

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Université de Sherbrooke

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Techniques expérimentales sur les bétons incorporant la poudre de verre

Chakib SALIK

Sous la direction de M. Abderrahim BALI Professeur

Et M. Ablam ZIDOL Docteur

Présenté et soutenu publiquement le (16/06/2016)

Composition du Jury :

Président	Mme. Ratiba KETTAB,	Professeur	ENP
Rapporteur/ Promoteur	M. Abderrahim BALI,	Professeur	ENP
Examineur	Mme. Nadjia BAOUCHE,	Docteur	ENP
Examineur	M. Remdane BOUTMEUR,	Docteur	ENP

ENP 2016

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تحديد المشاكل المتعلقة بمتانة الخرسانة، ومنحهم حل ولكن خصوصا لمعرفة التقنيات التجريبية المستخدمة في متانة الخرسانة المتضمنة لمسحوق الزجاج.

في نهاية كل تقنية سنقدم النتائج التي لاحظها الدكتور ابلام زيظول من جامعة شيربروك عن رد فعل الخرسانات المدمجة بمسحوق الزجاج كإضافات للإسمنت عوضا عن جزء من الاسمنت.

كلمات مفتاحية: متانة، الخرسانة، مسحوق الزجاج، إضافة الاسمنت، الاسمنت، الزجاج

Abstract

The aim of this work is to define the problems related to the durability of concrete, give them a solution, but especially; to be familiar with the experimental techniques used in the durability of concrete incorporating glass powder.

At the end of each technique we will give the results observed by Dr. Ablam ZIDOL from University of Sherbrook about the reaction of concrete incorporating glass powder as cement additives to substitute a portion of the cement.

Key words: durability, concrete, glass powder, cement additives, cement, glass.

Résumé

Le but de ce travail est de définir les problèmes liés à la durabilité des bétons, leurs donner une solution mais surtout de connaître les techniques expérimentales utilisées dans la durabilité des bétons incorporant la poudre de verre.

A la fin de chaque technique nous donnerons les conclusions observées par le docteur Ablam ZIDOL de l'université de Sherbrooke quant à la réaction des bétons incorporant la poudre de verre comme ajout cimentaire en substitution d'une portion du ciment.

Mots clés : durabilité, bétons, poudre de verre, ajout cimentaire, ciment, verre.

Remerciements

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'École Nationale Polytechnique, en collaboration avec le Département de Génie Civil à l'Université de Sherbrooke au Canada.

Tout d'abord, Je tiens à remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, Abderrahim Bali et Ablam Zidol. Ainsi que le professeur Arezki Tagnit-Hamou. Je tiens à leur exprimer ma reconnaissance pour leurs conseils et le soutien qu'ils m'ont accordés durant ce travail. Leur patience, leur disponibilité et leur grande compétence m'ont aidé à surmonter les obstacles lors de la construction de mon projet. Messieurs, j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec vous.

Mes remerciements s'adressent également à Mme.R.Kettab, M.R.Boutemour, Mme.N.Baouche, pour avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à tous les enseignants du département Génie Civil de l'École Nationale Polytechnique qui sans eux nous n'aurions jamais atteint ce niveau.

Maman, papa, merci pour tout. J'espère que vous êtes tout simplement fiers de moi, et je vous dédie ce travail. Merci à toute ma famille et à mes amis sur qui je peux toujours compter.

Je finirai par ces quelques mots de Françoise Dolto : « Tout groupe humain prend sa richesse dans la communication, l'entraide et la solidarité visant à un but commun : l'épanouissement de chacun dans le respect des différences ».

Table des matières

Liste des Figures.....	
INTRODUCTION.....	8
<i>Bibliographie</i>	9
CHAPITRE 1 – PROPRIETES DE TRANSPORTS DES BETONS.....	10
1.1. Porosité.....	10
1.2. Perméabilité.....	11
1.2.1. Perméabilité à l'eau.....	11
1.2.2. Perméabilité à l'air.....	12
1.3. Diffusion ionique.....	13
1.4. Absorption capillaire.....	13
1.5. Advection.....	15
1.6. Conclusion.....	15
<i>Bibliographie</i>	16
CHAPITRE 2 - LES DIFFERENTES AGRESSIONS ET ATTAQUES DU BETON.....	18
2.1. Carbonatation.....	18
2.1.1 Mécanisme de la carbonatation.....	18
2.1.2. Les facteurs influençant la Carbonatation.....	19
2.2. Attaque par les sulfates.....	20
2.2.1 Mécanisme des attaques sulfatiques.....	20
2.2.2. Les facteurs influençant l'attaque par les sulfates.....	21
2.3. Attaque par les chlorures.....	22
2.3.1. Mécanisme de l'attaque par les chlorures.....	22
2.3.2. Les facteurs influençant l'attaque par les chlorures.....	22
2.4. La lixiviation.....	23
2.4.1. Mécanisme de dégradation par lixiviation.....	23
2.4.2. Facteurs influençant la lixiviation.....	24
2.5. Attaque des acides organiques.....	24
2.5.1. Mécanisme des attaques des acides organiques.....	25
2.6. Réaction Alkali-Granulats.....	25
2.6.1. Mécanisme de la réaction Alkali-Granulats.....	25
2.6.2. Facteurs influençant la réaction Alkali-Granulats.....	26

2.7. Les attaques bactériennes et biochimiques.....	27
2.7.1. Mécanisme des attaques biochimiques et bactériennes.....	27
<i>Bibliographie</i>	28
CHAPITRE 3 – LE ROLE DES AJOUTS CIMENTAIRES DANS LA RESISTANCE DU BETON AUX ATTAQUES.....	32
3.1. Les ajouts cimentaires	32
3.1.1. Cendres volantes	32
3.1.2. Laitier de haut fourneau	34
3.1.3. La fumée de silice	35
3.1.4. La Pouzzolane	36
3.2. Le rôles des ajouts minéraux dans la résistance aux attaques.....	37
3.2.1. Le rôle des cendres volantes.....	37
3.2.2. Le rôle du laitier des hauts fourneaux	38
3.2.3. Le rôle de la fumée de silice.....	38
3.2.4. Le rôle de la pouzzolane.....	39
<i>Bibliographie</i>	40
CHAPITRE 4 - LA POUDRE DE VERRE	43
4.1. Réaction pouzzolanique de la poudre de verre.....	43
4.2. Réaction alcalis granulats du verre.....	44
4.3. Resistance au gel dégel	45
4.4. Resistance a l'écaillage	45
4.5. Pénétrabilité des ions chlorure	45
4.6. Retrait de séchage.....	47
4.7. Retrait endogène.....	47
4.8 Conclusion.....	47
<i>Bibliographie</i>	48
CHAPITRE 5 – TECHNIQUES EXPERIEMENTALES	49
5.1. Essai de pénétrabilité des ions chlorure	50
5.2. Essai de diffusion des ions chlore	54
5.2.1. Mesure en diffusion naturelle.....	55
5.2.2. Mesure sous champ électrique	57
5.3. Essai sur les attaques par les sulfates	60
5.4. Essai accéléré de carbonatation.....	63
5.4.1. Prétraitement des échantillons.....	63

5.4.2. Essai Accéléré	63
5.4.3. Test à la phénophtaléine	63
5.5. Essai de perméabilité au gaz	68
5.6. Essai de résistance à la corrosion	69
5.7. Conclusion.....	76
<i>Bibliographie</i>	76
CONCLUSIONS GENERALES.....	81

Liste des Figures

Figure 1.1.....	8
Figure 1.2.....	9
Figure 4.1.....	38
Figure 4.2.....	39
Figure 4.3.....	40
Figure 4.4.....	40
Figure 5.0.....	43
Figure 5.1.....	45
Figure 5.2.....	46
Figure 5.3.....	46
Figure 5.4.....	48
Figure 5.5.....	49
Figure 5.6.....	50
Figure 5.7.....	53
Figure 5.8.....	55
Figure 5.9.....	56
Figure 5.10.....	58
Figure 5.11.....	59
Figure 5.12.....	60
Figure 5.13.....	60
Figure 5.14.....	61
Figure 5.15.....	62
Figure 5.16.....	64
Figure 5.17.....	65
Figure 5.18.....	66
Figure 5.19.....	67
Figure 5.20.....	69
Figure 5.21.....	69

INTRODUCTION

Connu depuis l'antiquité romaine, le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. D'abord employé en complément ou en substitution de la pierre, le matériau a connu un réel essor dans son association avec l'acier dans le béton armé. La complémentarité, à la fois mécanique et chimique, entre ces deux matériaux, a permis de construire de façon économique et fiable les ouvrages nécessaires à toutes les activités humaines. Cependant, comme tout matériau, le béton vieillit. Il évolue avec le temps et finit par se dégrader. Les besoins des hommes évoluent eux aussi avec le temps. Des bâtiments ou des équipements construits il y a seulement quelques dizaines d'années peuvent ne plus être adaptés aux besoins actuels et aujourd'hui démolis. Mais certains ponts construits il y a plusieurs siècles sont encore très empruntés. En fonction de l'évolution prévue des besoins, est donc définie pour chaque ouvrage une durée de vie ou « durabilité » souhaitée (50 ou 100 ans par exemple), pendant laquelle le bâtiment, devra non seulement être stable, mais en plus offrir un confort d'utilisation constant, moyennant un entretien régulier. Le niveau de risque doit donc être maîtrisé et les matériaux conçus en conséquence, en fonction des sollicitations mécaniques et environnementales.

La durabilité d'un béton est la capacité de ce béton à maintenir un comportement et un rendement approprié sur le plan de la sécurité selon les conditions de service prévues et pendant la vie utile considérée comme probable. Une altération de la durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton. L'ampleur de la dégradation est étroitement liée à la qualité du matériau mis en œuvre.

Les exigences de durabilité encouragent d'avantage l'utilisation des ajouts cimentaires supplémentaires classiques. Les ajouts cimentaires classiques les plus couramment utilisés sont les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice. La performance et l'influence de ces ajouts classiques sur les principales propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du béton sont largement étudiées. Ces ajouts favorisent une réduction considérable de la perméabilité du béton et par conséquent une amélioration de sa résistance aux attaques chimiques [Al-Amoudi et al, 1994, Yan et al, 2007]. Cependant, ces ajouts ne sont pas toujours disponibles sur place dans chaque région.

La plupart de ces ajouts sont transportés d'une région à une autre, générant des coûts supplémentaires et des émissions de gaz à effet de serre liés au transport. Pour pallier à ce problème, et développer des ajouts cimentaires locaux, de récentes études menées au sein du laboratoire de matériaux cimentaires alternatifs de l'Université de Sherbrooke ont permis de démontrer la Pouzzolanité de la poudre de verre et son utilisation comme ajout cimentaire [Idir, 2009]. De plus, de par sa composition chimique qui est majoritairement de la silice (>70 % massique), la poudre de verre répond aux exigences requises par la norme ASTM C618 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) et peut être classée comme une pouzzolane classe N. Sa structure amorphe fait également de la poudre de verre un excellent ajout cimentaire. La poudre de verre peut donc être incorporée au béton avec des effets bénéfiques et assez comparables à ceux des ajouts classiques.

Introduction

Ce projet a pour objet d'apporter une contribution à la compréhension des techniques et essais utilisés pour comprendre le comportement de la poudre de verre en milieu cimentaire, illustrer ses potentialités, et favoriser la vulgarisation de son utilisation à grande échelle.

Le projet aura pour guide les études faites à l'université de Sherbrooke en 2014 de la durabilité des bétons contenant de la poudre de verre dans des milieux propices à la corrosion des armatures, qui est souvent à l'origine des dégradations prématurées des infrastructures en béton et dont les objectifs étaient :

- Déterminer l'effet de la poudre de verre sur la pénétrabilité des ions chlorure des bétons de différents rapports E/L;
- Evaluer la performance des bétons contenant la poudre de verre dans différents milieux agressifs tels que les milieux riches en sulfates, en chlorures ou en CO₂, à partir des essais de vieillissements accélérés notamment la carbonatation et la corrosion;
- Mettre en évidence l'efficacité de la faible pénétrabilité des bétons ordinaires contenant la poudre de verre vis-à-vis de l'initiation à la corrosion ;
- Comprendre et élucider le comportement révélé par la poudre de verre dans des bétons ayant des rapports E/L différents à partir des essais de caractérisation physico-chimique et microstructurale.

Bibliographie

Al-Amoudi, O. S. B. (1995). Performance of 15 reinforced concrete mixtures in magnesium-sodium sulphate environments. *Construction and Building Materials*, volume 9, n° 3, p. 149-158.

Bouzoubaa, N., Fournier, B. (2003). *Current Situation of SCMs in Canada*. Materials Technology Laboratory Report, MTL/CANMET 2003-4 (TR), Montreal, 55 p.

Idir, R. (2009). *Mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique*. These de doctorat Cotutelle, Université de Toulouse (France) et Université de Sherbrooke (Canada), 284 p.

Schwarz, N. et Cam, H. et Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, volume 30, n° 6, p. 486-96.

Shi, C. et Wu, Y. (2005a). Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. *ACI Materials Journal*, volume 102, n° 5, p. 355-363.

Zidol, A. (2009). *Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires*. Memoire de maitrise, Université de Sherbrooke, Qc, Canada, p 168

CHAPITRE 1 – PROPRIETES DE TRANSPORTS DES BETONS

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. Ces dernières sont intimement liées à la porosité du béton qui est globalement fonction de plusieurs paramètres de formulation du béton notamment le rapport E/C, le type et le dosage en liant, le degré d'hydratation, le murissement et l'âge.

La perméabilité et la diffusivité correspondent à deux mécanismes bien distincts de transport de matière : la perméabilité décrit un écoulement (d'eau ou de gaz par exemple) qui se produit sous gradient de pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que de leur interconnexion. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur interconnexion [BUI92].

1.1. Porosité

La phase poreuse du béton peut être séparée en quatre types de vides: les pores de gel, les pores capillaires, les bulles d'air entraîné et les vides de compaction.

Les pores de gel sont ceux ayant la plus petite taille avec un diamètre de l'ordre de quelques nanomètres. Ils correspondent aux interstices laissés entre les feuillettes, et aux espaces vides laissés entre les particules et autres formes solides. Les pores de gel forment toujours un réseau de vides interconnectés. De plus, la porosité du gel est fixe et égale à environ 28%, soit un peu moins du tiers du volume total du gel. Cette valeur est indépendante du rapport E/L et des conditions d'hydratation.

À une échelle supérieure, les vides capillaires représentent le volume de la pâte occupé initialement par l'eau de gâchage, et qui n'est pas rempli par les hydrates. Ces pores ont des formes variables, et [Neville (2000)] rapporte que leur diamètre médian est d'environ 1,3 μm . Ils forment au départ (début de l'hydratation) un système de vides interconnectés distribués aléatoirement dans la pâte. Ce système de pores capillaires est le principal responsable de la perméabilité dans la pâte durcie, et de sa vulnérabilité au gel-dégel [Neville 2000]. Dans les pâtes denses où l'hydratation est suffisamment avancée, le système de pores capillaires est bloqué de sorte que l'interconnectivité ne subsiste qu'entre les vides du gel. Pour avoir cette condition, la pâte doit avoir un rapport E/L assez faible et la période de cure doit être assez longue et adéquate [Neville 2000].

Les bulles d'air entraîné sont créées par l'ajout au mélange d'un adjuvant entraîneur d'air, qui a également pour rôle de stabiliser le réseau de vides sphériques ayant un diamètre compris entre 1 μm et 200 μm .

Chapitre 1– Propriétés de transports des bétons

Enfin, les vides de compaction sont engendrés par une mise en place inadéquate, une mauvaise consolidation du matériau, ou une formulation inadéquate. Leur forme est donc indéfinie et leur taille peut être de l'ordre du centimètre.

1.2. Perméabilité

Pour qu'il y ait perméabilité d'eau à travers les pores du béton, il doit y avoir présence d'un gradient de pression ou de charge hydraulique. L'étude de la perméabilité est requise, par exemple, dans le cas des barrages ou des réservoirs. Ce mécanisme de transport implique que le matériau soit complètement saturé. En faisant l'hypothèse d'un écoulement laminaire, en condition isotherme, le fluide obéit à la loi de Darcy [Hall 1994] :

$$u = -k \frac{\Delta p}{L}$$

- **U** : Vitesse d'écoulement (m/s)
- **K** : Coefficient de perméabilité du matériau à l'eau (m/s)
- **ΔP** : Gradient de pression aux bornes de l'élément (m)
- **L** : Longueur de l'élément (m)

1.2.1. Perméabilité à l'eau

Le type de perméabilité dépend de la nature des actions agressives pouvant affecter le béton. La perméabilité à l'eau est le principal facteur influençant la résistance au gel-dégel du béton [Pigeon et al, 1987; Power, 1949]. La résistance à l'écaillage en présence des sels fondant est principalement gouvernée par la perméabilité à l'eau et la pénétrabilité des ions chlorure dans la pâte de ciment [Marchand et al., 1994]. Les mécanismes de la corrosion impliquent largement la perméabilité à l'eau, aussi bien que la perméabilité au gaz et aux ions chlorure [Metha, 1986]. La perméabilité à l'eau est largement déterminante dans l'attaque par les sulfates [Metha, 1986]. La perméabilité à l'eau est étroitement liée aux caractéristiques de la structure des pores de la pâte de ciment ou de l'interface pâte-granulat. Les pâtes de ciment les plus imperméables sont ceux ayant une porosité totale faible composée de pores capillaires fins, résultant de faible rapport Eau/Ciment (E/C). La perméabilité à l'eau de la pâte de ciment, du mortier ou du béton peut être significativement réduite par simple réduction du rapport E/C. Pour un rapport E/C donné, le mortier et le béton présentent généralement une perméabilité plus élevée que celle de la pâte de ciment due aux caractéristiques particulières de l'interface pâte-granulat qui offre un chemin préférentiel du mouvement de l'eau dans le béton et le mortier [Gagne et Aitcin, 1988]. Dans la pratique, il est généralement admis qu'avec une valeur de la perméabilité à l'eau inférieure à 5×10^{-14} m/s, le béton peut être considéré comme imperméable [Aitcin, 1993]. Cependant, un très faible rapport E/C n'est pas le seul moyen de produire un béton très imperméable. L'utilisation de super-plastifiant et des ajouts minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes, peuvent contribuer à abaisser la perméabilité à l'eau ($<10 \times 10^{-14}$ m/s) du béton même pour un rapport E/L usuel de 0,45 [Armaghani,v1991].

Chapitre 1– Propriétés de transports des bétons

Un béton de faible perméabilité à l'eau est généralement un béton plus durable puisque plusieurs processus de détérioration peuvent s'initier seulement si l'eau extérieure chargée d'agents agressifs pénètre dans la masse du béton. Par exemple, la formation des produits expansifs de corrosion sur les barres d'armatures dépend de la disponibilité des ions OH^- qui sont souvent produits par un processus électrochimique entre l'eau, l'oxygène et les électrons libérés par la réaction anodique. Une bonne protection contre la corrosion des bétons ayant une faible perméabilité à l'eau peut être expliquée aussi par un faible degré de saturation qui fait augmenter la résistivité électrique de l'électrolyte. Le taux de formation d'autres produits expansifs résultant de la réaction alcalis-granulat ou de l'attaque par les sulfates est fonction de la disponibilité d'eau extérieure du béton. La majorité des processus de destruction associés au gel-dégel et à l'écaillage en présence des sels fondants dépend du degré de saturation de la pâte de ciment. Une pâte avec une faible perméabilité a généralement un faible degré de saturation à proximité de la surface du béton, par conséquent une bonne résistance à l'écaillage [Marchand et al., 1994; Gagne et al., 1990]. La pénétration des ions agressifs tels que Cl^- est généralement très faible dans les bétons ayant une faible perméabilité à l'eau puisque ces ions pénètrent principalement le béton à travers la phase liquide.

1.2.2. Perméabilité à l'air

Comme le cas de la perméabilité à l'eau, la perméabilité à l'air des bétons à faibles rapports E/C est aussi très faibles due à la finesse et à la discontinuité du réseau de pores capillaires dans la pâte de ciment durcie. L'effet bénéfique du faible rapport E/C sur la perméabilité à l'air est particulièrement notable durant les 7 premiers jours de cure humide initiale. La perméabilité à l'air est affectée par la durée de cure. Une cure humide prolongée réduit la perméabilité à l'air, du fait qu'elle favorise la formation des produits d'hydratation additionnels qui remplissent les pores favorisant leur affinement par segmentation. C'est principalement les 7 premiers jours de cure humide qui produisent la plus importante réduction de la perméabilité à l'air [Gagne et al, 1993]. Il convient de souligner que la perméabilité à l'air est beaucoup moins sensible à la durée de cure pour les bétons de faible rapport E/C. Ceci constitue un avantage pratique important puisque les bétons à faible rapport E/C seront peu affectés par une mauvaise cure initiale.

La perméabilité à l'air est un paramètre majeur de la durabilité des bétons armés dans la mesure où, celle-ci contrôle la teneur en oxygène et en dioxyde de carbone disponible dans le béton d'enrobage protégeant les barres d'armature. Une faible perméabilité à l'air est très bénéfique parce qu'elle permet de réduire soit l'oxygène disponible à la cathode pouvant alimenter la formation des produits expansifs ou soit le CO_2 et par conséquent les risques de carbonatation qui peuvent accélérer les processus de corrosion par destruction de la couche protectrice des armatures. Les phénomènes d'efflorescence et de carbonatation sont souvent contrôlés par la teneur en CO_2 disponible qui dépend de la perméabilité à l'air [Scholin et Hilsdorf, 1989].

Chapitre 1– Propriétés de transports des bétons

1.3. Diffusion ionique

La diffusion ionique est le déplacement des ions en solution sous l'effet de leur agitation thermique. Cette agitation produit des collisions aléatoires entre les particules qui a pour effet de les disperser vers des régions de la solution où la concentration est plus faible [Samson 2005]. Autrement dit, il s'agit d'un mouvement d'ions des régions à haute concentration vers des régions à faible concentration. Le modèle de diffusion le plus simple est exprimé par la première loi de Fick :

$$j = -D \text{grad}(c),$$

Où j est le flux ionique, D est le coefficient de diffusion et c est la concentration de l'espèce considérée. Même si la diffusion se produit dans les pores, les termes j et D s'appliquent à une section droite de béton. Il faut donc parler de coefficient effectif de diffusion [Neville 2000]. Il est à noter que la première loi de Fick s'applique lorsqu'une seule espèce ionique est considérée (pas de couplage électrique entre les ions). De plus, cette loi assume que la diffusion s'effectue dans une matrice inerte, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'interaction chimique entre la solution et la phase solide du matériau.

Une approche récente pour modéliser la diffusion ionique dans le béton se base sur la loi de Nernst-Planck étendue [Samson, Marchand et al. 2003]:

$$j_i = -D_i \text{grad}(c_i) - \frac{D_i z_i F}{RT} c_i \text{grad}(\psi) - D_i c_i \text{grad}(\ln \gamma_i) - \frac{D_i c_i \ln(\gamma_i c_i)}{T} \text{grad}(T)$$

Cette loi est dite étendue puisqu'un terme est ajouté pour tenir compte de l'activité chimique de la solution interstitielle. Le premier terme représente le mécanisme de diffusion sous l'effet d'un gradient de concentration (1^{ère} loi de Fick). Le second terme traite du potentiel électrochimique de l'électrolyte, et s'assure du maintien de l'électro-neutralité de la solution. Le troisième terme tient compte de l'activité chimique, et le dernier terme prend en considération les effets de température. L'indice i signifie que l'espèce ionique i est considérée. La loi de Nernst-Planck étendue doit donc être écrite pour chaque ion présent en solution, de manière à créer un système d'équations. La compréhension fondamentale de cette loi dépasse largement le contenu de ce texte, et des explications détaillées sont disponibles dans la documentation scientifique [Samson, Marchand et al. 2003; Glasser, Marchand et al. 2008].

1.4. Absorption capillaire

Un certain recul scientifique est nécessaire à la compréhension de l'absorption capillaire. La distribution des molécules d'eau est régie par des forces dites de cohésion et d'adhésion. Les forces de cohésion sont déterminées par le frottement entre les molécules d'un même liquide, alors que les forces d'adhésion sont celle générées entre les molécules de deux milieux

Chapitre 1– Propriétés de transports des bétons

distincts. Si les forces d'adhésion entre un liquide et une surface solide sont supérieures aux forces de cohésion du liquide, ce dernier s'étendra jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint [Conciatori 2005]. Ce phénomène, appelé tension de surface, est responsable de la montée d'eau dans les tubes capillaires, tel que présenté sur le schéma de la figure 1.1.

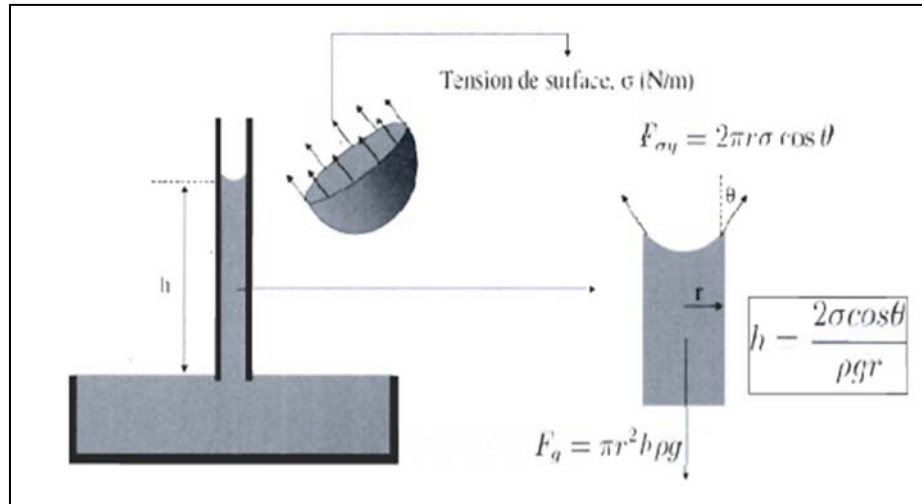


Figure 1.1 - Montée capillaire [tiré de Samson (2008)]

Le même phénomène se produit dans les pores du béton, mais étant donné que la porosité est complexe et évolutive, il est difficile de modéliser avec précision les mouvements capillaires d'eau dans les matrices cimentaires. [Fagerlund (1993)] explique que l'absorption d'eau par un béton suit deux étapes distinctes. Premièrement, l'eau remplit les vides capillaires ayant un diamètre inférieur à environ 0,10 micromètres. Le liquide est absorbé sous l'effet des ménisques qui résultent des tensions inter-faciales gaz/liquide/solide. Suite à cette étape, seule la porosité grossière demeure insaturée. Cette dernière est constituée des bulles d'air entraîné, des fissures et des vides de compaction. Il est toutefois impossible pour l'eau d'atteindre ces vides par capillarité. En effet, comme le rayon des pores s'agrandit, les ménisques ne peuvent exercer la pression nécessaire pour pénétrer les macropores. Ainsi, pour que le béton continue d'absorber l'eau, on doit passer à la deuxième étape qui consiste en un processus diffusionnel, par lequel l'air contenu dans les macropores se dissout dans l'eau interstitielle pour diffuser vers les endroits où la pression est plus faible, soit à l'extérieur de la matrice ou dans les pores de dimension supérieure. L'eau remplit donc lentement l'espace laissé par l'air. [Fagerlund (1993)] rapporte que plus le rayon des pores est grand, plus le processus est lent. La figure 1.2 montre clairement les deux étapes décrites précédemment.

Chapitre 1– Propriétés de transports des bétons

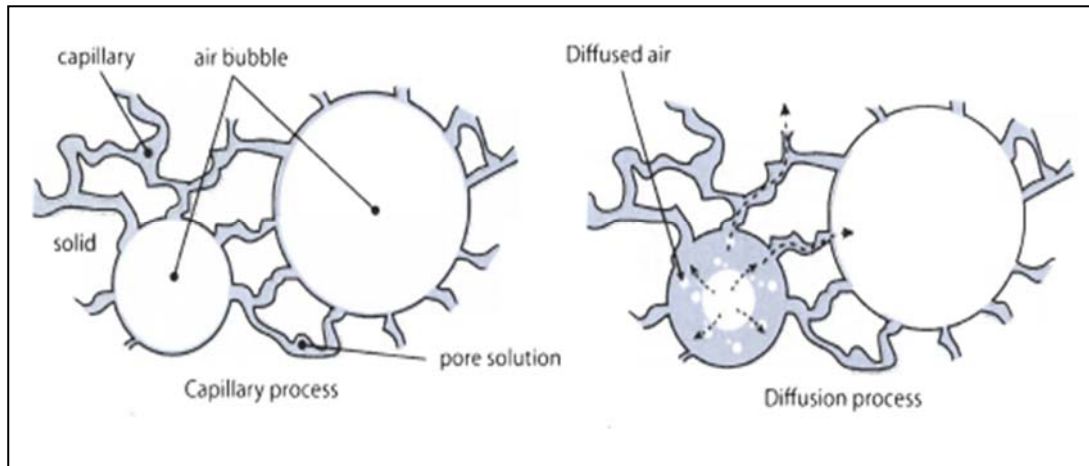


Figure 1.2 - Mécanismes d'absorption d'eau par un béton

1.5. Advection

L'advection est le transport des ions résultant du mouvement du milieu aqueux lui-même dans le béton [Samson 2005]. Tel que mentionné précédemment, l'eau peut être aspirée dans le matériau sous l'effet de forces capillaires, ou poussée sous l'effet d'un gradient de pression. Si l'eau est chargée d'une espèce ionique quelconque, la pénétration est causée par le mouvement de l'eau, et par la diffusion dans le milieu aqueux. La progression de l'ion est donc causée par deux mécanismes, au même titre qu'un individu qui se déplace dans un train en mouvement. Le flux ionique de l'espèce i , causé par l'advection, est exprimé par:

$$j_i = c_i \vec{v},$$

Où C_i est la concentration de l'espèce i , et v est la vitesse du fluide.

L'étude de l'advection est particulièrement importante lorsque la portion de l'ouvrage étudié est soumise à des cycles fréquents de mouillage-séchage. Lors de la période de mouillage, l'eau chargée d'une espèce ionique pénètre dans le matériau par succion capillaire. Durant la période de séchage, l'eau s'évapore et quitte par les pores capillaires en contact avec l'air ambiant par évaporation. Comme seule l'eau pure s'évapore, les ions initialement présents en solution demeurent dans la phase aqueuse. La concentration de l'espèce considérée augmente dans la solution interstitielle du béton et le mécanisme de diffusion s'enclenche dans la phase liquide présente. Au cycle suivant, il y a encore pénétration d'ions, ce qui vient augmenter davantage la concentration dans le béton. Les cycles répétés de mouillage-séchage peuvent entraîner la pénétration rapide d'agents agressifs, même dans des bétons à hautes performances [Neville 2000; Conciatori 2005].

1.6. Conclusion

Les propriétés de transport des bétons constituent les chemins préférentiels par lesquels l'eau ou tout autre fluide chargé d'agents agressifs peut pénétrer dans la matrice cimentaire. Une

Chapitre 1– Propriétés de transports des bétons

fois que ces agents agressifs traversent la barrière que constitue la peau du béton, il se développe diverses sortes de réactions entre ces agents et certains éléments de la matrice cimentaire plus particulièrement les produits d'hydratation. Ces réactions conduisent généralement à l'altération des propriétés liantes du béton ou à la formation de produits expansifs générant des contraintes préjudiciables au béton. Ces propriétés de transport jouent un rôle capital dans la durabilité des bétons. Une bonne durabilité de la matrice cimentaire nécessite donc une formulation axée sur des contrôles efficaces de ces propriétés de transport visant à améliorer la durabilité du système.

Bibliographie

Aitcin, P.-C. (1993). Durable Concrete. Proceedings of 6th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Omya, Japan, 10p.

Aitcin, P.-C. et Gagne, R. (1993). Un beton durable. Congrès des Ingénieurs Municipaux, Sherbrooke, Qc, 14p.

Armaghani, J. M. et Romano, D. C. et Larsen, T. J. (1991). Strength and durability of concrete in Florida. Dans Malhotra, V. M., Proceeding of the Second International Conference on Durability of Concrete, Supplementary Papers Montreal, p. 723-748.

Gagne, R.; Aitcin, P.-C. (1993) Superplasticizers for durable concrete, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton, Monterrey, Octobre, Mexique, p. 200-217.

Gagne, R. et Lamothe, P. et Aitcin, P.-C. (1993). Chloride – ion permeability of different concretes. In Proceeding of 6th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Omya, Japon, Vol. 2, E & FN, Spon, London, pp 1171-80.

Gagne, R. et Pigeon, M. et Aitcin, P.-C. (1990). Deicer salt scaling resistance of high performance concrete. Dans Whiting, D., Proceedings of the Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete. ACI SP-122, p. 29-44.

Pigeon, M. et Gagne, R. et Foy, C. (1987). Critical air-void spacing factor for low water-cement ratio concretes with and without condensed silica-fume. Cement and Concrete Research, volume 17, n° 6, p. 896-906.

Power, T. C. (1949). The air requirement of frost – resistant concrete. Proceedings of the Highway Research Board, 29, p. 184-211.

Marchand, J. et Sellevold, E. J. et Pigeon, M. (1994). The Deicer salt scaling deterioration of concrete – An Overview. Dans Anonyme, in the Proceedings of the P. K. Metha Symposium on Concrete Durability Nice, France, p. 40.

Chapitre 1– Propriétés de transports des bétons

Mehta, P. K. (1986). Concrete Structures. Properties and Materials, Prentice Hall, USA, p. 450.

Neville, A. (1995). Properties of Concrete. (Fourth edition) edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

Neville, A. M. (2000). Propriétés des bétons. Eyrolles edition. 806 p.

Neville, A. (2003). Can we determine the age of cracks by measuring carbonation? Dans Anonyme, Part 1, Concrete International

Neville, A. (2004). Can we determine the age of cracks by measuring carbonation? Dans Anonyme, Part 2, Concrete International

Scholin, K. et Hilsdorf, H. K. (1989). The potential Durability of concrete. Dans Anonyme, Proceedings of the 9th European Ready Mixed Concrete Organisation Congress, Stavanger, Fabeko PublishersOslo, p. 453-479.

Whiting, D. (1988). Permeability of selected concretes. Dans Whiting, D. et Walitt, A., Permeability of Concrete, volume SP-108, American Concrete Institute, Detroit, p. 195-22

CHAPITRE 2 - LES DIFFERENTES AGRESSIONS ET ATTAQUES DU BETON

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure. Une altération de la durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton. L'ampleur de la dégradation est étroitement liée à la qualité du matériau mis en œuvre.

Le niveau de risque doit donc être maîtrisé et les matériaux conçus en conséquence, en fonction des sollicitations environnementales. Ces sollicitations sont classées par les normes en différentes classes d'attaques.

2.1. Carbonatation

Un climat doux et tempéré, un environnement urbain, constituent un environnement agressif qui pourra affecter la durabilité des structures, c'est bien la durabilité du béton armée qui est considérée non directement celle du béton. En effet si la carbonatation entraîne des modifications notables dans la structure du matériau, elle n'altère pas systématiquement ses propriétés mécaniques et de transfert. Il semble même qu'elle conduise à une augmentation de la résistance en compression et du module d'élasticité, cependant le matériau deviendrait plus fragile [Chang et Chen, 2005].

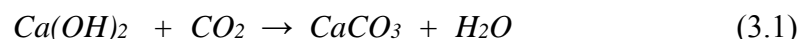
En revanche, Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air, pénètre sous forme gazeuse dans le béton par le réseau poreux ou par les fissures, il se dissout dans la solution interstitielle et réagit avec la Portlandite $Ca(OH)_2$ et les silicates de calcium hydratés pour former des carbonates de calcium $CaCO_3$.

Cette réaction abaisse le pH de la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9. Ce qui conduit à la dépassivation des armatures lorsque le front de carbonatation atteint ces dernières, Le gonflement des produits d'oxydation des armatures qui en résulte pourra à terme entraîner l'éclatement du béton d'enrobage.

2.1.1 Mécanisme de la carbonatation

Le processus de la carbonatation nécessite deux étapes principales notamment la diffusion et la dissolution du CO_2 , et la réaction chimique avec les hydrates.

La dégradation proviendrait essentiellement de la réaction avec la Portlandite [Papadakis, 1991, Thiéry, 2004, 2006] selon l'équation bilan suivante :



Plusieurs équilibres chimiques et leurs constantes interviennent dans le processus de carbonatation avant d'atteindre ce bilan. En effet la réaction a lieu en phase liquide, en solution aqueuse, mais fait intervenir un gaz et un composé solide. La réaction de carbonatation nécessite ainsi le passage du CO_2 en phase aqueuse (3.2), des réactions acido-basiques impliquant les ions carbonates (3.3, 3.4) et l'eau (3.5), la dissolution de la Portlandite (3.6), et la précipitation du carbonate de calcium (3.7).

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

- $\text{pH} < 4$



- $6 < \text{pH} < 10,5$



- $\text{pH} > 10,5$



Les grandeurs qui peuvent donc permettre de caractériser l'évolution de la réaction, en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le pH de la solution interstitielle du béton.

2.1.2. Les facteurs influençant la Carbonatation

On distingue deux types de facteurs, les facteurs internes qui comprennent l'humidité interne, la composition chimique de la pâte de ciment et surtout le rapport E/L qui représente le facteur déterminant dans cette catégorie [Neville, 2003 et 2004]. En effet la vitesse de carbonatation est d'autant plus faible que le rapport E/L est réduit, ceci revient à une meilleure capacité et une diminution de la quantité des produits carbonatables liée au dosage faible du ciment en particulier, ou du liant en général [Papadakis et al. 1992 ; Loo et al. 1994 ; Al-Khaiat et Fattuhi, 2002 ; Sulapha et al., 2003 ; Song et al., 2006].

Au plus des facteurs internes on retrouve également les facteurs externes qui comprennent la température, la concentration de dioxyde de carbone (CO_2), la texture de la surface et l'humidité relative [Neville, 2004].

Les ajouts minéraux et plus spécialement les cendres volantes peuvent également influencer la carbonatation [Papadakis et al. 1992 ; Thomas et Matthews, 1992 ; Muller et Sickert, 1995 ; Osborne, 1999 ; Khan et Lynsdale, 2002 ; Atiş, 2003 ; Sulapha et al., 2003 ; Khunthongkeaw et al. 2006 ; Sisomphon et Franke, 2007]. En effet ils augmentent la profondeur de carbonatation [Parrott, 1985], ceci revient au fait que les ajouts minéraux génèrent des bétons de faible teneur en Portlandite et ce qui réduit la quantité d'hydroxyde à réagir. En revanche, les ajouts minéraux réduisent la porosité et la perméabilité de la pâte, des études rapportent que cela annule donc l'effet négatif [Houst, 1992].

La température et l'humidité les plus propices pour un maximum de carbonatation varient respectivement entre 20 à 25° et de 50 à 70% [Parrott, 1985 et Neville, 2003 et 2004]. A 100% d'humidité relative, la pénétration du CO_2 est très faible, par contre à moins de 50% d'humidité relative, il n'y a pas assez d'eau pour permettre la formation d'acide carbonique [John et al. 1998].

2.2. Attaque par les sulfates

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines, au contact du béton on parle alors, des attaques sulfatiques, L'utilisation du pluriel pour évoquer la dégradation du béton par les sulfates n'est pas anodine ni accessoire, car il y a une réelle multiplicité des attaques, tant au niveau des origines que des manifestations du phénomène. Lorsque les sulfates proviennent du milieu environnant les attaques sulfatiques sont dites externes.

Les conséquences de la pénétration des sulfates dans le béton sont la formation de gypse, d'ettringite, ou de thaumasite, et la transformation des produits d'hydratation. Cela peut entraîner un gonflement, une perte de résistance et une altération de la surface de d'élément en béton. Si le premier des trois phénomènes est le plus connu et caractéristique, les deux autres ne sont pas à négliger dans la pratique.

2.2.1 Mécanisme des attaques sulfatiques

Si l'ion sulfate SO_4^{2-} est toujours en cause [Neville, 2004], les conditions dans lesquelles il agit, notamment le cation associé, la température, le pH, la concentration, conditionnent fortement le mécanisme et le type de dégradation. En outre, pour le même processus et le même stade de dégradation, le taux d'atteinte varie en fonction de l'indicateur mesuré [Sahmaran et al. 2007].

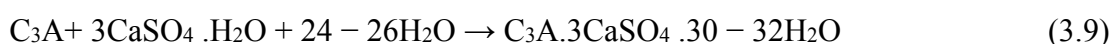
Outre les constituants du béton, dont les produits d'hydratation (C-S-H et Portlandite), trois composés, qui se forment en présence de sulfates, jouent un rôle important dans les attaques sulfatiques externes : le gypse, l'ettringite, et dans certains cas, la thaumasite.

Le gypse existe déjà dans le béton sain, celui qui se forme en présence d'une solution riche en sulfates résulte de la substitution des ions hydroxyde par les ions sulfate au niveau de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon la réaction suivante, dans le cas où le cation associé est l'ion sodium Na^+ .



Son rôle dans les attaques sulfatiques n'est pas encore totalement déterminé, mais certaines études comme l'étude de Mehta et al. (1979) montre que la formation de gypse peut être responsable d'un écaillage et d'une perte de masse importants [Santhanam et al. 2001]. Tian et Cohen (2000) ont relevé des gonflements importants mis en évidence avec la formation de gypse.

L'ettringite peut se former à partir du gypse ainsi produit qui réagit avec les aluminates de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{30-32}$ (où C est utilisé pour désigner CaO, A pour Al_2O_3 et H pour H_2O), à partir de C_3A anhydre, selon la réaction (3.9). Comme elle peut également se former à partir de l'aluminate tétra-calcique hydraté $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{H}_{13}$ ou du monosulfoaluminate de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$.



Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

L'ettringite primaire est le produit de réactions entre les sulfates de calcium introduits dans le ciment comme régulateur de prise et l'aluminate tricalcique C_3A . Elle se décompose ensuite pour former du monosulfoaluminate de calcium. Elle n'est jamais expansive ni pathologique et se présente le plus souvent sous forme d'aiguilles.

L'ettringite secondaire se développe quand le béton a déjà durci. Si les sulfates sont d'origine externe, elle peut générer de l'expansion. C'est celle qui est en cause dans le cas des attaques sulfatiques externes.

L'ettringite différée est formée lors d'attaques sulfatiques internes, et peut provoquer ou non de l'expansion. Elle concerne des bétons où l'ettringite primaire n'a pas pu se former pendant les premiers instants de l'hydratation.

Le caractère expansif ou non de l'ettringite peut dépendre de la composition de la solution, et en particulier de sa teneur en chaux CaO . En effet la solubilité de l'ettringite diminue sensiblement avec la teneur en CaO [Baron et Ollivier, 1996].

Les sulfates de magnésium ont un mode d'action particulier et semble être plus sévère que celle des autres sulfates puisque le $Mg(OH)_2$ formé suivant la réaction (3.10) possède une faible alcalinité, déstabilisant les produits d'hydratation tels que C-S-H et C-A-H [Lea, 1970; Biczok, 1980; Celleja, 1980].

Et en plus de la formation d'ettringite se produit la substitution des ions calcium Ca^{2+} par les ions magnésium Mg^{2+} au niveau des silicates de calcium hydratés CS-H. Ceci entraîne la perte de leurs propriétés liantes et donc la perte de la résistance mécanique du béton, car les silicates de magnésium hydratés M-S-H n'ont pas de caractère liant.



Sous certaines conditions, notamment en présence d'ions carbonates, de silice ou de silicates, d'eau et d'une température relativement basses (inférieure à $15^\circ C$) [Crammond, 1993], les C-S-H peuvent réagir avec les sulfates et conduire à la formation de thaumasite ($CaCO_3.CaSiO_3.CaSO_4.15H_2O$) qui est un produit expansif et qui appuie surtout la désagrégation de l'ensemble du liant.

3.2.2. Les facteurs influençant l'attaque par les sulfates

L'attaque par les sulfates peut être influencée par plusieurs facteurs, selon leur fonctionnement on distingue :

- La teneur en C_3A pour les pâtes de ciment sans additions ;
- la teneur en Al_2O_3 du laitier pour les ciments avec laitier comme ajout ;
- le rapport E/L qui plus il augmente, plus la résistance aux sulfates diminue ;
- la fissuration qui joue un rôle de favorisant des échanges ;
- la concentration et le type de sulfates ;
- le cycle de mouillage séchage, l'humidité relative et le mûrissement

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

2.3. Attaque par les chlorures

L'exposition du béton aux chlorures a deux origines principales : l'eau de mer et les sels de déverglaçage, les deux environnements ont pour conséquence commune la corrosion des armatures du béton armé. Leurs intensités varient suivant les caractéristiques du béton et de l'environnement : taux de saturation, concentration en chlorures, température.

La présence d'ions chlorure entraîne une corrosion localisée particulièrement préjudiciable, par piqûres de l'acier, et donc une perte de résistance mécanique du matériau. La rouille entraîne dans ce cas des gonflements et un éclatement du béton (formation d'épaufrures sur les ouvrages).

2.3.1. Mécanisme de l'attaque par les chlorures

La pénétration des chlorures dans un environnement naturel a lieu sous l'effet de deux mécanismes : l'absorption capillaire et la diffusion.

L'absorption capillaire se produit lorsque le béton sec ou partiellement saturé est imbibé par la solution saline. Les chlorures sont susceptibles de migrer avec la phase liquide interstitielle par convection. L'absorption d'eau dans le béton sec est représentée à partir de deux paramètres principaux :

- La masse d'eau nécessaire pour saturer complètement le matériau (la porosité) ;
- La vitesse d'absorption par remontée capillaire ou absorptivité (notée S).

L'humidification d'un matériau sec avec une solution saline durant une journée peut faire pénétrer les chlorures plus profondément que ne le feraient plusieurs mois de diffusion en milieu saturé [Francy, 1998].

En milieu saturé, structure complètement immergée, les ions chlorure pénètrent dans le béton par diffusion, sous gradient de concentration entre la surface contenant les chlorures et le cœur exempt de chlorure.

La pénétration des chlorures dépend des caractéristiques du matériau et des cycles de mouillage-séchage considérés. Une partie des ions peuvent être "piégés" dans la pâte de ciment suivant deux mécanismes de captage tels que l'adsorption à la surface des hydrates ou fixation par les aluminates. L'autre partie des chlorures peut réagir avec les hydrates de la pâte de ciment. On distingue ainsi :

- les chlorures libres ClF, qui sont présents sous forme ionique dans la solution,
- les chlorures liés ClB, adsorbés sur les CSH ou chimiquement liés sous forme de chloroaluminates de calcium (en particulier le monochloroaluminate de calcium hydraté, ou sel de Friedel, $C_3A.CaCl_2.10H_2O$).

2.3.2. Les facteurs influençant l'attaque par les chlorures

Plusieurs facteurs influencent la quantité des chlorures fixes [Nilsson, 1997, Francy, 1998 et Truc, 2000] notamment la concentration en chlorure libres, la quantité et la surface spécifique du

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

liant, la température et la présence d'autres espèces ioniques telles que les hydroxydes et les alcalins.

On retrouve également les paramètres de formulation du béton tels que les rapports (E/C ou E/L), le type ciment mais aussi les ajouts minéraux.

2.4. La lixiviation

La lixiviation ou « lessivage » du béton concerne tous les ouvrages immergés. En effet la solution interstitielle du béton est fortement basique et chargée en ions calcium et alcalins, à la différence de la plupart des eaux en contact avec le béton, qui imposent donc un fort gradient de concentrations.

Le phénomène de lixiviation est d'autant plus intense que l'eau en contact avec le béton est peu minéralisée et acide. La lixiviation conduit à une fuite du calcium ce qui a pour conséquence la dissolution des hydrates de la matrice cimentaire principalement la Portlandite, ce phénomène permet la pénétration d'éléments par diffusion comme les ions sulfates, magnésium, chlorures, carbonates, etc [Guillon, 2004].

2.4.1. Mécanisme de dégradation par lixiviation

Le mécanisme de dégradation induit provient des gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton (équation 3.11), de pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium Ca^{2+} et hydroxyde OH^- [Adenot et Buil, 1992]. Leur transport vers le milieu extérieur est donc diffusif [Mainguy et al. 2000, Kamali, 2003, Guillon, 2004, Yokoseki et al, 2006, Nguyen et al, 2006].

$$[\text{OH}^-]=10^{-14+\text{pH}} \quad (3.11)$$

La solution interstitielle n'étant plus saturée en ions calcium et hydroxyde, les composés solides contenant ces espèces se dissolvent ce qui augmente la porosité et donc la perméabilité du béton [Mainguy et al, 2000]. La lixiviation commence par la dissolution de la Portlandite (équation 3.12), puis les monosulfoaluminate, l'ettringite et les C-S-H se décalcifient.



La progression de la dégradation se traduit par l'avancée de fronts de dissolution observables par des indicateurs pH colorés ou en microscopie.

La lixiviation affecte à la fois la durabilité du béton en tant que matériau et la durabilité des structures. En effet, les conséquences les plus directes sont l'augmentation de la porosité et des propriétés de transfert, et la baisse du pH de la solution interstitielle, qui peut conduire à l'initiation de la corrosion d'armatures en acier. Les cinétiques de lixiviation en milieu naturel restent parfois relativement lentes par rapport à d'autres mécanismes de dégradation. Cependant, dans le cas du stockage profond de déchets radioactifs, où la durabilité visée de l'ouvrage est de plusieurs ordres de grandeurs supérieures à celle des ouvrages terrestres, cette dégradation est à prendre en compte.

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

2.4.2. Facteurs influençant la lixiviation

Le mécanisme de transport prédominant étant la diffusion, le facteur principal est donc la compacité du béton souvent formulée en termes de rapport Eau/Ciment ou Eau/Liant. En effet les études expérimentales font apparaître une diminution quasi linéaire de la cinétique de lixiviation avec l'augmentation de ce rapport [Kamali, 2003, Moranville, 2004, Yokoseki, 2004, Badoz, 2006].

La nature du liant peut également avoir une influence significative sur les performances du béton. En effet les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de lixiviation. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en Portlandite – dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité – et des C-S-H plus denses et stables. D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et globalement cela se traduirait par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles [Kamali et al, 2003].

2.5. Attaque des acides organiques

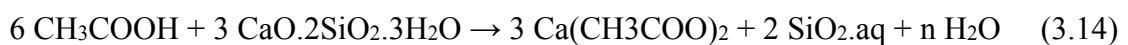
La matrice cimentaire est un milieu basique. La présence dans l'environnement du matériau d'un milieu acide se traduit par une réaction acido-basique entre l'acide et les hydrates et/ou les anhydres de la pâte de ciment.

Les acides organiques sont susceptibles de réagir avec les différents hydrates (Portlandite, C-S-H, aluminates hydratés) et anhydres de la pâte de ciment pour former des sels plus ou moins solubles. Par exemple, [BAJZA et al [BAJ94]] ont émis l'hypothèse que l'acide acétique est impliqué au moins dans les trois réactions suivantes lors de son action sur la matrice cimentaire :

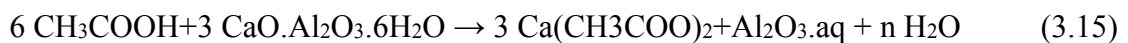
Portlandite



C-S-H



Hexahydrate



L'agressivité de l'attaque dépend directement de la solubilité des sels formés à partir de la dissolution des différentes phases. Dans des conditions d'immersion, les réactions d'échange entre la solution d'acides et les hydrates de la pâte de ciment aboutissent à l'accroissement de la porosité du béton et de sa perméabilité. Les conséquences sont, entre autres, la perte de masse et la diminution des caractéristiques mécaniques du béton [Alexandra Bertron, MEHTA [MEH86],2004].

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

2.5.1. Mécanisme des attaques des acides organiques

Au sein de la porosité d'une matrice cimentaire immergée dans une solution agressive, deux phénomènes se produisent :

- les gradients de concentrations entre l'eau interstitielle de la pâte de ciment et la solution agressive provoquent la diffusion d'espèces chimiques ;
- les variations de concentrations des espèces chimiques de la solution porale, issues de la diffusion, génèrent des sous /sursaturations par rapports à certaines phases solides et donc des réactions chimiques de dissolution-précipitation.

Tous les travaux faits dans ce contexte montrent que les attaques des acides organiques se traduisent par la décalcification plus ou moins intense de la pâte de ciment et la dissolution partielle ou totale des phases hydratées, la zone dégradée étant riche en silicium, aluminium et fer.

La décalcification est liée à la dissolution de la Portlandite qui est la phase la moins stable de la pâte de ciment, et à une décalcification des C-S-H.

2.6. Réaction Alkali-Granulats

La réaction alcali-silice est une pathologie des bétons qui se caractérise au niveau local par l'attaque des ions hydroxydes et la déstructuration du réseau siliceux contenu dans les granulats réactifs. Ce phénomène se produit en deux étapes : attaque des liaisons silanols et coupure des ponts siloxanes. Les alcalins et les ions calcium équilibrent les charges négatives engendrées par la rupture des liaisons du réseau siliceux. Ces réactions conduisent à la formation de produits silico-alcalins (gels) et/ou silico-calco-alcalins (C-K-S-H) riches en eau caractéristiques des alcalis-réactions.

Au voisinage des sites réactifs, des cristallisations d'ettringite secondaire peuvent se former, la précipitation de l'ettringite pourrait être expliquée par deux phénomènes complémentaires :

- l'ouverture de fissures par la réaction Alkali-Granulat permet des arrivées d'eau propices à l'apparition de l'ettringite différée
- la consommation des alcalins par le gel siliceux est compensée par une solubilisation de la chaux (pour maintenir le pH), un nouvel équilibre thermodynamique de la solution interstitielle se crée alors, pouvant éventuellement induire une précipitation d'ettringite si les composants de la solution interstitielle le permettent.

2.6.1. Mécanisme de la réaction Alkali-Granulats

Deux théories complémentaires sont couramment avancées pour expliquer le gonflement par alcali réactions, la théorie du gel expansif d'une part, celle du granulat expansif d'autre part.

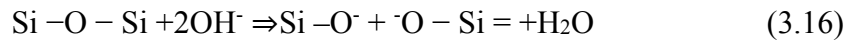
Dans le cas des gels expansifs, on retrouve deux approches :

- Approche topochimique : Dans cette approche, on considère que l'endroit où a lieu l'alcali-réaction est fixe, elle se produit à la surface des granulats réactifs. Le

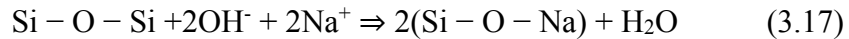
Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

mécanisme passe par trois phases selon [Glasser et Kataoka [Glasser, 1981]. Poole [Poole, 1992]].

La première étant l'attaque des liaisons silanols.



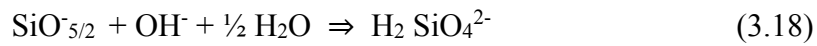
La deuxième phase est la création d'un gel silico-alcalin. La présence simultanée d'alcalins, de calcium et de silice en solution entraîne la précipitation de produits amorphes ou « gel ».



La troisième phase est le Vieillissement du gel, Au contact du calcium, la silice en solution forme généralement un gel polymérisé de composition silico-calco-alcaline.

- Approche trans-solution : Dans cette approche, l'alcali-réaction se déroule dans la solution interstitielle, à n'importe quel endroit dans le béton, et non uniquement au contact des granulats réactifs. Cette approche compte également trois phases, la première étant le mécanisme topo-chimique, ensuite la dissolution du gel et passage en solution [Dron, 1993], et enfin la Coagulation des produits de la solution pour former des gels d'alcali-réaction.

Dans le cas du Gonflement granulaire, le gonflement initial des granulats est attribué à la transformation structurale de la silice suivant la réaction (3.18) [Bulteel et al, 2006].



2.6.2. Facteurs influençant la réaction Alkali-Granulats

Parmi les paramètres on retrouve :

- Types de granulats siliceux

La réactivité d'un granulat s'explique par la variation de l'énergie nécessaire pour rompre la liaison (Si-O) [Couty, 1999]. Cette énergie est caractérisée par l'angle inter tétraédrique (Si-O-Si) qui est une donnée spécifique des structures siliceuses. Cet angle est donc un paramètre majeur pour la réaction d'hydrolyse. Les granulats ayant la plus faible énergie de liaison sont les plus fragiles vis-à-vis de la RAG.

- la granulométrie

Le diamètre des granulats a une très grande influence sur la cinétique de la réaction, Pour une distribution de granulats fins, le volume de granulats est mieux réparti dans le volume de béton, les distances de diffusion des alcalins s'en trouvent réduites, ce qui accélère le processus. Par contre, pour des granulats plus gros, il faut attendre la diffusion des alcalins avant de constater la dissolution de la silice (sites de réaction localisés et éloignés les uns des autres) [Poyet, 2000].

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

- la teneur en alcalins

Pour que la réaction soit possible, il faut une teneur suffisante en alcalins. Selon Poole, la teneur minimale en alcalins est de 3 kg/m³ [Poole, 1992], selon Taylor, 4 kg/m³ [Taylor, 1997].

2.7. Les attaques bactériennes et biochimiques

Les bétons utilisés dans les infrastructures d'assainissement les systèmes d'égouts et les pipelines sont sujet en plus des attaques habituelles à des attaques chimiques et bactériennes, ces attaques peuvent être très dangereuses et nécessitent une grande attention.

La corrosion des ces infrastructures ont été sujet de débat depuis des décennies, avec un peu de consensus sur les méthodes de conception et de spécifications pour répondre de façon optimale aux exigences environnementales et leurs durées de service [Attiobe et Rizkalla, 1988; Yamanaka et Al, 2004].

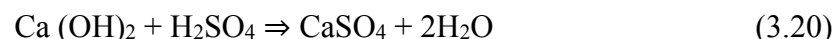
L'effluent n'est pas en lui même particulièrement agressif pour le béton sauf érosion, par contre, la flore bactérienne chimiotrophes qui s'y développe oxyde le sulfure d'hydrogène H₂S en acide sulfurique H₂SO₄ qui lui par contre est très agressif.

2.7.1. Mécanisme des attaques biochimiques et bactériennes

L'hydrogène sulfuré H₂S gazeux, non agressif en tant que tel, se trouve dans les eaux résiduaires qui contiennent de nombreux composés soufrés sous forme organique ou inorganique, ce dernier en contacte avec les bactéries et l'oxygène se transforme en acide sulfurique H₂SO₄ suivant la réaction (3.19).



L'acide sulfurique biogène dégagé est très agressif vis-à-vis du béton suivant un double mécanisme d'attaques, attaque acide et attaque sulfatique. L'attaque acide conduit à la dissolution de la chaux suivant la réaction (3.20), de l'hydroxyde de calcium et des C-S-H.



L'attaque sulfatique quant à elle conduit à la formation d'ettringite pouvant être expansive suivant la réaction (3.21).



L'ettringite étant un produit expansif elle provoque la fissuration interne ainsi que les piqûres. Elle offre une grande surface favorisant ainsi la réaction chimique et permet également la création d'autres sites de pénétration de l'acide dans le béton ce qui affaiblie le béton.

Les effluents agricoles et agroalimentaires peuvent également être une cause de problèmes. En effet sous l'action des bactéries ces produits sont transformés en acide organique [Bertron A., (2004)]. Les processus biologiques liés aux activités bactériennes produisent notamment des acides gras volatils, du dioxyde de carbone et du dihydrogène.

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

L'altération liée aux effluents agricoles et agroalimentaires se traduit par la combinaison de deux phénomènes : une progressive dissolution des phases initiales de la pâte de ciment avec une décalcification partielle liée à l'exposition de la matrice à la solution de PH 6-8, et une carbonatation intense de la matrice liée à la respiration des bactéries.

Bibliographie

- Abe, H. et Nagataki, S. et Tsukayama, R. (1968).** Written discussion on Ref. 19. Proceeding steel; Fifth International Symposium Chemistry of Cement, p. 105-111.
- Al-Amoudi, O. S. B. (1995).** Performance of 15 reinforced concrete mixtures in magnesium sodium sulphate environments. *Construction and Building Materials*, volume 9, n° 3, p. 149-158.
- Al-Khaiat, H. et Fattuhi, N. (2002)** Carbonation of Concrete Exposed to Hot and Arid Climate, *Journal Of Materials in Civil Engineering*, 14 (2), 2002, 97-107.
- Atiş, C. D. (2003)** Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash, *Construction and Building Materials*, 17 (3), 2003, 147-152.
- Bailon, J. P.; Dorlot, J. M. (2000)** Des matériaux, 3eme Edition, Presse Internationale Polytechnique, Montreal 2000.
- Bapat, J. D. (2001).** Performance of cement concrete with mineral admixtures. *Advances in Cement Research*, volume 13, n° 4, p. 139-155.
- Barnett, S. J., Halliwell, M. A., Crammond, N. J., Adam, C. D. et Jackson.W. (2002).** Study of thaumasite and ettringite phases formed in sulfate/blast furnace slag slurries using XRD full pattern fitting. *Cement and Concrete Composites*, volume 24, n° 3-4, p. 339-346.
- Berry, E.E. et Malhotra, V.M. (1987).** Utilisation des cendres volantes dans la preparation du beton. Laboratoire des sciences minérales CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada.
- Biczok, I. (1980).** Concrete corrosion. *Concrete Protection*. 8th edition, Akademiai Kiado, Budapest.
- Bier, T. A. (1987).** Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pores structure of hydrated cement paste. *Materials Research Society Symposium*, volume 85, p. 123-134.
- Brime, (2001)** Project Funded by the European Commission under the Transport, RTD Programme of the 4th Framework Programme - Bridge Management and Condition. Monitoring, BRIME PL97-2220, January 2001.

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

- Calleja, J. (1980).** Durability. In Proc. 7th International Congress on Chemistry of Cement, Editions Septima, Paris, Sub-Theme VII-2, vol. 1, pp VII : 2/1 – VII : 2/48.
- Cohen, M. D. et Bentur, A. (1988).** Durability of Portland cement-silica fume pastes in magnesium and sodium sulfate solutions. ACI Mater. J., volume 85, n° 3, p. 148-157.
- De Gutierrez, R. M. (2003).** Effect of supplementary cementing materials on the concrete corrosion control. Revista de Metalurgia (Madrid), p. 250-255.
- El Hassan, J. (2010)** Evaluation fiabiliste de l'impact des facteurs climatiques sur la corrosion des poutres en beton arme. Application au cas libanais. These de Doctorat Universite de Blaise Pascal-Clermont II, p. 174
- Feldman, R. F. (1981).** Pore structure formation during hydration of fly ash and slag cement blends. Dans Diamond, S., Effects of fly ash incorporation in cement and concrete. Materials Research Society, Pittsburgh, PA, p. 124-133.
- Feldman, R. F. (1984).** Pore structure damage in blended cements caused by mercury Intrusion. Journal of the American Ceramic Society, volume 67, n° 1, p. 30-34.
- Francy, O. et Francois, R. (1998).** Measuring chloride diffusion coefficients from non steady state diffusion tests. Cement and Concrete Research, volume 28, n° 7, p. 947-953.
- Frearson, J. P. H. (1986).** Sulphate resistance of combination of Portland cement and ground granulated blast furnace slag. Proc. 2nd Int. Cong. Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in Conc., Madrid, ACI Pub-91, volume 2, p. 1495-1524.
- Gagne, R. (2007)** Durabilite et reparations du beton GCI 714. Chapitre 2: La durabilite du beton. Dans Universite de Sherbrooke, Departement de Genie Civil, GCI 714 Durabilite et reparations du beton, Notes de cours.
- Gouda, V. K. (1970).** Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: 1-immersion in alkaline solution. British Corrosion Journal 5, p. 198-203.
- Grandet, J. (1992).** Durability of high-performance concrete in relation to external chemical attack. High-performance concrete, ed. E. and F.N. Spon, London, G. B., p. 234-238.
- Grillo, U.; Driemel, K.; Spriestersbach, J. et Grillo, G. (s.d.)** Les raisons de la corrosion de l'acier du beton arme. Cours en ligne : http://www.kks-beton.de/f/produkte_f.htm, site consulte le 09 avril 2014.
- Hamada, M. (1968).** Neutralisation (Carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel. Fifth International Symposium Chemistry of Cement, volume III-3, p. 343-369.

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

- Hausmann, D. A. (1967).** Steel corrosion in concrete: how does it occur? *Materials Protection* 6, p. 19-23.
- Ho, D.W.S. et Lewis, R.K. (1983).** Carbonation of concrete incorporating fly ash or a chemical admixture. *Proceedings, First International conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Other Mineral By-Products in Concrete.*
- Horiguchi, K. e. c. (1994).** The rate of carbonation in concrete made with blended cement. *Durability of Concrete*, volume ACI SP-145, p. 917-931.
- Houst, Y. F (1992)** Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pate de ciment durcie, These de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Khan, M. I et Lynsdale, C. J. (2002)** Strength, permeability, and carbonation of high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 32 (1), 2002, 123-131.
- Khunthongkeaw, S. et Leelawat T. (2006)** A study on carbonation depth prediction for flyash concrete, *Construction and Building Materials*, 20 (9), 2006, 744-753.
- Kokubu, M. et Nagataki, S. (1969).** Carbonation of concrete correlating with the corrosion of reinforcement in fly ash concrete. *Proceedings, Symp on Durability of Concrete, Rilem, Final Report*, volume Part II, p. D71-79.
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., MacLoad, N.F., McGrath, R.J. (2002)** *Design and Control of Concrete Mixtures*, 7th Canadian Edition, Cement Association of Canada, Ottawa, 355 p.
- Lammertin, S. et De Belie, N. (2008).** Porosity, gas permeability, carbonation and their interaction in high volume fly ash concrete. *Magazine of Concrete Research*, volume 60, n° 7, p. 535-545.
- Lawrence, C. D. (1984)** Transport of oxygen through concrete, *British Ceramics Society Proceedings*, 35, 1984, 277-293.
- Mehta, P. K. (1981).** Studies on blended portland cements containing Santorin earth. *Cement and Concrete Research*, volume 11, p. 507-518.
- Metha, P. K. (1991).** Durability of concrete, Fifty years of Progress, Dans Anonyme, *Second International Conference*,. ACI SP-126, Montreal, Canada, p. 1-31.
- Meyer, A. (1968).** Investigation on the carbonation of concrete. *Proceedings, Fifth International Symposium Chemistry of Cement*, volume III-52, p. 394-401.

Chapitre 2 – Les différentes agressions et attaques du béton

Paradis, F. (2009) Influence de la fissuration du beton sur la corrosion des armatures. Caracterisation des produits de corrosion formes dans le beton, thèse de doctorat, universite de Laval, 2009.

Parrott, L. J. (1987). A Review of Carbonation in Reinforced Concrete. British Cement Association. 126p.

Scholin, K. et Hilsdorf, H. K. (1989). The potential Durability of concrete. Dans Anonyme, Proceedings of the 9th European Ready Mixed Concrete Organisation Congress, Stavanger, Fabeko PublishersOslo, p. 453-479.

Taylor,H.F.W. (1997) Cement Chemistry, Second Edition, Thomas Telford, London, 459p.

Thomas, M. D. A., Matthews, J. D. (1992) Carbonation of fly ash concrete, Magazine of Concrete Research, 44 (160), 1992, 217-228.

CHAPITRE 3 – LE ROLE DES AJOUTS CIMENTAIRES DANS LA RESISTANCE DU BETON AUX ATTAQUES

A l'heure actuelle, les études entreprises dans le domaine « durabilité » du matériau béton et le domaine « environnement » ont conduit à proposer des dispositions constructives où à concevoir de nouveaux matériaux tout en gardant à l'esprit l'aspect technico-économique et cela pour répondre à un objectif de résistance du matériau dans un environnement donné et une durée d'exposition définie, c'est pourquoi le recours aux ajouts cimentaires est certainement la voie la plus prometteuse à suivre afin d'assurer un développement durable du matériau béton.

L'utilisation des ajouts cimentaires en remplacement d'une partie du ciment dans le béton présente plusieurs aspects bénéfiques. Ces matériaux, étant généralement des sous-produits industriels, leur valorisation dans le béton est non seulement économique mais également écologique.

Dans la composition chimique de la plupart des ajouts cimentaires, on retrouve la silice vitreuse réactive qui en présence de l'eau se combine par l'hydratation du C_2S et du C_3S pour former un silicate de calcium hydrate de même type que celui produit par l'hydratation du ciment Portland [Ai'tcin, 2001].

3.1. Les ajouts cimentaires

Les ajouts minéraux ou ajouts cimentaires sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux présentant une phase réactive ou amorphe. Ils peuvent posséder des propriétés hydrauliques c'est-à-dire qu'ils s'hydratent de façon autonome au contact de l'eau. Ils peuvent également présenter des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la Portlandite pour former des C-S-H. Cette réaction est particulièrement intéressante puisque la Portlandite, qui contribue peu à la résistance, est remplacée par des C-S-H qui sont responsables des propriétés liantes de la matrice cimentaire.

3.1.1. Cendres volantes

Les cendres volantes sont les pouzzolanes artificielles les plus courantes. Elles sont générées par la combustion du charbon pulvérisé, utilisé dans les centrales thermiques. Elles se présentent avec une distribution granulaire semblable à celle du ciment Portland et contribuent à l'amélioration des propriétés du béton, surtout la maniabilité du béton frais. Elles diminuent le dégagement de chaleur et elles réduisent grandement la pénétration des ions chlorures [Kosmatka et coll., 2004].

La norme canadienne CSA A3001-03 classe les cendres volantes en fonction de leur teneur en oxyde de calcium. Elle les répartit en trois grandes classes. Les cendres volantes de classe F, les cendres volantes de classe CL et les cendres volantes de classe CH.

La classe F représente les cendres volantes les plus communes. Elle est qualifiée de silicoalumineuse avec un faible potentiel pouzzolanique. La classe CL riche en chaux (entre 8 % et 20 % de CaO) est un produit de la combustion du lignite. Elle a une teneur en oxyde

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

supérieure à 50 % et est qualifiée de silicocalaire avec un potentiel pouzzolanique élevé. La classe CH est très riche en chaux (> 70 % de CaO). Ce sont des cendres qui ont également une teneur en oxyde supérieure à 50 %.

En général, les cendres volantes provenant de la combustion des charbons bitumineux (généralement de classe F) contiennent une faible quantité de calcium tandis que les cendres provenant de la lignite ont une faible teneur en silice et en alumine et leur teneur en sulfate est élevée et la plupart du temps, elles se présentent sous forme de sulfate de sodium.

Le carbone se trouve d'avantage dans les grosses particules alors que les alcalis, les sulfates et le chlore ont tendance à former une mince couche à la surface des particules plus fines [Malhotra, 1987]. Le tableau 3.1 présente les exigences physiques et chimiques des cendres volantes selon la norme CSA A3000.

Tableau 3.1 : Exigences physiques et chimiques des cendres volantes (CSA A3000)

Caractéristiques	F	CL	CH
Chimiques			
CaO (% max)	<8	8 à 20	>20
SO ₃ (% max)	5	5	5
Perte au feu (% max)	8	6	6
Physique			
Finesse : retenue tamis 45µm (% max)	34	34	34
Expansion a Autoclave (% max)	0.8	0.8	0.8

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et physiques selon les impuretés contenues dans le charbon utilisé. Le tableau 3.2 tire des travaux de Dhir, 1986 présente la composition chimique typique des cendres volantes.

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

Tableau 3.2 : Composition chimique typique des cendres volantes [Dhir, 1986]

Oxydes	Cendres à faible teneur en chaux (% massique)	Cendres à haute teneur en chaux (% massique)
SiO ₂	50	40
Al ₂ O ₃	28	18
Fe ₂ O ₃	9	8
CaO	3	20
MgO	1	4
SO ₃	1	2
Autres	8	8

3.1.2. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il provient de la récupération du laitier qui surnage la fonte après refroidissement, dans le procédé de production de fonte dans les hauts fourneaux. Le laitier de haut fourneau est l'ajout le plus connu et le plus fiable pour la stabilité de ses propriétés comparativement aux autres sous produits.

Les laitiers sont constitués de silicates et d'alumino-silicates de calcium qui sont fondus en même temps que la fonte dans le haut fourneau. En général, le laitier s'hydrate de la même manière que les cendres volantes de la classe C. Cependant, son effet sur la résistance commence à se faire sentir à partir de 7 jours.

Le laitier peut être obtenu par trempe (laitier vitreux) dès sa sortie du haut fourneau, soit avec des jets d'eau sous pression, soit dans des grands bassins remplis d'eau ou partiellement dans l'eau et dans l'air. Le laitier se refroidit aussi lentement à l'air dans des fosses spécialement aménagées. Dans ce cas, il se présente sous forme de cristaux et n'a pratiquement aucune propriété hydraulique. [Neville, 2000].

Les laitiers ont une composition chimique assez constante. En moyenne, le laitier contient 35 % de SiO₂, 40 % de CaO, 8 % de MgO et 12 % de Al₂O₃ [Aitcin, 2001]. La variation de la composition chimique du laitier est fonction de la température dans le haut fourneau. Le tableau 3.3 indique la composition chimique type de laitier de haut fourneau [Aitcin, 2001].

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

Tableau 3.3 : Composition chimique typique de laitier du haut fourneau [Ai'tcin, 2001]

	Laitier Français	Laitier nord Américain
SiO ₂	29 à 36	33 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16
CaO	40 à 43	36 à 45
Fe ₂ O ₃	< 4%	0,3 à 20
MgO	< 6%	3 à 12
S ⁻	< 1,5%	---

La structure cristalline du laitier peut être assimilée à celle d'un filet dont l'ossature est formée d'un réseau de silicate covalent et dont certaines mailles ont été coupées aux points les plus faibles.

3.1.3. La fumée de silice

La fumée de silice est obtenue pendant la production du silicium et des alliages de ferrosilicium. Elle est extraite en surface du four de réduction, ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation. Les caractéristiques de la fumée de silice dépendent de plusieurs facteurs tels que le type de production au four (Si ou FeSi) et les différentes impuretés de la fumée de silice. Le mélange de réducteurs utilisé dans le four peut, quant à lui, conduire à des colorations différentes du produit (de gris clair à gris foncé), sans pour autant en changer les performances.

La fumée de silice se présente sous la forme de particules individuelles, avec un diamètre compris entre 50 et 200 nanomètres. Ces sphères contiennent majoritairement du SiO₂, avec des quantités variables en oxydes de Ca, Al, Na, K comme impuretés principales. C'est est un produit amorphe et non cristallin.

La fumée de silice non densifiée a une densité apparente faible, ce qui rend sa manipulation difficile. Par un traitement de densification, il est possible d'augmenter sa densité apparente et ainsi faciliter son transport, son stockage et sa manipulation. Elle est généralement comprise entre 400 et 650 kg/m³. En augmentant la densité du produit, on améliore la coulabilité et la manipulation du produit, mais on diminue sa capacité à se disperser dans l'eau. La fumée de silice est aussi disponible sous une forme prête à l'emploi : le slurry, suspension aqueuse avec environ 50 % en masse de fumée de silice. Le slurry est un produit stable dans le temps, avec une basse viscosité et donc facile à pomper et à utiliser. Son procédé de fabrication conduit à un produit très finement dispersé dans l'eau et donc dans le béton lors du malaxage. Les Paramètres principaux à contrôler dans la production de la fumée de silice sont inscrit dans le tableau 3.4.

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

Tableau 3.4 : les paramètres contrôlés lors de la production de la fumée de silice.

Paramètres	Limites
SiO ₂	>85%(classe1) >80%(classe2)
Perte au feu	<4%
Surface spécifique BET	15-35m ² /g
Si libre	<0,4%
Alcalins totaux (Na ₂ Oeq)	À reporter
CaO libre	1%
SO ₃	<2%
Chlorures	<0,3%
Indice d'activité Pouzzolanique à 28 jours	>100%
Variation d'extrait sec (cas du slurry)	<2%

3.1.4. La Pouzzolane

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

On distingue deux types de pouzzolane. Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinés dans un four ou transformés, puis broyés pour obtenir une fine poudre et les pouzzolanes artificielles qui sont des déchets des efférentes industries essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique.

On classe les pouzzolanes en trois classes,

- Les constituants actifs : phase vitreuse plus ou moins altérées, opale, terre diatomée, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes : phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs : substances organiques et argiles gonflantes.

3.2. Le rôles des ajouts minéraux dans la résistance aux attaques

Les ajouts minéraux ont deux rôles principaux dans les bétons. Un rôle granulométrique, ou finement broyés ils comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. Un rôle pouzzolanique, ou ils réagissent avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique.

3.2.1. Le rôle des cendres volantes

Les cendres volantes influent d'une façon ou d'une autre sur la plupart des propriétés du béton durci. Les propriétés, la composition chimique, la taille des particules et la réactivité des cendres volantes ainsi que les conditions de murissement du béton sont les principaux facteurs qui influencent les propriétés du béton durci.

Généralement, les composés des cendres volantes retardent l'hydratation du ciment au début. Les effets physiques et chimiques des cendres volantes se font davantage sentir au cours des trois premières semaines de l'hydratation. Par la suite, ils s'estompent face aux effets pouzzolaniques. L'effet des cendres sur les propriétés mécaniques ne se fait sentir qu'après quelques semaines. L'action des cendres volantes, d'abord faible, s'intensifie durant les 3 à 4 premières semaines pour devenir prédominante par la suite [Talbot, 1996].

D'une façon générale, l'effet pouzzolanique, produit une pâte composée de gel de C-S-H [Malhotra, 1987]. Cependant, dans la microstructure de la pâte de ciment contenant des cendres volantes, on retrouve des grains de cendre étroitement reliés dans les matrices et ne présentant aucun signe de réaction. A long terme, les grains de cendre consomment par réaction pouzzolanique une bonne partie de la Portlandite issue de l'hydratation du ciment. Réduisant ainsi la quantité de Portlandite formée aux interfaces pâte granulat [Marchand et coll., 1999].

Une des conséquences de la lente réaction des cendres volantes est qu'initialement le béton a une perméabilité plus grande qu'un béton ne comportant pas que du ciment Portland et ayant les mêmes rapports E/C. Avec le temps, le béton avec cendres volantes devient plus imperméable, surtout quand le murissement est adéquat et prolonge plus longtemps. Le mauvais murissement a un effet préjudiciable sur la porosité de la zone superficielle du béton [Neville, 2000].

L'hydratation de la pâte de ciment s'accompagne d'une élévation de la température. Retardant et ralentissant l'hydratation du ciment, les cendres volantes ont une influence bénéfique sur l'évolution de la chaleur d'hydratation. Elles sont donc précieuses pour modifier les bétons de masse : réduisant l'exothermie des réactions d'hydratation, elles permettent d'éviter la fissuration par retrait thermique des ouvrages massifs.

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

L'ajout de cendres volantes réduit le coefficient de diffusion des ions chlorures non seulement par une diminution, à terme, de la porosité de la matrice cimentaire, mais également du fait de l'amélioration de la capacité de liaison des ions chlorures par la matrice, ceci pour plusieurs raisons :

- Liaison chimique : l'élévation de la teneur en alumine qu'implique l'ajout de cendre améliore la capacité de liaison des ions chlorures par la formation de chloroaluminates.
- Liaison physique : l'enrichissement en C-S-H qu'implique la réaction pouzzolanique augmente d'autant les capacités d'adsorption des ions chlorure à la surface du gel de C-S-H.

3.2.2. Le rôle du laitier des hauts fourneaux

Les laitiers des hauts fourneaux sont des liants hydrauliques. Cependant, ils ne durcissent pratiquement pas quand on les mélange avec de l'eau, sauf à long terme. Ils réagissent peu avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former des C-S-H secondaires.

Dans le cas d'une activation alcaline autre que la chaux, le laitier donnera des silicates de calcium hydratée (C-S-H), de l'aluminate tetracalcique hydrate (C_4AH_{13}) et un aluminosilicate de calcium hydraté (C_2ASH_8). Dans le cas d'une activation sulfatique (gypse), l'hydratation du laitier aboutit à la formation de silicate de calcium hydratée (C-S-H), d'ettringite ($C_3A.3CS.H_{32}$) stable et d'hydroxyde d'aluminium ($Al(OH)_3$) [Aitcin, 2001].

La structure des pores de la matrice change lors de la réaction du laitier avec l'hydroxyde de calcium et les alcalis libérés par l'hydratation du ciment Portland. Ceci s'explique par une densification microstructurale de la pâte hydratée du ciment contenant du laitier. La Portlandite produite par l'hydratation des grains de clinker réagit avec les ions Si^{4+} et Al^{3+} provenant de l'hydratation du laitier pour former du C-S-H et du C_4AH_{13} . Les différentes espèces doivent diffuser dans toutes les directions pour permettre cette réaction. La précipitation du C-S-H et du C_4AH_{13} entre les grains de clinker et celui du laitier bloqueront les pores entre les deux.

La perméabilité d'un béton contenant du laitier adéquatement muri est, d'une façon générale, inférieure à celle d'un béton à base de ciment Portland. Plus la proportion de laitier est grande, plus on peut s'attendre à une plus grande imperméabilité. Ceci revient au fait que l'hydratation du laitier consomme une partie de la Portlandite issue de l'hydratation du clinker pour produire des C-S-H. Ce mécanisme homogénéise la microstructure de l'auréole de transition avec une augmentation de sa densité et une réduction de son épaisseur [Neville, 2000].

3.2.3. Le rôle de la fumée de silice

L'incorporation de fumée de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation. Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense qui conduit à des bétons extrêmement compacts, à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

l'adjuvantation. Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs : attaques chimiques, acides, sulfates, abrasion gel/dégel, en réduisant significativement la porosité et la perméabilité, la carbonatation, les phénomènes d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne.

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte. Sa finesse et ses propriétés pouzzolaniques confèrent à la fumée de silice une forte réactivité avec les $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produits durant l'hydratation du béton suivant la réaction (4.1) et (4.2).



Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton.

La fumée de silice est 100 à 150 fois plus fine qu'une particule de ciment et peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment. Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du béton.

La fumée de silice a un effet favorable vis-à-vis du phénomène d'alcali-réaction. Les particules fines et amorphes de la fumée de silice réagissent avec les alcalins du ciment et réduisent ainsi leur teneur dans le béton avant son durcissement.

La fumée de silice permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion des différents constituants d'un béton, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques, en particulier sur les résistances mécaniques en compression. Ces dernières sont directement liées à la quantité de fumée de silice ajoutée au ciment. L'utilisation de fumée de silice pour un béton de même qualité permet d'augmenter la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.

La réaction sulfatique interne (RSI) est une cause de désordres susceptibles d'endommager assez sévèrement les ouvrages en béton. L'influence de la fumée de silice à des teneurs optimisées de 10 % en taux de substitution est très significative en prévention de cette pathologie.

En diminuant la perméabilité du béton, la fumée de silice réduit les mouvements d'eau et les pressions internes dans le béton qui sont source de pathologies. Un béton contenant de la fumée de silice supporte un plus grand nombre de cycles gel/dégel.

3.2.4. Le rôle de la pouzzolane

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

par une série d'effets très favorables : accroissement de la résistance finale, légère diminution du retrait et du fluage, réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité, amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques, protection des armatures contre la corrosion, une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques, une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton, une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

Bibliographie

ASTM, C672M-03. (2003) Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals. American Society for Testing and Materials, USA.

Bager, D., H. et Sellevoid E. J. (1986) Ice formation in hardened cement past, part I - Room temperature cured pastes with variable moisture content, *Cement and Concrete Research*, vol. 16, p. 709-720

Bai, J., Wild, S., Sabir, B.B. (2002) Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PCPFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth. *Cement and Concrete Research*, vol 32, n° 11, p. 1813-1821

Bakker, R.F.M. (1983) Permeability of blended cement concretes, *Proceedings, First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-products in Concrete*; Montebello, Quebec, Canada, vol. 1, p. 589-605

Begue, P. et Gagne, R. (2004) Relation ecaillage/sorptivite des betons confectionnes a l'aide de ciments aux ajouts: Etude preliminaire, *Universite de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada*, p. 13

Begue, P., Gagne, R. et Marquis, A. (2004) Effects of covercrete quality on the sorption behaviour of concrete, *CRIB, Universite de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada*, p. 21

Bogue, R., H., (1952) *La Chimie du ciment Portland*, Paris Eyrolles,

Bilodeau, A., Carette G.G., Malhotra V.M. and Langley W.S. (1991) Influence of curing and drying on salt scaling resistance of fly ash concrete. In : *Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, ACI SP-126, V. M. Malhotra Ed.*, p. 210-228

Bouzoubaa, N., Bilodeau, A., Fournier, B., Hooton, R. D., Gagne, R., and Jolin, M. (2010) Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: laboratory and field test data - sidewalks cast in fall 2002. *Canadian Journal of Civil Engineering*, p. 30 (under review)

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

Bouzoubaa, N., Bilodeau, A., Fournier, B., Hooton, R. D., Gagne, R., and Jolin, M. (2008) Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: laboratory and field test data. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, p. 1261-1275

Bouzoubaa, N., Bilodeau, A., and Fournier, B. (2005) De-icing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing material. *Proceedings of CONMAT'05, 3rd International Conference (CD-ROM)*, Vancouver.

Bouzoubaa, N., Fournier, B., and Bilodeau, A. (2003) De-icing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials. *Proceedings of 6th CANMET/ACI Conference on durability of concrete, Supp. Papers*, Thessaloniki, p. 791-821

Browne, F.P. and Cady, P.D. (1975) Deicer scaling mechanism in concrete *Durability of concrete*, ACI Special Publication SP-47, American Concrete Institute, Detroit, p. 101-119

Claisse, P.A., Elsayad, H.I., Shaaban, I.G., (1997) Absorption and sorptivity of cover concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 9 n°3, p. 105-110

CSA, (2004) Concrete materials and methods of concrete construction - Method of test and standard practices for concrete. *CSA Standard A23.1-04*. Canadian Standards Association, Mississauga, Ont.

Dias, W., P., S. (2000) Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n°8, p. 1255-1261.

Dhir, R., K., Hewlett, P., C, and Chan, Y.N. (1987) Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods. *Magazine of Concrete Research*, vol. 39, n°141, p. 183-195.

Duchesne, J., Marchand, J. et Lajnef-Edwards, M. (2000) Le murissement a l'eau de chaux des échantillons de béton en laboratoire est-il adapté au cas des bétons contenant des cendres volantes. *Revue Canadienne de Génie Civil* vol. 27, n° 5, p. 1073-1081.

Fagerlund, G., (1975) Studies of the destruction mechanisms at freezing of porous materials, *Proc. Sixth International Congress on the Problems Raised by Frost Action*, Fondation française d'études nordiques, France, p. 166-196.

Gagne, R., Latreille, Y. et Marchand, J. (1996) Les effets des caractéristiques du réseau de bulles d'air, du type de murissement, du truillage de surface et de la fumée de silice sur la résistance à l'écaillage d'un béton à haute performance, *Revue Canadienne de Génie Civil*, vol. 23, n°6, p. 1260-1271.

Hall, C, (1989). Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research*, vol. 41, n°147, p. 51-61.

Chapitre 3– Le rôle des ajouts cimentaires dans la résistance du béton aux attaques

Houehanou, E., Gagne, R., John, M., (2010) Analysis of the representativeness and relative severity of ASTM C672 and NQ 2621-900 standard procedures in evaluating concrete scaling resistance, Canadian Civil Engineering Journal, p. 37 (under review).

Kleiger, P., and Gebler, S. (1987) Fly ash and concrete durability. Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, American Concrete Institute, ACI Special Publication SP-100, J. M. Scanlon Ed., p. 1043-1069.

Machabee, Y. (1998) Etude de l'influence de certains paramètres sur la résistance à l'écaillage des bétons, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, p. 211.

Ollivier, J-P., et Vichot A., (2008) La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 978-2-85978-434-8 (2ème édition), Paris, p. 868.

Petersson, P., E. (1993) Scaling resistance tests of concretes - experience from practical use in Sweden, Proc. Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, Comité RILEM TC 117, Québec, p. 249-259.

Regourd, M. (1982b) Microstructure et propriétés des ciments, mortiers et bétons. Bétons, Plâtres, Chaux, n°734, p. 41 -49.

Saric-Coric, M. et Ai'tcin, P.-C. (2003) Bétons à haute performance à base de ciments composés contenant de laitier et de fumée de silice, Revue Canadienne de Génie Civil, vol. 30, n°2, p.414-428.

CHAPITRE 4 - LA POUDRE DE VERRE

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulat dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons gonflent et se fissurent. Depuis l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'années que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons aussi bien économiques qu'environnementales, l'utilisation du verre recyclé comme ajout cimentaire a suscité l'intérêt de nombreux scientifiques et ceux-là ont encouragé de nouvelles études.

4.1. Réaction pouzzolanique de la poudre de verre

Le verre incorporé dans le béton peut manifester plusieurs types de comportements, essentiellement en fonction de sa granularité. En effet une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordre, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique.

La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans une matrice cimentaire désigne la combinaison en présence d'eau, de la silice amorphe du verre avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment.

[Shayan et al. (2004)], ont remarqué que la poudre de verre de finesse Blaine relativement élevée de 800 m²/kg développe des réactions pouzzolanique importantes dans le mortier et pourrait remplacer jusqu'à 30 % de ciment dans quelques mélanges de béton.

D'autres études conduites par [Shi et al. (2005b)] portant sur des poudres de verre de différentes finesses variant de 264 à 582 m²/kg, ont montré que la réaction pouzzolanique de la poudre de verre est d'autant plus importante que sa finesse est élevée. Ils ont également observé qu'une augmentation de la température de murissement des échantillons accélère l'activation de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et des cendres volantes.

Par toutes les études établies sur la réaction pouzzolanique du verre on dégage les conditions suivantes :

- La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique, plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique.
- A jeun âge la résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leurs teneurs en poudre de verre augmentent.
- L'activité pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leurs couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable.

L'utilisation simultanée du verre et d'un ajout cimentaire notamment la fumée de silice, la cendre volante ou encore le métakaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel.

Chapitre 4 – La poudre de verre

La réaction pouzzolanique de la poudre semble être fortement affectée par le dosage en eau du béton. En effet, les effets d'amélioration des propriétés du béton résultant de l'activité pouzzolanique du verre sont nettement plus perceptibles dans les bétons ayant des rapports E/L élevés que dans ceux ayant E/L faibles [Aladdine, 2009; Zidol, 2009].

4.2. Réaction alcalis granulats du verre

Le remplacement partiel du ciment par la poudre de verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment la résistance à la compression. Toutefois les bétons à base de granulat de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. Effectivement, la silice du granulat de verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons.

[Shayan et al. (2004)] ont montré que le verre utilisé comme granulat fin est susceptible de générer la réaction alcali-silice. Alors que, utilisé, comme poudre, le verre réduit significativement l'expansion due à la réaction alcali-silice des granulats de verre comme le montre la figure 4.1 [Shayan, et al, 2004]. Bien qu'elle ne soit pas aussi efficace que les cendres volantes de même taux de remplacement, la poudre de verre malgré sa forte teneur en alcalis réduit considérablement l'expansion due à la réaction alcalis silice, sans l'inhiber complètement [Idir, 2009; Aladdine, 2009 et Zidol, 2009]. [Shi al. (2005a)] avaient observé que des bétons légers autoplaçants avec un sable réactif et incorporant la poudre de verre développent une bonne résistance à la réaction alcali-granulat.

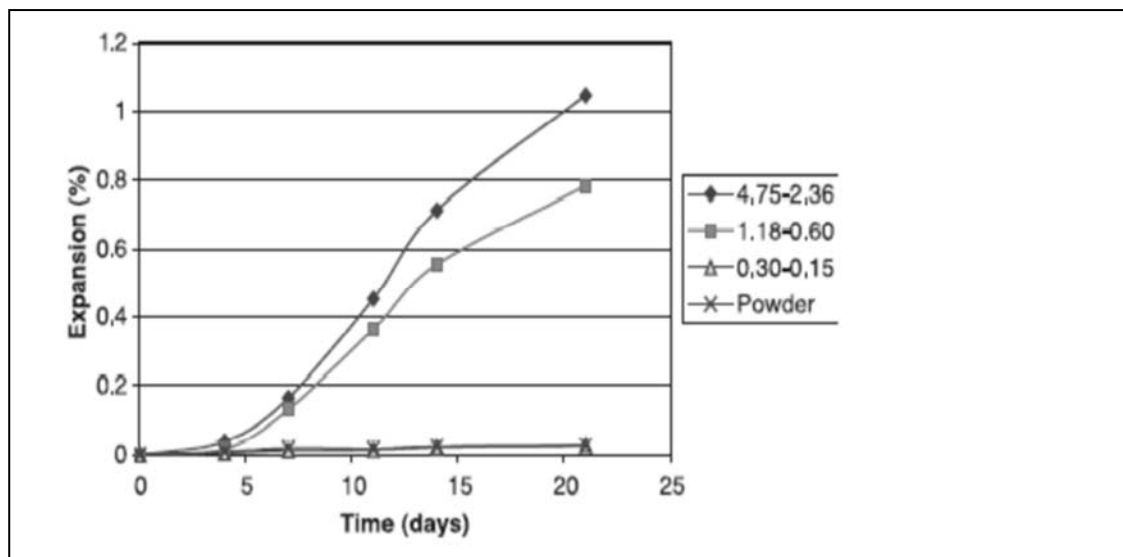


Figure 4.1- Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre De différentes tailles [Shayan et al, 2004].

4.3. Résistance au gel dégel

La réduction de la perte de masse augmente avec l'augmentation du taux de substitution par la poudre de verre [Turgut (2008)]. De même, des bétons légers autoplaçants incorporant la poudre de verre développent également une bonne résistance au gel et dégel [Shi et al, 2005a].

4.4. Résistance à l'écaillage

La résistance à l'écaillage des bétons contenant la poudre de verre dépend fortement du rapport E/L. Effectivement, les bétons avec poudre de verre ayant un rapport E/L élevé résistent faiblement à l'écaillage contrairement aux bétons avec poudre de verre ayant un rapport E/L faible dont la résistance à l'écaillage est relativement bonne.

En absence des sels de déverglaçage la résistance des bétons incorporant la poudre de verre à l'écaillage est plus sensible à la variation du rapport E/L comparée à celle du gel-dégel. Un prolongement de la durée de cure humide avant l'application des cycles de gel-dégel favorise également l'amélioration de la résistance à l'écaillage des bétons avec poudre de verre ayant E/L faible [Zidol, 2009].

4.5. Pénétrabilité des ions chlorure

Les fines particules de verre ainsi que les produits d'hydratation remplissent les pores conduisant à l'augmentation de leur tortuosité et donc une réduction de leur connectivité, donc l'incorporation de la poudre de verre entraîne une réduction de l'interconnectivité des pores plus ou moins relativement proportionnelle au taux de substitution [Schwarz et al, 2007].

[Shayan et al, (2006)], ont observé [figure 4.2] que la poudre de verre contribue à l'amélioration de la durabilité des bétons par la réduction significative de la pénétration des ions chlore réduisant ainsi les risques de corrosion des armatures du béton

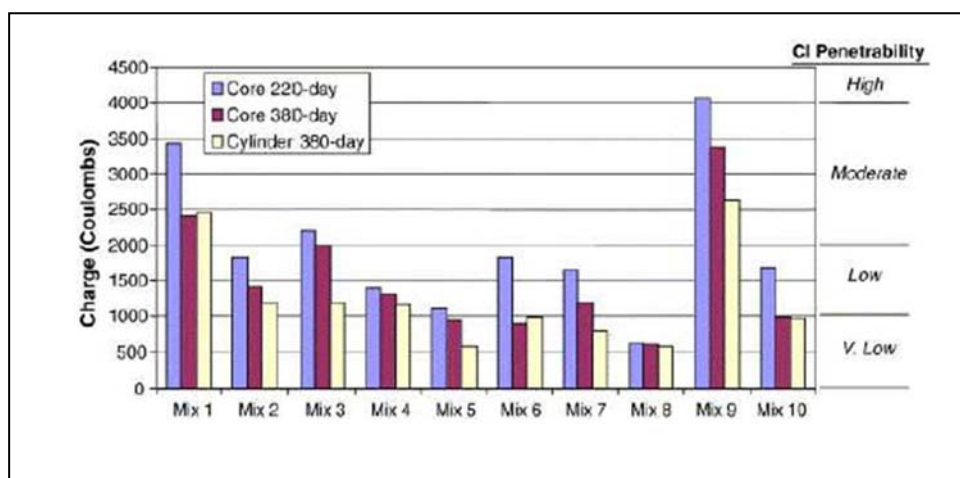


Figure 4.2- Pénétrabilité des ions chlorure [Shayan et al, 2006].

Chapitre 4 – La poudre de verre

² Mix 3 et Mix 4 contient 20% ou 30% de la poudre de verre; Mix 6, Mix 7 et Mix 8 contiennent en plus de la poudre de verre, respectivement 50, 40 et 75% CGS (Crushed Glass Sand)

³ Les bétons identifiés 10 GP ou 10 GPR contiennent 10% de la poudre de verre et ayant des rapports E/L respectifs de 0,40 et 0,36.

⁴ V374 ou V436 désigne la finesse respective de 374 et 436 m²/kg de la poudre verre utilisée dans ces bétons

[Aladdine, 2009], figure 4.3, qui a étudié une poudre de verre finement broyé de finesse de l'ordre de 555 m²/kg et Zidol, 2009, figure 4.4, ont remarqué que la pénétrabilité des ions chlore à 91 jours dans des bétons contenant de la poudre de verre est identique pour des rapports E/L = 0,55 et E/L = 0,40.

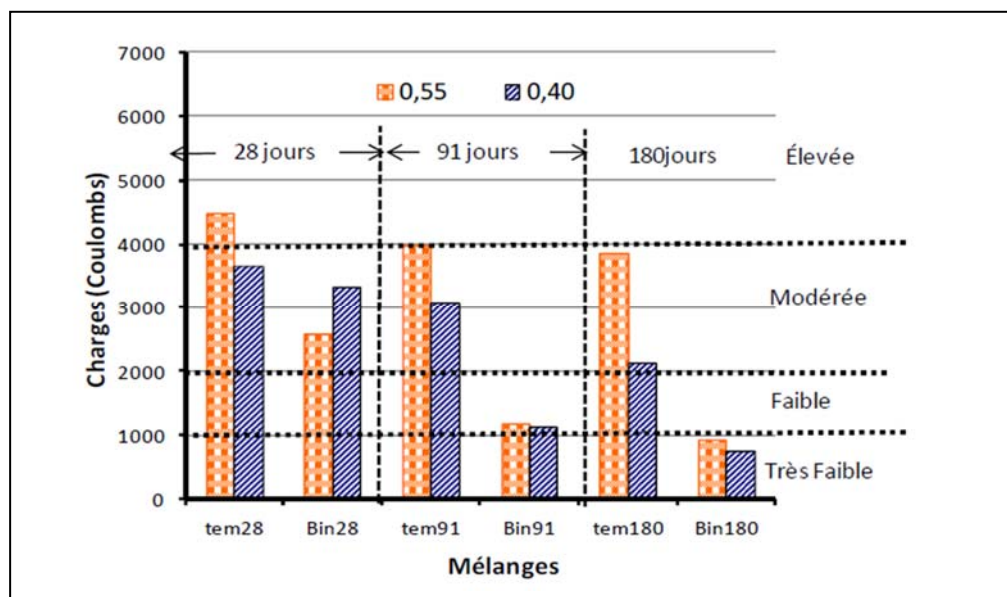


Figure 4.3- Pénétrabilité des ions chlorure des bétons à 28, 91 et 180 jours de murissement [Aladdine, 2009].

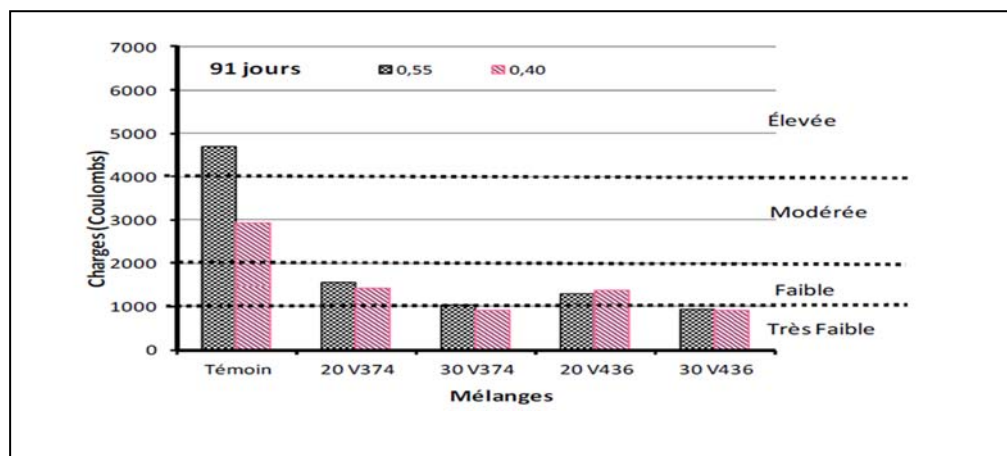


Figure 4.4 -Pénétrabilité des ions chlorure des bétons ayant E/L = 0,55 et 0,40 contenant de la Poudre de verre à 91 jours de murissement [Zidol, 2009].

Chapitre 4 – La poudre de verre

Les bétons contenant la poudre de verre présentent une perméabilité similaire voire plus faible que celle du béton contenant le même taux d'incorporation de cendres volantes [Jain et Neithalath, 2010].

4.6. Retrait de séchage

Le retrait de séchage correspond à une variation de la dimension du béton particulièrement dû à la disparition d'eau libre par l'hydratation de ses constituants et par l'évaporation. Les bétons de faibles rapports E/L ($\leq 0,40$) incorporant la poudre de verre présentent un retrait de séchage plus élevé que celui du témoin [Zidol, 2009].

L'étude faite par [Shayan et al, 2006], montre que l'effet de la poudre de verre sur le retrait de séchage dépend de la teneur en poudre de verre dans les bétons. En effet le retrait de séchage d'un béton ayant E/L = 0,49 incorporant 20 % de poudre de verre est du même ordre de grandeur voire légèrement inférieur à celui du témoin alors que des bétons incorporant 30 % de poudre de verre ont présenté un retrait supérieur à celui du témoin.

4.7. Retrait endogène

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/L. La poudre de verre diminue considérablement le retrait endogène à court terme alors qu'elle l'augmente à long terme [Danilova, 2012].

A court terme les particules de verre sont inertes et empêchent le retrait de la même manière que font les granulats, tandis qu'à long terme la poudre de verre rapporte des alcalis d'un côté et sa réaction pouzzolanique consomme de l'eau contenue dans la pâte de ciment d'un autre côté la réduisant ainsi entre les feuillettes de C-S-H, et affine les pores en formant des ménisques très courbés qui occasionnent de fortes dépressions internes et augmentent la contraction volumétrique et donc le retrait endogène.

4.8 Conclusion

Les études faites jusqu'à aujourd'hui concernant l'incorporation de la poudre de verre dans les bétons se sont intéressées uniquement à certains aspects de la durabilité des bétons incluant la résistance à la réaction alcalis-granulat, à la pénétration des ions chlorure, aux variations dimensionnelles notamment retrait de séchage et le retrait endogène, à la résistance au gel-dégel et écaillage des bétons.

Au vu de ces aspects de durabilité des bétons, la poudre de verre ne présente pas d'effet négatif sur la durabilité des bétons. Au contraire des améliorations substantielles et considérables sont observées sur la plupart de ces paramètres de durabilité des bétons en présence de la poudre de verre.

A travers ces études on remarque que la poudre de verre semble receler des performances intéressantes avec l'augmentation du rapport E/L des bétons. Ce qui laisse croire, que la

Chapitre 4 – La poudre de verre

poudre de verre à besoin de plus d'eau et de temps pour s'hydrater et développer tous ses potentiels. Or, il est bien connu que le dosage en eau des bétons varie inversement avec leur qualité et leur durabilité. Il est donc indispensable d'étudier la durabilité de ces bétons ayant différents rapports E/L contenant de la poudre de verre dans des milieux agressifs tels que les milieux riches en chlorure, en sulfates et CO₂.

Bibliographie

Aladdine, F. (2009). *Propriétés mécaniques et durabilité des bétons incorporant le verre finement broyé.* Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Qc, Canada, 124 p.

Danilova, M. (2012). Effet de la poudre de verre sur le fluage du C-S-H. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Qc, Canada, 322 p.

Idir, R. (2009). *Mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique.* Thèse de doctorat Cotutelle, Université de Toulouse (France) et Université de Sherbrooke (Canada), 284 p.

Shayan, A. et Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 34, n° 1, p. 81-89.

Shayan, A. et Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, volume 36, n° 3, p. 457-468.

Taha, B. et Nounu, G. (2008a). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, volume 22, n° 5, p. 713-720.

Taha, B. et Nounu, G. (2008b). Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. *Cement and Concrete Composites*, volume 30, n° 6, p. 497-505.

Zidol, A. (2009). *Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires.* Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Qc, Canada, p168.

CHAPITRE 5 – TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Un ouvrage en béton doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations physiques, mécaniques ou chimiques auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions conjuguées des éléments (le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant) tout en conservant son esthétisme. La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement. Elle dépend de nombreux paramètres tels que la qualité de sa conception, les matériaux utilisés, les dispositions constructives, la réalisation de l'ouvrage et les diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Ce chapitre traite les essais utilisés à la détermination de la résistance du béton aux différentes attaques notamment, la pénétrabilité des ions chlorure, la diffusion des ions chlore, les attaques par les sulfates, la carbonatation, la perméabilité au gaz et la corrosion des armatures. Et présente également les résultats d'une étude effectuée par **Ablam Zidol (2014)** à l'université de Sherbrooke dans le cadre de sa thèse doctorale intitulée durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre.

Cette étude a été faite en deux phases présentées dans la figure 5.0. Elle vise à identifier l'effet du rapport E/L sur certaines propriétés, telles que la pénétrabilité et la diffusion des Ions chlore, des bétons incorporant la poudre de verre mais également étendue aux autres ajouts classiques à savoir la cendre volante de classe F, le laitier de haut fourneau, le métakaolin et la fumée de silice, pour fin de comparaison.

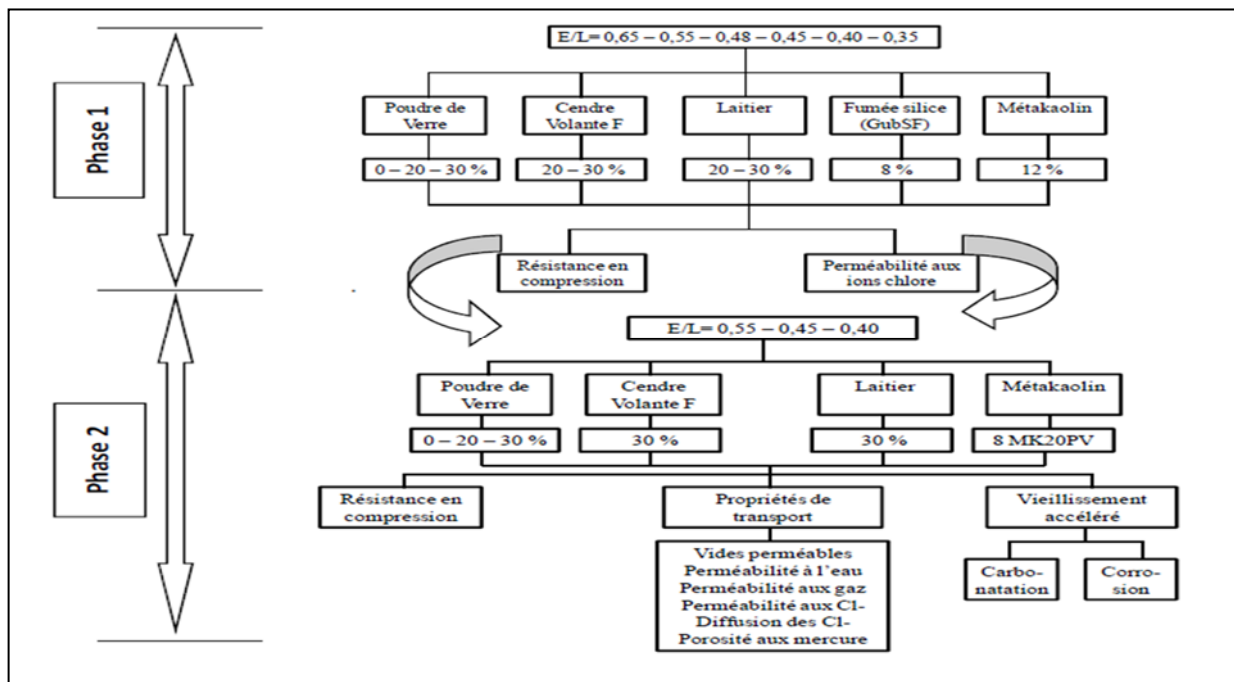


Figure 5.0 Structure des deux phases du programme expérimental [Zidol, 2014].

5.1. Essai de pénétrabilité des ions chlorure

La pénétrabilité des ions chlorure permet d'évaluer l'interconnectivité des pores dans le béton. Cet essai est effectué suivant la norme ASTM C1202 sur des éprouvettes de 95 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur.

L'éprouvette est placée dans une cellule de telle façon que l'une des faces circulaires baigne dans une solution de 3 % de chlorure de sodium (NaCl) dans laquelle se trouve une électrode émettrice d'électrons (cathode). L'autre face circulaire baigne dans une solution de soude (0,3N de NaOH) ou se trouve une autre électrode qui boucle le circuit (anode). Une différence de potentielle (ddp) de 60 volts est maintenue entre les deux extrémités de l'éprouvette. L'essai consiste à mesurer la charge électrique totale, exprimée en coulombs qui passe à travers l'éprouvette pendant 6 heures. La charge mesurée exprime la pénétrabilité des ions chlorure à travers l'échantillon. Les résultats sont interprétés par référence aux valeurs du tableau 5.1 qui exprime le niveau de pénétrabilité aux ions chlorure dans l'échantillon en fonction de la charge.

Tableau 5.1 Différentes classes de pénétrabilité des ions chlorure [Whiting, 1988]

Echelle de pénétrabilité des ions chlorure		
Charge (coulombs)	Classe de pénétrabilité	Types de bétons estimés correspondant
Supérieure à 4000	Elevée	Béton ayant $E/C > 0,60$
Entre 2000 et 4000	Modérée	Béton ayant $0,40 < E/C < 0,60$
Entre 1000 et 2000	Basse	Béton ayant $E/C < 0,40$
Entre 100 et 1000	Très basse	Béton au Latex
Inférieure à 100	Négligeable	Béton polymère

Quel que soit le rapport E/L, les bétons contenant un ajout minéral et plus particulièrement la poudre de verre présentent des pénétrabilités plus faibles que celles des témoins.

Suivant les tests faits par [Zidol 2014], à 28 jours, les pénétrabilités des ions chlorures des bétons témoins se trouvent dans la classe de pénétrabilité élevée ou modérée selon la classification de la norme ASTM C1202 de même que celles des bétons contenant de la

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

poudre de verre qui sont classées modérées indépendamment du rapport E/L et du taux d'incorporation. Les valeurs de la pénétrabilité des ions chlorure des bétons contenant des ajouts tels que le laitier, ou métakaolin sont considérablement réduites et se situent dès 28 jours dans la classe de faibles pénétrabilités. Ces observations constituent une résultante de leur effet "filler" et effet pouzzolanique [Baroghel-Bouny et al.2011; He et al. 2011; Young, 1988]. La réduction de la pénétrabilité des ions chlorure en présence de la poudre de verre ou de la cendre volante n'est pas assez perceptible comparativement au laitier, au métakaolin ou à la fumée de silice du fait de leur réactivité plus lente.

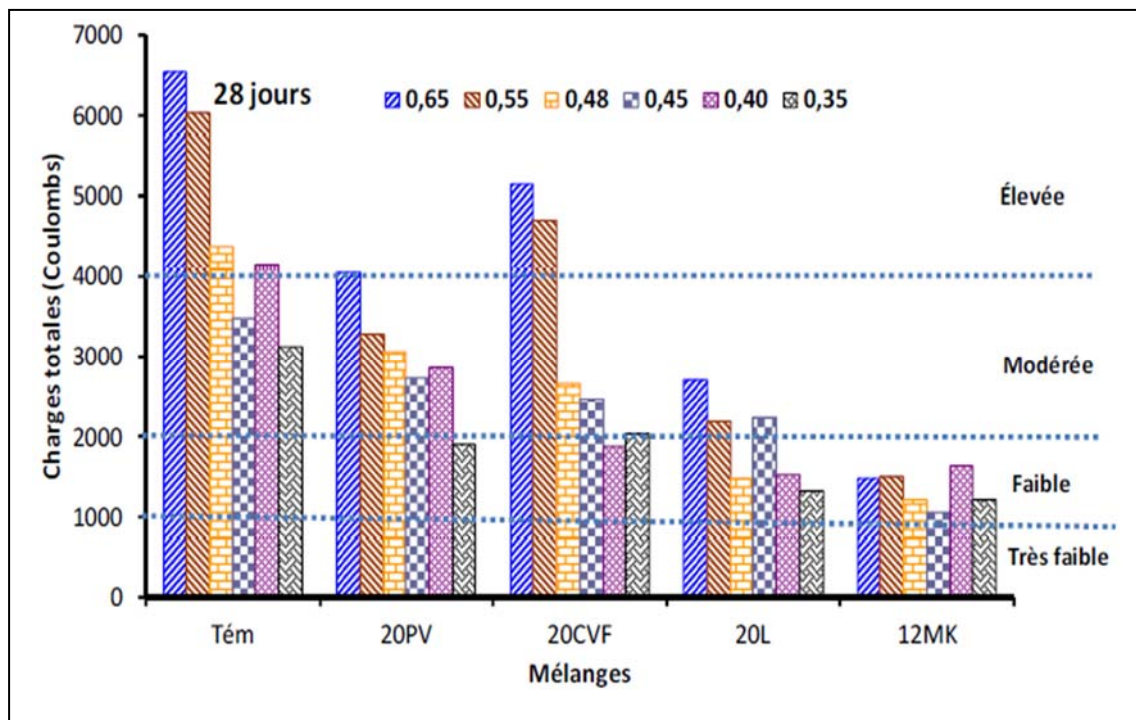


Figure 5.1- Pénétrabilité des ions chlorure à 28 jours des bétons incorporant la plupart 20% d'ajouts Cimentaires [zidol,2014]

A 56 jours, Zidol a observé une réduction spectaculaire de la pénétrabilité des ions chlorure en présence de la poudre de verre. En effet, à cet âge, comme déjà observé à 28 jours, les témoins présentent encore des valeurs de pénétrabilité élevées ou modérées tandis que celles des bétons contenant la poudre de verre oscillent entre faible et très faible en fonction du taux d'incorporation. Indépendamment du rapport E/L, les valeurs de la pénétrabilité des ions chlorure de tous les bétons contenant 20% de la poudre de verre sont faibles (< 1500 Coulombs) alors que celles des bétons contenant 30% de la poudre sont très faibles (< 1000 coulombs). Cette observation traduit un effet du taux d'incorporation de la poudre de verre sur la réduction de la pénétrabilité des ions chlore. La réduction de la perméabilité augmente avec l'augmentation du taux d'incorporation de la poudre de verre.

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

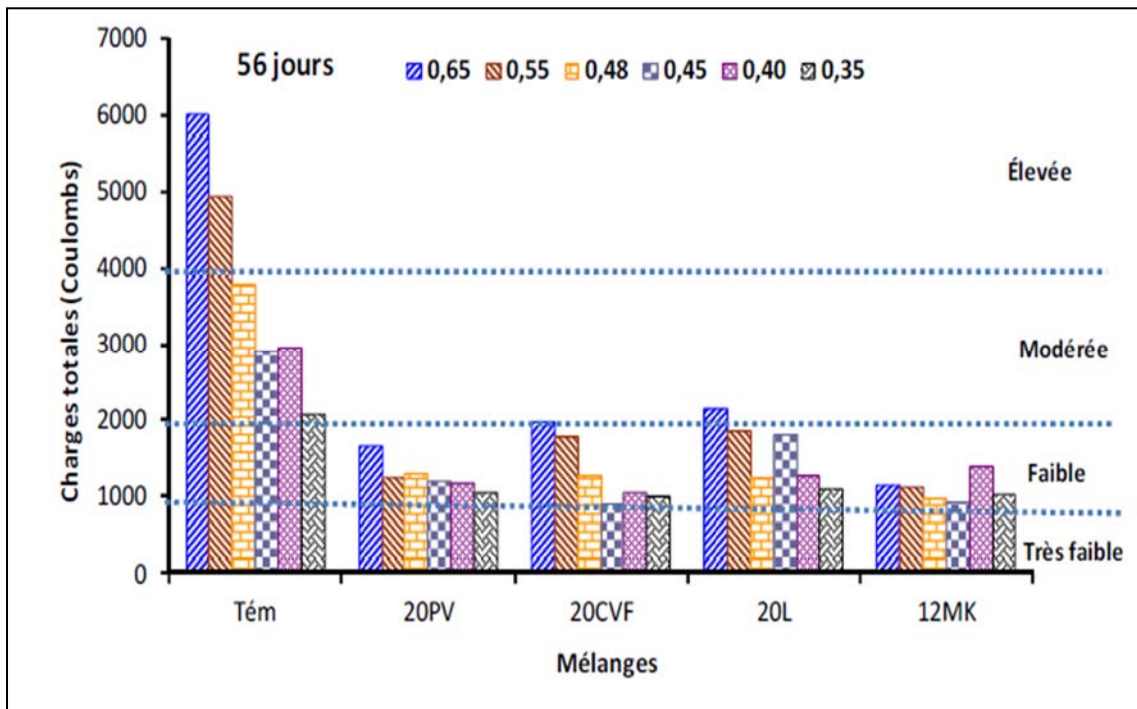


Figure 5.2- Pénétrabilité des ions chlorure à 56 jours des bétons incorporant la plupart 20% d'ajouts cimentaires [zidol,2014]

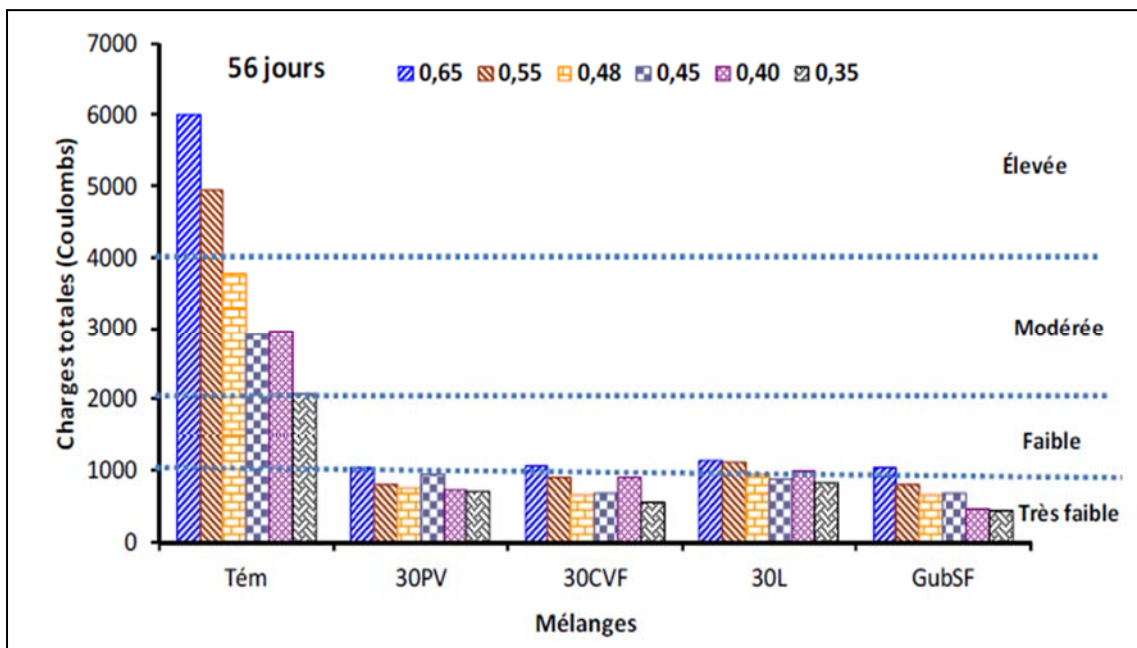


Figure 5.3 - Pénétrabilité des ions chlorure à 56 jours des bétons incorporant la plupart 30% d'ajouts cimentaires [zidol,2014]

Cette réduction de la pénétrabilité dans ces bétons résulte de l'affinage des grains et des pores par suite de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre [Idir, 2009] d'une part et

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

éventuellement de l'interaction entre la matrice et les ions chlorure [Jain et al., 2010; Shayan et al., 2006; McPolin et al., 2005], d'autre part.

En effet, la réaction pouzzolanique entre la poudre de verre et la portlandite occasionne une réduction de la taille des particules de portlandite assimilable à l'affinage des grains et les produits résultant de cette réaction remplissent les pores en les segmentant davantage. Ce remplissage des pores par ces derniers produits d'hydratation, les rend plus fins, d'où l'affinage des pores. L'affinage des grains et des pores génère une modification du réseau poreux qui se caractérise principalement par des pores plus fins. Cette modification qui se traduit par la segmentation et la tortuosité importante des pores entraînent la réduction spectaculaire des valeurs de la pénétrabilité des ions chlorure en présence de la poudre de verre. De plus, une éventuelle réaction entre les chlorures et la matrice cimentaire contenant la poudre de verre pourrait entraîner la fixation des chlorures et par conséquent affecter leur mobilité et leur pénétration dans le béton comme l'ont déjà observés certains chercheurs avec les autres ajouts classiques tels que le laitier, la cendre volante et le métakaolin [Li et al., 1986; Ngala et al., 1995; Amiri et al., 2001].

Cependant, il est important de souligner que les bétons contenant 20% de poudre de verre présentent des valeurs de pénétrabilité plus faibles de l'ordre de 600 coulombs que celles des bétons contenant un même taux de la cendre volante ou du laitier. Par contre pour les bétons contenant 30% d'ajouts cimentaires tels que la poudre de verre, le laitier ou la cendre volante, leurs valeurs de la pénétrabilité des ions chlorures sont similaires indépendamment du rapport E/L et du type d'ajouts cimentaires. Par ailleurs, il est à retenir aussi que, même des bétons ayant E/L = 0,65 avec un dosage en liant de 300 kg/m³ et contenant de la poudre de verre présentent des valeurs de pénétrabilité des ions chlorure à 56 jours inférieure de 500 à 1000 coulombs (dépendamment du taux de la poudre de verre) à celle d'un béton témoin ayant E/L = 0,35 avec un dosage en liant de 430 kg/m³. Cette observation illustre davantage l'apport substantiel de la poudre de verre dans la réduction de la pénétrabilité des ions chlorure à moyen ou long terme.

A 91 jours, Zidol a remarqué que la pénétrabilité des bétons témoins demeure toujours dans la gamme de classe modérée - élevée, due à de faibles réductions de la pénétrabilité de ces bétons. Les valeurs de pénétrabilité des bétons incorporant 20% de la poudre de verre sont très faibles alors que celles des bétons contenant ce même taux de cendre volante ou de laitier oscillent entre faible et très faible. Tous les bétons contenant 30% d'ajouts minéraux présentent des valeurs de pénétrabilité se situant dans la même classe, avec des plus faibles valeurs pour les bétons contenant 30% de la poudre de verre. Ceci illustre une meilleure performance de la poudre de verre aux âges avancés et démontre un comportement de la poudre de verre similaire voire meilleur que ceux des autres ajouts classiques dans la réduction de la pénétrabilité des ions chlorure.

Il est à souligner également que la pénétrabilité des ions chlorure d'un béton de rapport E/L aussi élevée que 0,55 contenant 30% de poudre de verre représente environ le tiers de celle d'un béton témoin de E/L aussi faible que 0,35. Ceci confirme les observations faites par [Baroghel-Bouny et al, 2011], démontrant que la réduction de la pénétrabilité des bétons par

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

des ajouts cimentaires domine largement celle qui résulterait d'une simple diminution du rapport E/L.

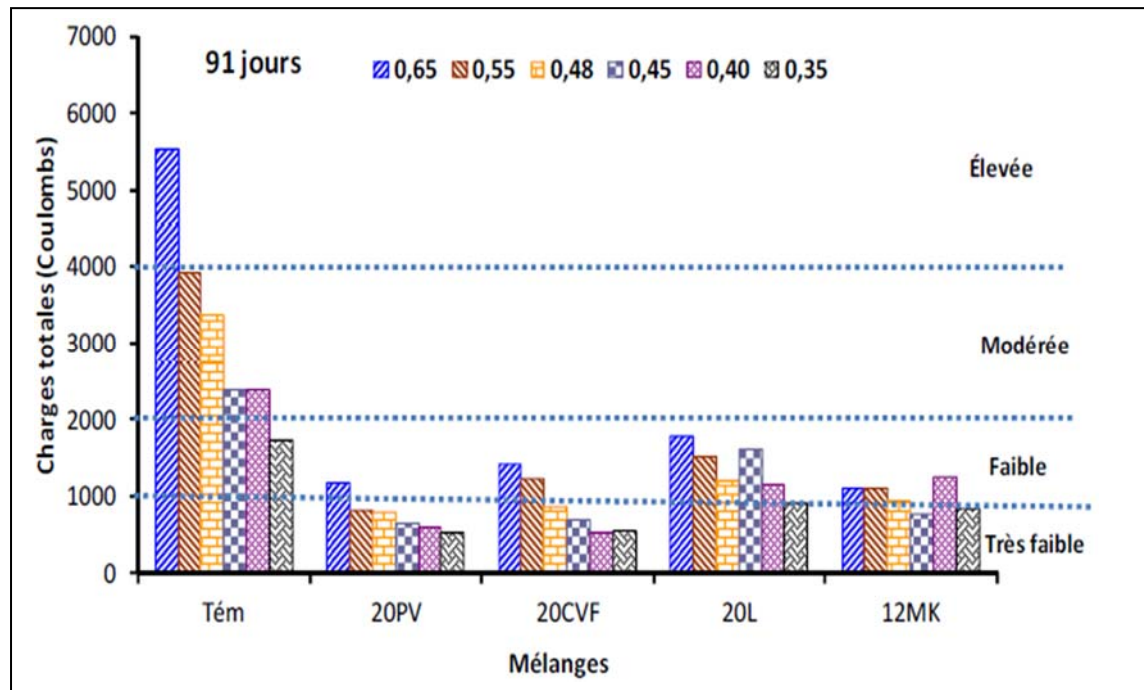


Figure 5.4- Pénétrabilité des ions chlorure à 91 jours des bétons incorporant la plupart 20% d'ajouts cimentaires [zidol,2014]

5.2. Essai de diffusion des ions chlore

En plus des propriétés physiques élémentaires, la porosité et la masse volumique par exemple, le coefficient de diffusion est un paramètre fondamental pour décrire la pénétration des chlorures dans les matériaux cimentaires comme le béton. Il est important de définir correctement la grandeur mesurée et de connaître précisément ses conditions de mesure expérimentale.

Les essais sont systématiquement réalisés en conditions saturées et sans gradient de pression pour que seul le phénomène diffusif intervienne. La solution de saturation contient généralement de l'eau de chaux ou de l'hydroxyde de sodium et de l'hydroxyde de potassium (NaOH et KOH) pour limiter la modification du pH et des équilibres chimiques. De plus, les différents dispositifs de mesure utilisent des compartiments contenant, hormis les chlorures, une solution support à base de NaOH et/ou KOH pour éviter au maximum la lixiviation des alcalins du béton.

Il existe deux types de mesure du coefficient de diffusion, mesure en diffusion naturelle et mesure sous champs électrique, chaque mesure est découpée en deux régimes, transitoire et stationnaire.

5.2.1. Mesure en diffusion naturelle

5.2.1.1. Essai de diffusion en régime stationnaire

Un échantillon de béton saturé est disposé entre deux compartiments de concentrations en chlorures différentes, le plus souvent nulle dans le compartiment aval. Sous l'effet du gradient de concentration de part et d'autre de l'éprouvette, les chlorures diffusent au travers de celle-ci de l'amont vers l'aval. Cet essai est plus communément appelé essai de diffusion. Le gradient de concentration est maintenu constant en renouvelant régulièrement les solutions dans les compartiments.

Par dosages chimiques réguliers du compartiment aval, le flux de chlorures au travers de l'échantillon est mesuré. La figure 5.5 présente la courbe d'évolution avec le temps de la quantité cumulée W (mol) de chlorures ayant pénétré dans le compartiment aval { A est la surface exposée de l'échantillon (m^2), L son épaisseur (m), et C_{up} la concentration en chlorure à l'amont (mol/ m^3)}.
}

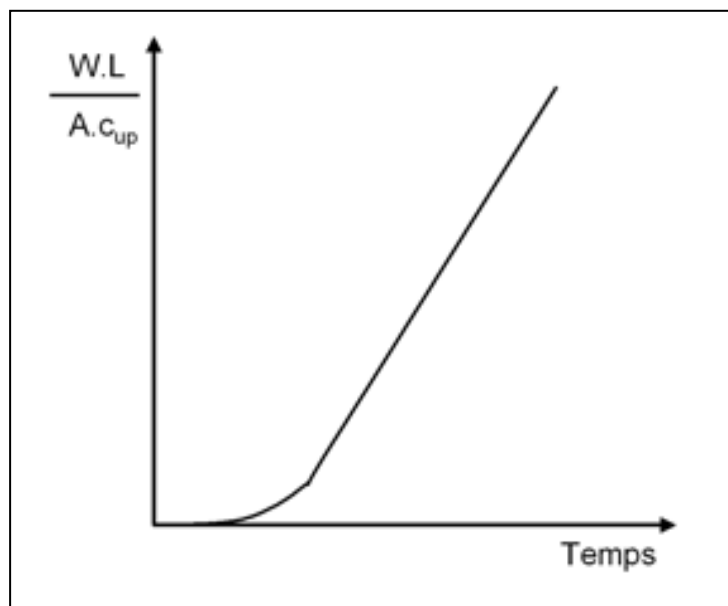


Figure 5.5- Evolution du flux de chlorures en aval

Le régime permanent apparaît au bout d'un certain temps d'essai et se traduit par la partie linéaire de la courbe. Le flux constant ($\Delta W/A.\Delta t$) permet de calculer le coefficient de diffusion effectif en utilisant la première loi de Fick :

$$J_e = D_e \frac{c_{up}}{L}$$

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Avec **Je** le flux effectif en régime stationnaire (mol/m².s) et **De** le coefficient de diffusion effectif (m²/s). Le coefficient de diffusion est, en conséquence, la pente de la partie linéaire de la courbe figure 5.5.

La durée de cet essai est fonction de l'épaisseur de l'échantillon et des caractéristiques du béton comme le type de ciment (la capacité de fixation augmente la durée du régime transitoire), le rapport E/L et la taille des granulats. Cependant, le délai d'obtention du régime permanent est très long, plus d'un an pour un échantillon d'un béton ordinaire de 3 cm d'épaisseur.

5.2.1.2. Essai de diffusion en régime transitoire

Pour diminuer la durée de l'essai de diffusion, deux possibilités sont envisageables : évaluer le coefficient de diffusion en régime transitoire et/ou augmenter le gradient de concentration en augmentant C_{up} . Un échantillon de béton saturé est placé en immersion dans une solution à forte concentration en chlorures. La différence fondamentale avec l'essai précédent provient de la mesure : au lieu d'étudier le flux de chlorures, c'est le profil de concentration en chlorures dans l'échantillon qui est déterminé à un instant donné. Cet essai est souvent appelé essai d'immersion.

Pour mener cet essai, un échantillon de béton, généralement cylindrique, est rendu étanche sur toutes les surfaces sauf une des bases par laquelle la diffusion des chlorures va intervenir. Cette étanchéité est nécessaire pour assurer une pénétration unidimensionnelle des chlorures. La surface accessible est exposée à une solution salée pendant une durée déterminée.

A la fin de la période d'exposition, le profil de concentration en chlorures est déterminé comme indiqué sur la figure 5.6. De la poudre de l'échantillon est collectée à différentes profondeurs par grignotage puis les chlorures totaux sont mesurés par dosage titrimétrique de la solution contenant les chlorures solubles à l'acide.

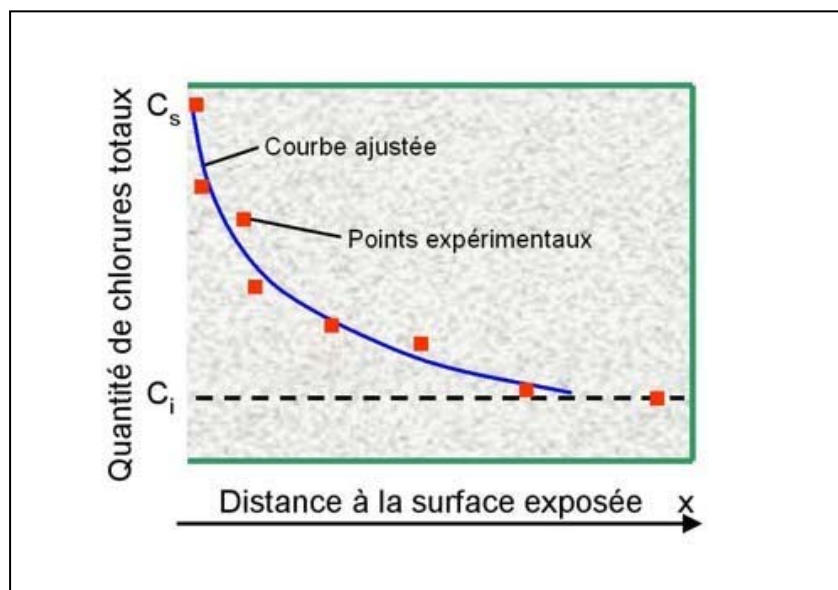


Figure 5.6- Profil en chlorures dans le béton après immersion

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Le coefficient de diffusion mesuré n'est donc pas le même que dans l'essai de diffusion précédent, ou il s'agissait du coefficient de diffusion effectif D_e , puisqu'il prend en compte non seulement la microstructure du béton mais aussi la capacité de fixation des chlorures.

La loi de Fick est utilisée avec la limite qu'elle sous-tend : une description incomplète des transferts ioniques. De plus, le coefficient de diffusion apparent est considéré comme constant ce qui est vrai seulement si le matériau est homogène, non-évolutif et l'isotherme de fixation linéaire ; ce dernier point étant le plus discutable. L'avantage principal de cet essai est d'être une bonne simulation des conditions d'exposition réelles avec une durée d'essai acceptable. Cependant, la procédure d'obtention du profil en chlorures par grignotage et dosages chimiques est très longue et fastidieuse.

5.2.2. Mesure sous champ électrique

Le processus de diffusion reste un processus lent pour lequel l'essai de diffusion et l'essai d'immersion ne sont pas satisfaisants pour un béton au jeune âge (évolution de la microstructure pendant la durée de l'essai) ou encore en cas de besoin d'un résultat rapide (nombreux essais, comparaison de différents bétons. . .). Des essais de migrations ont été développés afin d'accélérer le transport des chlorures. Il s'agit d'appliquer une différence de potentiel de part et d'autre de l'échantillon de béton par l'intermédiaire d'électrodes. Sous l'influence du champ électrique crée, le mouvement des chlorures, ainsi que celui des autres espèces ioniques, est accéléré vers l'électrode de signe opposé.

5.2.2.1. Essai de migration en régime stationnaire

Le principe de l'essai est identique à celui de la cellule de diffusion avec en plus la mise en place des électrodes fixées sur les deux faces de l'échantillon et reliées à un générateur de tension. L'éprouvette de béton saturé est placée entre les deux compartiments amont, contenant la solution salée et la cathode (signe négatif), et aval, sans chlorures et contenant l'anode (signe positif). Sous l'effet du champ électrique, les chlorures migrent de la cathode vers l'anode.

Le générateur de tension est réglé le plus souvent dans ce type d'essai afin d'obtenir un champ électrique de l'ordre de 4 V/cm (soit 12 V pour un échantillon de 3 cm). Cette valeur reste suffisante pour obtenir une bonne accélération du mouvement des chlorures mais n'est pas trop élevée afin d'éviter une augmentation excessive de la température et l'apparition de perturbations au niveau des électrodes, notamment la formation d'hypochlorite [Prince et al, 1999].

L'exploitation se fait là aussi en régime stationnaire comme pour l'essai de diffusion. Par dosage régulier du compartiment aval, la quantité de chlorures ayant traversé l'échantillon est calculée. Les résultats obtenus sont du même type que ceux de la figure 5.5, l'échelle de temps étant beaucoup plus courte puisque le régime devient permanent au bout de quelques jours.

Dès que ce régime est atteint, c'est-à-dire que le flux devient constant, le coefficient de diffusion peut être déterminé à partir de la relation de Nernst-Planck. En écartant le terme diffusif, et en considérant que le potentiel électrique local n'est dû qu'à la différence de potentiel appliquée à l'éprouvette, le coefficient de diffusion flux de chlorures s'écrit :

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

$$J_e = D_e \frac{c_{up} F U}{R T L}$$

Où J_e est le flux effectif en régime stationnaire mesuré dans le compartiment aval (mol/m².s), D_e le coefficient de diffusion effectif (m²/s), C_{up} la concentration en chlorure en amont (mol/m³), F la constante de Faraday (96500 J/V.mol), T la température (K), U la différence de potentiel entre les deux surfaces de l'éprouvette (V), et L son épaisseur (m). Une autre exploitation de l'essai consiste à suivre l'appauvrissement en chlorures dans le compartiment amont, le coefficient de diffusion étant calculé à partir du flux amont [Truc et al, 2000]. Cette méthode présente l'avantage de réduire encore plus la durée de l'essai puisque le régime permanent est atteint plus rapidement dans le compartiment amont, et de rendre possible la mesure du coefficient de diffusion sur des bétons déjà contaminés par les chlorures.

Afin d'éviter les opérations fastidieuses de dosage des chlorures, en amont ou en aval, on pourra exploiter l'évolution des courants électriques durant l'essai d'électrodifusion, à condition de mener l'essai en deux étapes : une chronoampérométrie avec la solution de base (NaOH+KOH) et une autre après ajout de NaCl à l'amont de la cellule [Amiri et al. 2001]. La démarche consiste à extraire le courant dû au transport des chlorures et d'en calculer le flux en régime stationnaire, donc le coefficient de diffusion [Arliquie et Hornain, 2007]. Néanmoins, les inconvénients de durée d'essai subsistent puisque l'exploitation se fait en régime stationnaire.

5.2.2.2. Essai de migration en régime transitoire

Le dernier essai présenté ici est le plus rapide puisqu'il combine à la fois l'utilisation d'un champ électrique et l'exploitation en régime non permanent. Il permet de calculer un coefficient de diffusion apparent. Le principe de cet essai est de placer une éprouvette reconditionnée entre deux cellules remplies respectivement d'une solution contenant un diffusant, généralement NaCl, et d'une solution initiale dépourvue de ce diffusant. On utilise souvent une solution basique (0,1 M NaOH) comme solution de base pour les compartiments amont et aval de manière à éviter de modifier la microstructure de l'éprouvette lors de l'essai. Un champ électrique est imposé afin de faire migrer les ions chlorure de la cellule amont vers la cellule aval. La différence de potentielle est proportionnelle à l'épaisseur de l'échantillon soit 5 V/cm. A un intervalle de temps Δt , l'essai est arrêté et l'échantillon est fendu perpendiculaire à la surface d'exposition aux chlorures. La profondeur de pénétration des ions chlorure est déterminée à l'aide d'un essai colorimétrique à base du nitrate d'argent. Cette profondeur de pénétration des ions chlorure permet de calculer le coefficient de diffusion apparent par la formule suivante :

$$\frac{R T L}{Z F \Delta E} \frac{X_d - \alpha \sqrt{X_d}}{\Delta t}$$

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Avec $\alpha = 2\xi\sqrt{\frac{RTL}{ZF\Delta E}}$ et $\xi = \text{erf}^{-1}\left(1 - 2\frac{C_d}{C_0}\right)$ dont :

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

F : constante de Faraday égale a $96\,487 \text{ J.V}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

T : Température en degré Kelvin (K)

Z : Valence de l'ion chlorure égale à (1)

L : épaisseur de l'échantillon (m)

X_d : profondeur mesurée par colorimétrie (m)

Δt : durée de l'essai (s)

ΔE : différence de potentiel moyenne aux bornes de l'échantillon (V)

C_0 : concentration en cl^- de la solution amont (mol.l^{-1})

C_d : concentration en cl^- limite pour changement de couleur (mol.l^{-1})

erf^{-1} : inverse de la fonction erreur erf.

$\xi = 0,764$ pour $C_0 = 0,50 \text{ mol.l}^{-1}$ et $\xi = 1,044$ pour $C_0 = 1 \text{ mol.l}^{-1}$

Le pré-conditionnement des échantillons consiste à saturer les échantillons sous vides dans une solution de 0,1 M NaOH.

[Zidol, 2014] a étudié la diffusion des ions chlore en utilisant l'essai de migration en régime transitoire, il a observé que Les coefficients de diffusion des ions chlorure des bétons incorporant 30% des ajouts sont faibles et varient très peu en fonction du rapport E/L figure.5.7

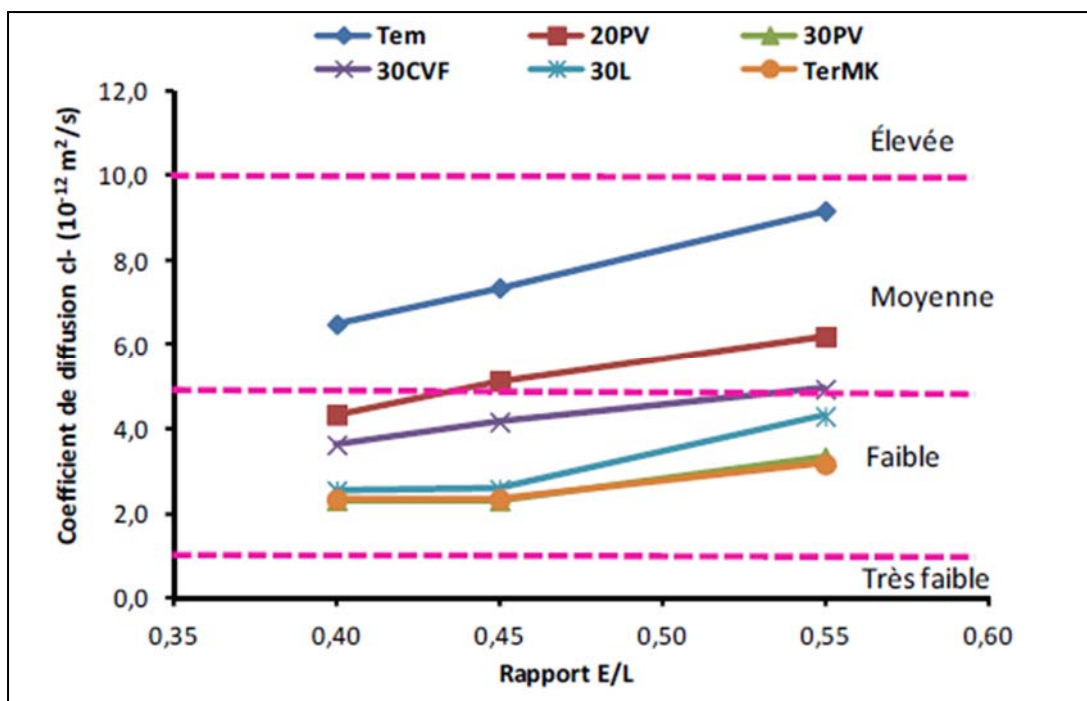


Figure 5.7- Coefficient de diffusion des ions chlorure à 56 jours des bétons Suivant les rapports E/L [zidol,2014]

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Pour le béton contenant 20 % de poudre de verre, **Zidol** a observé une augmentation de la diffusion des ions chlorure avec le rapport E/L. Ces résultats sont en parfait accord avec ceux de **[Leng et al., (2000)]** qui montrent une diminution du coefficient de diffusion avec l'augmentation de la quantité d'ajouts tels que la cendre volante ou le laitier. De même, **[Ye et al., (2011)]** qui ont mené des études similaires rapportent que l'addition du laitier au béton diminue considérablement la diffusion des ions chlorure et augmente la résistance contre la pénétration des ions chlorure avec une amélioration substantielle de la structure des pores. Selon ces auteurs, la résistance à la pénétration des ions de ces types de bétons est liée à l'affinage des pores entraînant ainsi une augmentation du pourcentage des pores fins au détriment des gros pores **[Ye et al., 2011]**. D'autres études conduites par **[Lizarazo Marriaga et al., 2011]**, ont montré que le laitier améliore la résistance à la pénétration des ions chlorure des bétons et par conséquent ces bétons sont moins vulnérables à la corrosion.

5.3. Essai sur les attaques par les sulfates

L'essai fait par **[Zidol, 2014]** est effectué sur des mortiers suivant la norme ASTM C1012. Il s'agit explicitement d'un suivi de la variation de longueur des barres de mortiers immergées dans une solution de sulfates de sodium (Na_2SO_4) à 5 % durant au moins 6 mois. Les mortiers doivent avoir une résistance en compression d'au moins 20 MPa avant l'application de la solution sur les barres. Aux différentes échéances de la prise des mesures sur les barres de mortiers, la solution est renouvelée, après les mesures sur les barres.

Les systèmes considérés sont des mortiers à base de ciment GU (témoin), de ciment commercialisé contenant 8 % de fumée de silice pré-mélangé (Ciment GUBSF) et 20% et 30 % de poudre de verre en remplacement du ciment GU. Les résultats sont indiqués sur la figure 5.8. L'expansion due à l'attaque par les sulfates présentée par le mélange témoin dépasse des 130 jours, la limite d'expansion maximale de 0,10 % à atteindre au bout de 6 mois, recommandée dans la norme ASTM C595, et continue d'augmenter considérablement durant l'exposition. Cette expansion se traduit par une augmentation importante de la masse de l'échantillon figure 5.9. Les réactions qui se développent durant l'attaque par les sulfates conduisent principalement à la formation du gypse et de l'ettringite qui génère des expansions excessives. Cependant, le mécanisme par lequel, la formation de l'ettringite cause d'importantes expansions demeure encore un sujet controversé. La pression générée par la formation de l'ettringite et le gonflement dû à l'adsorption de l'eau dans un milieu alcalin par l'ettringite cristallin sont deux des nombreuses hypothèses généralement supportées par certains chercheurs **[Mehta et al, 1993]**. Par ailleurs, les mélanges incorporant 20% ou 30% de la poudre de verre présentent une expansion très faible largement en dessous de la limite prescrite par la norme. Ces expansions sont de même ordre que celles observées dans le mortier GUBSF. Ces résultats suggèrent que la poudre de verre contrôle efficacement les expansions dues à l'attaque par les sulfates au même titre que la fumée de silice présente dans le GUBSF.

Cette amélioration indéniable de la résistance aux attaques par les sulfates en présence de la poudre de verre résulterait d'une part de la réduction de la perméabilité de ces mélanges, et d'autre part de la diminution de la teneur en aluminates et en portlandite qui sont les éléments

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

les plus vulnérables dans la matrice cimentaire. En effet, la substitution partielle du ciment par la poudre de verre permet de diminuer la quantité en C3A, élément, susceptible de réagir avec les sulfates apportés pour former de l'ettringite secondaire qui est expansive. De plus, la réaction pouzzolanique de la poudre de verre permet de diminuer la teneur en portlandite qui est responsable de la formation de gypse et d'ettringite secondaires en présence des ions sulfates [Cohen et al., 1991; Rasheeduzzafar, et al., 1990 ; Gjorv, 1971; Price, 1961]. Ces résultats sont en accord avec les études menées par [Barnett et al., 2002; De Gutierrez et al., 2003] qui ont montré une réduction de l'expansion due à l'attaque par les sulfates en présence des ajouts cimentaires tels que le laitier et la cendre volante de classe F. De plus, [Rasheeduzzafar et al. (1986)] ont montré que la réduction de l'expansion par 20 % la cendre volante est d'autant plus importante que la teneur en C3A du ciment est élevée confirmant ainsi la diminution de l'expansion liée à la diminution de la quantité de C3A. Selon [Rasheeduzzafar et al. (1990)], le contrôle de l'expansion due aux sulfates ne serait pas seulement lié à la teneur en C3A du liant mais aussi au rapport C3S/C2S

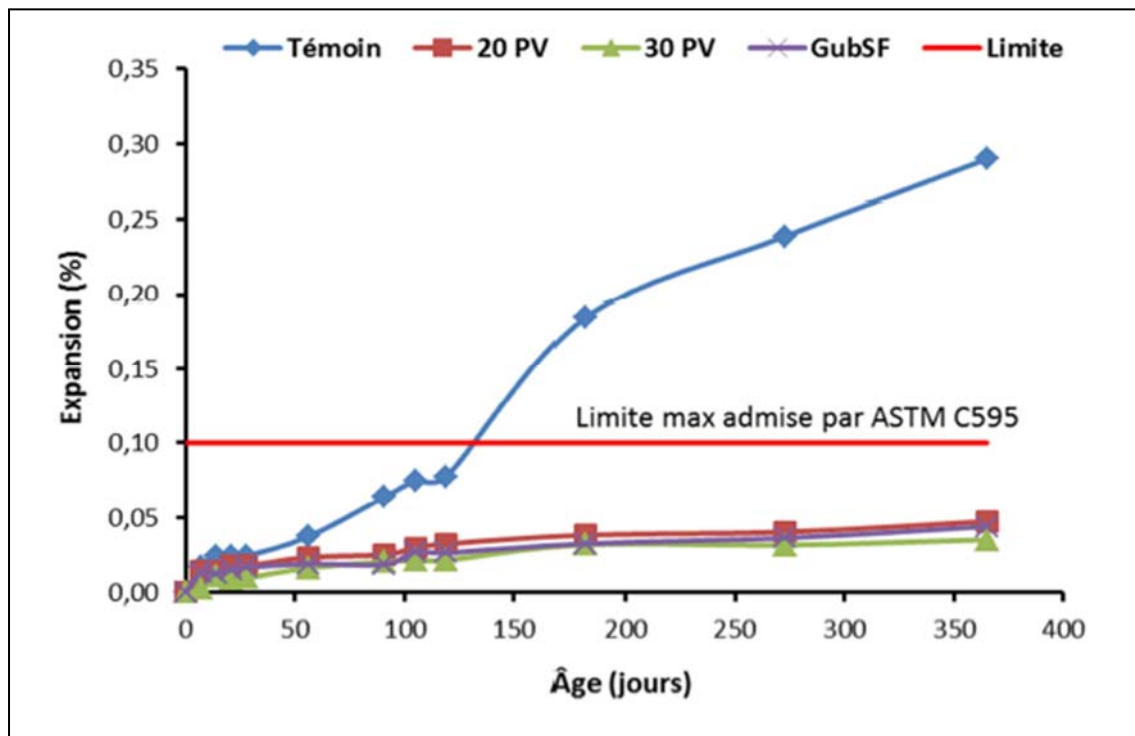


Figure 5.8- Expansion due à l'attaque par les sulfates [zidol,2014]

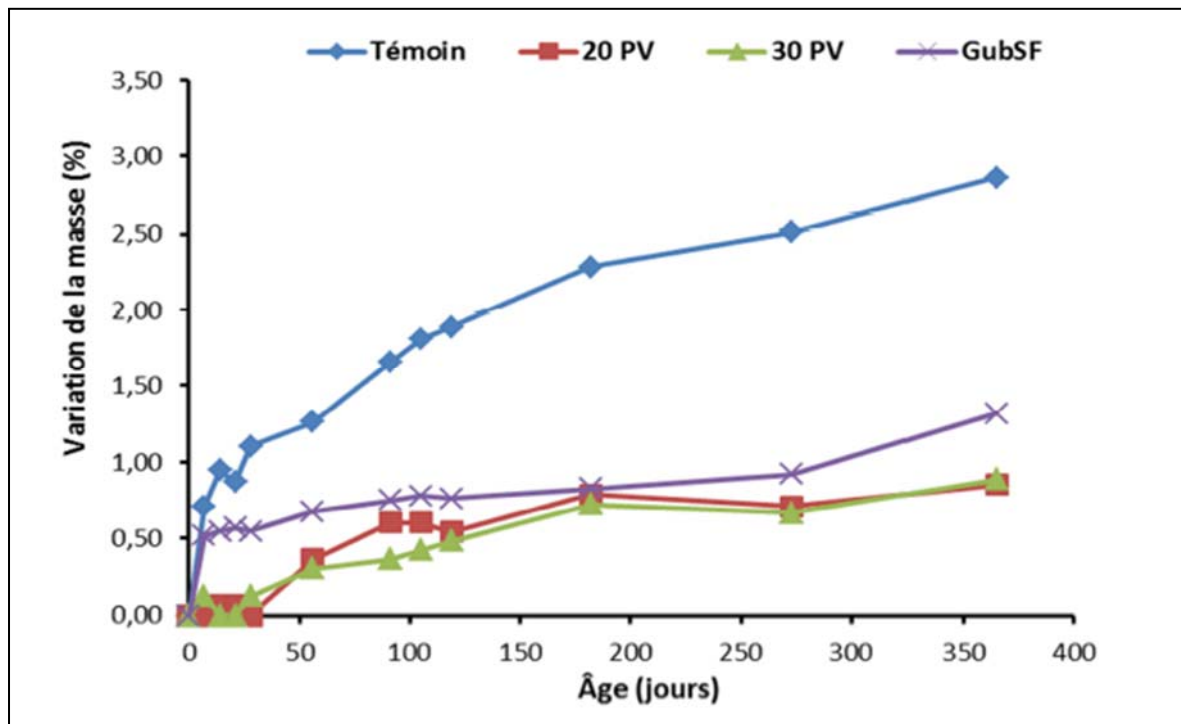


Figure 5.9- Variation de masse due l'attaque par les sulfates [zidol,2014]

Grace à leurs caractéristiques remarquables dans les milieux riches en sulfate, les ciments composés à base des ajouts cimentaires sont maintenant de plus en plus utilisés pour améliorer la durabilité des bétons. Quand ces ajouts remplacent une partie du ciment, ils réagissent avec la portlandite en présence d'humidité pour produire des C-S-H secondaires. Cette réaction pouzzolanique présente des impacts bénéfiques sur l'attaque par les sulfates qui sont les suivants [Al- Amoudi, 2002] :

- La consommation de la portlandite réduit la formation du gypse;
- Le remplacement d'une partie de ciment par le matériau pouzzolanique implique la réduction de la teneur en C3A (ie effet de dilution) par conséquent toutes les phases aluminates sont donc réduites;
- Même si l'ettringite se forme, elle devient expansive seulement à un pH élevé. Ainsi, dans les bétons à base de ciment composé, les ajouts cimentaires consomment la grande partie de la portlandite. Ceci entraîne la réduction du pH de la solution interstitielle et par conséquent l'ettringite devient moins expansive [Mehta, 1973];
- La formation du C-S-H secondaire produit un film ou un revêtement sur les aluminates et d'autres phases réactives entravant par conséquent la formation de l'ettringite secondaire;
- La formation du C-S-H secondaire entraîne aussi une densification de la pate de ciment durcie par le remplissage des pores, faisant des matrices imperméables si bien que les ions sulfates ne peuvent pénétrer facilement comme dans le cas des bétons de référence à base de ciment Portland seulement.

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

La poudre de verre se comporte de façon similaire aux ajouts classiques en termes de bonne résistance aux sulfates. Ce qui suggère donc que la poudre de verre peut être convenablement utilisée dans les bétons des ouvrages exposés aux sulfates.

5.4. Essai accéléré de carbonatation

Le déroulement de l'essai fait par [Zidol, 2014], en ce qui concerne la carbonatation a été structuré en trois étapes :

5.4.1. Prétraitement des échantillons

Les connaissances sur les conditions optimales de carbonatation ont conduit les expérimentateurs à retenir l'humidité relative comme paramètre prépondérant pour les essais de carbonatation accélérée [Arliquie et Grandet, 1991]. A l'issue de la cure humide, les matériaux ont une hygrométrie très élevée. Leur carbonatation directe sous conditions accélérées est déconseillée, puisque la pénétration du CO₂ serait fortement ralentie. Un prétraitement des échantillons sous forme de séchage est donc indispensable. Le séchage doit être léger afin d'éviter d'altérer la microstructure ou de déshydrater le matériau et surtout de maintenir une quantité suffisante d'humidité pour la dissolution du CO₂. Le prétraitement adopté dans cette étude est celui proposé dans le projet de norme EN 12390. Il consiste à sécher les échantillons dans un local à une humidité relative de 50 % durant 14 jours. A la suite du séchage, deux faces de chaque prisme sont couverts du papier aluminium imperméable avant d'être introduit dans l'enceinte de carbonatation afin de permettre une carbonatation unidirectionnelle.

5.4.2. Essai Accéléré

Le principe de l'essai de carbonatation accélérée consiste à introduire du dioxyde de carbone dans une enceinte à humidité relative et température contrôlées dans laquelle sont placés les échantillons de bétons et de pâtes cimentaires. L'enceinte de carbonatation est conditionnée suivant les spécifications légèrement modifiées du mode opératoire développé par AFREM, soit une humidité relative de 55 ± 5%, une température de 20 ± 1°C et une teneur en CO₂ de 4,0 %. Un analyseur de CO₂ permettra de quantifier la fraction volumique du CO₂ dans l'enceinte de carbonatation et un système régulateur d'humidité sert à réguler l'humidité relative à 55 ± 5%. A certaines échéances prévues (généralement 7, 14, 28, 56 et 91 jours), la profondeur de carbonatation est mesurée sur des fractures fraîches à l'aide d'un indicateur colore de pH, la phénolphthaléine.

5.4.3. Test à la phénolphthaléine

Ce test consiste à pulvériser un échantillon fraîchement fendille d'une solution de phénolphthaléine. Les parties carbonatées restent incolores alors que les parties saines se colorent en rose, figure 5.10. La profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide d'une règle graduée et correspond à la distance moyenne entre la surface externe et le front de coloration. Un suivi de la profondeur de carbonatation dans le temps, sert à déterminer la vitesse ou la cinétique de carbonatation.

La profondeur est obtenue par
$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Avec X_c moyenne des X_i mesures élémentaires sur un échantillon et n , nombre de mesures.

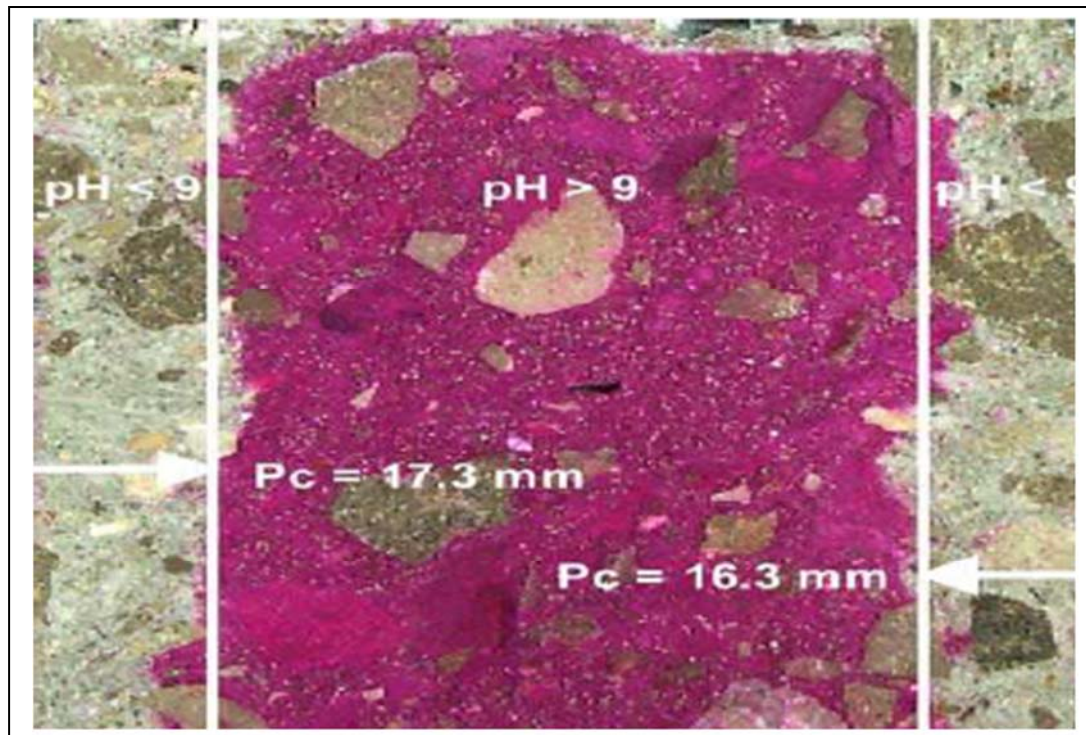


Figure 5.10- Principe de mesure de la profondeur de carbonatation [Villain, 2006]

Afin d'évaluer la résistance à la carbonatation, des bétons contenant 0, 20 et 30 % de poudre de verre ont été soumis à un essai accéléré de carbonatation par [Zidol, 2014]. A titre de comparaison, des bétons incorporant 30 % de cendre volante ou de laitier ou à la fois 20 % de poudre de verre et 8 % de métakaolin (TerMK) ont été également étudiés. L'essai a été effectué suivant un protocole d'essai européen décrit dans AFPC-AFREM, 1997 fixant les conditions de la chambre de carbonatation comme suit: Humidité relative 60 ± 5 %, taux du CO_2 $4 \pm 0,1$ % et température de 20 ± 2 °C. Les échantillons ont suivi une cure humide de 56 jours puis un prétraitement avant d'être convoyés dans la chambre de carbonatation. Le prétraitement consiste à sécher les échantillons durant deux semaines dans une salle à humidité et température bien contrôlées ($HR = 50$ % et $T = 23 \pm 2$ °C) pour initier une répartition relativement uniforme de l'humidité dans les échantillons avant de les exposer aux conditions accélérées de carbonatation. La profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide d'une règle graduée après avoir pulvérisé l'échantillon fraîchement fracturé d'un indicateur coloré de pH, la solution de phénolphthaléine. Les parties colorées en rose sont saines alors que les parties incolores sont carbonatées. La progression de la carbonatation dans les bétons étudiés exprimée par la profondeur, a été mesurée et les résultats présentés sur les figures 5.11 à 5.13.

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Pour mettre en évidence l'effet du rapport E/L sur la profondeur de carbonatation, les rapports E/L de 0,55 figure 5.11, 0,45 figure 5.12 et 0,40 figures 5.13 ont été considérés. Les résultats montrent que la profondeur de carbonatation augmente avec le temps dans tous les bétons. Cette augmentation est d'autant plus marquée que le rapport E/L augmente Figure 5.14. Cependant, le béton témoin résiste mieux à la carbonatation avec une pente moins élevés contrairement aux bétons avec ajouts. La poudre de verre semble être moins résistante à la carbonatation et présente un comportement similaire à la cendre volante pour un même taux d'incorporation. De même, la profondeur de carbonatation augmente avec le taux d'incorporation de la poudre de verre et ceci quel que soit le rapport E/L.

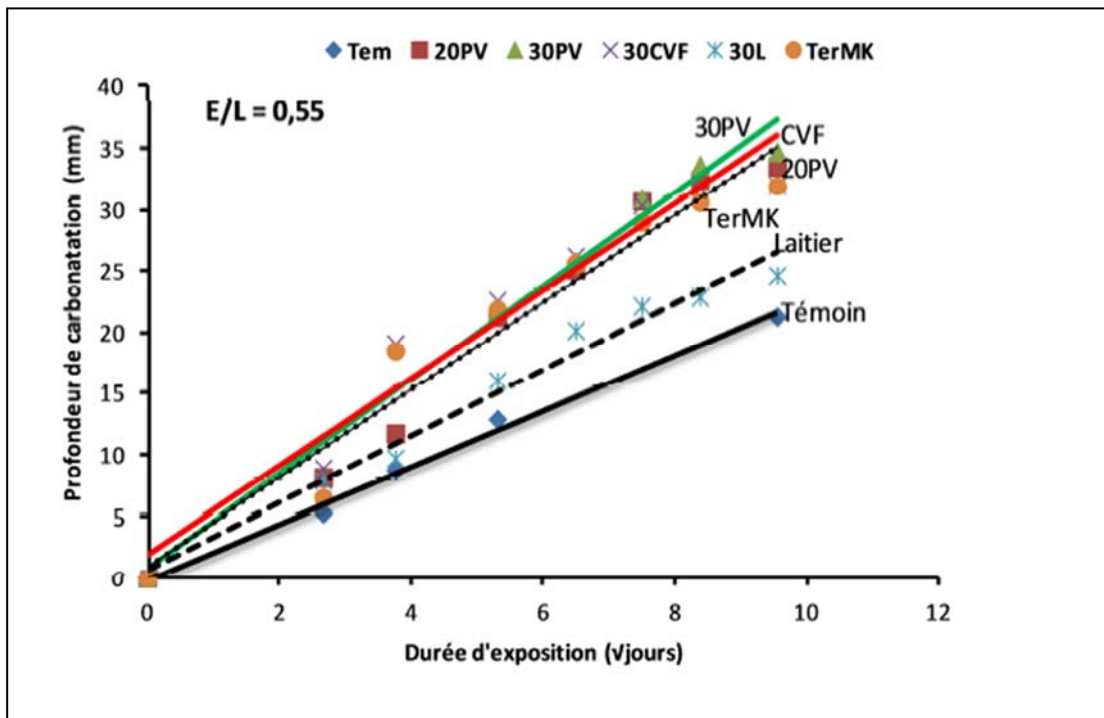


Figure 5.11- Profondeur de carbonatation des bétons ayant E/L = 0.55 [zidol,2014]

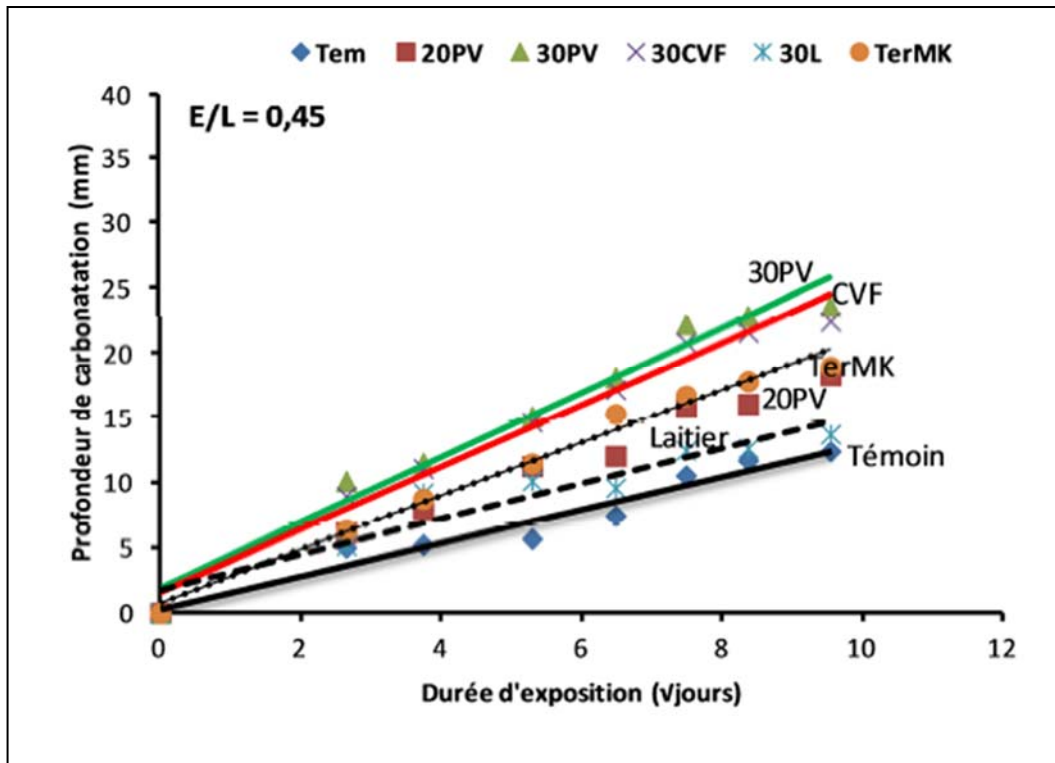


Figure 5.12- Profondeur de carbonatation des bétons ayant E/L = 0.45 [zidol,2014]

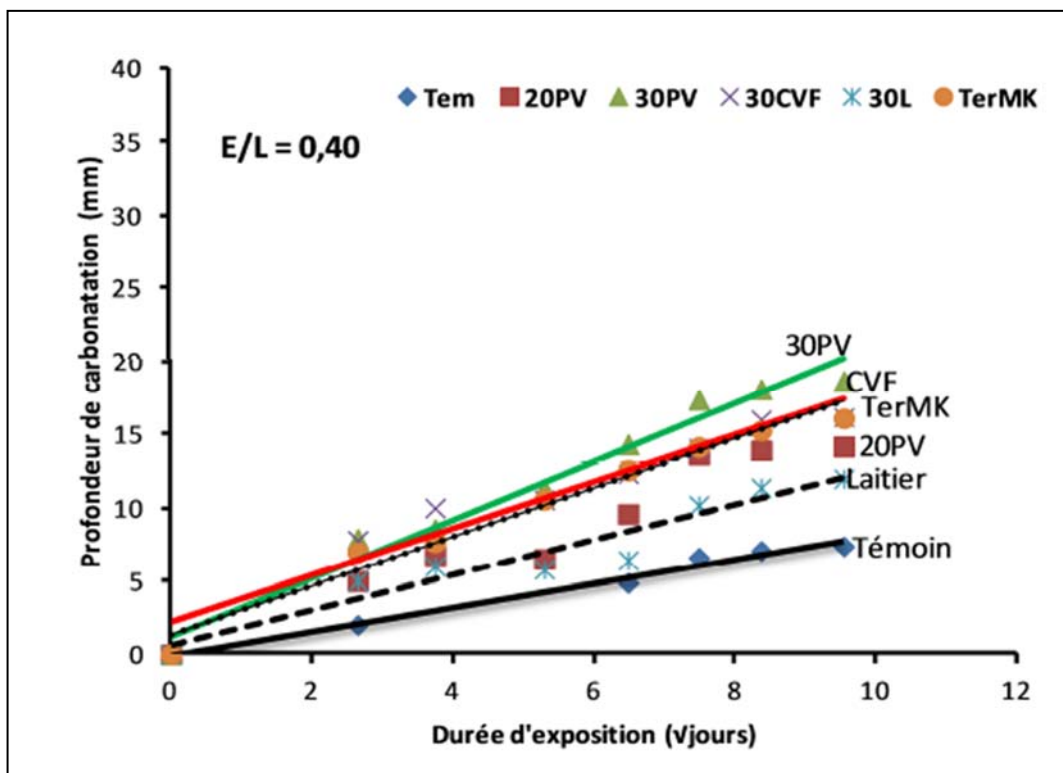


Figure 5.13- Profondeur de carbonatation des bétons ayant E/L = 0.40 [zidol,2014]

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Le comportement similaire de la poudre de verre avec celui de la cendre volante en termes de profondeur de carbonatation est en parfait accord avec les résultats de l'essai Chapelle réalisé par [Idir, 2009] qui ont montré une consommation identique de la chaux par ces deux ajouts. La pente de chaque courbe permet d'estimer la vitesse ou la cinétique de carbonatation de chaque béton. Par ordre croissant de bonne résistance à la carbonatation, on peut classer les bétons comme suit: béton de poudre de verre \leq béton de cendre volante < béton de laitier < béton de référence. En teneur d'additions minérales équivalentes, la résistance à la carbonatation des bétons par ordre décroissant se présente comme suit: CV + GGBS + SF; FA + GGBS; FA + SF; GGBS; FA; SF [Song et al., 2009]. La forte carbonatation des bétons avec ajouts comparativement aux bétons témoins serait liée à la faible quantité de l'élément le plus vulnérable à la carbonatation (portlandite) dans les bétons avec ajouts. En effet, la réaction pouzzolanique consomme la majorité de la portlandite, donc la faible quantité restante est rapidement carbonatée.

Cependant, on s'attendait à ce que la densification de la matrice à la suite de la réaction pouzzolanique limite la diffusion du CO₂ et donc ralentit le phénomène de carbonatation dans ces bétons. Tel n'est pas explicitement le cas, pour les bétons testés dans cette étude, certainement du à l'âge du béton au moment des essais. Ceci s'explique par le développement d'un réseau poreux forme de pores très fins dans le cas des bétons avec ajouts. Ces pores fins ne sont pas accessibles à l'eau mais au gaz et donc au CO₂.

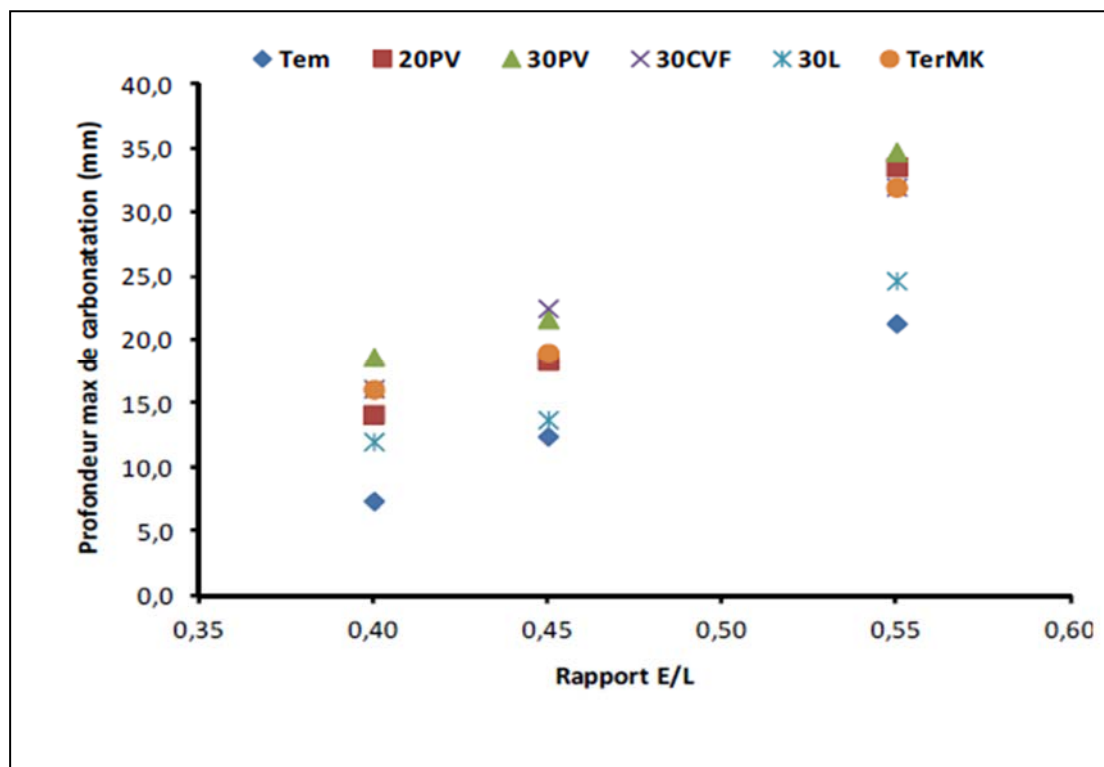


Figure 5.14- Profondeur de carbonatation maximale des bétons après 91 jours d'exposition à la carbonatation accélérée [zidol,2014]

5.5. Essai de perméabilité au gaz

L'essai est effectué selon le protocole de l'AFPC-AFREM et consiste à soumettre l'échantillon d'essai ayant subi préalablement un prétraitement, à une pression constante de gaz. La perméabilité apparente K_a est alors déterminée à partir de la mesure du flux de gaz Q (m³/s), en régime permanent avec l'hypothèse d'un flux laminaire, à une pression donnée, en utilisant la loi de Hagen- Poiseuille.

$$K_a = \frac{2QP_{atm}L\mu}{A(P^2 - P_{atm}^2)}$$

Où L (m) et A (m²) désignent respectivement la longueur et la section de l'échantillon, μ (Pa.s) est la viscosité dynamique du gaz, P_{atm} (Pa) est la pression atmosphérique, P (Pa) est la pression d'entrée appliquée.

Les résultats de la perméabilité aux gaz ont révélés une perméabilité plus élevée dans le cas des bétons avec ajout. La carbonatation étant un phénomène de diffusion du CO₂ à travers le béton, elle serait plus évidente si la perméabilité au gaz du béton est élevée. Pour mettre en évidence la relation entre la perméabilité au gaz et le phénomène de carbonatation, la profondeur de la carbonatation a été rapportée en fonction de la perméabilité à l'oxygène par [Zidol, 2014] à la figure 5.15. On remarque que la profondeur de carbonatation des bétons suit presque la même tendance que la perméabilité à l'oxygène surtout pour les bétons avec ajouts.

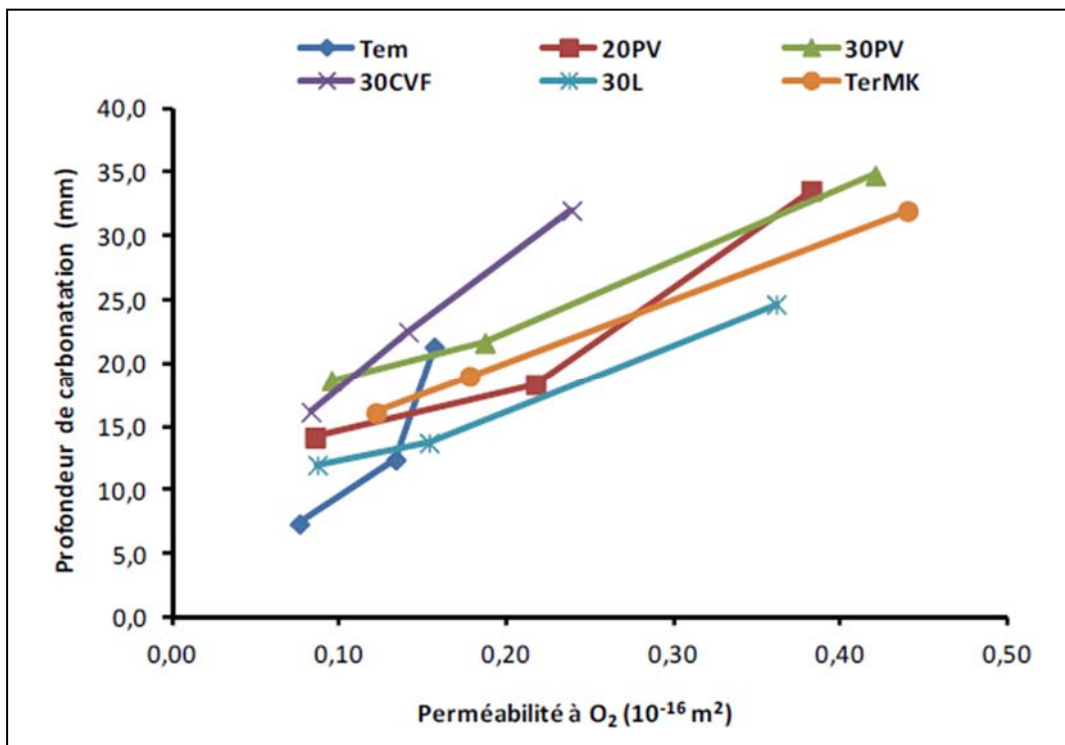


Figure 5.15- Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la perméabilité à l'oxygène [zidol,2014]

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

En effet, dans ces bétons, la profondeur de carbonatation varie proportionnellement avec la perméabilité au gaz. Ce qui traduit donc une forte corrélation entre la perméabilité du béton et la diffusion du CO₂. Plus le béton est perméable plus de CO₂ vont pénétrer augmentant ainsi la profondeur de carbonatation. Cependant, on note un comportement différent dans les bétons témoins, pour une variation de perméabilité trois fois plus élevée dans le béton avec poudre de verre que celle dans le béton témoin, on observe une profondeur de carbonatation de même ordre de grandeur. Cette différence entre les bétons avec ajouts et les bétons témoins pourrait avoir deux origines : l'effet des ajouts sur la microstructure et l'altération éventuelle de la microstructure des bétons avec ajouts due à la pression lors de l'essai de perméabilité.

Par contre, les bétons avec ajouts présentent plus de carbonatation que les bétons témoins pour un même rapport E/L. Ceci s'expliquerait par la faible réserve de basicité (portlandite) dans ces bétons qui pourrait entraîner une baisse du pH [Neville, 2000; Pakawat et al., 2005; McPolin et al., 2007; Lammertijn et al., 2008]. En effet, le milieu fortement basique dans les bétons témoins facilite la fixation du CO₂ et par conséquent limite la progression de sa diffusion dans ces bétons.

Cependant, les bétons de fortes teneurs en ajouts cimentaires pourraient développer de bonnes résistances à la carbonatation correspondantes à celle du béton témoin avec du ciment portland lorsque ces bétons sont formulés avec des proportions et du rapport E/L appropriées [Jiang et al., 2009]. De même, d'autres auteurs [Gruyaert et al. (2013); Liu et al. (2012); Tu et al. (2012); Tu et al. (2011); Ye et al. (2011a); Ye et al. (2011b); Chen et al. (2009)], rapportent que le remplacement partiel du ciment par la cendre volante ou le laitier dans le béton augmente le taux de carbonatation à jeune âge avec l'augmentation du taux de la cendre volante alors que le taux de carbonatation aux âges plus avancés est réduit [Tu et al. 2012; Chen et al., 2009].

5.6. Essai de résistance à la corrosion

L'essai de corrosion accélérée, inspiré du principe de montage de l'essai lollipop figure 5.16a, est effectué sur des "piscines" figure 5.16b. Les quatre murs constituant chaque "piscine" sont coulés avec des bétons différents du point de vue du rapport E/L, du dosage en liant, du type et du taux d'incorporation des ajouts cimentaires. Dans chaque mur d'une piscine, neuf barres d'armatures espacées horizontalement de 100 mm ont été placées avec une variation de l'enrobage de chaque série de trois armatures.

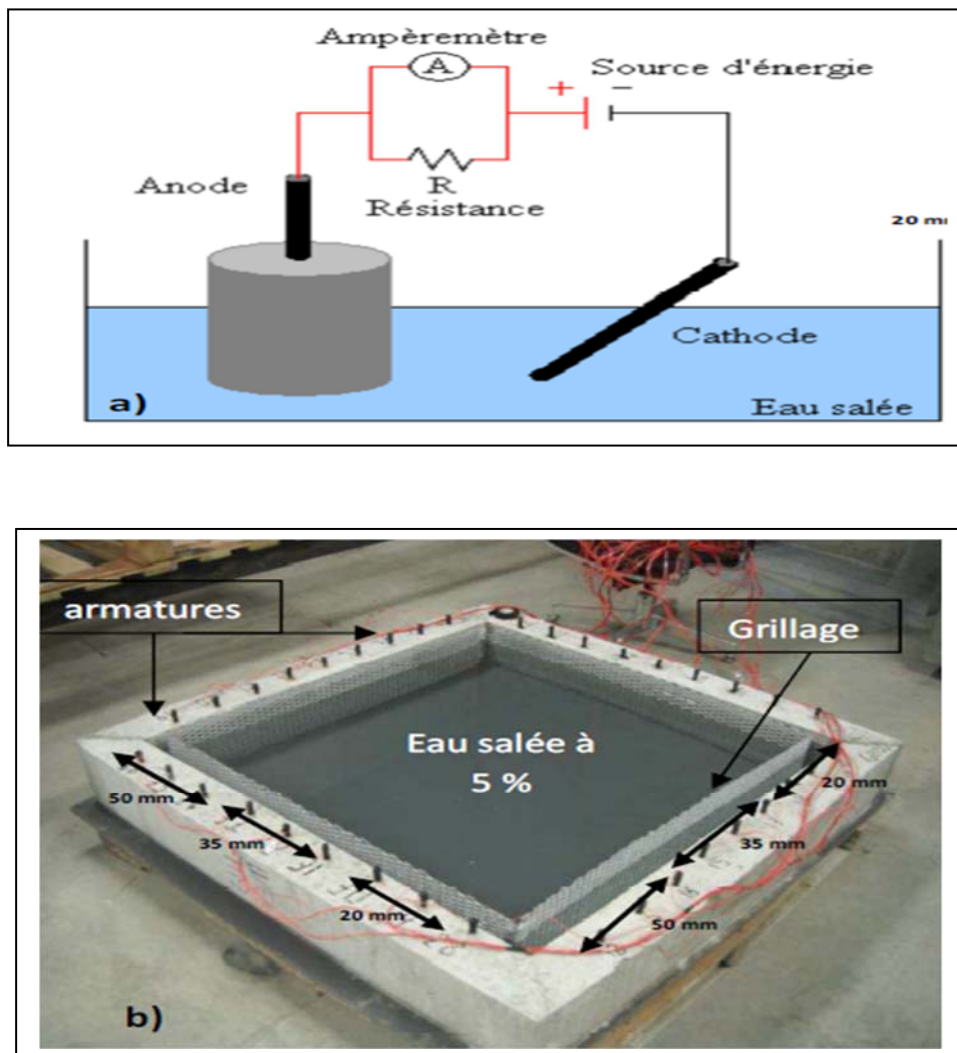


Figure 5.16 (a;b)- Image d'une piscine pour l'essai de corrosion

Les neuf barres de chaque mur sont regroupées en trois séries de trois barres d'armatures se situant respectivement à 20 mm, 35 mm et 50 mm de la paroi intérieure du mur correspondant aux différentes épaisseurs d'enrobage considérées dans l'étude figure 5.18. Après une cure humide de 45 jours, la piscine est séchée environ 3 jours puis les joints sont scellés pour assurer leur étanchéité afin de prévenir une éventuelle fuite prématurée de la solution au cours de l'essai. La piscine est mise à eau une semaine pour saturer les murs puis elle est remplie ensuite par une solution de NaCl à 5 %.

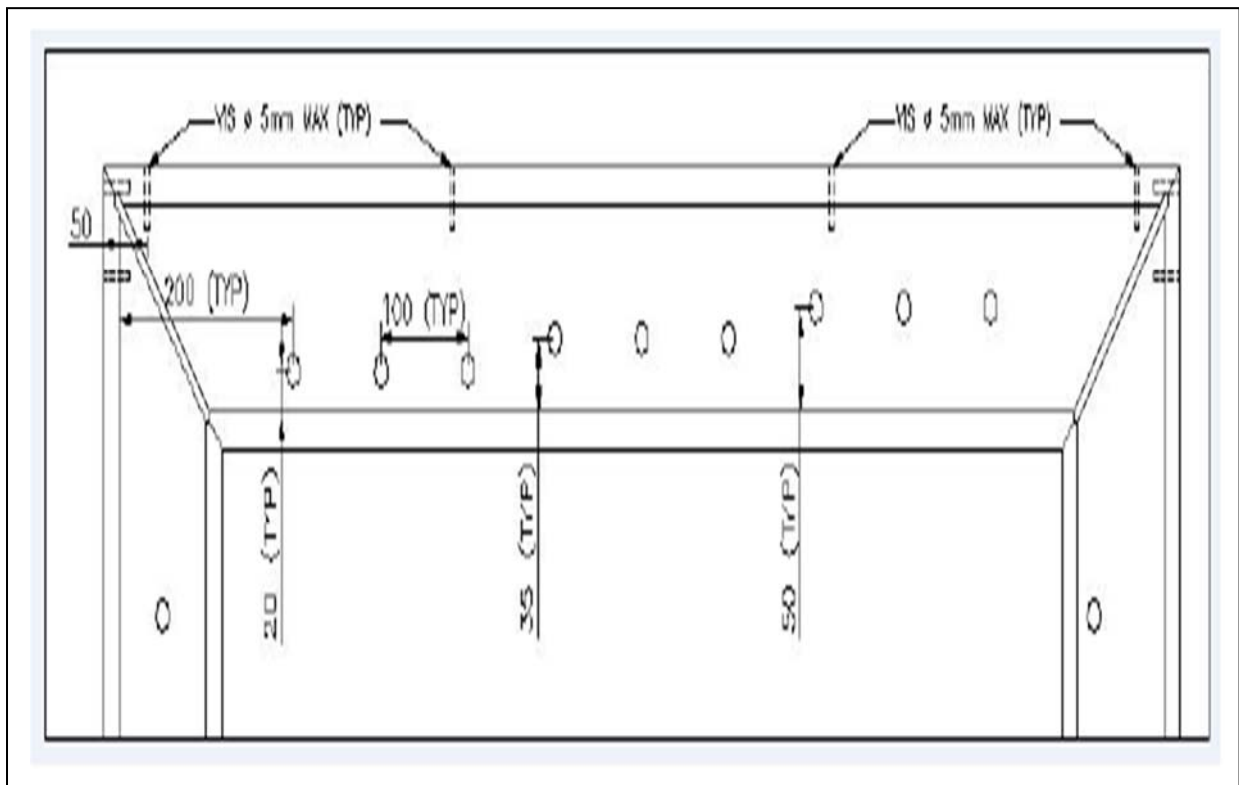


Figure 5.17- Schéma illustrant les différentes épaisseurs d'enrobage étudiées

Le principe de l'essai consiste à établir un circuit de courant entre les bornes des armatures (anode) et le grillage en acier galvanisé (cathode) en appliquant une différence de potentielle ddp constante de 5 V et en déterminant l'intensité traversant chaque armature à partir de la mesure de la tension aux bornes de la résistance R se trouvant dans le circuit constitué par chaque armature, figure 5.19. Ce montage sert à faire migrer les chlorures vers les armatures sous l'effet du champ électrique. L'évolution de l'intensité dans chaque circuit permet d'estimer l'activité de corrosion sur la barre d'armature se situant dans le circuit. L'intérêt d'effectuer cet essai sur des piscines est d'évaluer à la fois la résistance à la corrosion de plusieurs bétons ainsi que l'effet de l'épaisseur d'enrobage.

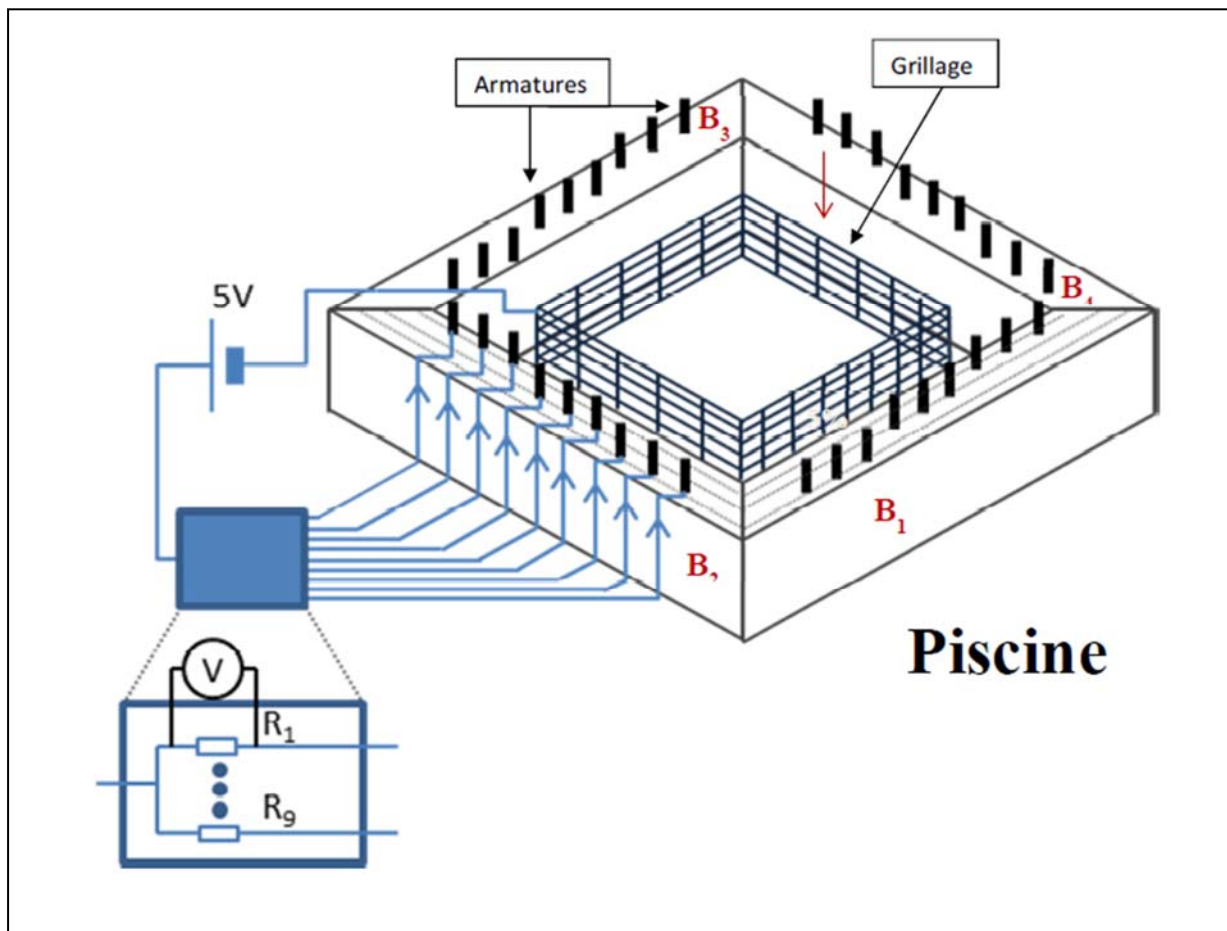


Figure 5.18- Vue schématique du montage de l'essai accéléré de corrosion sur piscine

L'objectif de l'essai de corrosion est d'évaluer l'effet des faibles pénétrabilités sur la résistance à la corrosion initiée par les ions chlorure malgré des rapports E/L élevés. Pour cela, différents rapports variant de 0,40 à 0,55 ont été considérés pour des bétons contenant 30 % de poudre de verre. A titre de comparaison, un béton témoin confectionné avec un rapport E/L de 0,35 a été également considéré. L'intensité (en mA) corrélant la corrosion des barres des armatures est présentée aux figures 5.20; 5.21 et 5.22 pour les trois épaisseurs d'enrobages étudiées respectivement 20 mm; 35 mm et 50 mm. L'évolution de chaque courbe permet de suivre l'activité de corrosion et d'estimer la capacité de protection d'armature offerte par chaque béton. L'augmentation de l'intensité en fonction du temps traduit une diminution de la résistivité et donc de la résistance du béton à la corrosion. Cette intensité est nettement plus importante dans le béton témoin de E/L plus faible (0,35) que dans les autres bétons de rapports E/L plus élevés mais qui contiennent de la poudre de verre, traduisant une faible protection des armatures dans le béton témoin. Ceci se reflète dans la période d'initiation et de la propagation de la corrosion et dans l'apparition des premières fissures qui se font beaucoup plus rapidement dans le béton témoin que dans les bétons incorporant la poudre de verre. Les différentes étapes durant l'activité de corrosion des barres d'armature dans un béton sont identifiées par des points de 1 à 5 représentés uniquement à titre d'information sur les

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

résultats du béton témoin pour l'enrobage 20 mm figure 5.20. Le point "1" correspond à l'intensité initiale élevée due à l'addition du sel; le point "2" traduit une diminution de l'intensité attribuée à la formation d'une couche protectrice d'oxyde FeO stable et à la période de migration des chlorures à travers le béton vers les armatures; le point "3" marque la destruction de la couche passive et donc l'initiation de la corrosion générant une augmentation de l'intensité, le point "4" indique le moment d'apparition des premières fissures et le point "5" exprime des fluctuations du courant induites par la formation d'oxyde en grandes quantité occasionnant des cycles de fissuration/obturation des fissures. Une tendance typique a été également observée par [Petrov, (1998)] sur les bétons autoplaçants.

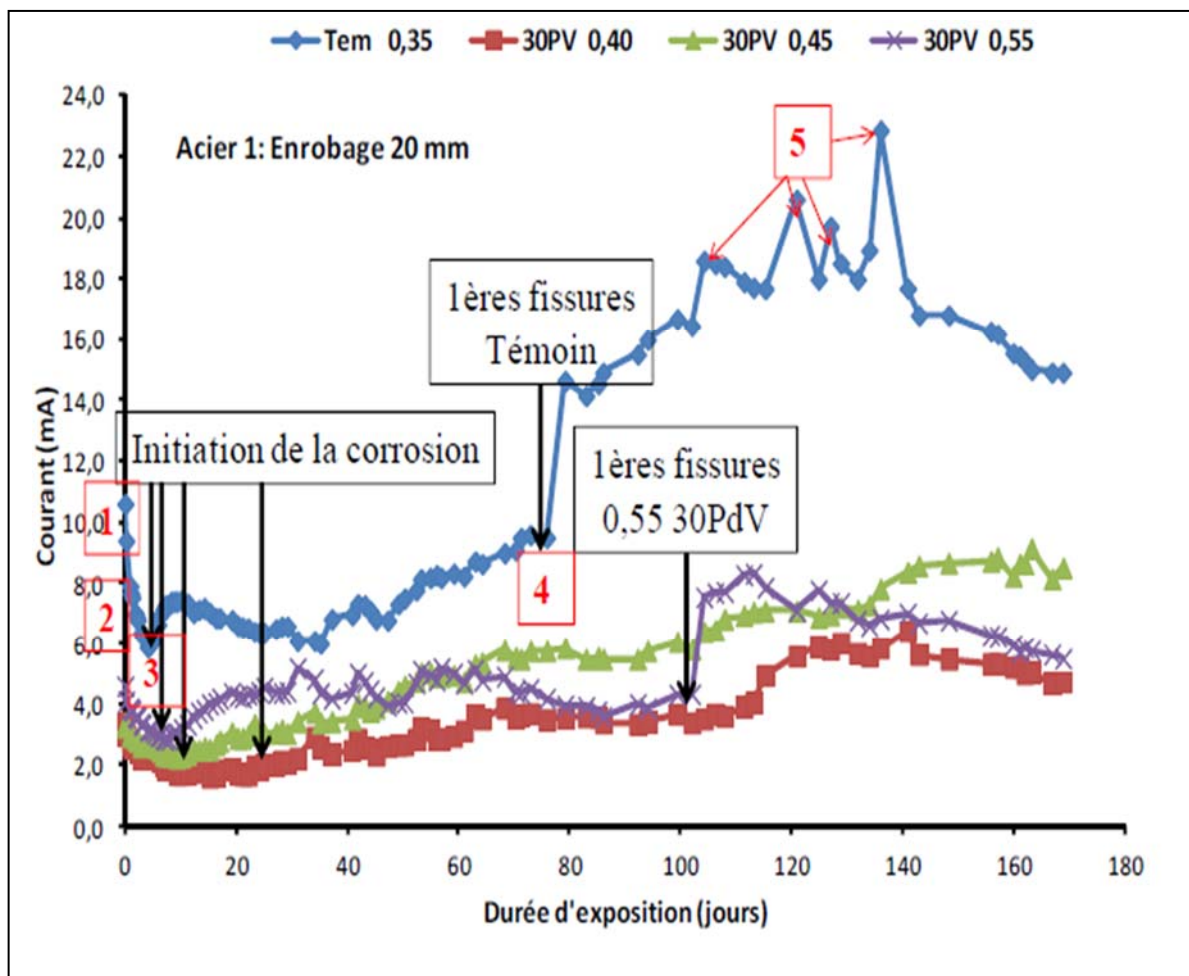


Figure 5.19 - Corrosion accélérée dans les bétons avec enrobage des armatures de 20 mm

Par ailleurs, l'enrobage semble avoir un effet sur l'activité de corrosion des barres d'armature. Pour l'enrobage de 20 mm figure 5.20, la période d'initiation de la corrosion dans les bétons avec poudre de verre est de l'ordre de 2 à 6 fois plus longue que celle du témoin dépendamment du rapport E/L. En effet, la période d'initiation du béton témoin de E/L = 0,35 est de 4,25 jours alors qu'elle est de 25,01; 11,23 et 8,31 jours pour les bétons contenant 30% de poudre de verre avec des rapports E/L respectifs de 0,40; 0,45 et 0,55. Aussi, une différence nettement perceptible résultante de la variation du rapport E/L se dégage entre les

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

périodes d'initiation contrairement aux résultats ultérieurement observés quant à la pénétrabilité des ions chlorure qui ont montré un effet moindre du rapport E/L en présence de la poudre de verre. Cette nette différence entre les périodes d'initiation de cette série d'armature due à la variation du rapport E/L en présence de la poudre de verre, démontre que les perméabilités aux ions chlorure quasi similaires de ces bétons indépendamment du rapport E/L n'impliquent pas systématiquement une même durabilité en milieux agressifs, pour ce type d'enrobage. Bien que l'augmentation du rapport E/L dans les bétons contenant la poudre de verre entraîne une diminution de la période d'initiation, celle-ci reste toutefois supérieure à celle du béton témoin qui a un plus faible rapport E/L. Puisque la période d'initiation du béton de $E/L = 0,55$ contenant 30% de poudre de verre est d'environ deux (2) fois plus longue que celle d'un béton témoin de rapport E/L plus faible (0,35). Ce résultat met en évidence l'efficacité de la faible perméabilité des bétons incorporant la poudre de verre malgré leurs rapports E/L élevés vis-à-vis de la corrosion induite par les chlorures. De plus, les fissures sont observées seulement dans les bétons témoins et le béton de rapport $E/L = 0,55$ contenant 30% poudre de verre avec des temps d'apparition respectifs de 79,2 et 104,2 jours confirmant une progression plus rapide de la corrosion dans le béton témoin malgré son faible rapport E/L. Aucune fissure n'est observée dans les autres bétons contenant de la poudre de verre

Pour l'enrobage de 35 mm figure 5.21, la période d'initiation du béton témoin de $E/L = 0,35$ est de 21,11 jours et de 52,41 jours pour les bétons contenant 30% de la poudre de verre de rapports E/L différents. Pour cette épaisseur d'enrobage, aucune différence significative n'est observée entre les périodes d'initiation de la corrosion des bétons contenant la poudre de verre simulant une protection des armatures quasi similaire pour ces bétons malgré leurs rapports E/L différents. La fissuration due à l'expansion des produits de corrosion s'est produite dans le béton témoin à 120,87 jours alors que tous les bétons contenant de la poudre de verre ne présentent aucune fissure. Ces observations relatent bien les effets de l'épaisseur d'enrobage ainsi que ceux des types de bétons étudiés sur la protection des armatures. Définitivement tous les bétons incorporant la poudre de verre offrent une meilleure protection des armatures comparativement à un béton témoin de rapport E/L plus faible de 0,35. La protection offerte par tous les bétons est affectée par l'épaisseur d'enrobage. Le comportement type des bétons contenant de la poudre de verre de différents rapports E/L, en termes de protection des armatures dépend de l'enrobage. Ces meilleures protections des armatures présentées par les bétons contenant de la poudre de verre sont en corrélation avec leur faible pénétrabilité des ions chlorure qui est tributaire aux effets typiques des ajouts cimentaires tels que l'effet filler et effet pouzzolanique. Pour l'enrobage de 50 mm, figure 5.22, l'initiation de la corrosion et la fissuration se sont produites uniquement dans le béton témoin tout comme dans l'enrobage de 35 mm. Quant aux bétons contenant la poudre de verre, aucune initiation ni fissuration n'est observée confirmant ainsi la résistance de ces bétons à la corrosion des armatures en environnement riche en chlorure.

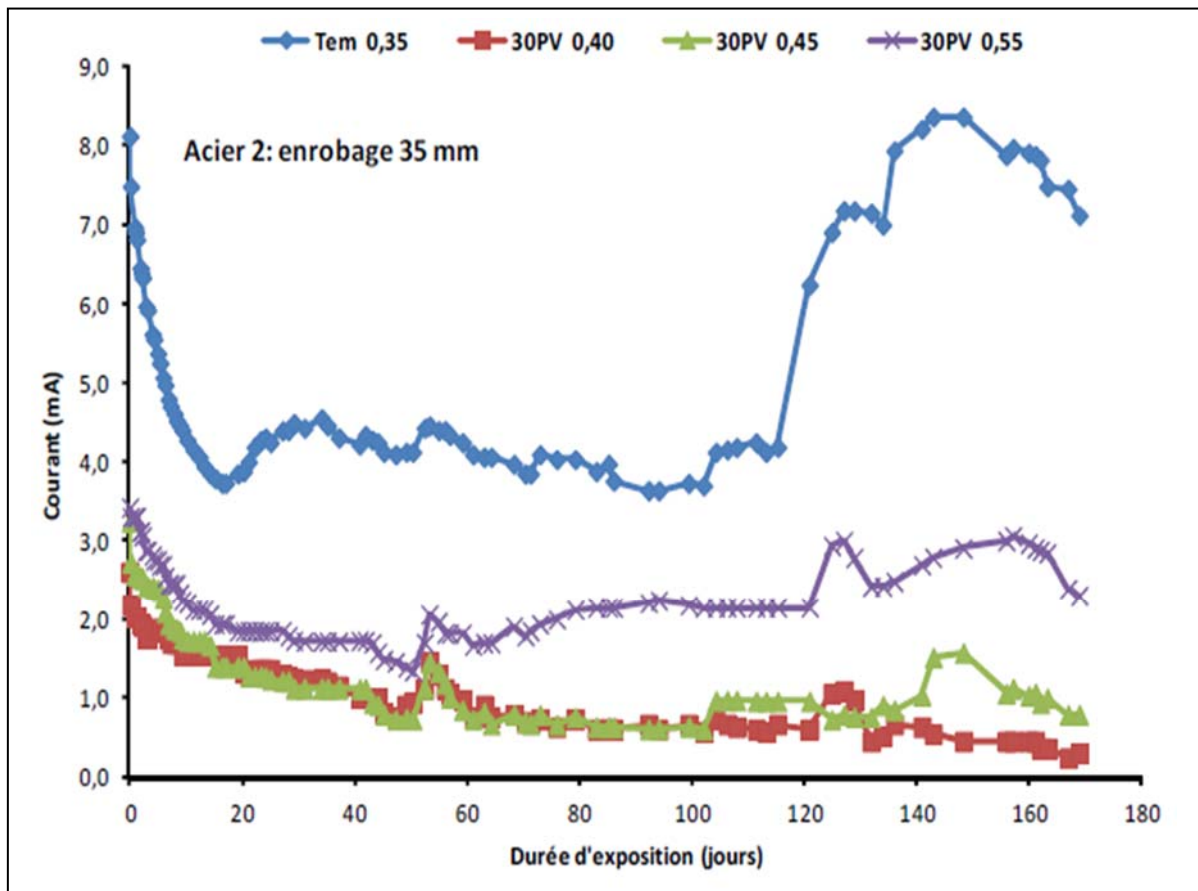


Figure 5.20- Corrosion accélérée dans les bétons avec enrobage des armatures de 35 mm [zidol,2014]

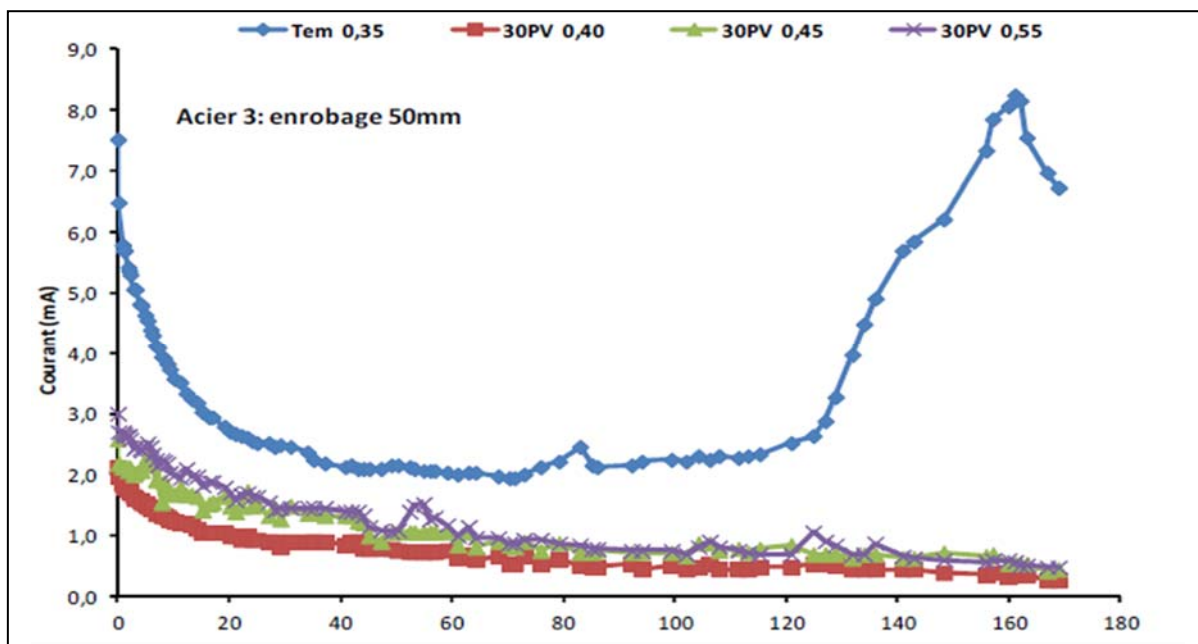


Figure 5.21- Corrosion accélérée dans les bétons avec enrobage des armatures de 50 mm [zidol,2014]

5.7. Conclusion

Les études sur la pénétrabilité des ions chlorure ont montré une bonne résistance à la pénétration des ions chlorure des bétons contenant les ajouts notamment la poudre de verre et ceci quel que soit le rapport E/L. Les résultats confirment bien que la poudre de verre contrôle efficacement l'expansion due à l'attaque par les sulfates et l'initiation ou la propagation de la corrosion induite par les chlorures. La résistance aux sulfates de ces bétons serait due à la diminution de la teneur en C3A et en portlandite qui sont les éléments les plus vulnérables dans un environnement riche en sulfates. La réduction de l'activité de corrosion en présence de la poudre de verre est nettement supérieure à celle résultante de la diminution du rapport E/C, démontrant clairement l'efficacité de la faible perméabilité de ces bétons vis-à-vis de la dégradation produite par les chlorures. Cependant, l'épaisseur de l'enrobage joue un rôle important dans l'initiation de la corrosion dans les bétons avec poudre de verre.

Par ailleurs, la diminution de la teneur en portlandite due à la réaction pouzzolanique, bénéfique à la résistance aux sulfates des bétons avec ajouts, entraîne une profondeur de carbonatation plus importante dans ces bétons par rapport au témoin. Aussi, il est important de noter que bien que la profondeur de la carbonatation soit plus importante dans les bétons contenant la poudre de verre, elle est équivalente à celle de la cendre volante classe F.

Ces résultats suggèrent donc que les bétons incorporant la poudre de verre peuvent être convenablement exposés dans des environnements riches en sulfates et en chlorure. Cependant, des précautions particulières, telles qu'une augmentation de l'épaisseur d'enrobage et une diminution du rapport E/L, doivent être prises dans des milieux sujets à de fortes carbonatations.

Bibliographie

Abbas, A.; Carcasses, M.; Ollivier J.-P. (1999) Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. *Materials and Structures*, 32, No. 215, 3–8.

Al Bakri Abdullah, M. M.; Hussin, K.; Bnhussain, M., Ismail, K. N.; Yahia, Z.; Razak, R. A. (2012) Fly Ashbased Geopolymer Lightweight Concrete Using Foaming Agent. *Journal of Molecular Science* (International Edition), v 13, n 6, 7186-98

Chen, X. et Wu, S. (2013) Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 38, p 804–812

Cheng, A-S.; Yen, T.; Liu, Y-W.; Sheen, Y-N. (2008) Relation between porosity and compressive strength of slag concrete. *Proceedings of the 2008 Structures Congress - Structures Congress 2008: Crossing the Borders*, v 314, 2008, *Proceedings of the 2008 Structures Congress - Structures Congress 2008: Crossing the Borders*.

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Chindaprasirt, P.; Jaturapitakkul, C.; Sinsiri, T. (2007) Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 1534–1541.

Danilova, M. (2012) Effet de la poudre de verre sur le fluage des CSH. These de Doctorat, Université de Sherbooke, Qc, Canada.

De Schutter G. & Audenaerk K., 2004. *Materials and structures*, Vol. 37, No 9, RILEM, pp 591-596. Dheghanian, C.; Ariemandi, M. (1997) Influence of slag blended cement concrete on chloride diffusion rate. *Cement and Concrete Research*, v 27, n 6, p 937-945.

Duan, P.; Shui, Z.; Chen, W.; Shen, C. (2013a) Efficiency of mineral admixtures in concrete: Microstructure, compressive strength and stability of hydrate phases. *Applied Clay Science* 83– 84, pp115–121.

Feldman, R.F. (1983) Significance of porosity measurements on blended cement performance. Proceeding of the 1st International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete. Vol. 1, ed. by V.M. Malhotra. American Concrete Institut, Detroit, pp 415 – 434.

Feldman, R.F. (1986) Pore structure, Permeability and diffusivity as related to durability. 8th International Congress on Chemistry of Cement, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp 337 – 56.

Geng, J.; Shen, J. et Chen, W. (2011) Resistivity characters of concrete with fly ash and slag. *Advanced Materials Research*, Vol. 168-170, p 1409 – 1413.

He, Z.; Liu, J. (2011) Effect of binders combination on porosity of steam-cured concrete. *Advanced Materials Research*, v.183-185, pp 1984-1988.

Homwuttiwong, S.; Chindaprasirt, P.; Jaturapitakkul, C.; (2012) Strength and water permeability of concrete containing various types of fly ashes and filler material. *International Journal of Materials Research*, v 103, n 8, p 1058-1064.

Hussain, S. E.; Rasheeduzzafar (1994) Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. *ACI Materials Journal*, v 91, n 3, p 264-272.

Johari, M. A. M.; Brooks, J. J.; Kabir, S.; Rivard, P. (2011) Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction & Building Materials*, v 25, n 5, 2639-48.

Khatri, R. P.; Sirivivatnanon, V.; Yu, L. K. (1997) Effect of curing on water permeability of concretes prepared with normal Portland cement and with slag and silica fume. *Magazine of Concrete Research*, v 49, n 180, p 167-172

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Kong, D.; Du, X.; Yang, Y. Shah, S. P. (2012) Effect of nano-silica agglomeration on hydration and hardening of cement. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, v 40, n 11, p 1599-1606.

Lafhaj, Z.; Goueygou, M.; Djerbi, A.; Kaczmarek, M. (2006) Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research*, 36, p 625 – 633.

Lammertijn, S. et De Belie, N. (2008). Porosity, gas permeability, carbonation and their interaction in high volume fly ash concrete. *Magazine of Concrete Research*, volume 60, n° 7, p. 535-545.

Leng, F.; Feng, N.; Lu, X. (2000) Experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research*, v 30, n 6, p 989-992.

Lilkov, V.; Petrov, O.; Petkova, V.; Petrova, N.; Tzvetanova, Y. (2011) Study of the pozzolanic activity and hydration products of cement pastes with addition of natural zeolites. *Clay Minerals*, v 46, n 2, p 241-250.

Lizarazo Marriaga, J.; Claisse, P. (2011) The influence of the blast furnace slag replacement on chloride penetration in concrete *Ingenieria e Investigacion*, v 31, n 2, 38-47

Ma, W.; Brown, P. W. (1994) Hydration of sodium phosphate-modified high alumina cement. *Journal of Materials Research*, v 9, n 5, p 1291-1297.

Naik, T. R.; Singh, S. S. Hossain, M.M.; (1994) Permeability of concrete containing large amounts of fly ash. *Cement and Concrete Research*, v 24, n 5, p 913-922, 1994.

Neithalath, N. (2008) Quantifying the effects of hydration enhancement and dilution in cement pastes containing coarse glass powder. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v 6, n 3, p 397-408.

Ollivier, J.P.; Torrenti, J.M. (2008) La structure poreuse des betons et les proprietes de transfert. Chapitre 3 du Livre [2] La durabilite des betons [2], Bases scientifiques pour la formulation de betons durable et leur environnement. Sous la direction de J.P. Ollivier et A. Vichot. 868p

Ollivier, J-P., et Vichot A., (2008) *La durabilité des bétons : bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussees, ISBN 978-2-85978-434-8 (2ieme edition), Paris, p. 868.

Pandey, S.P.; Sharm, R.L. (2000) The influence of mineral additions on the strength and porosity of OPC mortar. *Cem Concr Res*, pp 19–23.

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Pera J.; Husson S.; Guilhot, B. (1999) Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*, v 21, n 2, p 99-105, Apr 1999

Petrov, N. (1998) Etude des propriétés d'un béton Autonivelant in situ et de leurs influences sur l'interface béton – armature. Mémoire de Maîtrise en Science Appliquée, Sherbrooke, Québec. 158p.

Ployaert Ir C., 2009. Durabilité des bétons par la maîtrise de l'absorption d'eau. *Bulletin Technologie*, FEBELCEM, Bruxelles.

Poon, C.S., Wong, Y.L., Lam, L. (1997) The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly ash cement pastes and mortars. *Constr Building Mater* 11(7-8): pp 383-93.

Poon, C.S.; Lam, L., Wong, Y.L. (1999) Effect of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete. *ACI Materials Journal* , pp 197-205.

Rahmouni, Z.; Belouadah, M.; Tebbal, N. (2012) Influence des additions minérales sur les propriétés à l'état durci des bétons ordinaires à base de matériaux locaux. XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.

Roberts, L.R.; Grace, W.R. & Co. (1989) Microsilica in concrete, I. in *Materials Science of Concrete I*. ed. by Jan P. Skalny.

Sadok, A.H.; Kenai, S. (2012) Gas and chloride ions permeability of mortar with low hydraulicity slag. *MATEC Web of Conferences*, v 2, 01011 (7 pp.), 2012. Conference: CSNDD 2012 – *International Conference on Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*, 30 April-2 May 2012, Marrakech, Morocco.

Safiuddin, M. et Hearn N. (2005) Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, No. 5, 1008-1013. Schwarz, N. et DuBois, M. et Neithalath, N. (2007). Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, volume 29, n° 9, p. 656-666.

Shafiq, N.; Nurrudin, M. F.; Kamarrudi, I. (2007) Comparison of engineering and durability properties of fly ash blended cement concrete made in UK and Malaysia. *Advances in Applied Ceramics*, v 106, n 6, 314-1.

Shane, J.D., Aldea, C.M., Bouxsein, N.F., Mason, T.O., Jennings, H.M., Shaw, S.P. (1999) Microstructural and pore solution changes induced by rapid chloride permeability test measured by impedance spectroscopy”, *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, pp. 110-119.

Chapitre 5 – Techniques expérimentales

Shi, H., Xu, B. (2007) Study on gas permeability of high performance concrete with fly ash. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, v 35, n 9, 1230-4.

Shi, H-S.; Xu, B-W.; (2008) Determination of gas permeability of high performance concrete containing fly ash. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v 41, n 6, p 1051-1056.

Singh, N.B.; Sarvahi, R.; Singh, S. P.; Shukla, A.K. (1994) Hydration studies of rice husk ash blended white Portland cement. *Advances in Cement Research*, v 6, n 21, p 13-18.

Song, H.W.; Kwon, S.J. (2007) Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure. *Cement Concrete Research*, 37 (6), p 909–915.

Stoitchkov, V.; Abadjiev, P.; Lilkov, V; Vasileva, V. (1996) Effect of the “Pozzolit” active mineral admixture on the properties of cement mortars and concretes. *Cement and Concrete Research*, 27, No 7, pp 1065-1071.

Tinnea, R.; Tinnea, J.; Kuder, K.; Daudistel, R.; Hassane, B.; Stoll, C. et Tomosada, K. A. (2009) Testing of high-resistivity concrete. *International Corrosion Conference Series*, 2009, Corrosion 2009, March 22-26, 2009.

Winslow, D.N.; Liu, D. (1990) Pore structure of paste in concrete. *Cement Concrete Research* 20 (2), p 227–235.

Ye, J.X.; Wang, Y. J.; Zhao, S.; Yang, M. C.; Yang, C. H. (2011) Effect of ground phosphate slag on the resistance to chloride ion penetration of concrete. *Advanced Materials Research*, v 194-196, p 924-929.

Zhang, X.; Jiang, L.; Liu, G. (2011) The effect of fly ash on water transport of concrete in dry state. *Advanced Materials Research*, v 335-336, 1190-4.

CONCLUSIONS GENERALES

La durabilité d'un béton est intimement liée à ses propriétés de transport qui définissent des chemins préférentiels par lesquels des agents extérieurs potentiellement agressifs pourraient y pénétrer et accentuer les processus de dégradations prématurées du béton. Ces propriétés de transport jouent un rôle primordial dans les diverses formes de dégradations des bétons en constituant un pont entre les agents extérieurs agressifs et les mécanismes de dégradations précoces d'un béton. L'importance capitale de ces propriétés de transport dans la durabilité des bétons nous incite à leur accorder une attention particulière lors de la formulation des bétons. L'impact des additions minérales telles que la poudre de verre et d'autres ajouts minéraux classiques notamment la cendre volante classe F, le laitier et le métakaolin sur ces propriétés de transport sont rapportés dans ce travail.

Tout dépendant de l'âge des bétons, la porosité totale mesurée soit par pesée hydrostatique à 56 jours de murissement, soit par intrusion au mercure à 180 jours de cure humide, est globalement et légèrement plus élevée dans les bétons incorporant les ajouts minéraux que dans les bétons témoins. Cette augmentation de la porosité totale semble être attribuable à un effet de dilution et de réactivité plus ou moins lente des ajouts.

On remarque à travers les résultats de l'université de Sherbrooke que la porosité totale des bétons ne diminue pas forcément systématiquement avec l'incorporation des ajouts minéraux. Par contre la perméabilité, la pénétrabilité ou la diffusivité qui constituent les propriétés de transport des matières dans les bétons diminuent considérablement avec l'incorporation des ajouts minéraux.

Cependant, contrairement à la réduction systématique de la pénétrabilité ou de la diffusion des ions chlorure dans les bétons en présence de la poudre de verre ou tout autre ajout cimentaire classique, on observe de légères augmentations de la perméabilité au gaz en présence des ajouts.

La réduction de l'activité de corrosion en présence de la poudre de verre est nettement supérieure à celle résultante de la diminution du rapport E/C, démontrant clairement l'efficacité de la faible perméabilité de ces bétons vis-à-vis de la dégradation produite par les chlorures.

Il est à souligner également que les résultats de l'étude faite par Zidol permettent de confirmer que la poudre de verre performe mieux dans les bétons de rapport E/L élevé que dans ceux de rapport E/L faible. Ces résultats suggèrent que la poudre de verre nécessite assez d'eau disponible pour développer toutes ses potentielles.

La performance de la poudre de verre dans le développement de la résistance à la carbonatation est peu significative. La diminution de la teneur en portlandite due à la réaction pouzzolanique, bénéfique à la résistance aux sulfates des bétons avec ajouts cimentaires, entraîne une profondeur de carbonatation relativement plus élevée dans ces bétons par rapport aux bétons témoin. Bien que la profondeur de la carbonatation soit plus importante dans les bétons contenant la poudre de verre, elle est équivalente à celle observée dans les bétons incorporant la cendre volante de classe F.

Conclusions générales

En somme, l'ensemble des résultats de cette étude se converge et suggère donc que la poudre de verre, performe beaucoup mieux dans les bétons de rapport E/L élevé comparativement à ceux de rapport E/L faible. De plus ces résultats démontrent aussi la performance de la poudre de verre dans l'amélioration de la résistance du béton contre certaines formes extérieures de dégradations notamment les sulfates, les chlorure et la corrosion. Mais sa performance dans le développement de la résistance à la carbonatation est faible suggérant que quelques précautions particulières telles qu'une réduction du rapport E/L ou une augmentation de l'épaisseur d'enrobage doivent être prises dans des milieux sujets à de fortes probabilités de carbonatation. En définitif, les bétons incorporant la poudre de verre peuvent être convenablement exposés dans des environnements riches en sulfates et/ou en chlorure. La poudre de verre recèle incontestablement des performances indéniables pour son utilisation adéquate dans les matériaux de construction.