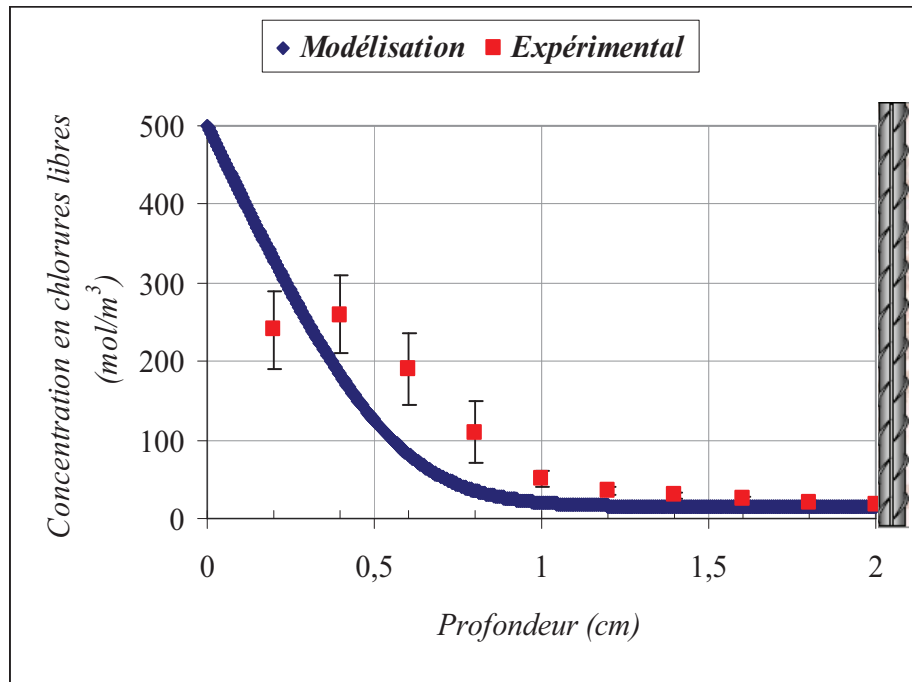


Figure 4.44 : Profils en chlorures de l'échantillon BC1-C30

On peut constater que les valeurs théoriques et expérimentales en concentration au niveau de l'armature sont assez proches. Par contre, on observe des décalages entre profils théoriques et profils expérimentaux. Le premier décalage est observé entre 0 et 0,4 cm, il est dû à l'effet de bord dans l'échantillon. En effet, la surface supérieure des échantillons se caractérise par une grande porosité. Cette porosité peut conduire à un séchage et une perte de chlorures. Le deuxième décalage est observé entre 0,4 et 1,2 cm, il peut être dû à l'effet de la polarisation sur la fixation des chlorures. Le but de la polarisation est d'accélérer la diffusion des chlorures, ces derniers ont une vitesse de déplacement dans le réseau poreux qui contribue à diminuer la fixation des chlorures par la matrice cimentaire. Mais ce qu'on observe, c'est que ce décalage n'apparaît qu'entre 0,4 et 1,2 cm. Au-delà de 1,2 cm, les points expérimentaux et théoriques s'accordent bien. On présente sur la figure 4.45 les valeurs théoriques et expérimentales des concentrations critiques en chlorures.

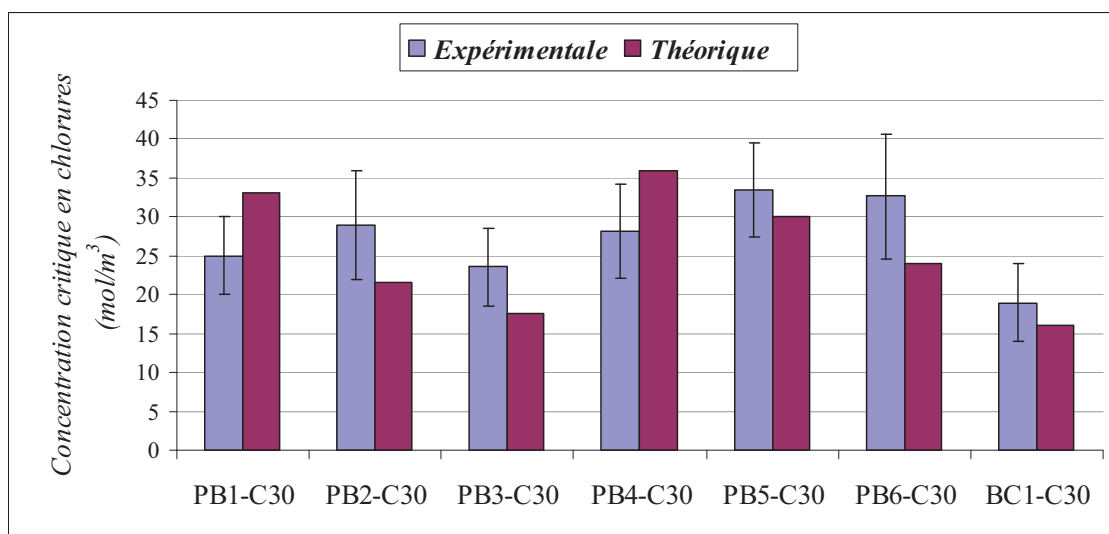


Figure 4.45 : Concentrations critiques en chlorures issues de l'expérimental et de la simulation en mol par m³ de solution porale

Hormis les chlorures, le modèle utilisé peut aussi nous fournir l'évolution des ions OH⁻. Cette concentration nous permet ainsi de connaître le rapport [Cl⁻]/[OH⁻] théorique nécessaire pour l'initiation de la corrosion. On présente dans le tableau 4.8 les concentrations des ions OH⁻ ainsi que les rapports [Cl⁻]/[OH⁻] théoriques pour les différents échantillons.

Echantillons	[OH ⁻] théorique (mol/m ³)	[Cl ⁻] théorique (mol/m ³)	[Cl ⁻]/[OH ⁻] théorique
PB1-C30	17	33	1,94
PB2-C30	14,5	23	1,58
PB3-C30	13	18	1,38
PB4-C30	16,5	36	2,18
PB5-C30	18	30	1,66
PB6-C30	15	24	1,60
BC1-C30	13,6	16	1,17

Tableau 4.8 : Valeurs du rapport [Cl⁻]/[OH⁻] nécessaire à la dép passivation de l'armature

D'après certains chercheurs, le rapport [Cl⁻]/[OH⁻] est un paramètre plus complet pour prédire s'il y a corrosion ou pas. Gouda et Hausmann [Hausmann, 67], [Gouda, 70] ont été les premiers à proposer une valeur critique de ce rapport, elle était comprise entre 0,35 et 0,6.

D'autres chercheurs ont aussi proposé d'autres valeurs de ce rapport. Elles sont résumées dans le tableau 4.9.

<i>Rapport $[Cl^-]/[OH^-]$</i>	<i>Référence</i>
0,25-0,8	<i>[Goni, 90]</i>
3,0	<i>[Lambert, 91]</i>
1,17-3,98	<i>[Alonso, 00]</i>
0,5-1,5	<i>[Li, 01]</i>
0,5-2	<i>[Alonso, 02]</i>
1,5-2	<i>[Castellote, 02]</i>

Tableau 4.9: Valeurs du rapport $[Cl^-]/[OH^-]$ responsables de l'initiation de la corrosion issues de la littérature

Selon les auteurs, on constate une variation dans les valeurs du rapport $[Cl^-]/[OH^-]$, cette variation est due essentiellement à une différence dans la méthode utilisée pour la détection de la corrosion et aussi à la nature du matériau utilisé. Globalement, les valeurs sont comprises entre 0,25 et 5. Nos valeurs sont comprises entre 1,17 et 2,18. Ces valeurs sont assez proches de celles obtenues par Castellote et Alonso. Elles restent quand même des valeurs théoriques qui doivent être comparées à des résultats expérimentaux. Ces derniers peuvent être obtenus par des mesures de pH de la solution porale au droit de l'armature.

3.4 Conclusion

Malgré un décalage entre les profils théoriques et expérimentaux. Cette modélisation simplifiée nous a permis de retrouver des concentrations critiques théoriques proches de celles déterminées expérimentalement. Cette étude théorique semble donc une démarche intéressante dans la détermination de la concentration critique dans des conditions accélérées. En effet, grâce à la base de données établie expérimentalement (propriétés de transfert des mortiers de réparation et paramètres de l'essai), nous sommes capables de déterminer un temps d'initiation de la corrosion. Ce temps peut être intégré dans le modèle de diffusion ionique utilisé dans notre étude afin d'estimer une concentration critique en chlorures. Cette dernière peut être intégrée par la suite dans des modèles prédictifs afin d'estimer un temps d'initiation de la corrosion en conditions naturelles.

L'intégration d'une interface dans ce modèle serait aussi une démarche intéressante pour la prédiction du temps de l'initiation de la corrosion. Une détermination expérimentale des profils en chlorures sur des échantillons avec interface permettrait de confronter les résultats expérimentaux et théoriques en conditions accélérées et de prédire par la suite la durée de vie d'une réparation en conditions naturelles.

4 Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était d'étudier la performance des mortiers de réparation vis-à-vis de la protection des armatures contre la corrosion. Cette étude a confirmé les résultats des performances des indicateurs de durabilité où le mortier bi-composant présente une meilleure barrière physique quant à la protection des armatures. Ceci est dû en grande partie à son fort dosage en polymères qui contribue à ralentir considérablement la diffusion des chlorures et donc retarde l'initiation de la corrosion. Cette étude a confirmé aussi que l'incompatibilité entre mortier de réparation et béton support contribue à accélérer la diffusion des chlorures, par conséquent elle accélère l'initiation de la corrosion.

Pas de grandes différences ont été observées entre les concentrations critiques des différents mortiers de réparation. Les valeurs sont comprises entre 0,13 et 0,3% de la masse du ciment. Ces valeurs sont proches de celles obtenues pour des bétons classiques.

La modélisation numérique nous a permis de retrouver des concentrations critiques en chlorures proches de celles obtenues expérimentalement. Cette modélisation peut être améliorée par l'introduction d'une ou de plusieurs interfaces en vue d'une prédiction de la durée de vie d'une réparation en conditions réelles.

Conclusion Générale et Perspectives

Ce projet de recherche a été mené pour étudier la durabilité et la performance de mortiers de réparation pour un environnement marin. L'étude bibliographique a montré que les matériaux de réparation sont généralement des matériaux très complexes et modifiés par l'ajout de polymères et autres additions minérales et adjuvants. La recherche bibliographique a montré aussi que les mortiers de réparation sont formulés pour assurer une bonne tenue mécanique à la mise en œuvre et dans le temps. Par voie de conséquence, les propriétés de durabilité et de transfert sont améliorées avec une influence notable des polymères.

Au-delà de l'étude bibliographique, la première partie de l'étude expérimentale a été consacrée à la caractérisation physique et minéralogique de huit mortiers de réparation industriels aux formulations inaccessibles. Ces mortiers de réparations sont de deux familles, mortiers bi-composants et mortiers mono-composant. La caractérisation préliminaire nous a permis de déterminer la quantité de ciment et de polymères ce qui nous a permis d'estimer deux paramètres de formulation qui sont le rapport E/C (eau/ciment) et le rapport P/C (polymère/ciment). Les mortiers bi-composants contiennent 20 % de polymères, à l'inverse des mortiers mono-composant qui ne contiennent que 4 à 8% avec un rapport E/C nettement plus élevé qui atteint 0,5 contre un rapport de 0,2 pour les mortiers bi-composants. À travers cette étude préliminaire, nous avons pu identifier la nature chimique des solutions polymériques qui est de type Acrylamide styrène-acrylate d'éthyle ainsi que la nature des additions minérales. Ces dernières peuvent être de la fumée de silice ou des additions calcaires. En résumé, cette caractérisation préliminaire nous a permis de nous familiariser avec ce type de matériaux et d'estimer les proportions des constituants (ciment, polymères) indispensables à la compréhension des mécanismes mis en jeu lors de l'étude des propriétés de transfert.

La deuxième partie expérimentale a été dédiée à une caractérisation des indicateurs de durabilité de ces matériaux. Les mortiers bi-composants ont montré qu'ils possèdent un meilleur comportement quant à l'absorption d'eau, à la perméabilité à l'air et à la diffusion des ions chlorures. Ceci est dû à un fort dosage en polymères qui contribue à affiner la structure poreuse par son effet de remplissage mais aussi par la formation d'un film polymère dans la matrice cimentaire.

En général, cette étude a pu démontrer aussi que les mortiers mono-composant ont des comportements équivalents à ceux d'un mortier témoin concernant les différentes propriétés de transfert étudiées. Certaines propriétés du mortier normalisé, comme le coefficient de diffusion des chlorures et la perméabilité intrinsèque se sont même révélées inférieures à celles de certains mortiers. Néanmoins, tous les mortiers présentent des coefficients d'absorption capillaire inférieurs à celui du mortier témoin. Ceci est dû en grande partie à la présence du polymère qui contribue à réduire la pression capillaire.

Les résultats des propriétés de transfert à l'interface, ont montré qu'il existe une bonne compatibilité entre les mortiers de réparation étudiés et le béton support. Ceci peut être dû à la présence du polymère qui remplit la porosité du support, mais aussi à leur faible granulométrie qui leur permet une meilleure pénétration dans le support. Des essais supplémentaires doivent donc être réalisés pour confirmer ces résultats. Cette étude a permis aussi de confirmer que la fissuration à l'interface est un chemin privilégié pour la diffusion des chlorures. Cependant, peu de conclusions peuvent être déduites quant à l'influence de l'interface sur l'absorption capillaire. Ceci nécessite des essais supplémentaires et une analyse plus approfondie.

La troisième partie expérimentale de ce travail de thèse a été consacrée à l'étude de l'amorçage de la corrosion sur des échantillons de béton réparés. Cette étude a confirmé les résultats des performances des indicateurs de durabilité où les mortiers bi-composants présentent une meilleure barrière physique quant à la protection des armatures. Cette étude a révélé aussi que les concentrations critique en chlorures restent équivalentes quelle que soit la famille du mortier.

En résumé, on peut dire que la méthodologie expérimentale qui a été mise en œuvre nous a permis de distinguer les mortiers performants des mortiers moins performants. Les mortiers bi-composants sont ceux qui présentent le meilleur comportement vis-à-vis des propriétés de transfert et présentent une meilleure capacité à protéger l'armature contre la corrosion.

En conséquence, ils sont les mieux adaptés pour une réparation dans un environnement marin et plus particulièrement dans des zones de marnage où le processus d'absorption capillaire est prédominant. Ceci est dû en grande partie à un fort dosage en polymère et une faible quantité d'eau dans les dosages prescrits par les fabricants.

Dans les mortiers mono-composant, le mortier autoplaçant se distingue des autres par un meilleur comportement à la perméabilité à l'air et une plus faible absorption capillaire. Ce

mortier présente un dosage en polymères équivalent à celui des autres mortiers mono-composant, mais recommandé avec un plus faible dosage en eau.

Enfin, le mortier qui présente une mauvaise incompatibilité avec le support (PB5) ne peut pas être appliqué dans un environnement marin en raison des problèmes de fissurations.

Grâce à la simulation numérique, on a pu montrer que le modèle numérique basé sur l'équation de Nernst-Planck décrit correctement le transfert des chlorures à travers l'enrobage de l'armature. Les concentrations critiques en chlorures prédites par le modèle sont assez proches de celles obtenues expérimentalement. Ceci signifie qu'on peut déterminer la concentration critique en chlorures d'autres mortiers en connaissant leurs propriétés de transfert (porosité, coefficient de diffusion des chlorures et isothermes d'interactions chimiques). Avec ces propriétés, on peut prédire la concentration critique en chlorures en conditions accélérées. Cette concentration peut être intégrée par la suite dans les modèles numériques afin de déterminer le temps de l'initiation de la corrosion en conditions naturelles.

Perspectives

Ce projet de thèse peut être complété et approfondi par d'autres travaux expérimentaux et numériques. Les travaux expérimentaux concernent l'étude des indicateurs de durabilités d'autres mortiers de réparation avec des dosages différents en polymères, par exemple avec des rapports P/C supérieurs à 20% pour les mortiers bi-composants ainsi que des rapports supérieurs à 10% pour les mortiers mono-composant. Ceci permettrait d'avoir une tendance générale quant à l'influence du dosage en polymères sur les propriétés de durabilité. Ceci permettrait aussi de déterminer l'optimum du dosage en polymère. Ce travail peut être approfondi par l'étude de l'influence de la nature chimique du polymère sur la microstructure et de son interaction avec la matrice cimentaire. L'influence du polymère sur le degré d'hydratation semble aussi un paramètre important à étudier puisque ce dernier peut avoir une influence sur la structure poreuse, donc sur les propriétés de transfert.

L'étude du transfert de chlorures peut être étendue à des zones de marnage afin d'analyser la cinétique de pénétration dans ce type de matériaux. Ceci peut être réalisé grâce au simulateur de marnage disponible au laboratoire ou bien au site de marnage de La Rochelle. L'étude peut être aussi étendue au transfert des chlorures dans l'enceinte de brouillard salin disponible au laboratoire.

Enfin, l'étude des propriétés de transfert à l'interface peut être étendue à un ensemble mortier-béton à haute performance. Cette étude permettrait d'analyser le comportement des mortiers de réparation appliqués sur les bétons généralement utilisés dans un milieu marin. Elle peut être complétée par une étude des propriétés mécaniques, notamment l'étude de l'adhérence. Ceci afin d'examiner la relation pouvant exister entre propriétés de durabilité et propriétés mécaniques.

Les travaux numériques concernent la prédiction de la durée de vie des réparations effectuées en conditions naturelles. Cette prédiction peut se faire grâce à l'introduction des concentrations critiques déterminées expérimentalement dans des modèles prédictifs. Ceci permettrait de simuler le temps nécessaire à l'initiation de la corrosion. D'autres modèles peuvent aussi être développés par l'introduction d'une ou deux interfaces afin de simuler l'évolution de la pénétration des chlorures en conditions d'exposition naturelles, avec la prise en compte des paramètres d'agressivité de l'environnement (exposition, humidités relatives, cycles de marnage,...).

Références Bibliographiques

- [Abbas, 99] A. Abbas, M. Carcassès, J.P. Ollivier. Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. *Materials and Structures*, vol 32, pp 3-8, 1999.
- [Afgc, 03] Association française de génie civil (AFGC). Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion. Document scientifique et technique, 2003.
- [Afnor, 98] Association française de normalisation. NF EN 12190. Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Méthodes d'essais : Détermination de la résistance à la compression pour les mortiers de réparation, 1998.
- [Afnor, 00] Association française de normalisation. NF EN 206-1. Béton. Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, 2000.
- [Afnor, 08] Association française de normalisation. NF EN 1504. Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton, 2008.
- [Afridi, 95] M.U.K. Afridi, Y. Ohama, M.Z. Iqbal, K. Demura. Water retention and adhesion of powdered and aqueous polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Composite*, vol 17, pp 113-118, 1995.
- [Afridi, 03] M.U.K. Afridi, Y. Ohamab, K. Demurab, M.Z. Iqbal. Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, vol 33, pp 1715-1721, 2003.
- [Aggarwal, 07] L.K. Aggarwal, P.C. Thapliyal, S.R. Karade. Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions. *Construction and Building Materials*, vol 21, pp 379-383, 2007.
- [Ahmad, 03] S. Ahmad. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction- a review. *Cement and Concrete Composites*, vol 25, pp 459-471, 2003.
- [Aït-Mokhtar, 99] A. Aït-Mokhtar, O. Amiri, S. Sammartino. Analytic modelling and experimental study of the porosity and permeability of porous medium - application to cement mortars and granitic rock. *Magazine of Concrete Research*, vol 51, pp 391-396, 1999.

- [Aït-Mokhtar, 06] A. Aït-Mokhtar, O. Poupard, P. Dumargue. Relationship between the transfer properties of the coating and impedance spectroscopy in reinforced cement-based materials. *Journal of Materials Science*, vol 41, pp 6006-6014, 2006.
- [Al Hajjar, 08] H. Al Hajjar. Applicabilité et efficacité d'une protection galvanique aux aciers de précontrainte. Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2008.
- [Almeida, 06] S. Almeida, E.P. Sichieri. Mineralogical study of polymer modified mortar with silica fume. *Construction and Building Materials*, vol 20, pp 882-887, 2006.
- [Almusallam, 03] A.A. Almusallam, F.M. Khan, S.U. Dulaijan, O.S.B. Al-Amoudi. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cement and Concrete Composites*, vol 25, pp 473-481, 2003.
- [Alonso, 00] C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, P. Castro. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. *Cement and Concrete Research*, vol 30, pp 1047-1055, 2000.
- [Alonso, 02] C. Alonso, M. Castellote, C. Andrade. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. *Electrochimica Acta*, vol 47, pp 3469-3481, 2002.
- [Amiri, 98] O. Amiri. Modélisation de l'électrodifusion des ions chlore dans les mortiers de ciment – Intégration des phénomènes d'adsorption électrocapillaires. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 1998.
- [Amiri, 01a] O. Amiri, A. Aït Mokhtar, P. Dumargue, G. Touchard. Electrochemical modeling of chloride migration in cement based materials: Part I: Theoretical basis at microscopic scale. *Electrochimica Acta*, vol 46, pp 1267-1275, 2001.
- [Amiri, 01b] O. Amiri, A. Aït Mokhtar, P. Dumargue, G. Touchard. Electrochemical modeling of chlorides migration in cement based materials. Part II : Experimental study and calculation of chlorides flux. *Electrochimica Acta*, vol 46, pp 3589-3597, 2001.

- [Amiri, 05] O. Amiri, A. Aït-Mokhtar, M. Sarhani, Tri-dimensional modelling of cementitious materials permeability from polymodal pore size distribution obtained by mercury intrusion porosimetry tests. *Advanced in Cement Research*, vol 17, pp 39-45, 2005.
- [Amiri, 07] O. Amiri, A. Aït -Mokhtar. Rapport synthétique sur les méthodes de calcul des coefficients de diffusion. *GranDuBé-grandeurs associées à la durabilité des bétons*, Presse des Ponts et des Chaussées, paris, 2007.
- [Andrade, 95] C. Andrade, C. Alonso. Advances in electrochemical impedance measurements in reinforced concrete. *Materials Science Forum*, pp 843-855, 1995.
- [Angst, 09] U. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, O. Vennesland. Critical chloride content in reinforced concrete - A review. *Cement and Concrete Research*, vol 39, pp 1122-1138, 2009.
- [Arenas, 06] M.A. Arenas, C. Casado, V. Nobel-Pujol, J. de Damborenea. Influence of the conversion coating on the corrosion of galvanized reinforcing steel. *Cement and Concrete Composites*, vol 28, pp 267-275, 2006.
- [Arliguie, 07] GranDuBé. *Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons*, sous la direction de G. Arliguie et H. Hornain. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- [ASTM, 91] ASTM C876 – 09. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1991.
- [Bagel, 97] L. Bagel. V. Kivica. Relationship between pore structure and permeability of hardened cement mortars: on the choice of effective pore structure parameter. *Cement and Concrete Research*, vol 27, pp 1225-1235, 1997.
- [Balayssac, 92] J.P. Balayssac. Relation entre performance mécanique, microstructure et durabilité des bétons. Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 1992.
- [Bamforth, 99] P.B. Bamforth. The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-years UK coastal exposure trials. *Magazine of Concrete Research*, vol 51, pp 87-96, 1999.
- [Banthia, 06] N. Banthia, R. Gupta. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 36, pp 1263-1267, 2006.

- [Barluenga, 04]* G. Barluenga, F. Hernandez-Olivares. SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp 527-535, 2004.
- [Basheer, 01]* L. Basheer, J. Kropp, D.J. Cleland. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, vol 15, pp 93-103, 2001.
- [Betioli, 09]* A.M. Betioli, J. Hoppe Filho, M.A. Cincotto, P.J.P. Gleize, R.G. Pileggi. Chemical interaction between EVA and portland cement hydration at early-age. *Construction and Building Materials*, vol 23, pp 3332-3336, 2009.
- [Bissonnette, 99]* B. Bissonnette, P. Pierre, M. Pigeon. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, vol 29, pp 1655-1662, 1999.
- [Bureau, 01]* L. Bureau, A. Alliche, Ph. Pilvin, S. Pascal. Mechanical characterization of a styrene-butadiene modified mortar. *Materials Science and Engineering*, vol 308, pp 233-240, 2001.
- [Cabrera, 97]* J.G. Cabrera, A.S. Al-Hasan. Performances properties of concrete repair materials. *Construction and Building Materials*, vol 11, pp 283-290, 1997.
- [Care, 11]* S. Care, F. Derkx. Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars. *Construction and Building Materials*, vol 25, pp 1248-1256, 2011.
- [Castellote, 02]* M. Castellote, C. Andrade, C. Alonso. Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. *Corrosion Science*, vol 44, pp 2409-2424, 2002.
- [Delagrave, 97]* A. Delagrave, J. Marchand, J-P. Ollivier, S. Julien, K. Hazrati. Chloride binding capacity of various hydrated cement systems. *Advanced Cement Based Materials*, vol 6, pp 28-35, 1997.
- [Do, 03]* J. Do, Y. Soh. Performance of polymer-modified self-leveling mortars with high polymer–cement ratio for floor finishing. *Cement and Concrete Research*, vol 33, pp 1497-1505, 2003.
- [Elsner, 1986]* B. Elsner, H. Böhni. Corrosion of steel in mortar studied by impedance measurements. *Materials Science Forum*, vol 8, pp 363-372, 1986.

- [Embersons, 90]* N. K. Embersons, G.C. Mays. Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete, part I: properties of repair systems. *Cement and Concrete Research*, vol 19, pp 147-160, 1990.
- [Emmons, 94]* P.H. Emmons, A.M. Vaysburd, J.E. Mc Donald. Concrete repair in the future turn of the century - any problems. *Concrete International*, vol 16, pp 42-49, 1994.
- [Emmons, 96]* P.H. Emmons, A. M. Vaysburd. System concept in design and construction of durable concrete repairs. *Construction and Building Materials*, vol 10, pp 69-75, 1996.
- [Ford, 98]* S.J. Ford, J.D. Shane, T.O. Mason. Assignment of features in impedance spectra of the cement-paste/steel system. *Cement and Concrete Research*, vol 28, pp 1737-1751, 1998.
- [Fowler, 99]* D.W. Fowler. Polymers in concrete: a vision for the 21st century. *Cement and Concrete Composites*, vol 21, pp 449-452, 1999.
- [Francy, 98]* O. Francy. Modélisation de la pénétration des ions chlorures dans les mortiers partiellement saturés en eau. Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 1998.
- [Friedman, 03]* H. Friedmann, Modélisation multi-espèces de l'électrodifusion instationnaire des ions chlore dans les mortiers du ciment - intégration de la double couche électrique. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 2003.
- [Friedman, 04]* H. Friedmann, O. Amiri, A.K. Aït -Mokhtar, P. Dumargue. A direct method for determining chloride diffusion coefficient by using migration test. *Cement and Concrete Research*, vol 34, pp 1967-1973, 2004.
- [Friedman, 08]* H. Friedman, O. Amiri, A.K. Aït-Mokhtar. Physical modeling of the electrical double layer effects on multispecies ions transport in cement based materials. *Cement and Concrete Research*, vol 38, pp 1394-1400, 2008.
- [Gallé, 01]* C. Gallé. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven vacuum and freeze-drying. *Cement and Concrete Research*, vol 31, pp 1467-1477, 2001.

- [Gao, 02]* J.M. Gao, C.X. Qiana, B. Wanga, K. Morino. Experimental study on properties of polymer-modified cement mortars with silica fume. *Cement and Concrete Research*, vol 32, pp 41-45, 2002.
- [Garboczi, 91]* E.J. Garboczi. Mercury porosimetry and effective networks for permeability calculations in porous materials. *Powder Technology*, vol 67, pp 121-125, 1991.
- [Glass, 97]* G.K. Glass, N.R. Buenfeld. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, vol 39, pp 1001-1013, 1997.
- [Glass, 01]* G.K. Glass, R. Yang, T. Dickhaus, N.R. Buenfeld. Backscattered electron imaging of the steel-concrete interface. *Corrosion Science*, vol 43, pp 605-610, 2001.
- [Gomes, 05]* C.E.M Gomes, O.P Ferreira, M.R Fernandes. Influence of vinyl acetate-versatic vinylester copolymer on the microstructural characteristics of cement pastes. *Materials Research*, vol 8, pp 51-56, 2005.
- [Goni, 90]* S. Goni, C. Andrade. Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides. *Cement and Concrete Research*, vol 20, pp 525-539, 1990.
- [Gonzales, 04]* J.A. Gonzales, J.M. Miranda, S. Filiu. Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete. *Corrosion Science*, vol 46, pp 2467-2485, 2004.
- [Gouda, 70]* V.K. Gouda. Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel. I. Immersed in alkaline solutions. *British Corrosion Journal*, vol 5, pp 198-203, 1970.
- [Gretz, 11]* M. Gretz, J. Plank. An ESEM investigation of latex film formation in cement pore solution. *Cement and Concrete Research*, vol 41, pp 184-190, 2011.
- [Gu, 93]* P. Gu, Z. Xu, P. Xie, J.J. Beaudoin. Application of A.C. impedance techniques in studies of porous cementitious materials: Influence of solid phase and pore solution on high frequency resistance. *Cement and Concrete Research*, vol 23, pp 531-540, 1993.

- [Gu, 97] P. Gu, S. Elliott, R. Hristova, J. J. Beaudoin, R. Brousseau, B. Baldock. A study of corrosion inhibitor performance in chloride contaminated concrete by electrochemical impedance spectroscopy. *ACI Materials Journal*, vol 94, pp 385-395, 1997.
- [Hall, 89] Hall C. Water absorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete and Research*, vol 41, pp 51-61, 1989.
- [Hamami, 09] A. Hamami. Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2009.
- [Hamami, 12] A. Hamami, Ph. Turcry, A. Aït-Mokhtar. Influence of mix proportions on microstructure and gas permeability of cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, vol 42, pp 490-498, 2012.
- [Hanson, 84] C.M. Hansson. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 14, pp 574-584, 1984.
- [Hanzic, 10] L. Hanzic, L. Kosec, I. Anzel. Capillary absorption in concrete and the Lucas–Washburn equation. *Cement and Concrete Composites*, vol 32, pp 84-91, 2010.
- [Hassan, 00] K.E. Hassan, P.C. Robery, L. Al-Alawi. Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials, *Cement and Concrete Composites*, vol 22, pp 453-458, 2000.
- [Hausmann, 67] D.A. Hausmann. Steel corrosion in concrete. How does it occur? *Journal of Materials Protection*, vol 6, pp 19-23, 1967.
- [Hocine, 09] T. Hocine, Détermination expérimentale de la double couche électrique et étude de son influence sur le transfert des ions chlorure dans les matériaux cimentaires. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2009.
- [Hope, 89] B.B. Hope. A.K.C. Ip. Corrosion inhibitors for use in concrete. *ACI Materials Journal*, vol 86, pp 602-608, 1989.
- [Horn, 07] A.T. Horne, I.G. Richardson, R.M.D. Brydson. Quantitative analysis of the microstructure of interfaces in steel reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 37, pp 1613-1623, 2007.
- [Hussein, 95] S.E. Hussain, A. Al-Musallam, A.S. Al-Gahtani. Factors affecting

- threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 25, pp 1543-1555, 1995.
- [Jacobs, 98]* Jacobs F. Permeability to gas of partially saturated concrete. *Magazine of Concrete Research*, vol 50, pp 115-121, 1998.
- [Jae-Ho, 97]* K. Jae-Ho, R.E. Robertson. Prevention of air void formation in polymer modified cement mortar by pre-wetting. *Cement and Concrete Research*, vol 27, pp 171-176, 1997.
- [Janotka, 96]* I. Janotka, J. Madejovh, L. Stevula, D.M. Frt'alova. Behavior of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the presence of the set styrene-acrylate dispersion. *Cement and Concrete Research*, vol 26, pp 1727-1735, 1996.
- [Kaid, 09]* N. Kaid, M. Cyr, S. Julien, H. Khelafi. Durability of concrete containing a natural pozzolan as defined by performance-based approach. *Construction and Building Materials*, vol 23, pp 3457-3467, 2009.
- [Kim, 97]* J.H. Kim, R. Robertson. Prevention of air void formation in polymer-modified cement mortar by pre-wetting. *Cement and Concrete Research*, vol 27, pp 171-176, 1997.
- [Klinkenberg, 41]* L.J. Klinkenberg The permeability of porous media to liquid and gases. *Drilling and production practice*, American Petroleum Institute, pp 200-213, 1941.
- [Koleva, 06]* D.A. Koleva, J. Hu, A.L.A. Fraaij, P. Stroeven, N. Boshkov, J.H.W. De Wit. Quantitative characterisation of steel/cement paste interface microstructure and corrosion phenomena in mortars suffering from chloride attack. *Corrosion Science*, vol 48, pp 4001-4019, 2006.
- [Lea, 70]* F.M. Lea. *Chemistry of cement and concrete*, 3rd edition. Chemical publishing company, 1970.
- [Loche, 01]* J.M. Loche. Etude du transfert d'ions chlorures à travers des mortiers de ciment par diffusion-migration, suivi par spectroscopie d'impédance électrochimique. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2001.
- [Mallat, 11]* A. Mallat, A. Alliche. Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system. *Construction and Building Materials*, vol 25, pp 1587-1595, 2011.
- [Mangat, 95]* P.S. Mangat, M.C. Limbachi. Repair material properties which influence

- long-term performance of concrete structures. *Construction and Building Materials*, vol 9, pp 81-90, 1995.
- [*Marcotte, 99*] T.D. Marcotte, C.M. Hansson, B.B. Hope. The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar. Part I: Electrochemical measurements. *Cement and Concrete Research*, vol 29, pp 1555-1560, 1999.
- [*Martys, 97*] N.S. Martys, C.E. Ferrairis. Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 27, pp 747-760, 1997.
- [*Mauroux, 11*] T. Mauroux. Impact du séchage sur les propriétés d'adhérence entre un mortier et un support - Influence de l'adjuvantation par des éthers cellulose. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2011.
- [*Mauroux, 12*] T. Mauroux, F. Benboudjema, P. Turcry, A. Aït-Mokhtar, O. Deves. Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation. *Cement and Concrete Research*, vol 42, pp 1014-1023, 2012.
- [*Medeiros, 09*] M.H.F. Medeiros, P. Helene, S. Selmo. Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars. *Construction and Building Materials*, vol 23, pp 2527-2533, 2009.
- [*Meishan, 02*] P. Meishan, W. Kima, W. Hyunga, A.J. Angoa, Y. Soh. Effects of emulsifiers on properties of poly (styrene-butyl acrylate) latex-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, vol 32, pp 837-841, 2002.
- [*Mendes, 12*] A. Mendes, J.G. Sanjayan, W.P. Gates, F. Collins. The influence of water absorption and porosity on the deterioration of cement paste and concrete exposed to elevated temperatures, as in a fire event. *Cement and Concrete Composites*, vol 34, pp 1067-1074, 2012.
- [*Michael, 96*] T. Michael. Chloride thresholds in marine concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 26, pp 513-519, 1996.
- [*Mirza, 02*] J. Mirza, B. Durand. Laboratory and field performance of polymer-modified cement-based repair mortars in cold climates. *Construction and Building Materials*, vol 16, pp 365-374, 2002.
- [*Moradllo, 12*] M.K. Moradllo, M. Shekarchi, M. Hoseini. Time-dependent performance of concrete surface coatings in tidal zone of marine environment. *Construction and Building Materials*, vol 30, pp 198-205, 2012.
- [*Morgan, 96*] D.R. Morgan. Compatibility of concrete repair materials systems.

- Construction and Building Materials, vol 10, pp 51-61, 1996.
- [Nepomuceno, 06]* A.A. Nepomuceno, C. Andrade. Steel protection capacity of polymeric based cement mortars against chloride and carbonation attacks studied using electrochemical polarization resistance. Cement and Concrete Composites, vol 28, pp 716-721, 2006.
- [Neville, 95]* A. Neville. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. Materials and Structures, vol 28, pp 63-70, 1995.
- [Nguyen, 06]* T.S. Nguyen. Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux. Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2006.
- [Nicot, 08]* P. Nicot. Interactions mortier-support: éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier. Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2008.
- [NT Build, 99]* NT Build 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 1999.
- [Oh, 03]* B.H. Oh, S.Y. Jang, Y.S. Shin. Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures. Magazine of Concrete Research, vol 55, pp 117-124, 2003.
- [Ohama, 87]* Y. Ohama. Principle of latex modification and some typical properties of latex modified mortars and concretes. Materials Journal, vol 84, pp 511-518, 1987.
- [Ohama, 91]* Y. Ohama, K. Demura. Pore size distribution and oxygen diffusion resistance of polymer-modified mortars. Cement and Concrete Research, vol 21, pp 309-315, 1991.
- [Ohama, 96]* Y. Ohama. Handbook of polymer modified concrete and mortars: Properties and process technology. Building Materials Science, 1996.
- [Ohama, 97]* Y. Ohama. Recent progress in concrete-polymer composites. Advanced Cement Based Materials, vol 5, pp 31-40, 1997.
- [Ohama, 98]* Y. Ohama. Polymer-based Admixtures. Cement and Concrete Composites, vol 20, pp 189-212, 1998.
- [Ollitrault, 98]* R. Ollitrault-Fichet, C. Gauthier, G. Clamen. Microstructural aspects in a

- polymer modified cement. *Cement and Concrete Research*, vol 28, pp 1687-1693, 1998.
- [Ollivier, 06]* J-P. Ollivier, A. Vichot. *La durabilité des bétons*. Les Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 2006.
- [Omrikine, 06]* O. Omrikine-Metalssi. *Etude des couplages hydratation-échanges hydriques-carbonatation dans les mortiers modifiés polymères*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2006.
- [Orellan, 04]* J.C. Orellan, G. Escadeillas, G. Arliguie. Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects. *Cement and Concrete Research*, vol 34, pp 227-234, 2004.
- [Padeferri, 96]* P. Padeferri. Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials*, vol 10, pp 391-402, 1996.
- [Page, 91]* C.L. Page, P. Lambert, P.R.W. Vassie. Investigations of reinforcement corrosion. 1. The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete. *Materials and Structures*, vol 24, pp 243-252, 1991.
- [Park, 12]* D. Park, S. Park, Y. Seo, T. Noguchi. Water absorption and constraint stress analysis of polymer-modified cement mortar used as a patch repair material. *Construction and Building Materials*, vol 28, pp 819-830, 2012.
- [Parrot, 94]* L.J. Parrott. Moisture conditioning and transport properties of concrete test specimens. *Materials and Structures*, vol 27, pp 460-468, 1994.
- [Parthiban, 08]* G.T. Parthiban, T. Parthiban, R. Ravi, V. Saraswathy, N. Palaniswamy, V. Sivan. Cathodic protection of steel in concrete using magnesium alloy anode. *Corrosion Science*, vol 50, pp 3329-3335, 2008.
- [Pascal, 03]* S. Pascal, A. Alliche, Ph. Pilvin. Mechanical behaviour of polymer modified mortars. *Materials Science and Engineering*, vol 380, pp 1-8, 2003.
- [Picandet, 01]* V. Picandet, A. Khelidj, G Bastian. Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 31, pp 1525-1532, 2001.
- [Pietro, 96]* P. Pietro. Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials*, vol 10, pp 391-402, 1996.
- [Polder, 01]* R.B. Polder. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and*

- Building Materials, vol 15, pp 125-131, 2001.
- [Polder, 02]* R. Polder, W. Peelen. Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. Cement and Concrete Composites, vol 24, pp 427-437, 2002.
- [Poupard, 01]* O. Poupard. Étude de transfert de chlorures et de l'initiation de la corrosion d'un acier au sein d'un matériau cimentaire saturé - Suivi par spectroscopie d'impédance. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2001.
- [Poupard, 03]* O. Poupard, A. Aït-Mokhtar, P. Dumargue. Impedance spectroscopy in reinforced concrete: Experimental procedure for monitoring steel corrosion. Part II : Polarization effect. Journal of Materials Science, vol 38, pp 3521-3526, 2003.
- [Poupard, 04]* O. Poupard, A. Aït-Mokhtar, P. Dumargue. Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy. Cement and Concrete Research, vol 34, pp 991-1000, 2004.
- [Qian, 06]* S. Qian. Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures. Cement and Concrete Composites, vol 28, pp 685-695, 2006.
- [Ramli, 12]* M. Ramli, A.A. Tabassi. Effects of polymer modification on the permeability of cement mortars under different curing conditions: A correlational study that includes pore distributions, water absorption and compressive strength. Construction and Building Materials, vol 28, pp 561-570, 2012.
- [Raupach, 96]* M. Raupach. Chloride induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences. Construction and Building Materials, vol 10, pp 329-338, 1996.
- [Raupach, 06]* M. Raupach. Patch repairs on reinforced concrete structures- Model investigations on the required size and practical consequences. Cement and Concrete Composites, vol 28, pp 679-684, 2006.
- [Ray, 95]* I. Ray, A. P. Gupta. Effect of latex and superplasticiser on Portland cement mortar in the hardened state. Cement and Concrete Composites,

- vol 17, pp 9-21, 1995.
- [Rosière, 07]* E. Rozière. Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 2007.
- [Ru, 05]* W. Ru, P.M, Wang, X.G. Li. Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars. Cement and Concrete Research, vol 35, pp 900- 906, 2005.
- [Rucker, 10]* P. Rucker-Gramm, R.E. Beddoe. Effect of moisture content of concrete on water uptake. Cement and Concrete Research, vol 40, pp 102-108, 2010.
- [Saija, 95]* L.M. Saija. Waterproofing of Portland cement mortars with a specially designed polyacrylic latex. Cement and Concrete Research, vol 25, pp 503-509, 1995.
- [Sakai, 95]* E. Sakai, J. Sugita. Composite mechanism of polymer modified cement. Cement and Concrete Research, vol 25, pp 127-135, 1995.
- [Saleem, 96]* M. Saleem, M. Shameemt, S. E. HussainS, M. Maslehuddint. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. Construction and Building Materials, vol 10, pp 209-214, 1996.
- [Samson, 99a]* E. Samson, J. Marchand. Numerical solution of the extended Nernst-Planck model. Journal of Colloid and Interface Science, vol 215, pp 1-8, 1999.
- [Samson, 99b]* E. Samson, J. Marchand, J.J. Beaudoin. Describing ion diffusion mechanisms in cement-based materials using the homogenization technique. Cement and Concrete Research, vol 29, pp 1341-1345, 1999.
- [Sanjuh, 97]* M. A. Sanjuh, A. Moragues. Polypropylene fibre reinforced mortars mixes: optimization to control plastic shrinkage. Composites Science and Technology, vol 51, pp 655-660, 1997.
- [Shaker, 97]* F.A. Shaker, A.S. El-Dieb, M.M. Reda. Durability of styrene butadiene latex modified concrete. Cement and Concrete Research, vol 27, pp 711-720, 1997.
- [Shamsad, 03]* A. Shamsad. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review. Cement and Concrete Composites, vol 25, pp 459-471, 2003.

- [Silva, 01]* D.A. Silva, V.M. John, J.L.D. Ribeiro, H.R. Roman. Pore size distribution of hydrated cement pastes modified with polymers. *Cement and Concrete Research*, vol 31, pp 1177-1184, 2001.
- [Silva, 02]* D.A. Silva, H.R. Roman, P.J.P. Gleize. Evidences of chemical interaction between EVA and hydrating portland cement. *Cement and Concrete Research*, vol 32, pp 1383-1390, 2002.
- [Sivakumar, 07]* A. Sivakumar, M. Santhanam. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol 29, pp 575-581, 2007.
- [Sleiman, 08]* H. Sleiman. Etude de transport des chlorures dans les matériaux cimentaires non saturé : Validation expérimentale sur bétons en situation de marnage. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2008.
- [Song, 02]* G. Song. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 30, pp 1723-1730, 2002.
- [Soylev, 08]* T.A. Soylev, M.G. Richardson. Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, vol 22, pp 609-622, 2008.
- [Steven, 99]* F. Steven. Using cathodic protection to control corrosion of reinforced concrete structures in marine environments. Australasian corrosion association conference. Sydney (Australia), 1999.
- [Strres, 08]* Travaux de réparation et de renforcement de structure (STRRES). Guide 1 Reprise des bétons dégradés, 2008.
- [Su, 96]* Z. Su, K. Sujata, J.M.J.M. Bijen, H.M. Jennings, A.L.A. Fraaij. The evolution of the microstructure in styrene acrylate polymer-modified cement pastes at the early stage of cement hydration. *Cement Based Materials*, vol 3, pp 87-93, 1996.
- [Tahlaiti, 10]* M. Tahlaiti. Etude de la pénétration des chlorures et de l'amorçage de la corrosion en zone saturée et en zone de marnage. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2010.
- [Tang, 92]* L. Tang, L.O. Nilsson. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field. *ACI materials journal*, vol 89, pp 49-53, 1992.

- [Tang, 96]* L. Tang. Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete -current development. Magazine of concrete research, vol 48, pp 173-179, 1996.
- [Tong, 01]* L. Tong. O.E. Gjørsv. Chloride diffusivity on migration testing. Cement and Concrete Research, vol 31, pp 973-982, 2001.
- [Thomas, 96]* M. Thomas. Chloride thresholds in marine concrete. Cement and concrete Research, vol 26, pp 513-519, 1996.
- [Thomas, 12]* M.D.A. Thomas, R.D. Hooton, A. Scott, H. Zibara. The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. Cement and Concrete Research, vol 42, pp 1-7, 2012.
- [Truc, 00]* O. Truc, J.P. Ollivier, M. Carcassès. A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test. Cement and Concrete Research, vol 30, pp 217-226, 2000.
- [Van Gemert, 05]* D. Van Gemert, L. Czarnecki, M. Maultzsch, H. Schorn, A. Beeldens, P. Lukowski, E. Knapen. Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merging worlds. A report from 11th ICPIC Congress in Berlin, 2004. Cement and Concrete Composites, vol 27, pp 926-933, 2005.
- [Velivasakis, 97]* E.E. Velivasakis, S.K. Henriksen, D.W. Whitmore. Halting corrosion by chloride extraction and realkalization. Concrete International, vol 19, pp 39-45, 1997.
- [Villain, 01]* G. Villain, V. Baroghel-Bouny, C. Kounkou, C. Hua. Mesure de la perméabilité aux gaz en fonction du taux de saturation des bétons. Revue Française de Génie Civil, vol 5, pp 251-268, 2001.
- [Wang, 05]* J. Wang, S. Zhang, Y. Haiqin, K. Xiangzheng, W. Xikui, G. Zhongmao. Study of cement mortars modified by emulsifier-free latexes. Cement and Concrete Composites, vol 27, pp 920-925, 2005.
- [Wang, 11]* R. Wang, P.M. Wang. Action of redispersible vinyl acetate and copolymer powder in cement mortar. Construction and Building Materials, vol 25, pp 4210-4214, 2011.
- [Wenger, 86]* F. Wenger. Etude de la corrosion de l'acier doux dans le béton par des méthodes électrochimiques. Application au contrôle des ouvrages de génie

- civil. Thèse de doctorat, Université de Paris, 1986.
- [Woo, 08]* R.S.C. Wooa, H. Zhu, M.M.K. Chow , C.K.Y. Leung, J-K. Kim. Barrier performance of silane-clay nanocomposite coatings on concrete structure. *Composites Science and Technology*, vol 68, pp 2828-2836, 2008.
- [Xu, 93a]* Z. Xu, P. Gu, P. Xie, J.J. Beaudin. Application of A.C. impedance techniques in studies of porous cementitious materials : Relationship between ACIS behavior and the porous microstructure. *Cement and Concrete Research*, vol 23, pp 853-862, 1993.
- [Xu, 93b]* Z. Xu, P. Gu, P. Xie, J.J. Beaudin. Application of A.C. impedance techniques in studies of porous cementitious materials : ACIS behavior of very low porosity cementitious systems. *Cement and Concrete Research*, vol 23, pp 1007-1015, 1993.
- [Yang, 09]* Z. Yang, X. Shi, A. T. Creighton, M.M. Peterson. Effect of styrene-butadiene rubber latex on the chloride permeability and microstructure of portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, vol 23, pp 2283-2290, 2009.
- [Zhang, 06]* J. Zhang, P. Mailvaganam. Corrosion of concrete reinforcement and electrochemical factors in concrete patch repair. *NRC Research Press*, vol 33, pp 785-793, 2006.
- [Zhong, 02]* S. Zhong, Z. Chen. Properties of latex blends and its modified cement mortars. *Cement and Concrete Research*, vol 32, pp 1515-1524, 2002.

Annexes

Annexe 1 : Fiche technique d'un mortier mono-composant



EMACO® NanoCrete R3

Mortier de réparation structurel monocomposant, allégé, renforcé de polymères et de fibres synthétiques.

Description

L'EMACO® NanoCrete R3 est un mortier de réparation structurel allégé, monocomposant, renforcé de polymères.

L'EMACO® NanoCrete R3 est un matériau prêt à l'emploi contenant du ciment portland, des agrégats parfaitement calibrés, des fibres polymères spécialement sélectionnées et des additifs. La formulation intègre la nanotechnologie appliquée et un nouveau système de compensation de retrait.

L'EMACO® NanoCrete R3 a été spécialement formulé pour produire un mortier avec des résistances en compression et un module d'élasticité répondant aux exigences de la classe R3 de la norme EN 1504 part 3.

Mélangé à l'eau, il forme un mortier hautement thixotrope qui peut facilement être appliqué manuellement, à la truelle ou par projection, et permet une application en fortes épaisseurs, jusqu'à 75 mm en une passe. Il convient particulièrement pour une application en vertical et en sous-face.

Domaines d'application

L'EMACO® NanoCrete R3 est adapté aux réparations de structures et d'éléments bétons :

- Nez de balcons, soffits et dalles
- Parkings multi-étages
- Rebords de fenêtre, linteaux et poutres de bâtiments commerciaux ou privés
- Façades de bâtiments
- Angles de pièces préfabriquées
- Poutres

Ou encore, sur toute structure nécessitant une réparation ou un reprofilage manuel.

L'EMACO® NanoCrete R3 peut être appliqué en intérieur et extérieur, en horizontal, vertical et en sous-face, dans des environnements secs ou humides.

Propriétés

- Formulé avec la nouvelle nanotechnologie, et un nouveau système de compensation de retrait pour minimiser la tendance à la fissuration
- Module d'élasticité moyen, renforcé de polymères et adapté aux réparations de structures béton n'ayant pas forcément de haute résistance et ce, sans provoquer de contraintes internes
- Excellente adhérence au béton
- Hautement thixotrope et allégé, il permet l'application de fortes épaisseurs en une seule passe
- Excellente qualité de mise en oeuvre et d'application, - peut être appliqué en horizontal ou vertical jusqu'à 75 mm, et en sous-face jusqu'à 50 mm
- Grande facilité pour modeler le mortier sans coffrage
- Très faible retrait et excellente résistance à la fissuration
- Durable et résistant aux intempéries

CE	
0333	
BASF Construction Chemicals France S.A.S 2,1 De La Petite Montagne Sud - 10 rue de Cévennes - 91050 Lisses 0333-CPD-030002	
EN 1504-3	
Mortier PCC, allégé, de réparation structurel pour la réparation des structures en béton (à base de ciment hydraulique polymère)	
Résistance en compression	Classe R3
Retrait en ions chlorure	≤ 0,05 %
Adhérence	≥ 1,5 MPa
Résistance à la carbonation	essai réussi
Module d'élasticité	10,4 GPa
Compatibilité thermique	
- Gel séché	≥ 1,5 MPa
- Pluie d'orage	≥ 1,5 MPa
- Cycle thermique 5 fois	≥ 1,5 MPa
Absorption capillaire	≤ 0,5 kg m ⁻² h ^{-1/2}
Substances dangereuses	conforme à 3.4
Marquage au feu	Europe A1



Classe R3 - NF EN 1504-3
AFNOR CERTIFICATION
Référentiel NF 030



Consommation

Un sac de 20 kg représente env. 11 litres de mortier frais. Env. 1,8 kg de mortier/m²/mm d'épaisseur (env. 1,5 kg de poudre/m²/mm d'épaisseur).

Les consommations indiquées sont théoriques et dépendent de la rugosité du support. Elles doivent être ajustées par des tests in situ.

Conditionnement

L'EMACO® NanoCrete R3 est disponible en sac de 20kg.



Propriétés	Standard	Unité	Valeurs
Aspect			Poudre grise
Granulométrie			Max. 1.2 mm
Epaisseur			
Minimum		mm	5
Maximum		mm	75
Densité		g/cm ³	env. 1.8
Eau de gâchage par sac de 20 kg		litre	env. 4,4 - 4.8
Durée Pratique d'Utilisation		minutes	45 - 60
Température d'application (support et matériau)		°C	entre +5 et +30
Résistance en compression	EN 12190	N/mm ²	
à 24 heures			≥ 12
à 7 jours			≥ 25
à 28 jours			≥ 35
Module d'élasticité (28 jours)	prEN13412	N/mm ²	≥ 15 000
Adhérence (à 28 jours)	EN 1542	N/mm ²	≥ 1,5
Adhérence après gel/dégel (50 cycles avec sel)	EN 13687 - 1	N/mm ²	≥ 1,5
Adhérence après cycle orage/pluie (50 cycles)	EN 13687 - 2	N/mm ²	≥ 1,5
Adhérence après cycle sec (50 cycles)	EN 13687 - 4	N/mm ²	≥ 1,5
Résistance à la carbonatation	prEN 13295	Profondeur en mm	≤ au béton de référence
Absorption capillaire	EN 13057	kg/m ² /h ^{0.5}	≤ 0,5
Tendance à la fissuration (I)	Anneau de Coutinho		Absence de fissure après 180 jours
Tendance à la fissuration (II)	DIN type tunnel en V		Absence de fissure après 180 jours

Annexe 2 : Fiche technique d'un mortier bi-composant

Construction

SIKATOP® SF 126

Mortier hydraulique prédosé à base de résine et de fumées de silice pour la réparation des bétons soumis à des atmosphères agressives.



Référentiel de certification NF 030

Enquête technique SOCOTEC, CCT 15 « Réparation – Prévention – Protection ».

Présentation

Kit prédosé comprenant :

- composant A (résine en émulsion et additifs spécifiques) : liquide de couleur blanche,
- composant B (ciment PM ES, charges spéciales, fumées de silice) : poudre de couleur grise.

Après mélange, on obtient un mortier de couleur grise.
Classement R4 selon la EN 1504-3.

Domaines d'application

- Réparation des bétons armés exposés à des milieux agressifs (sites industriels, bord de mer, montagne).
- Réparation d'épaufrures d'ouvrages d'art (ponts, barrages, etc).
- Réparation d'épaufrures d'ouvrages de génie civil (silos, réservoirs, écluses, etc).
- Réparation d'épaufrures de bâtiments.
- Réparation de nids de poule (soils industriels, ateliers, garages).

Caractères généraux

- Très bonne ouvrabilité.
- Bonne adhérence sur béton, mortier, brique, pierre.
- Applicable sur des épaisseurs de 3 à 100 mm par passe.
- Excellente imperméabilité.
- Hautes performances mécaniques.
- Excellente tenue au gel et aux sels de déverglaçage.
- Très bonne protection du béton armé contre les environnements agressifs.

Agréments, essais officiels

- Enquête technique SOCOTEC : Réparation - Prévention - Protection (CCT n° 15).
- Marque NF
- PV SCETAURROUTE - Résistance à l'écaillage, norme XP P 18.420 (tenue au gel et sels de déverglaçage).
- PV Préfecture de Police de Paris - Essai de réaction au feu : classement Mo.
- Marquage CE – EN 1504-3 :
Principe 3 (restauration du béton) – Méthode 3.1 et 3.3
Principe 4 (renforcement structural) – Méthode 4.4

Caractéristiques

Coloris

Gris.



Conditionnement	Kit de 35 kg comprenant : <ul style="list-style-type: none"> ■ composant A : bidon plastique de 5 kg, ■ composant B : sac papier kraft de 30 kg. Kit de 14 kg comprenant dans un suremballage carton : <ul style="list-style-type: none"> ■ composant A : bidon plastique de 2 kg, ■ composant B : sac plastique de 12 kg. 																								
Stockage	A l'abri du gel et de l'humidité.																								
Conservation	1 an en emballage d'origine.																								
Données techniques																									
Densité	Densité du mortier frais : environ 2,1																								
Granulométrie	0 à 1 mm.																								
Epaisseur d'application	3 mm à 100 mm																								
Résistances mécaniques	Résistance à la compression selon la norme NF EN 12190 (valeurs données à titre indicatif) : <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>5°C</th> <th>20°C</th> <th>30°C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2 jours</td> <td>15 MPa</td> <td>30 MPa</td> <td>30 MPa</td> </tr> <tr> <td>28 jours</td> <td>45 MPa</td> <td>50 MPa</td> <td>45 MPa</td> </tr> </tbody> </table> Résistance à la flexion selon la norme NF EN 12190 (valeurs données à titre indicatif) : <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>5°C</th> <th>20°C</th> <th>30°C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2 jours</td> <td>5 MPa</td> <td>7 MPa</td> <td>8 MPa</td> </tr> <tr> <td>28 jours</td> <td>10 MPa</td> <td>10 MPa</td> <td>10 MPa</td> </tr> </tbody> </table>		5°C	20°C	30°C	2 jours	15 MPa	30 MPa	30 MPa	28 jours	45 MPa	50 MPa	45 MPa		5°C	20°C	30°C	2 jours	5 MPa	7 MPa	8 MPa	28 jours	10 MPa	10 MPa	10 MPa
	5°C	20°C	30°C																						
2 jours	15 MPa	30 MPa	30 MPa																						
28 jours	45 MPa	50 MPa	45 MPa																						
	5°C	20°C	30°C																						
2 jours	5 MPa	7 MPa	8 MPa																						
28 jours	10 MPa	10 MPa	10 MPa																						
Adhérence	Adhérence sur béton \geq 2 MPa � 28 jours selon la EN 1542.																								
Résistance aux cycles gel-dégel	Conforme � la norme XP P 18.420																								

Annexe 3 : Exigences de performance pour les produits de réparation structurale et de réparation non structurale

Point n°	Caractéristique de performance	Support de référence (EN 1766)	Méthode d'essai	Exigence			
				Structurale		Non-Structurale	
				Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
1	Résistance en compression	Aucun	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
2	Teneur en ions chlorure	Aucun	EN 1015-17	≤ 0,05 %		≤ 0,05 %	
3	Adhérence	MC(0,40)	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^{a)}	
4	Retrait/expansion empêchés ^{b), c)}	MC(0,40)	EN 12617-4	Contrainte d'adhérence après essai ^{d), e)}			Aucune exigence
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^{a)}	
5	Résistance à la carbonatation ^{f)}	Aucun	EN 13295	$\alpha_k \leq$ béton témoin (MC(0,45))		Aucune exigence ^{g)}	
6	Module d'élasticité	Aucun	EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	Aucune exigence	
7	Compatibilité thermique ^{f), h)} Partie 1, Gel-dégel	MC(0,40)	EN 13687-1	Contrainte d'adhérence au bout de 50 cycles ^{d), e)}			Examen visuel après 50 cycles
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
8	Compatibilité thermique ^{f), h)} Partie 2, pluie d'orage	MC(0,40)	EN 13687-2	Contrainte d'adhérence au bout de 30 cycles ^{d), e)}			Examen visuel après 30 cycles
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^{a)}	
9	Compatibilité thermique ^{f), h)} Partie 4, Cycles thermiques à sec	MC(0,40)	EN 13687-4	Contrainte d'adhérence au bout de 30 cycles ^{d), e)}			Examen visuel après 30 cycles
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^{a)}	
10	Résistance au glissement et au dérapage	Aucun	EN 13036-4	Classe I : > 40 unités essayées humides		Classe I : > 40 unités essayées humides	
				Classe II : > 40 unités essayées à sec		Classe II : > 40 unités essayées à sec	
				Classe III : > 55 unités essayées humides		Classe III : > 55 unités essayées humides	
11	Coefficient de dilatation ^{c)}	Aucun	EN 1770	Non requis, si les essais 7, 8 et 9 sont effectués, sinon valeur déclarée		Non requis, si les essais 7, 8 et 9 sont effectués, sinon valeur déclarée	
12	Absorption capillaire	Aucun	EN 13057	≤ 0,5 kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}		≤ 0,5 kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}	Aucune exigence

a) La valeur 0,8 MPa n'est pas requise lorsqu'il se produit une rupture de cohésion du matériau de réparation. S'il se produit une rupture de cohésion, une résistance minimale en traction de 0,5 MPa est requise.

b) Non requis pour la méthode de réparation 3.3.

c) Non requis en cas de cycles thermiques.

d) Valeur moyenne sans valeur individuelle inférieure à 75 % de l'exigence minimale.

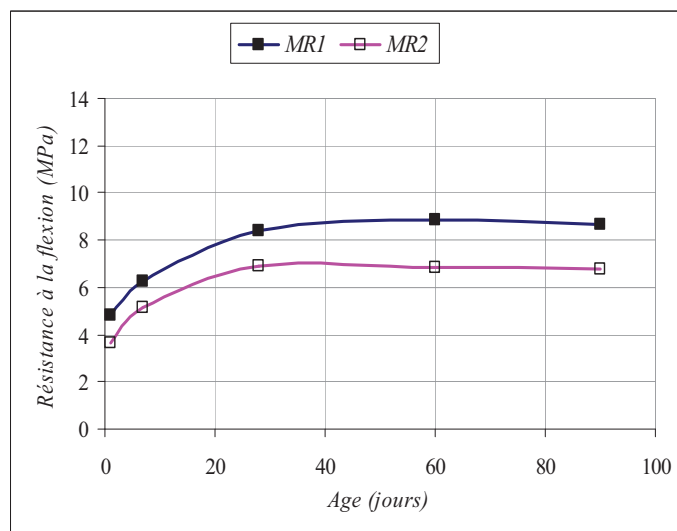
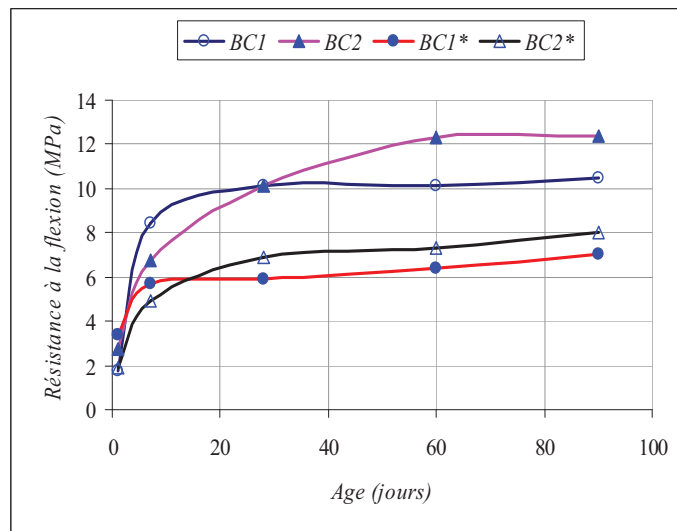
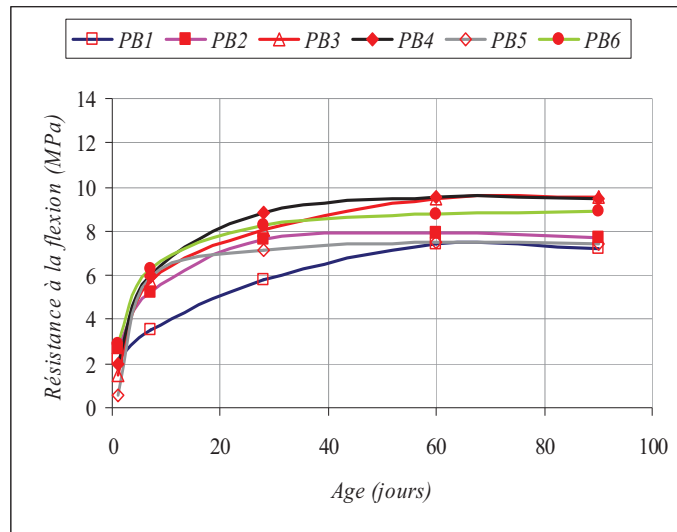
e) Ouverture de fissure moyenne tolérée ≤ 0,05 mm et absence de fissure ≥ 0,1 mm et de feuilletage.

f) Pour la durabilité.

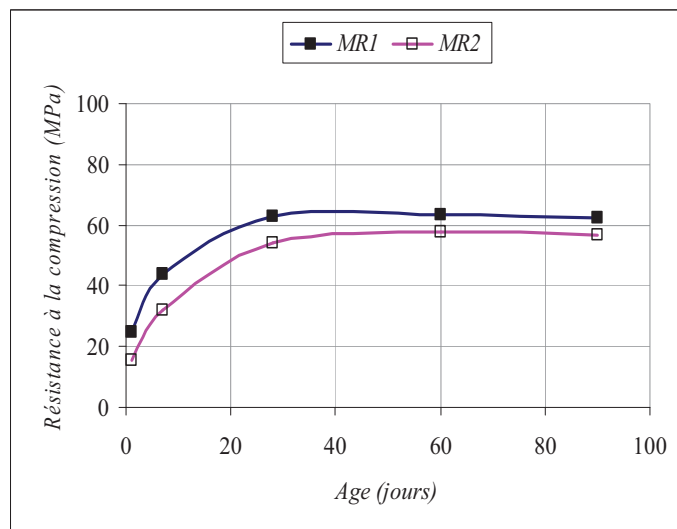
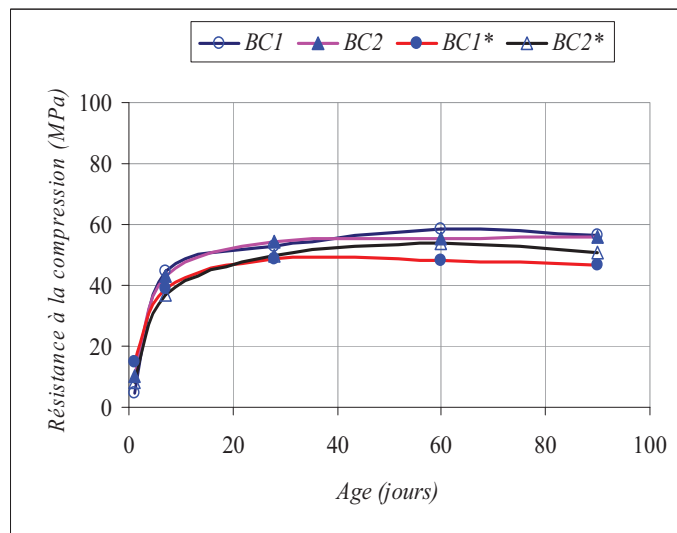
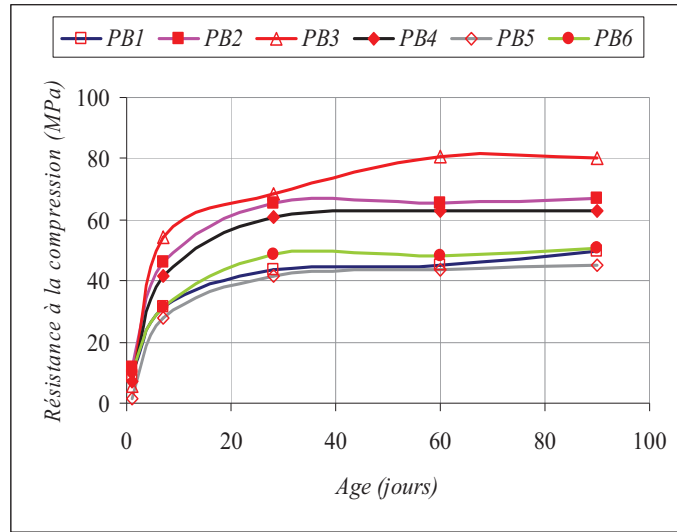
g) Ne convient pas pour la protection contre la carbonatation, sauf si le système de réparation comporte un système de protection de surface assurant une protection démontrée contre la carbonatation (voir l'EN 1504-2).

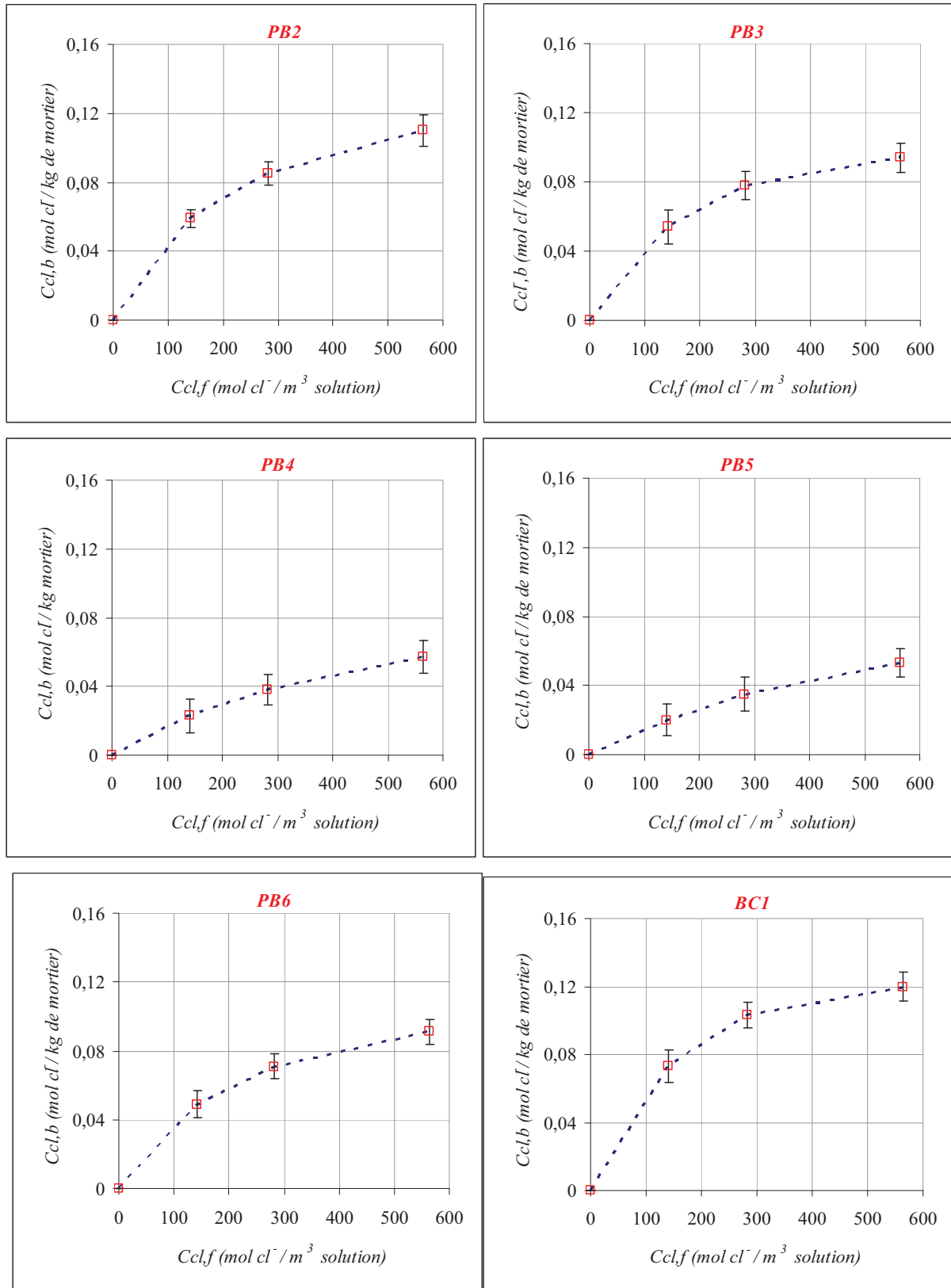
h) Le choix de la méthode dépend des conditions d'exposition. Lorsqu'un produit est conforme à la Partie 1, il est réputé conforme aux Parties 2 et 4.

Annexe 4 : Résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers étudiés



Annexe 5 : Résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers étudiés



Annexe 6 : Isothermes d'interactions chimiques des mortiers étudiés

Étude de la durabilité des systèmes béton armé – mortiers de réparation en milieu marin

Résumé :

Le domaine de la réparation et de la réhabilitation des ouvrages en béton armé est en pleine évolution. En effet, la plupart des ouvrages en béton armé, en particulier les structures marines, ont plus de 40 ans et beaucoup d'entre eux nécessitent des travaux de maintenance et de réparation vu leur état de dégradation. La corrosion des armatures occupe le premier rang des dégradations causant ainsi des désordres dans le béton jusqu'à la ruine partielle de l'ouvrage. Le coût engendré par ces réparations représente de grands enjeux économiques pour les maîtres d'ouvrages. D'après la norme européenne EN 1504 il existe de nombreuses méthodes de réparation pour les ouvrages en béton armé (« produit et système pour la protection et la réparation des structures en béton »). Parmi les quelles figure la réparation par mortiers, méthode choisie dans le cadre de ce projet de thèse.

L'objectif principal de ce travail est de réaliser une analyse performantielle sur des mortiers de réparation industriels et de proposer un meilleur choix quant à l'utilisation de ces matériaux dans un milieu marin.

Huit mortiers de réparation disponibles dans l'industrie ont été sélectionnés pour cette étude. Dans un premier temps, la formulation de ces mortiers a été estimée par la recherche des proportions de leurs constituants. Dans un deuxième temps, la quantification de leurs indicateurs de durabilité a été réalisée. Dans un troisième temps, l'objectif a été de quantifier leurs performances par des essais expérimentaux de corrosion accélérée sur des éprouvettes de béton armé réparé par ces mortiers. La méthode utilisée est la Spectroscopie d'Impédance Electrochimique. Enfin, une simulation de la pénétration des ions chlorures dans les mortiers de réparation a été réalisée, moyennant un modèle développé au laboratoire qui se base sur l'équation de Nernst-Planck

Mots clés : Mortiers, réparation, durabilité, polymères.

Durability study of repaired reinforced concrete in marine environment

Summary :

The repair and rehabilitation domain of concrete structures is continuously evolving. In fact, most of reinforced concrete structures, especially marine structures are more than 40 years old, many of them require maintenance and repair due to all the damage they are facing. Corrosion is the main cause of damage leading to disorders in concrete until the partial destruction of the structure. The cost of those repairs represent large economic stakes for the constructors who need to find solutions and appropriate methods of repair.

According to the European standard EN 1504, there are many methods of repair for reinforced concrete structures ("products and systems for the protection and repair of concrete structures"). Which include the mortars repair method chosen in the context of this thesis project. The main objective is to achieve a performance-analysis on industrial repair mortars and offer a better choice for the use of these materials in a marine environment

For this study, eight repair mortars available in the industry were selected. As a starting point, the formulation of these mortars was estimated by finding the constituents proportion. In the second step, the quantification of their sustainability indicators has been achieved. In the third step, the objective was to quantify their performance through accelerated corrosion experimental tests on concrete samples repaired by these mortars. The method used is Electrochemical Impedance Spectroscopy. Finally, a simulation of the chloride ions penetration in repair mortars was carried out, with a model developed in the laboratory based on the Nernst-Planck equation.

Keywords : Mortars, repair, sustainability, polymers.



Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement

FRE CNRS 3474- Avenue Michel Crépeau

17042 La Rochelle Cedex 1 - France