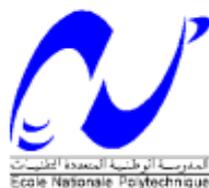


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil



Mémoire de Master
en Génie Civil

Intitulé :

***Durabilité des bétons
à la poudre de verre :
étude de la carbonatation***

Proposé et dirigé par :

Pr. A. BALI

Présenté par :

LEGHREIB Mekki Nour El Islam

Soutenu publiquement le (16/06/2015) devant le jury composé de

Présidente :	Pr. R. KETTAB	Professeur à l'ENP
Encadreur :	Pr. A. BALI	Professeur à l'ENP
Examineurs :	Mme. A. CHIKH	MAA à l'ENP
	Dr. R. BOUTEMEUR	MAA à l'ENP
	M.A. ABDELGUERFI	MAA à l'ENP

Promotion 2015

ENP : 10, avenue Hacén Badi, El Harrach, Alger
Tel : 213 21 52 53 01/03 – Fax : 213 21 59 7973

Résumé :

Le ciment est la principale source des impacts sur l'environnement de l'utilisation du matériau béton. Afin d'optimiser ce dernier d'un point de vue environnemental, il est nécessaire de réduire son dosage en ciment. Cela peut être entrepris en remplaçant une partie du ciment par des additions lors de sa fabrication. La poudre de verre constitue un nouveau ajout cimentaire alternatif, son utilisation dans les bétons a montré des résultats très appréciables vis-à-vis de la résistance à la compression, grâce à ses propriétés pouzzolaniques, cependant une étude de sa durabilité reste nécessaire voire primordiale. Un des facteurs influant sur la durabilité est la carbonatation qui est un phénomène de vieillissement naturel et concerne tous les bétons, et représente un fait de dégradation majeur puisque elle favorise la corrosion des armatures en les dépassivant. Nous avons essayé à travers ce travail de mener une étude concernant l'effet de la poudre de verre sur la durabilité des bétons en général et la carbonatation en particulier, néanmoins les résultats ont montré que les bétons avec poudre de verre ne produisent pas de bonnes résistances à la carbonatation, d'où la nécessité absolue de bien respecter les composition adaptée du béton, assurer une cure suffisamment longue et prendre soin des conditions de mise en œuvre.

Mots clés :

Durabilité, carbonatation, ajout cimentaire, poudre de verre, réaction pouzzolanique, corrosion des armatures.

المخلص :

يصنف الإسمنت على أنه المصدر الرئيسي للتأثيرات البيئية الراجعة لإستخدام الخرسانة. من وجهة نظر بيئية و من أجل تحسين الخرسانة فإنه من الضروري تقليل كمية الإسمنت الداخلة في تركيبها، وهذا عن طريق استبدال جزء منه بالإضافات خلال تصنيعه. يعتبر مسحوق الزجاج أحد الإضافات الإسمنتية البديلة ، إذ أظهر استخدامه في الخرسانة نتائج جد مرضية بالنسبة إلى مقاومة الضغط، بفضل خصائصه البوزولانية ، ومع ذلك تبقى دراسة إستدامته ضرورية. إن الكربنة من أحد العوامل المؤثرة في الاستدامة، وهي ظاهرة طبيعية للتقدم في السن ، تعني كل أنواع الخرسانات، فهي تمثل عن واقع فعلي للأضرار الكبيرة وذلك بتفعيل تآكل حديد التسليح. حاولنا من خلال هذا العمل إجراء دراسة حول تأثير مسحوق الزجاج على إستدامة الخرسانة بشكل عام، والكربنة بشكل خاص، إلا أن النتائج المتحصل عليها قد أوضحت أن الخرسانة مع مسحوق الزجاج لا تظهر مقاومة جيدة لظاهرة الكربنة، ولهذا فإنه من الضروري مراقبة مكونات الخرسانة المناسبة، ضمان عناية طويلة المدى، بالإضافة إلى احترام شروط التنفيذ.

كلمات مفتاحية:

الإستدامة، الكربنة، إضافات إسمنتية، مسحوق الزجاج، تفاعلات بوزولانية، تآكل حديد التسليح.

Abstract :

Cement is the main source of environmental impacts caused by the use of concrete material. In order to optimize the concrete from an environmental side, it is necessary to reduce the cement content. This can be done by replacing part of the cement by additives during its production.

The glass powder is a new alternative cementitious addition, thanks to its pozzolan properties, the use of glass powder in concrete showed very significantly results towards the compressive strength, however, a study of its durability remains necessary even essential.

One of the factors affecting durability is the carbonation which is a natural aging concrete's phenomenon and harms all concretes, it is one of the major damage that can affect concrete because it promotes steel reinforcement's corrosion by causing depassivation.

We tried through this work to make a study on the glass powder's effects on concrete's durability in general and carbonation in particular, however the results have shown that the concrete with glass powder does not produce good resistance to carbonation hence the absolute need to respect the suitable composition of concrete, ensuring a sufficiently long cure and take care of the implementation's conditions.

Keywords:

Durability, carbonation, cements additives, glass powder, pozzolanic reaction, steel reinforcement corrosion.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur monsieur Abderrahim BALI professeur à l'ENP, pour l'honneur qu'il m'a fait d'encadrer ce travail, pour ses grandes qualités pédagogiques, pour sa rigueur scientifique, pour l'aide précieuse et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour mener à bien ce travail.

Je remercie monsieur Malek OULD-HAMOU, chef de département du génie minier de nous avoir accueillis et permis de réaliser une partie de notre travail dans le laboratoire du génie minier, je remercie aussi monsieur Mustapha MEZIANI et madame Rachida IBDOUHAN pour leur assistance au laboratoire.

Je tiens également à remercier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et d'une façon distinguée Pr. Ratiba KETTAB pour son aide et ses conseils très précieux.

Je ne saurais tourner cette page sans adresser nos affectueux remerciements à tous mes amis qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



DÉDICACES



En témoignage de ma reconnaissance infinie pour toute la sollicitude dont ils m'ont faits preuve durant toutes ses années d'études, de mon affection pour toute la patience et pour tous les nombreux sacrifices qu'ils n'ont cessés de me consentir ; que mes chers parents trouvent dans ce travail l'expression de mon profond amour et gratitude, JE VOUS AIME.

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

- + mon frère Chafik que j'aime énormément, à ma belle Sœur, et mes petites nièces, mes amours Lilia et Yasmine que Dieu les protèges.*
- + ma tante Isma et son époux Nacer , ainsi que mes cousins Salah Eddine et Radia.*
- + la mémoire de mon cousin Youcef , que Dieu inchalah l'accueille de son vaste paradis.*
- + à mon binôme Issam à qui je souhaite tout le succès et le bonheur inchalah.*

Je termine par une dédicace très spéciale à toute ma promo GC 2015, ainsi que tous mes amis à l'ENP et mes coéquipiers d'EL BAHDJA Handball.



LEGHREIB Mekki Nour El Islam



Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre	3
1.1. Introduction.....	3
1.2. Propriétés des déchets de verre	4
1.2.1. Propriétés physiques.....	4
1.2.2. Propriétés chimiques.....	5
1.2.3. Autres propriétés :	7
1.3. Options de gestion :	8
1.3.1. Recyclage.....	8
1.4. Les challenges de l'industrie cimentaire :	10
1.5. Les déchets de verre dans la production du ciment et béton.....	11
1.6. L'utilisation des déchets de verre comme remplacement de ciment.....	13
1.7. L'effet des tailles des particules du verre :.....	14
1.8. Poudre de verre et son influence dans le béton	14
1.8.1. Pourcentage de substitution du ciment.....	15
1.8.2. L'activité pouzzolanique de la poudre de verre	15
1.8.3. Les réactions Alkali-Silica (RAS)	16
1.8.4. La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans le béton.....	19
1.8.5. Effet de la température de durcissement sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre dans les matériaux à base du ciment (13)	20
1.9. Comparaison entre la poudre de verre et les cendres volantes	22
1.10. Les avantages environnementaux et économiques de l'utilisation de la poudre de verre	23
1.11. Conclusion	24
Chapitre 2 : La durabilité des bétons	25
2.1. Introduction.....	25

2.2. Les facteurs influant sur la durabilité (20).....	25
2.2.1. Les facteurs propres au matériau béton	25
2.2.2. Les facteurs externes.....	31
2.3. Indicateurs de durabilité et autres paramètres	32
2.3.1. Définition.....	32
2.3.2. Indicateurs de durabilité généraux	33
2.3.3. Indicateurs de durabilité spécifiques	33
2.3.4. Indicateurs chimiques microscopiques (relatifs aux constituants du béton)	33
2.3.5. Indicateur global et macroscopique (relatif au béton durci)	33
2.3.6. Indicateurs de substitution	34
2.4. Les ajouts cimentaires et la durabilité	34
2.5. Conclusion :	36
Chapitre 3 : La carbonatation des bétons.....	37
3.1. Introduction.....	37
3.2. Dioxyde de carbone atmosphérique	38
3.3. Phénomène de carbonatation du béton	38
3.3.1. Physico-chimie de la carbonatation	38
3.3.2. Conséquence de la carbonatation sur le béton	42
3.3.3. Conséquence de la carbonatation sur le béton armé	45
3.3.4. Facteurs influençant la carbonatation	50
3.4. Influence des ajouts cimentaires sur la carbonatation	51
3.5. Influence de la poudre de verre sur la carbonatation.....	52
3.6. Conclusion :	53
Chapitre 4 : Objectif et méthodologie expérimentale.....	54
4.1. Introduction.....	54
4.2. La poudre de verre (31).....	54
4.3. Composition des bétons.....	55
4.4. Essai de carbonatation accéléré (selon la norme l'AFPC-AFREM (1997))	56

4.4.1. Appareillage.....	56
4.4.2. Corps d'épreuve confectionné par moulage	56
4.4.3. Prétraitement avant démarrage de l'essai.....	57
4.4.4. Procédure d'essai	58
4.4.5. Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté	58
4.4.6. Prédiction de la profondeur de carbonatation dans le béton.....	60
4.5. Conclusion	61
Chapitre 5 : Présentation et interprétation des résultats	62
5.1. Introduction.....	62
5.2. Résultats des essais de carbonatation accéléré (selon la norme AFPC-AFREM (1997)	62
5.2.1. En fonction du temps	64
5.3. Interprétation des résultats	65
5.4. Conclusion	66
Conclusion générale	67
Bibliographie.....	68

Liste des figures

Figure 1.1: Déchets de Verre dans une décharge	3
Figure 1.2: Structure du quartz, verre de silice et de verre de silicate Na-Ca.	7
Figure 1.3: Le verre concassé dans une machine de recyclage	10
Figure 1.4:L'application actuelle et potentielle de produits en béton avec verre dans la construction.	13
Figure 1.5: Les étapes de recyclage des déchets de verre en des matériaux cimentaires et granulaires	14
Figure 1.6:Morphologie de la poudre de verre	15
Figure 1.7:Forme et taille de la particule de verre à 38 µm.	16
Figure 1.8: Image MEB d'une particule de verre montrant une formation RAS dans la frontière de la particule.....	18
Figure 1.9: Réaction Alkali-Silica se produisant à l'intérieur d'une particule de verre sodocalcique, tandis que la surface des particules est soumise à une réaction pouzzolanique.	18
Figure 1.10: Image MEB du béton sans poudre de verre à l'âge de 28 jours	21
Figure 1.11: Image MEB du béton avec 20 % de poudre de verre à l'âge de 28 jours	21
Figure 1.12: Image MEB du béton avec 40 % de poudre de verre à l'âge de 28 jours	22
Figure 1.13: le Tri de verre dans le processus de recyclage.....	24
Figure 2.1:Exemple d'un béton fissuré	27
Figure 2.2: Armature corrodée	28
Figure 3.1: Augmentation de la concentration du CO ₂ dans l'atmosphère à l'échelle mondiale	38
Figure 3.2: Mécanisme de carbonatation de Ca(OH) ₂	40
Figure 3.3:Variation des quantités de portlandite et de carbonate de calcium avec la durée d'exposition en air (20°C, 65 % HR)	41
Figure 3.4: Progression de la carbonatation	45
Figure 3.5: Exemples de corrosion par carbonatation et d'éclatement de béton d'enrobage.....	46
Figure 3.6: Gradient de pH en fonction de la profondeur carbonatée	47
Figure 3.7:Evolution du comportement des armatures et du béton d'enrobage	48
Figure 3.8: : Résultats expérimentaux et modèle prédictif de profondeur de carbonatation avec substitution de quantité de fumée de silice et de cendre volante.....	52
Figure 4.1: La poudre de verre	54
Figure 4.2: Enceinte climatique assurant l'homogénéisation.....	57
Figure 4.3: Mise en évidence de l'épaisseur carbonatée par la solution de phénolphthaléine	59
Figure 4.4: Principe de mesure de l'épaisseur carbonatée sur éprouvette 7/7/28.....	59
Figure 4.5: Existence des trois zones caractéristiques (carbonatée, mixte, saine)	60
Figure 5.1: Profondeur de carbonatation (E/L=0.55)	64
Figure 5.2: Profondeur de carbonatation (E/L=0.45)	64
Figure 5.3:Profondeur de carbonatation (E/L=0.40)	65

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Type de verre et ses principales utilisations	4
Tableau 1.2: Propriétés physiques des déchets de verre.....	5
Tableau 1.3: Composition chimique de différents types de verre	6
Tableau 1.4: Résultats de conductivité thermique.....	8
Tableau 1.5: La quantité des déchets de verre et le pourcentage de recyclage dans différents pays.....	9
Tableau 1.6: La composition chimique du ciment et des différents verres colorés.....	12
Tableau 3.1: Volume molaire de la calcite, de la vaterite, de l'aragonite et de la portlandite.....	43
Tableau 4.1: Caractéristiques techniques de la poudre de verre.....	55
Tableau 4.2: Composition chimique de la poudre de verre en %	55

Introduction

générale

Introduction générale

Avec le taux très important des déchets de verre non recyclés, l'orientation de déchets vers l'industrie du ciment et du béton demeure une solution pratique et économique, cependant savoir le comportement de ces matériaux vis-à-vis des agressions chimiques et prédire leurs durabilité reste nécessaire voire primordial.

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usages... etc) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes, sur l'expérience et sur des préconisations de mise en œuvre, de fabrication et d'entretien.

Aujourd'hui, la durabilité est appréhendée en considérant un ensemble de propriétés dont, bien sûr, la résistance mécanique à 28 jours. Les autres caractéristiques prises en compte visent à assurer l'adéquation entre les propriétés physico-chimiques du béton et les contraintes qui s'appliquent à l'ouvrage. Les caractéristiques à prescrire pour garantir la pérennité des ouvrages sont désormais plus complètes et plus précises.

La pérennité d'un ouvrage en béton et sa durabilité dans le temps, dépend de plusieurs paramètres liés d'une part à l'environnement (nature, concentration et renouvellement ou non des éléments agressifs) et d'autre part au matériau lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de fabrication et de cure). Il est généralement admis qu'un béton durable est un béton résistant aux agressions.

Pour évaluer la durabilité "potentielle" d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation et d'étudier la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations.

Un des problèmes que rencontre le béton visant une bonne durabilité est la carbonatation qui est un phénomène prépondérant dans les milieux contenant un taux élevé de CO_2 . La carbonatation est responsable de la dégradation des bétons armés et aussi de la mise à nu de leurs armatures en acier. Les barres d'acier, censées garantir cette résistance, gonflent sous l'effet

Introduction générale

de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage, ce dernier subit un retrait à cause de la carbonatation et les aciers sont alors mis à nu et continuent à se corroder.

Ce travail présente une étude concernant l'effet de la poudre de verre sur la durabilité en générale et la carbonatation en particulier comme suite de l'étude des propriétés mécaniques réalisé dans le projet de fin d'étude. Le manuscrit qui comprend cinq chapitres :

Le premier chapitre porte sur les études menées concernant l'utilisation des déchets de verre dans l'industrie cimentaire notamment l'utilisation de la poudre de verre et ses caractéristiques physico-chimiques.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique dans lequel il est mentionné la notion de durabilité.

Le troisième chapitre porte sur le phénomène de carbonatation et ses effets sur le béton.

Le quatrième chapitre traitera la partie expérimentale notamment l'essai de carbonatation accéléré et le mode opératoire de ce dernier.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus avec une discussion et une interprétation détaillée.

Une conclusion générale rappelant les principaux résultats obtenus et est donnée à la fin de ce travail.

Chapitre 1

Matériau cimentaire alternatif

La poudre de verre

1.1. Introduction

Le verre est un matériau transparent formé par la fusion d'un mélange de plusieurs composants tel que la silice, les carbonates de sodium et les carbonates de calcium dans des températures très élevées, suivi par un refroidissement durant lequel la solidification se produit sans cristallisation.

Quand les déchets du verre sont concassés/broyés jusqu'à obtenir un sable dont la taille de ses particules est similaire à celle du sable naturel, il présente presque les propriétés d'un agrégat. Le verre est produit sous différentes formes : verre d'emballage, verre de lampes et verre d'écran de tubes à rayons cathodiques (TRC) comme montré dans le tableau (2.1). (1)



Figure 1.1: Déchets de Verre dans une décharge (source : www.usinenouvelle.com)

L'utilisation des produits en verre a connu un accroissement ces dernières années, qui a engendré de grandes quantités de déchets de verre. Néanmoins il existe deux types de déchets de verre (les déchets colorés et les déchets incolores). La plus part des déchets incolores sont généralement recyclables mais les déchets de verre colorés représentent un taux de recyclage très bas, d'où l'orientation de ces déchets vers les décharges qui sont très souvent insuffisantes et pose ainsi de sérieux problèmes écologiques.

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Tableau 1.1: Type de verre et ses principales utilisations (1)

Type de verre	Principaux produits
Verre Sodocalcique	Bouteille Vaisselle Verre plat
Verre à base du plomb	Vaisselle en cristal Les écrans de télévision et les équipements à écran de visualisation
Verre en borosilicate	fibres de verre Isolation en laine plats pour les fours
Verres techniques par exemple ; Alumino silicate, Alkali barium	Scientifique Optique

Comme le verre n'est pas biodégradable les sites de décharges ne fournissent pas de solutions environnementales, d'où la nécessité de trouver une utilisation à ces déchets. Nous nous proposons dans ce qui suit d'introduire les principales propriétés du verre ainsi que son utilisation dans le béton notamment comme ajout cimentaire.

1.2. Propriétés des déchets de verre

1.2.1. Propriétés physiques

Les particules du verre concassées/broyées ont généralement une forme angulaire et peuvent contenir quelques particules longues et plates.

Le degré d'angularité et la quantité des particules plates et longues dépendent du processus du concassage/broyage. Les plus petites particules provenant du concassage et du broyage fins produisent un peu moins d'angularité et réduisent la quantité des particules longues et plates.

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Le verre non contaminé (clean) possède des propriétés consistantes, cependant les propriétés du verre provenant des installations de récupération sont plus variables. Le verre récupéré dans les installations de traitement des déchets peut avoir une densité spécifique de l'ordre de 2.5. Le degré de variabilité de cette valeur dépend du degré de contamination et il est reflété dans une plage de densités comme montré ci-dessous dans le tableau (2.2). (2)

Tableau 1.2: Propriétés physiques des déchets de verre (2)

Echantillon du verre	Densité spécifique	Perméabilité (cm/sec)
Grossier	1.96–2.41	$\sim 2 \times 10^{-1}$
Fin	2.49–2.52	$\sim 6 \times 10^{-2}$

Le verre concassé a un coefficient de perméabilité variant de 10^{-1} à 10^{-2} cm/sec. Donc on peut le considérer comme un matériau très perméable similaire au sable grossier.

L'actuel coefficient de perméabilité dépend de la graduation du verre, qui, à son tour, dépend du degré du processus de concassage pour lequel le verre est exposé. Il faut noter par ailleurs que la distribution des tailles des particules du verre peut varier considérablement.

1.2.2. Propriétés chimiques

Les composants du verre sont les éléments qui peuvent être convertis en verre lorsqu'ils sont combinés avec de l'oxygène. Le dioxyde de silicium (SiO_2) entrant dans la composition du sable, est l'élément le plus commun des différents types de verre.

Le verre commun contient généralement près de 70 % de SiO_2 . Les carbonates de sodium anhydride Na_2CO_3 qui agissent comme un agent fluxant dans la masse fondue, abaissent le point de fusion et la viscosité du verre formé, libèrent le dioxyde de carbone et aide l'écoulement du fondu. Le tableau (2.3) donne les différentes compositions chimiques du verre sodocalcique, verre à base du plomb et le verre en borosilicate.

Les bouteilles et les vitres sont généralement faites à partir du verre sodocalcique, pour les ampoules ainsi que pour les lunettes optiques on utilise le verre combiné avec du plomb (Lead-alkali-silicate glass). Le verre en borosilicate qui a une résistance chimique extraordinaire et des

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

points de ramollissements à hautes températures est utilisé dans la fabrication des outils de cuisson et matériels de laboratoire. (3)

Tableau 1.3: Composition chimique de différents types de verre

Constituent (%)	Verre sodocalcique (4)	Verre à base du plomb (4)	Verre en Borosilicate (5)
SiO_2	70–73	60–70	60-80
Al_2O_3	1.7–2.0	-	1-4
Fe_2O_3	0.06–0.24	-	-
Cr_2O_3 seulement dans le verre vert	0.1	-	-
CaO	9.1–9.8 1	1	-
MgO	1.1–1.7	-	-
BaO	0.14–0.18	-	-
Na_2O	13.8–14.4	7-10	4.5
K_2O	0.55–0.68	7	-
PbO	-	15-25	-
B_2O_3	-	-	10-25

La structure du verre peut être décrite à l'aide d'un cadre à deux dimensions de tétraèdres SiO_4 représentés schématiquement sur la Fig. 2. Selon la théorie de réseau proposée par Zachariasen (1932), les composants du verre peuvent être classés en trois groupes: (1) formateurs de réseau; (2) modificateurs de réseau; et (3) intermédiaires. Les formateurs des réseaux sont caractérisés par de faibles rayons ioniques, les valences ioniques les plus élevées possibles, et sont entourés par quatre atomes d'oxygène. Ensemble, avec des atomes d'oxygène, ils forment un réseau plus

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

ou moins désordonné à trois dimensions par des tétraèdres. Les énergies de liaisons entre ces formateurs de réseau et des atomes d'oxygène sont généralement plus élevées que 335 KJ / mol.

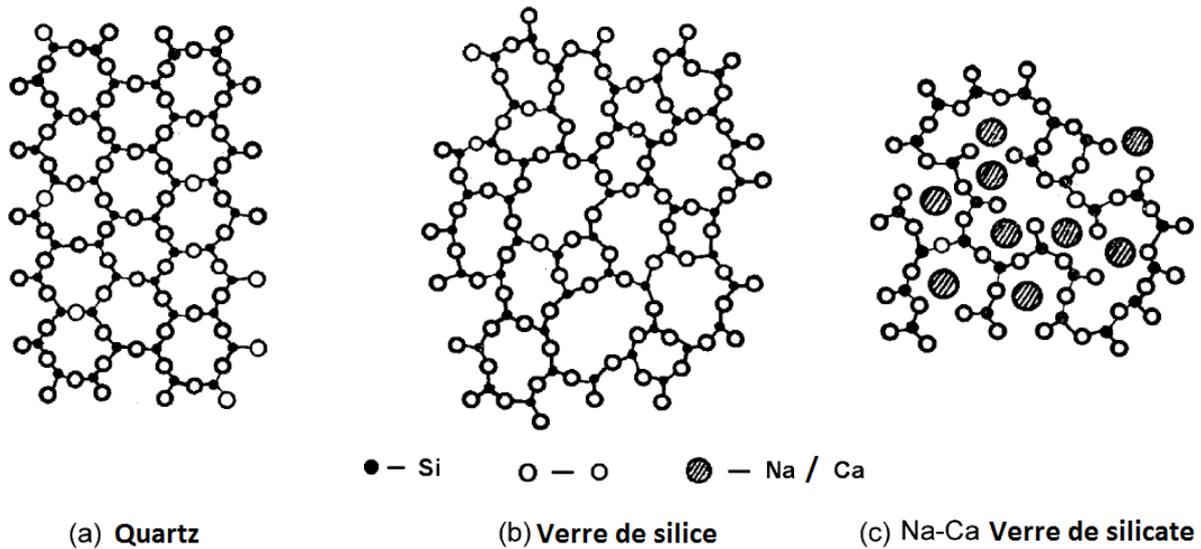


Figure 1.2: Structure du quartz, verre de silice et de verre de silicate Na-Ca. (6)

Les modificateurs du réseau ont les grands rayons ioniques. La présence d'un réseau modificateur désordonne et dépolymérise le réseau. Les énergies de liaison entre les modificateurs de réseau et les atomes d'oxygène sont généralement moins de 210 KJ/mol.

Les intermédiaires peuvent jouer le rôle à la fois de formateurs de réseau et des modificateurs. Les énergies de liaison des atomes d'oxygène varie de 210 à 335 kJ / mol. (7)

A partir des énergies de liaison des agents formateurs et modificateurs du réseau, on peut conclure que plus la quantité de formateurs de réseau est grande et plus le verre devient moins réactif.

1.2.3. Autres propriétés :

Le verre est connu pour sa basse conductivité thermique, les agrégats avec une conductivité thermique réduite peuvent aider à diminuer la profondeur de la pénétration au gel.

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Tableau 1.4: Résultats de conductivité thermique (2)

Matériau	Conductivité thermique apparente Watts/mètre °K	
	Echantillon 1	Echantillon 2
Verre concassé	0.315	0.260
Sable	0.463	0.683

Les résultats de conductivité thermique obtenus (tableau 2.4) montrent que le verre peut présenter une meilleure rétention de la chaleur par rapport aux agrégats.

1.3. Options de gestion :

1.3.1. Recyclage

Selon une estimation des Nations Unis pour l'année 2004, il y aurait autour de 200 millions de tonnes de déchets solides avec plus de 7 % de déchets de verre, ce qui équivaut à 14 millions de tonnes de déchets de verre et ce chiffre n'a cessé d'augmenter depuis. (1)

L'industrie du verre utilise une grande quantité des ressources naturelles de la terre comme matériaux bruts. Il est estimé que 1 Kg de verre plat consomme 1.73 Kg de matière brute et 0.15 m³ d'eau.

On a trouvé aussi que la production de chaque tonne d'emballage en verre consomme 1.2 tonne de matériaux bruts onéreux. De plus l'industrie du verre est considérée comme une des industries les plus intensives à cause du besoin d'une température supérieure à 1600 ° C pour fusionner les matières premières. Il est estimé que chaque Kg de verre plat produit 16.9 MJ de chaleur perdue.

La totalité d'Energie consommée par l'industrie du verre en Europe était de 352 PJ en 2007, qui représente entre 13 et 17 % de l'énergie consommée par l'industrie européenne totale.

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Par ailleurs, l'utilisation intensive de l'énergie induit une grande émission de CO_2 et d'autres gaz à effets de serres. Il a été constaté qu'en 2007 la production d'une tonne de verre produit 0.57 tonne de CO_2 .

Théoriquement le verre peut être complètement et infiniment recyclé sans perdre aucune de ses propriétés physiques et chimiques, mais le verre cassé et de couleurs mixtes rend difficile le processus de recyclage et coûteux, car ces matériaux peuvent causer une variation dans la composition chimique du verre recyclé. Les impuretés et les contaminants qui peuvent se trouver dans les déchets de verre avec couleurs mixte peuvent affecter les propriétés du nouveau verre produit. (8)

Le taux de recyclage des déchets de verre est très faible dans le monde entier, il est essentiellement concentré dans les secteurs du packaging et l'emballage. Le tableau (2.5) donne la quantité des déchets de verres ainsi que le pourcentage de la partie recyclée dans différents pays.

Tableau 1.5: La quantité des déchets de verre et le pourcentage de recyclage dans différents pays (9)

Pays	Déchets de verre (tonnes)	% du taux de recyclage	Année
Etas Unis	11 500 000	27	2010
Canada	116 000	68	2009
Singapour	72 800	29	2010
Suède	195 000 isolés	93	2010
	44 000 mixte	0	
Portugal	493 000	25	2001
Turquie	120 000	66	2004
Allemagne	3 200 000	94	2003

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Les déchets de verre représentent un challenge pour la gestion des déchets solides à travers le monde à cause du taux de recyclage bas mais aussi du manque des sites des décharges. L'industrie de la construction, plus précisément l'industrie du ciment et du béton peuvent fournir une solution importante et pratique pour l'impact environnemental des déchets de verre à cause de ses propriétés physiques et chimiques qui sont presque similaires à celle du ciment et du sable.



Figure 1.3: Le verre concassé dans une machine de recyclage
(source : www.emag.suez-environnement.com)

L'utilisation des déchets de verre dans la production du ciment et du béton conserve les ressources naturelles du globe, économise l'énergie et les coûts et réduit les émissions de CO_2 et autres gaz à effets de serres.

1.4. Les challenges de l'industrie cimentaire :

Le ciment est le matériau le plus utilisé pour tous les types de construction en béton, il est produit partout dans le monde. La production annuelle globale du ciment a atteint 2.8 milliards tonne et on prévoit une augmentation importante dans les prochaines années, d'où une production dépassant les 4 milliards de tonne/an à cause de la croissance dans différents pays comme la Chine, l'Inde, le Moyen Orient et l'Afrique du Nord.

Le type de ciment le plus utilisé est le ciment Portland il est composé essentiellement du Calcaire ($CaCO_3$) des Silicates (SiO_2), de l'oxyde de Magnésium (MgO), des alumine (Al_2O_3) et d'oxyde du fer (Fe_2O_3).

Théoriquement, chaque matériau qui possède tous ces oxydes peut être utilisé comme élément entrant dans la production du ciment Portland. Il existe deux processus de production du

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

ciment : la voie humide et la voie sèche. La sélection de l'une de ces deux méthodes dépend des propriétés des matières premières, leurs coûts et leurs disponibilités. Mais ce qui est sûr c'est que les deux processus consomment beaucoup d'énergie notamment pour la cuisson du clinker.

De nos jours, l'industrie du ciment fait face à beaucoup de challenges comme l'augmentation des coûts des carburants et de l'énergie. La nécessité de réduire la grande quantité des émissions de gaz à effets de serre notamment les émissions du CO₂, les coûts élevés des matières premières et l'approvisionnement en matériaux avec des quantités suffisantes et qualités satisfaisantes.

Avec la croissance de la production annuelle du ciment, les enjeux vont en découler. L'industrie cimentaire fera donc face à des pressions régulières pour trouver des solutions ou minimiser les effets de ces enjeux à un rang acceptable.

L'industrie du ciment est considérée comme une des grandes industries intensives. Le cout de l'énergie pour la production du ciment peut atteindre 40% de ses couts variable et même 50 à 60 % dans certains pays. (9)

Une des plus grandes industries responsables des émissions de gaz à effets de serre est l'industrie cimentaire avec plus de 7 % des émissions totale de CO₂ dans le monde.

La réduction des quantités de clinker dans le ciment peut s'avérer une des solutions pour réduire les émissions du CO₂.

L'utilisation des déchets dans la production du ciment et du béton en tant qu'ajouts cimentaires peut sauvegarder les ressources naturelles de notre monde, réduit le coût de la production du ciment, les émissions des gaz à effets de serre et l'impact environnemental de ces déchets solides notamment les déchets de verre à cause de leur nature non biodégradable.

1.5. Les déchets de verre dans la production du ciment et béton

Différents déchets ont été utilisés dans la production du ciment et du béton comme le laitier des hauts fourneaux, la fumée la silice, l'argile et les déchets de verre.

La composition chimique des différents déchets de verre de couleurs différentes montre que le verre a une large quantité de silicate et une bonne quantité de calcium comme montré dans le tableau (2.6). Avec sa structure amorphe, le verre a la capacité d'être une pouzzolane ou même un matériau cimentaire.

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Tableau 1.6: La composition chimique du ciment et des différents verres colorés (9)

Composition chimique	Ciment (%)	Verre transparent (%)	Verre ambré (%)	Verre vert (%)	Verre concassé (%)	Poudre de Verre (%)	Sable (%)
SiO_2	20.2	72.42	72.21	72.38	72.61	72.20	78.6
Al_2O_3	4.7	1.44	1.37	1.49	1.38	1.54	2.55
CaO	61.9	11.50	11.57	11.26	11.70	11.42	7.11
Fe_2O_3	3.0	0.07	0.26	0.29	0.48	0.48	2.47
MgO	2.6	0.32	0.46	0.54	0.56	0.79	0.46
Na_2O	0.19	13.64	13.75	13.52	13.12	12.85	0.42
K_2O	0.82	0.35	0.20	0.27	0.38	0.43	0.64
SO_3	3.9	0.21	0.10	0.07	0.09	0.09	-
TiO_2	-	0.035	0.041	0.04	-	-	0.15
Perte Au Feu (PAF)	1.9	-	-	-	0.22	0.36	7.6

La structure non biodégradable gêne étroitement la mise des déchets de verre en décharges ; aussi l'industrie du ciment et du béton peuvent fournir une solution adéquate pour une gestion environnemental de ces déchets.

De nombreuses études ont été faites à propos de l'utilisation des déchets de verre dans l'industrie du ciment et du béton. Dans certains travaux ils ont été utilisés comme agrégats, dans d'autres comme ajouts cimentaire. Certaines études ont même essayé de combiné les deux c.à.d. comme agrégats et ajout cimentaire dans le même mélange.



Figure 1.4:L'application actuelle et potentielle de produits en béton avec verre dans la construction. (10)

1.6. L'utilisation des déchets de verre comme remplacement de ciment

L'utilisation des déchets de verre comme agrégats dans la production des bétons est très limitée et n'a pas produit de résultats satisfaisants à cause des réactions Alkali-Silica (RAS) entre le ciment et les agrégats en verre mais aussi à cause des performances produites. Les propriétés pouzzolaniques du verre à suscité la curiosité d'utiliser le verre comme ajout cimentaire ou matériau cimentaire dans la production du béton. Il faut noter aussi que les propriétés pouzzolaniques sont étroitement liées aux tailles des particules du verre.

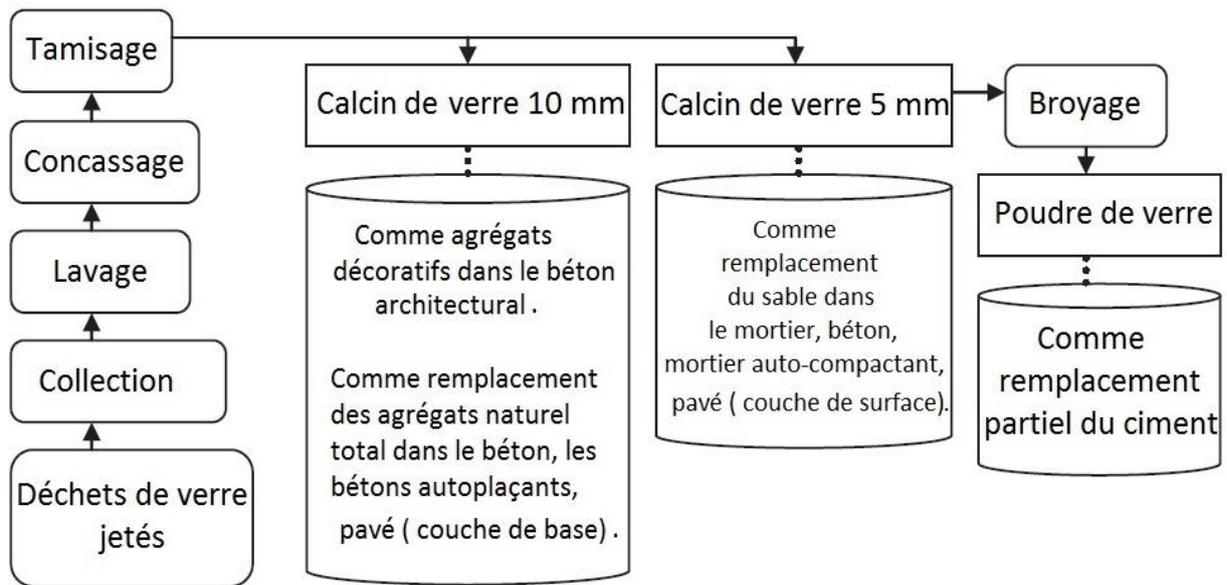


Figure 1.5: Les étapes de recyclage des déchets de verre en des matériaux cimentaires et granulaires (10)

1.7. L'effet des tailles des particules du verre :

Toutes les études menées jusqu'à présent sont d'accord sur le fait que la taille des particules du verre a une influence directe sur le ciment et le béton, seules les particules $< 38 \mu\text{m}$ développent des propriétés pouzzolaniques et procurent au béton des résistances mécaniques appréciables dépassant celles obtenues sur des bétons à 100 % ciment Portland.

Il a été également observé que les expansions RAS sont remarquablement réduites avec la diminution des tailles de particules de verre. Cette diminution contribue aussi à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des bétons notamment la résistance à la compression, à la flexion et à la traction. (11)

1.8. Poudre de verre et son influence dans le béton

Dans ce qui va suivre on s'intéressera à la poudre de verre et notamment à la réaction pouzzolanique induite par cette dernière. Il faut savoir que les dimensions des particules de verre ont une relation directe avec l'activité pouzzolanique qui n'est obtenue que pour des particules très fines. Il faut aussi noter que la présence de la poudre de verre dans le béton renforce les propriétés plastiques de ce dernier et cela est dû à l'amélioration de la texture mais aussi à la forme des particules du verre.

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

1.8.1. Pourcentage de substitution du ciment

L'utilisation de la poudre de verre demeure bien moins chère que le ciment, elle réduit la densité du béton et lui permet d'atteindre des résistances appréciables à moyen et long terme. Cette utilisation doit rester modérée, un ajout très important peut s'avérer néfaste au béton notamment en ce qui concerne l'ouvrabilité qui diminue avec la réduction du module de finesse. Un pourcentage de 10 à 20 % de la poudre de verre de la masse totale du ciment est cependant un dosage adéquat et permettrait d'obtenir des résultats satisfaisants. (12)

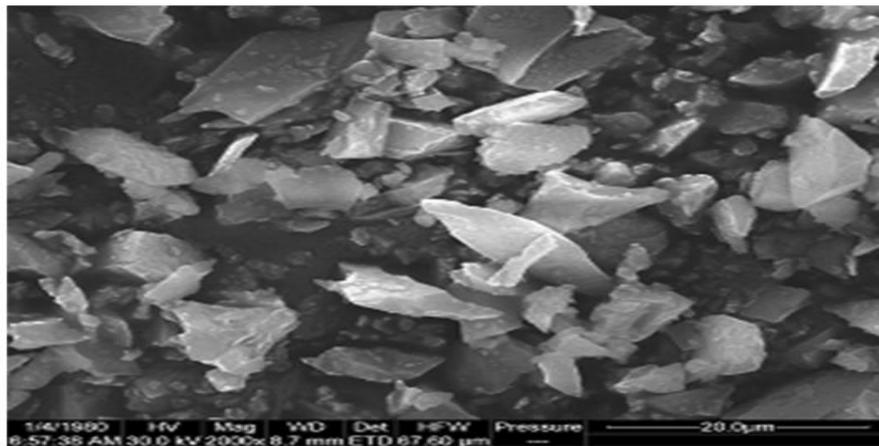


Figure 1.6:Morphologie de la poudre de verre (13)

La poudre de verre offre au béton une meilleure résistance à la compression à moyen et à long terme mais aussi une bonne résistance à la flexion, et une amélioration du module d'élasticité ainsi qu'une nette diminution du retrait. En incorporant de la poudre de verre dans le béton cela contribuera à la diminution de la ségrégation et une bonne ouvrabilité du béton.

1.8.2. L'activité pouzzolanique de la poudre de verre

Le béton contenant de la poudre de verre n'atteint pas les résistances souhaitées à jeune âge, la poudre de verre libère seulement une petite fraction des ions de sodium (Na^+) dans la solution et cette quantité est insuffisante pour accélérer les premières réactions et former l'ettringite et ainsi augmenter la résistance du ciment les premiers temps, néanmoins la résistance commence à s'améliorer considérablement après 28 jours suite à la substitution des ions de calcium (Ca^{2+}) par ces mêmes ions de sodium (Na^+) dans la formation du C-S-H gel. (14)

Pour que la poudre de verre ait une activité pouzzolanique elle doit être finement broyée de telle sorte que le D_{max} de la poudre soit inférieur à 38 μm selon la norme ASTM C618, es

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

particules de dimensions supérieures sont susceptibles de causer les réactions Alkali-Silica que nous définirons par la suite.

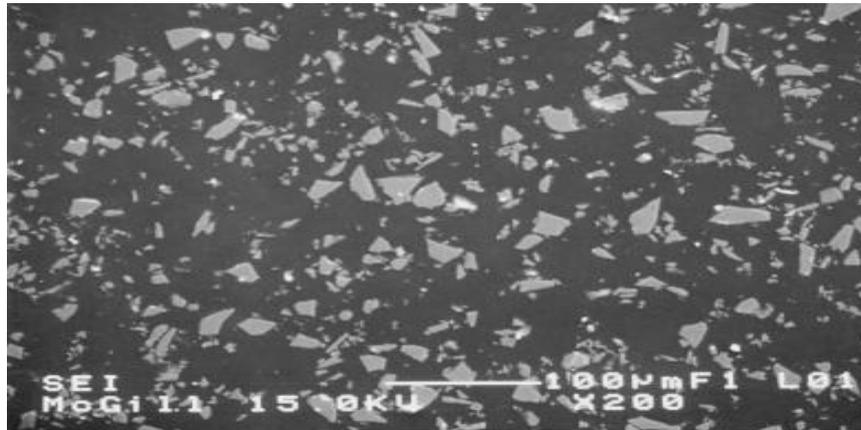


Figure 1.7: Forme et taille de la particule de verre à 38 µm. (11)

Pour qu'un matériau ait une activité pouzzolanique, la pâte (matériau + Chaux) doit avoir une résistance minimale de l'ordre de 4.1MPa après 7 jours de cure dans une température de 54°C et après 21 jours additionnels d'immersion dans une eau de 23°C. Il faut aussi ajouter à cela une surface de Blaine supérieure à 400(m²/Kg). (11)

1.8.3. Les réactions Alkali-Silica (RAS)

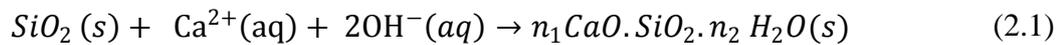
Plusieurs études ont été menées sur les Réactions Alkali-Silica (ASR) qui sont susceptibles non seulement de rompre les liaisons entre les liants et les agrégats notamment en milieu humide, mais de créer aussi des pressions internes capables de produire l'expansion et la dégradation du béton par rupture du ciment.

La présence massive des Alcalins provoque les RAS s'ils réagissent avec la Silice présente dans la solution, bien que la poudre de verre contienne plus d'alcalins que le ciment les expansions RAS sont moins que celles du ciment, cela peut s'expliquer par le fait que les alcalins présents dans la poudre de verre sont consommés dans la formation du C-S-H dans la réaction pouzzolanique qui se fait bien avant les RAS.

En fonction de plusieurs facteurs, notamment la teneur en calcium, la taille des particules, et l'alcalinité, la silice dissoute va se polymériser en gel expansif, s'hydrater en C-S-H, ou une combinaison des deux. Un mécanisme théorique suggère qu'à tout moment dans un béton contenant soit des granulats réactifs ou un matériau pouzzolanique, le gel de la RAS et le C-S-H, peuvent être trouvés. Selon ce mécanisme, la disponibilité des ions de calcium en combinaison

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

avec un taux relativement élevé des formations C-S-H favorisera la réaction pouzzolanique, et au fil du temps, tout produit de la RAS prendra la forme du C-S-H. Lorsqu'elle réagit comme une pouzzolane la poudre de verre se comportera comme indiqué dans l'équation (2.1), et le produit sera un type de silicate de calcium hydraté.



Lorsque la réaction du verre produit un gel RAS, l'équation chimique est similaire, néanmoins, le calcium peut être substitué par le sodium, le potassium ou autres alcalins comme c'est le cas dans l'équation (2.2).



Le produit final est probablement semblable à un précipité de la composition donnée dans l'équation (2.3), avec l'existence d'une matrice de silicate de calcium hydraté avec un rapport Na_2O/SiO_2 proche de 0.19.



La poudre de verre contribue au changement de concentration des ions d'hydroxyde (OH^-) considérés comme la cause directe de la réduction des expansions dues aux RAS.

Ce système peut être à l'origine de la variabilité dans les propriétés de gonflement des produits RAS. Le mécanisme qui permet une distinction entre les produits pouzzolaniques et les produits RAS peut être simplement la quantité d'agrégat ou la taille des particules de la source de silice. La facilité avec laquelle les ions calcium peuvent atteindre la réaction pouzzolanique conduit à un produit plus stable et une expansion réduite. (15)

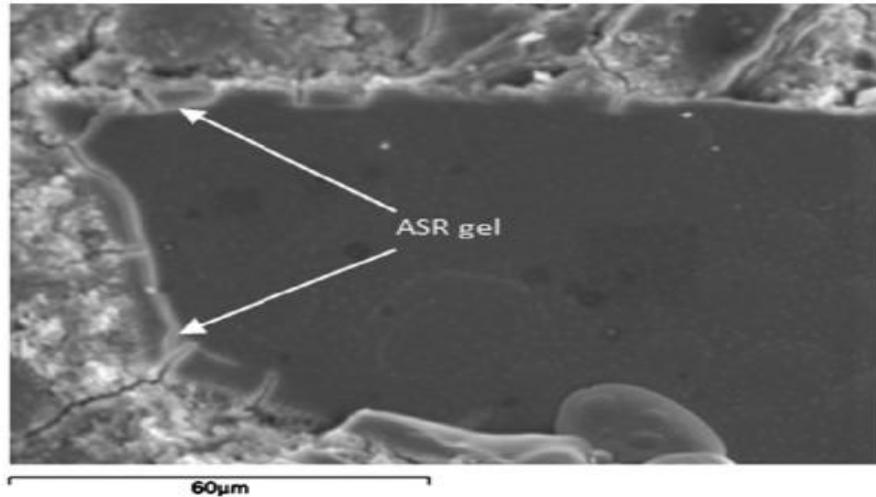


Figure 1.8: Image MEB d'une particule de verre montrant une formation RAS dans la frontière de la particule (16)

La surface extérieure des particules de la poudre de verre, où précipite le $Ca(OH)_2$, subit une réaction pouzzolanique. Tandis que la surface interne des particules (les microfissures internes) subit une détérioration par les ASR. (17)

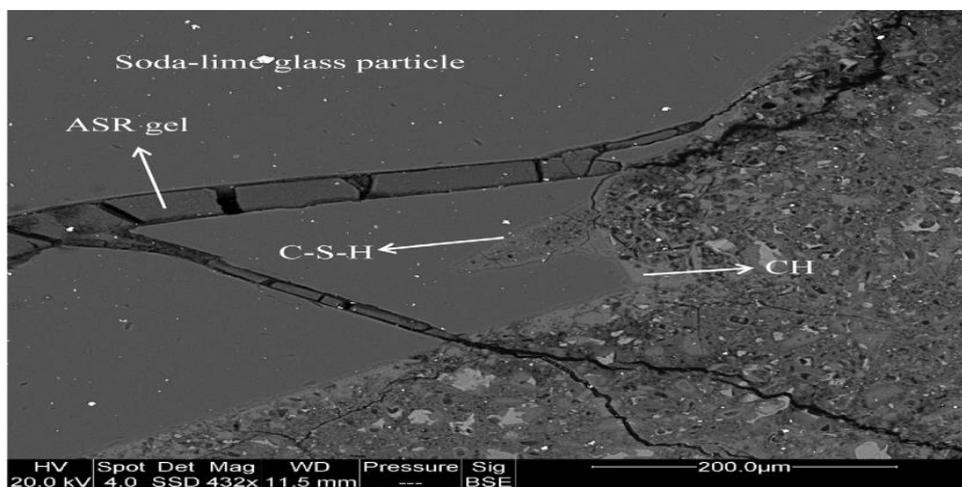


Figure 1.9: Réaction Alkali-Silica se produisant à l'intérieur d'une particule de verre sodocalcique, tandis que la surface des particules est soumise à une réaction pouzzolanique. (17)

La taille du verre et sa couleur ont une grande influence sur les réactions ASR, un broyage très fin et une utilisation du verre de couleur verte peut nettement améliorer la résistance à la réaction Alkali-Silica grâce à l'oxyde de chrome (Cr_2O_3) ajouté lors de la fabrication des bouteilles vertes. (18)

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Pour éviter les réactions (RAS) on doit respecter les précautions suivantes :

- Utiliser une poudre de verre dont le D_{max} est inférieur à 38 μm (Plus la poudre de verre a un $D_{max} < 38 \mu m$ plus son activité pouzzolanique est importante).
- Utiliser une poudre de verre riche en silicates SiO_2 et contient de faibles quantités d'oxyde de calcium CaO.
- Utiliser une poudre de verre de couleur verte qui est riche en oxyde de chrome, ce dernier a un effet réductif sur les RAS.

1.8.4. La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans le béton

Une réaction pouzzolanique est le résultat d'interaction entre un matériau siliceux amorphe (la poudre de verre, la fumé de silice, les cendres volantes ...) et l'hydroxyde de calcium, cette réaction conduit à la formation d'hydrates de silicate de calcium (C-S-H) comme produit principal. (19)

La différence entre la résistance à la compression au jeune âge entre un béton à la poudre de verre et un béton ordinaire (celle du béton ordinaire est plus importante) est due à la vitesse lente de la réaction pouzzolanique par rapport à la vitesse d'hydratation et ceci à cause de plusieurs facteurs.

Les facteurs qui influencent la vitesse des réactions pouzzolaniques sont les suivants :

- La composition et la cristallinité de l'ajout ;
- La taille des particules des ajouts (la finesse) ;
- Le PH de la solution interstitielle ;
- Les conditions de prise (la température et l'humidité) ;

Le taux de dissolution de la silice amorphe est le facteur principal pour la détermination de la vitesse de la réaction pouzzolanique. La poudre de verre libère une petite fraction de ses alcalis dans les pores. L'activation alcaline peut améliorer la cinétique de la réaction pouzzolanique. L'activation alcaline peut améliorer la cinétique de la réaction pouzzolanique. (19)

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Le CSH peut avoir plusieurs composition et structures. Le facteur important, qui influe la composition et les propriétés du CSH résultant, est la concentration des éléments réactives dans la solution interstitielle et particulièrement le calcium (Ca) et la silice (Si).

Si le système est riche en Calcium (durant l'hydratation du ciment) le CSH produit est similaire au Jennite comme montré dans l'équation (2.4) :



Cependant dans un système où la concentration du Calcium est faible et la concentration du Si est élevée (durant la réaction pouzzolanique) le CSH produit est similaire au tobermonite , équation (2.5)



Durant les premières étapes de la réaction pouzzolanique la masse de la poudre de verre réagit par unité de CH consommé est faible ceci entraîne la formation d'un CSH avec un rapport Ca/Si élevé (c.-à-d. un C-S-H avec une faible cristallinité). (17)

1.8.5. Effet de la température de durcissement sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre dans les matériaux à base du ciment (13)

La température de durcissement a des effets non négligeables sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre. Une haute température de durcissement est bénéfique pour le développement de la résistance à la compression pour les pâtes de ciment avec poudre de verre parce qu'elle peut à la fois, favoriser l'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique de verre simultanément.

La température de durcissement relativement élevée peut en partie compenser la baisse de la résistance due à un surdosage de la poudre de verre.

Lors de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre une partie de l'hydroxyde de calcium (CH) est consommée, la teneur en CH diminue avec l'augmentation de la quantité de poudre de verre, d'où une haute température de durcissement peut contribuer à améliorer la réaction pouzzolanique en permettant une meilleure consommation du CH.

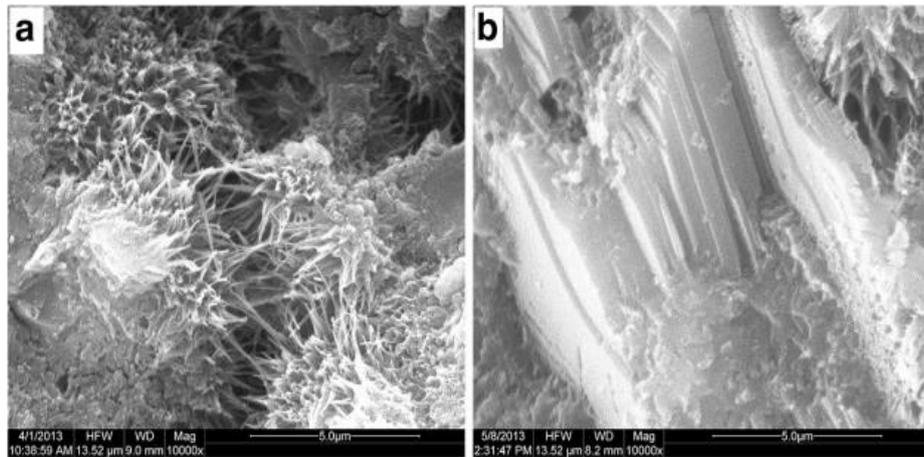


Figure 1.10: Image MEB du béton sans poudre de verre à l'âge de 28 jours
(a/ 20 °C et b °40) (13)

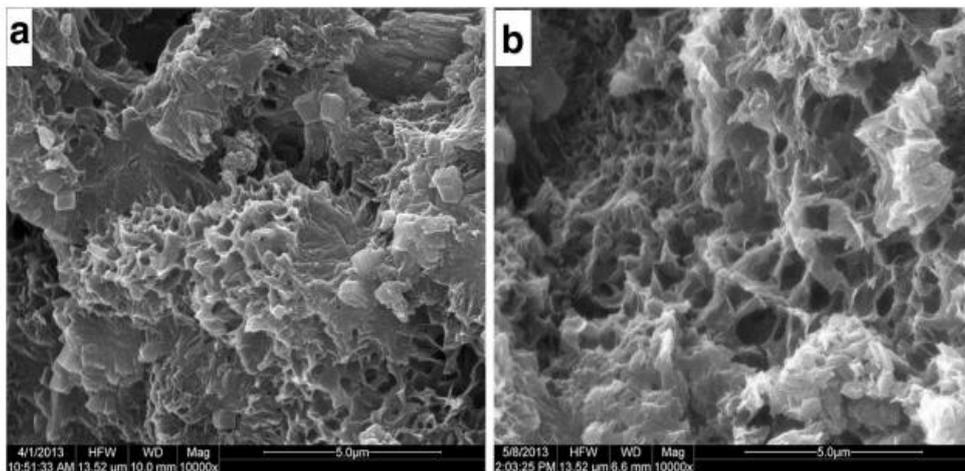


Figure 1.11: Image MEB du béton avec 20 % de poudre de verre à l'âge de 28 jours
(a-20 °C et b - 40°C) (13)

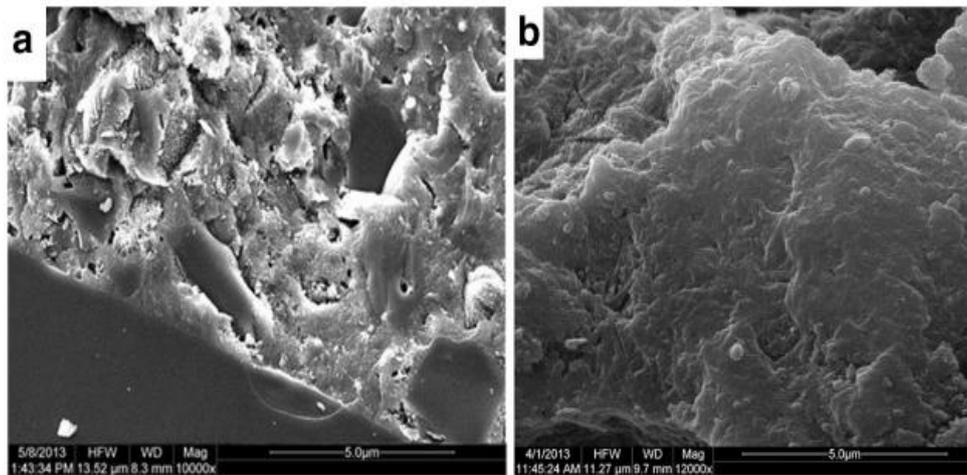


Figure 1.12: Image MEB du béton avec 40 % de poudre de verre à l'âge de 28 jours
(a-20 °C et b - 40°C) (13)

La microstructure de la pâte de ciment contenant de la poudre de verre sous une haute température est plus dense car la réaction pouzzolanique y est favorisée. Une grande quantité de gel C-S-H existe. Les particules de la poudre de verre non hydratée vont jouer le rôle de micro-agrégats et ne généreront pas des risques RAS.

Une haute température de durcissement est bénéfique pour l'activation pouzzolanique de la poudre de verre. Elle peut fournir une base théorique pour l'application de la poudre de verre dans les produits préfabriqués en béton, béton de masse ou même la construction en béton élaboré pendant la saison chaude.

1.9. Comparaison entre la poudre de verre et les cendres volantes

A titre comparatif on a pu constater que l'activité pouzzolanique de la poudre de verre est meilleure que celle des cendres volantes, La poudre de verre contient des quantités de SiO_2 , CaO , Na_2O , est plus importantes et de faibles quantités d' Al_2O_3 .

Pour un remplacement de l'ordre de 10% et entre 14 et 28 jours la teneur en eau non évaporée de la pâte de ciment contenant de la poudre de verre est plus grande que celle de la pâte de ciment renfermant des cendres volantes, ce qui améliore l'hydratation de cette dernière du fait de la faible absorption de l'eau de la poudre de verre entre 14 et 28 jours.

Chapitre 1 : Matériau cimentaire alternatif : La poudre de verre

Entre 28 et 90 jours la teneur en eau non évaporée de la pâte du ciment renfermant des cendres volantes augmente grâce à la seconde hydratation par contre la teneur en eau non évaporée de la pâte de ciment contenant de la poudre de verre reste presque la même. (19)

On peut déduire que la poudre de verre améliore l'hydratation principalement au début contrairement à la cendre volante qui améliore l'hydratation un peu plus tard. Ceci est dû à la teneur élevée en Alcalins dans les verres sodocalciques, cela procurera au béton ainsi élaboré une meilleure résistance à moyen terme que celui conçu avec des cendres volantes.

1.10. Les avantages environnementaux et économiques de l'utilisation de la poudre de verre

La réutilisation des déchets de verre dans la production du ciment et du béton présente de nombreux avantages:

- Réduction des coûts d'élimination des déchets, qui sont susceptibles d'augmenter en raison de la taxe appliquée par les décharges.
- Protection de l'environnement en économisant de grandes quantités de matières premières chaque année.
- Prolongement de la vie de nos sites de décharge, et conservation des campagnes.
- Economie d'une quantité importante d'énergie et réduction de l'émission des gaz à effet de serre et d'autres polluants atmosphériques émis lors de la fabrication du clinker.
- Accroissement de la sensibilisation du public au problème des déchets et des avantages du recyclage.
- Offre de nombreuses autres utilisations de produits recyclés à base de verre, sans compromis sur le coût ou la qualité.



Figure 1.13: le Tri de verre dans le processus de recyclage (source : www.syndicatvaldeloir.fr)

Les avantages économiques de la réutilisation des déchets de verre recyclés en production de ciment et de béton peuvent aussi être très importants. Aux États-Unis, la redevance de déversement aux sites d'enfouissement varie généralement de 40 \$ à 100 / tonne de déchets, tandis que les agrégats de béton coûtent environ \$ 5-15 / tonne. Les matériaux cimentaires supplémentaires coûtent environ 30-80 \$ / tonne. Le coût de broyage peut varier de 15 \$ à 30 / tonne en fonction de l'échelle de production.

1.11. Conclusion

Les études menées montrent qu'il existe un grand potentiel pour l'utilisation des déchets de verre dans le béton sous de nombreuses formes, à savoir comme agrégat fin, agrégat grossier et poudre de verre. Cette dernière forme fournira beaucoup plus de possibilités pour une valeur ajoutée et un amortissement des coûts, bien qu'elle puisse être utilisée comme une substitution à des matériaux coûteux tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le ciment. L'utilisation de la poudre de verre finement broyé dans le béton réduira considérablement les Réaction Alkali-Silica (RAS). Un gain en résistance significatif dans le béton a été observé lors de l'utilisation de la poudre de verre. Les examens des microstructures ont également montré que la poudre de verre produit une matrice dense et améliore les propriétés de durabilité du béton. Des substitutions du ciment jusqu'à 23 % en poudre de verre peuvent être élaborées sans effets néfastes sur le matériau à long terme.

Chapitre 2

La durabilité des bétons

2.1. Introduction

La durabilité du béton est un fait reconnu et attesté par la pérennité des ouvrages exposés à des conditions variables climatiques ou d'environnement tel que les autoroutes sollicitées par un trafic intense, les viaducs soumis à l'action du gel et des sels de déverglaçage, ainsi que les plates formes off-shore en milieu marin.

Ces ouvrages usuels résistent aux multiples agressions physico-chimiques au fil des années. Néanmoins, il se peut que des défauts de conception ou de mise en œuvre et des causes accidentelles ou bien même la nature des matériaux utilisés soient une source de désordres.

On peut dire donc que la notion de durabilité est indissociable de celle de qualité à tous les niveaux et, en particulier, de celle du matériau béton.

L'exigence de qualité est devenue aujourd'hui une nécessité primordiale notamment par sa contribution économique en limitant les coûts de maintenance mais aussi d'assurer un bon fonctionnement et une bonne qualité synonyme de conformité aux normes.

Les progrès considérables de la connaissance de la minéralogie et de la microstructure des bétons, celle des adjuvants et des additions minérales ont ouvert des perspectives de plus en plus fines aux réponses en termes de durabilité.

La démarche performante, par le choix d'indicateurs de durabilité et de critères de performance des bétons, permet de définir des objectifs de durabilité compatibles avec le milieu environnant et avec la durée de service envisagée.

2.2. Les facteurs influant sur la durabilité (20)

2.2.1. Les facteurs propres au matériau béton

2.2.1.1. La porosité du béton

Le béton est un mélange composé d'un ensemble de constituants – ciment, granulats, eau, adjuvants –, mais renfermant aussi des vides dus, entre autres, à l'eau excédentaire. Le béton durci courant présente une porosité de 10 à 12 % due à la présence de pores inclus dans la texture

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

même des hydrates, et de capillaires qui se développent dans la structure des grains. Les capillaires, qui sont dimensionnellement les plus importants, ne dépassent pas un diamètre de quelques microns. Les pores des hydrates sont 10 à 100 fois plus petits. Le comportement du béton et son évolution ont montré, dès l'origine, l'influence de la porosité sur la résistance. Mais les corrélations entre durabilité et résistances mécaniques, entre absorption d'eau et résistance au gel, ou perméabilité et carbonatation ont été mises en évidence plus récemment. Il est aujourd'hui admis que la réduction de la porosité du béton, qui est, entre autres, la condition pour réaliser des bétons de hautes performances, est requise pour l'amélioration de la résistance du béton, aussi bien d'un point de vue mécanique que vis-à-vis d'agressions d'ordre physico-chimique.

La réduction de la porosité du béton dépend principalement de sa conception et de sa mise en œuvre. Trois facteurs sont prépondérants dans la conception d'un béton de faible porosité :

- un dosage en ciment adéquat ;
- une faible teneur en eau ;
- une granulométrie comportant des éléments fins, éventuellement actifs, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

Les progrès réalisés dans la connaissance des adjuvants ont permis d'élaborer des plastifiants qui autorisent des réductions importantes de la teneur en eau sans diminuer la plasticité du mélange. Une étude correcte de la granulométrie du béton, jouant sur le ciment et le sable, est généralement suffisante et ne nécessite un recours à des particules ultrafines que pour des bétons de très hautes performances.

Il faut enfin souligner l'importance de la mise en œuvre du béton sur ses propriétés : un malaxage efficace, une vibration appropriée, un bon enrobage et la cure pour les ouvrages horizontaux, sont des conditions impératives de réalisation d'un béton durable.

2.2.1.2. La fissuration

Il faut savoir que le caractère non préjudiciable de la plupart des fissures qui, correctement maîtrisées par des armatures ou des joints qui en déterminent l'emplacement et en limitent l'ouverture, n'ont pas d'influence sur la durabilité du béton. La réglementation, notamment en matière de béton armé, prévoit le dimensionnement des ouvrages et les dispositions propices à empêcher ou à contrôler efficacement la fissuration potentielle. Seules, les fissures non

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

contrôlées à caractère fortuit sont susceptibles de jouer un rôle négatif. Les principales causes de fissuration sont les suivantes:

- retrait de la pâte de ciment ;
- conditions thermiques et hygrométriques ;
- causes mécaniques.



Figure 2.1:Exemple d'un béton fissuré (source : www.lamy-expertise.fr)

La pâte de ciment subit différentes phases de déformation aux stades successifs de l'hydratation : préprise, prise et durcissement. Chacune des phases de déformation est liée à un mécanisme prépondérant qui génère un gradient de température ou d'humidité dans le béton. Les facteurs qui influent sur les trois phases de déformation peuvent être groupés en quatre catégories principales, qui concernent plus particulièrement :

- la composition du béton, l'interdépendance des constituants, la cinétique d'hydratation ;
- la mise en œuvre du béton : fabrication, mise en place, vibration, cure ;
- la géométrie de l'ouvrage ;
- le milieu environnant.

Le soin apporté à la formulation du béton, et à sa mise en oeuvre, et la prise en compte des conditions extérieures permettront, dans la quasi-totalité des cas, de prévenir l'apparition d'une fissuration préjudiciable à sa durabilité.

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

2.2.1.3. La corrosion des armatures

Dans des conditions normales, les armatures enrobées de béton sont protégées de la corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface du métal, d'une pellicule protectrice de ferrite Fe_2O_3CaO . Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. Tant que la présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures, celles-ci sont protégées. Plusieurs agents peuvent neutraliser cette protection: le gaz carbonique, les chlorures, les sulfates, mais aussi l'eau pure. La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers agents est en relation directe avec la porosité du béton et avec la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou de liquides agressifs.

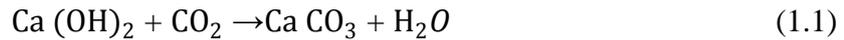


Figure 2.2: Armature corrodée (source : www.lamy-expertise.fr)

➤ *Phénomène de carbonatation*

La carbonatation constitue un phénomène qui a fait l'objet de nombreuses recherches et est maintenant bien connu. En présence du gaz carbonique de l'air, la chaux libérée (portlandite) se carbonate suivant l'équation (1.1) :

Chapitre 2 : La durabilité des bétons



Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier. La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur, mais se trouve freinée par la formation des carbonates. La vitesse de progression de la carbonatation diminue donc avec la profondeur atteinte.

Cette progression est en fait modifiée par des facteurs liés au béton lui-même – nature et dosage du liant, dosage en eau, porosité du béton – et au milieu. L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximum pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou saturée.

La carbonatation est maximale lorsque l'humidité relative est modérée (cycle séchage/humidité). Après environ 30 ans, la profondeur de carbonatation dans un béton d'ouvrage peut varier de 1 à 30 mm suivant la compacité du béton, la fissuration de peau et le milieu environnant.

La corrosion induite par carbonatation est donc fonction de :

- l'exposition des parements au CO_2 et à l'eau
- la qualité du béton en place (compacité) et notamment en parement avec l'absence de ségrégation, de bullage ou de fissuration (retrait gêné, dessiccation).
- l'enrobage du premier lit d'armature

➤ *Phénomène de pénétration des chlorures*

En pénétrant dans le béton par diffusion, les chlorures réagissent avec les hydrates (Ca(OH)_2 notamment) de la pâte de ciment, ce qui conduit à la dépassivation et à la corrosion des armatures. La pénétration des chlorures est favorisée par des cycles séchage/humidité également. Seuls les chlorures libres (solubles dans l'eau) peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de corrosion des armatures.

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

On définit un seuil critique $[Cl^-]_{critique} = 0,4\%$ par rapport à la masse de ciment soit $0,04$ à $0,1\%$ par rapport à la masse de béton. Lorsque $[Cl^-] > [Cl^-]_{critique}$ au voisinage des armatures, le phénomène de corrosion s'initie. La corrosion induite par la pénétration des chlorures est donc fonction de :

- la quantité initiale de chlorures dans le béton → liée au choix de la classe de chlorures du béton
- l'exposition des parements aux chlorures et à l'eau.
- la qualité du béton en place (compacité), et notamment en parement avec l'absence de ségrégation, de bullage ou de fissuration (retrait gêné, dessiccation).
- l'enrobage du premier lit d'armature

Dans les atmosphères industrielles, ou même urbaines, l'eau de pluie entraîne des composés chimiques qui peuvent diffuser dans le béton et attaquer le métal des armatures. En particulier, le dioxyde de soufre ou les oxydes d'azote provenant des moteurs d'automobiles peuvent entraîner une acidification des pluies (pH de l'ordre de 3 ou 4) qui deviennent particulièrement agressives pour le béton et pour les armatures. Les eaux chargées en sels tels que les chlorures (milieu marin) ou les sulfates (certaines eaux souterraines) provoquent une corrosion importante des armatures que peut empêcher un bon enrobage de béton.

2.2.1.4. Les réactions alcalis-granulats

Ce phénomène exceptionnel ne peut intervenir que si plusieurs conditions sont remplies simultanément: utilisation de certains granulats siliceux dits « réactifs », un environnement fortement humide, une teneur en alcalis du béton élevée et un béton insuffisamment compact. Les (RAG) constituent une famille de réactions dans le béton entre les ions alcalins contenus dans les pores du ciment et les granulats. Elles conduisent à l'attaque des agrégats et à la formation de gels hydrophiles. Cette attaque se traduit par une diminution des propriétés mécaniques du béton (résistance à la compression, à la flexion, modification du module d'Young), un gonflement caractéristique et une fissuration du béton.

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

2.2.2. Les facteurs externes

2.2.2.1. Les ambiances chimiquement agressives

Les acides, certaines solutions salines ou même des solutions basiques peuvent entraîner la dissolution de la chaux et la formation de composés qui, lorsqu'ils sont solubles, sont à l'origine d'altérations. Les constituants du béton, ses caractéristiques et les conditions climatiques ambiantes influent sur ces différentes actions et en modifient l'importance. Les eaux souterraines sulfatées constituent un cas d'agression bien connu : le sulfate de calcium se combine avec les aluminates du ciment pour former un sel, l'ettringite, dont la cristallisation accompagnée d'expansion provoque la fissuration du béton. Elle facilite la pénétration des agents agressifs jusqu'aux armatures qui sont, à leur tour, attaquées. Les chlorures réagissent avec les hydroxydes de chaux pour donner des sels solubles. Les chlorures et les sulfates coexistent dans l'eau de mer, qui constitue donc pour le béton et plus particulièrement pour le béton armé, un agent agressif dont l'action est, cependant, très différente selon que l'ouvrage est totalement immergé ou en immersion semi-alternée. Ce dernier cas est le plus défavorable, car les actions chimiques se superposent à des cycles de variations dimensionnelles (retrait et expansion), provoqués par les variations d'ambiance et l'alternance d'absorption et d'évaporation d'eau.

L'agression d'origine chimique peut aussi provenir des eaux de lavage, des eaux pures, des eaux carbonatées, des condensats de chantiers, ou des effluents en milieu industriel ou agricole. La diversité des composés minéraux ou organiques susceptibles d'agir, rend généralement très délicate l'analyse des phénomènes et nécessite un soin particulier dans le choix des constituants du béton.

➤ *Phénomène de réaction sulfatique interne*

C'est la réaction entre les ions sulfate de la solution interstitielle du béton et les aluminates du ciment plusieurs mois voire plusieurs années après la prise du ciment.

2.2.2.2. Les ambiances hivernales

Deux phénomènes peuvent être à l'origine des altérations du béton :

- une succession de phases de gel et de dégel ;
- l'action des sels de déverglaçage (ou fondants).

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

Le mécanisme d'altération s'explique, dans le premier cas, par l'accroissement des pressions dans les capillaires, dû au mouvement de l'eau vers les fronts de gel d'eau interne. L'action des sels de déverglaçage à la fois plus sévère et plus complexe, cumule les effets d'un refroidissement plus rapide que précédemment, se traduisant par un choc thermique et des causes chimiques liées à la diffusion dans le béton de ces sels.

Lorsque les pressions hydrauliques et/ou osmotiques deviennent supérieures à la résistance à la traction du béton, celui-ci se fissure : fissuration dans la masse (feuilletage parallèle aux faces) ou écaillage de surface.

2.3. Indicateurs de durabilité et autres paramètres

2.3.1. Définition

Il s'agit de paramètres relatifs au matériau constitutif, (béton), qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis d'un ou de plusieurs processus de dégradation. Ils interviennent par exemple dans les équations régissant les phénomènes et figurent parmi les données d'entrée des modèles de prédiction de la durée de vie. Cette première condition permet d'assurer leur pertinence théorique. Une seconde condition doit en outre être vérifiée : ces paramètres doivent être facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur éprouvettes ou sur prélèvements, selon des modes opératoires bien définis et validés.

Les méthodes d'essai doivent de plus présenter une reproductibilité, une précision, une simplicité et une rapidité adéquates.

Deux catégories d'indicateurs sont à distinguer. La première est celle des indicateurs de durabilité généraux, qui sont valables pour différents types de dégradation (corrosion des armatures ...etc.). La deuxième catégorie est celle des indicateurs spécifiques relatifs à un processus de dégradation donné, par exemple l'alcaliréaction ou le gel. (21)

En outre, la détermination directe de certains indicateurs de durabilité généraux pourra être remplacée par celle d'indicateurs de substitution.

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

2.3.2. Indicateurs de durabilité généraux

Les indicateurs de durabilité généraux que l'on peut sélectionner selon les critères explicités ci-dessus, sont les suivants :

- porosité accessible à l'eau;
- coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure;
- perméabilité aux gaz;
- perméabilité à l'eau liquide;
- teneur en portlandite Ca(OH)_2 (initiale, dans le cas d'un matériau carbonatable). (21)

2.3.3. Indicateurs de durabilité spécifiques

Selon le processus de dégradation considéré, il peut s'avérer nécessaire de compléter le panel d'indicateurs généraux par des indicateurs spécifiques à ce processus à titre d'exemple, pour la prévention des dégradations dues au gel, les caractéristiques du réseau de bulles d'air (en particulier le facteur d'espacement: demi-distance entre deux bulles voisines) semblent être un indicateur spécifique pertinent. En effet, ces caractéristiques peuvent se révéler au moins aussi importantes que les caractéristiques du réseau poreux, vis-à-vis du gel, selon le type de béton considéré et la quantité d'air entraîné. Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques, concernent deux échelles d'observation. (21)

2.3.4. Indicateurs chimiques microscopiques (relatifs aux constituants du béton)

Ça concerne La quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps (cinétique), pour l'évaluation de la réactivité des granulats et la concentration en alcalins équivalents. Le moyen le plus simple d'accéder à cet indicateur est d'effectuer un bilan des alcalins. Le recours à cet indicateur n'est nécessaire que dans le cas de granulats peu réactifs.

2.3.5. Indicateur global et macroscopique (relatif au béton durci)

C'est la déformation de gonflement d'éprouvettes en béton (« essai de performance » d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction. Cet indicateur est requis seulement dans certains cas.

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

2.3.6. Indicateurs de substitution

Il peut être envisagé de remplacer la détermination directe de certains des indicateurs de durabilité généraux par celle d'indicateurs de substitution. Cela pourra notamment être le cas pour des paramètres plus faciles à déterminer ou tout au moins accessibles par des méthodes d'essai pratiquées plus couramment dans certains laboratoires, ou bien pour des paramètres plus adaptés au problème posé ou aux modèles mis en oeuvre, ou encore lorsque des méthodes fournissant des données complémentaires aux indicateurs généraux sont requises.

Les indicateurs de substitution pourront soit être utilisés directement (notamment pour un simple classement de bétons, sous réserve qu'un système de classement soit disponible), soit permettre via des méthodes indirectes d'accéder aux indicateurs de durabilité généraux proposés.

On peut classer parmi les indicateurs de substitution, les paramètres suivants :

- porosité accessible au mercure;
- résistivité électrique;
- quantité d'électricité mesurée selon l'essai AASHTO (Norme ASTM C 1202);
- coefficient de diffusion du CO₂ (ou de l'O₂) dans les matériaux carbonatés;
- coefficient de diffusion de l'eau traitée;
- coefficient d'absorption capillaire.

2.4. Les ajouts cimentaires et la durabilité

Le laitier résiste à l'action des eaux agressives, surtout en immersion complète. Les chercheurs rapportent l'effet bénéfique des bétons aux laitiers sur la résistance aux sulfates surtout pour les taux de remplacement élevés, grâce à la réduction de la perméabilité, à la diminution de la chaux libre de la teneur en aluminat. Les réactions alcalis-silice décroissent avec l'augmentation de la teneur en laitier due à la fixation par ce dernier des ions sodium. (22)

L'effet de l'incorporation de la fumée de silice est minime dans le cas de la résistance aux cycles de gel-dégel avec des bétons de rapport E/L de 0,4 et des additions de fumée de silice de 15% ou moins. La résistance diminue pour des additions de 20 à 30% de fumée de silice et des rapports E/L variant de 0,35 à 0,55. (22)

Chapitre 2 : La durabilité des bétons

Quant à la cendre volante, elle réduit la perméabilité aux ions chlore. Les bétons avec cendres volantes procurent de bonnes résistances au gel même pour des taux de remplacement élevés. (23)

La nature minéralogique de l'addition influence la perméabilité au gaz des bétons. Plus l'addition présente une activité pouzzolanique ou hydraulique, et plus le coefficient de perméabilité au gaz est faible. Cette réduction est liée à l'amélioration du réseau poreux du béton par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire survenue lors de la formation de nouveaux hydrates, en favorisant une microstructure plus tortueuse.

Il faut aussi savoir que l'emploi de la poudre de verre comme addition, réduit considérablement la pénétration des ions chlorure dans le béton, par un meilleur raffinement des pores dû à la formation de nouveaux C-S-H.

Les bétons avec addition de poudre de verre ont montré des propriétés performantes vis-à-vis de la durabilité, excepté par rapport à la carbonatation. Il est envisageable que l'oxyde de soude (Na_2O) contenu dans le verre se transforme en carbonate ou bicarbonate de soude par fixation du dioxyde de carbone.

L'utilisation d'additions réactives telles que la poudre de verre réduit la cinétique de lixiviation. Cet effet est dû à la diminution de la teneur de portlandite en raison des réactions chimiques qui aboutissent à la formation de C-S-H, entraînant une réduction de la taille des pores et des capillaires, réduisant ainsi le passage d'agents agressifs. (24)

2.5. Conclusion :

La durabilité des bétons de ciment exige un contrôle efficace et effectif de tous les facteurs susceptibles d'affecter son comportement dans le temps. L'expérience montre que les facteurs d'influence, qui doivent faire l'objet d'un contrôle suivi, sont la composition du béton (teneur en liant et rapport eau-liant), l'enrobage des armatures, la compacité du béton et la protection du béton frais en cours de durcissement. Grâce à leurs propriétés physico-chimiques, les ajouts cimentaires peuvent aussi jouer un rôle important dans l'amélioration de la durabilité et réduire les coûts de maintenance.

Dans la suite de ce travail on s'intéressera essentiellement au phénomène de carbonatation et l'influence des ajouts cimentaires en général et la poudre de verre en particulier sur la carbonatation des bétons.

Chapitre 3

La carbonatation des bétons

3.1. Introduction

De nombreux phénomènes environnementaux sont connus pour influencer de manière significative la durabilité des structures en béton armé. La carbonatation est l'un des facteurs principaux de détérioration des structures en béton armé exposées à l'atmosphère, et plus encore pour les structures exposées à de fortes concentrations de dioxyde de carbone comme les tunnels routiers, les ouvrages urbains, les parkings souterrains, etc.

Le dioxyde de carbone pénètre dans le béton par le réseau poreux ou fissural. Sa diffusion à travers la structure poreuse du béton est conditionnée par l'état hygroscopique des pores du matériau. Selon Chaussadent, deux types de pénétration du dioxyde de carbone peuvent coexister :

- par l'intermédiaire de la phase liquide lorsqu'il y a transfert d'eau chargée en dioxyde de carbone dissous ou lorsque l'eau est déjà présente par diffusion en phase aqueuse ;
- par l'intermédiaire de la phase gazeuse lorsque le réseau poreux accessible est désaturé. (25)

Le dioxyde de carbone se dissout dans la solution interstitielle et provoque une décalcification de la pâte de ciment hydratée. Les ions calcium issus notamment de l'hydroxyde de calcium (porlandite) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et des gels de C-S-H, passent en solution pour se combiner avec les ions carbonates et former de la calcite CaCO_3 . En raison de la consommation de la réserve basique que constitue la porlandite, la carbonatation abaisse le pH de la solution interstitielle du béton (initialement entre 12,5 et 13,5) jusqu'aux environs de 8,5.

La carbonatation réduit la porosité du béton et augmente la résistance mécanique, ce qui constitue un effet positif, mais d'autre part conduit à une baisse du pH et à la dépassivation de l'acier. (26)

3.2. Dioxyde de carbone atmosphérique

La concentration du CO_2 dans l'atmosphère est un facteur principal qui agit sur la vitesse de carbonatation du béton. Elle favorise la carbonatation et par suite la corrosion des armatures dans le béton. En milieu rural, la fraction volumique en CO_2 est d'environ 0,03%. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 1% ; dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1%. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de CO_2 . (27)

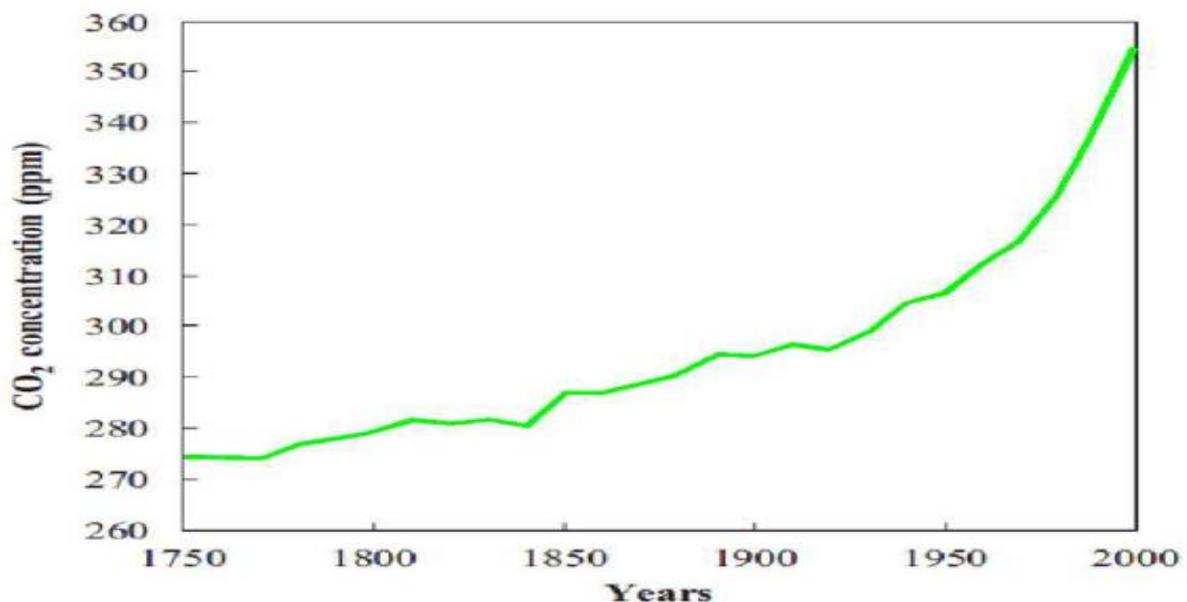


Figure 3.1: Augmentation de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère à l'échelle mondiale (28)

3.3. Phénomène de carbonatation du béton

3.3.1. Physico-chimie de la carbonatation

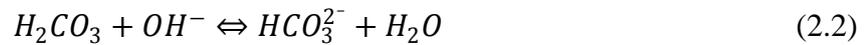
3.3.1.1. Dissolution du gaz carbonique dans la solution porale (29)

Lorsqu'une solution est soumise à une pression partielle de CO_2 , le gaz se dissout et s'hydrate sous forme d'acide carbonique H_2CO_3 , selon la réaction (2.1) :



Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

Dans l'eau, à pH élevé, l'acide carbonique H_2CO_3 se comporte comme un acide faible instable dont la dissociation a lieu en deux phases désignées par les réactions suivantes :



A chacune de ces deux réactions de dissociation (2.2) et (2.3) correspond une acidité de l'acide carbonique H_2CO_3 . A l'équilibre, ces deux acidités ont des domaines de prédominance disjoints : à 20°C, pour un pH supérieur à 10,3 c'est l'ion CO_3^{2-} qui prédomine et pour un pH compris entre 6,3 et 10,3 c'est l'ion HCO_3^{2-} .

3.3.1.2. Dissolution de la portlandite $Ca(OH)_2$

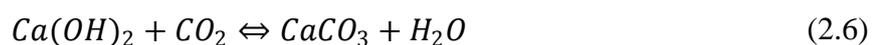
Le passage en solution du CO_2 suivant les réactions (2.4), (2.5) et (2.6) entraîne une baisse de la concentration en ion OH^- dans la solution interstitielle des pores, ce qui réduit le pH. Pour établir la basicité du milieu, la portlandite se dissout suivant la réaction:



Les ions calciums ainsi libérés précipitent avec les ions carbonates suivant la réaction (5) pour former du carbonate de calcium $CaCO_3$.



Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de $Ca(OH)_2$ est synthétisé par la réaction chimique hétérogène suivante :



L'inconvénient de cette formulation est qu'elle masque toutes les étapes intermédiaires du mécanisme. En revanche, elle a l'avantage d'indiquer que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure.

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

Trois isomorphes du carbonate de calcium existent : l'aragonite, la vaterite et la calcite. Cette dernière est la forme la plus stable dans les conditions usuelles de température et de pression lors des essais de carbonatation accélérée.

La Figure 2.2 illustre l'intervention combinée des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus de carbonatation de la portlandite

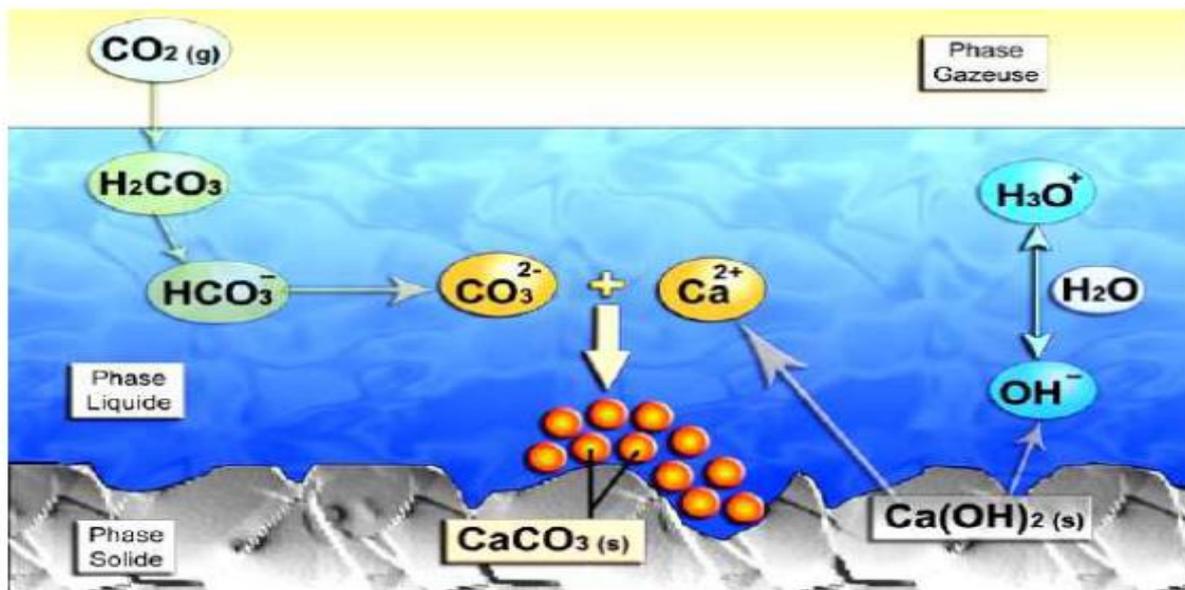
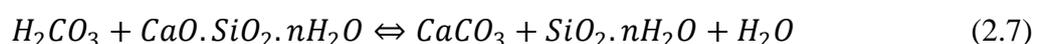


Figure 3.2: Mécanisme de carbonatation de Ca(OH)_2 (27)

3.3.1.3. Dissolution des silicates de calcium hydratés C-S-H

La carbonatation des C-S-H donne naissance à des carbonates de calcium, à un matériau siliceux hydratés (qualifié de gel de silice) et éventuellement à de l'eau libre. Ces C-S-H, qui représentent la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment confèrent au matériau béton l'essentiel de sa résistance mécanique. En revanche, ils ont un pouvoir tampon sur le pH de sa solution interstitielle plus faible que la portlandite. Par conséquent, leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation n'est pas indispensable si l'on s'intéresse à la variation de pH. Néanmoins, les modifications induites de la microstructure sont importantes.

La réaction chimique (2.7) synthétique des C-S-H (noté ici $\text{CaO.SiO}_2.n\text{H}_2\text{O}$) avec le dioxyde de carbone peut s'écrire :



Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

La carbonatation de la portlandite et celle des silicates de calcium hydratés sont simultanées mais avec une cinétique plus rapide pour la portlandite. A long terme, la dissolution de C-S-H et $Ca(OH)_2$ est bien complète : l'état ultime de dégradation correspond à un assemblage minéralogique de carbonate de calcium et de gel de silice.

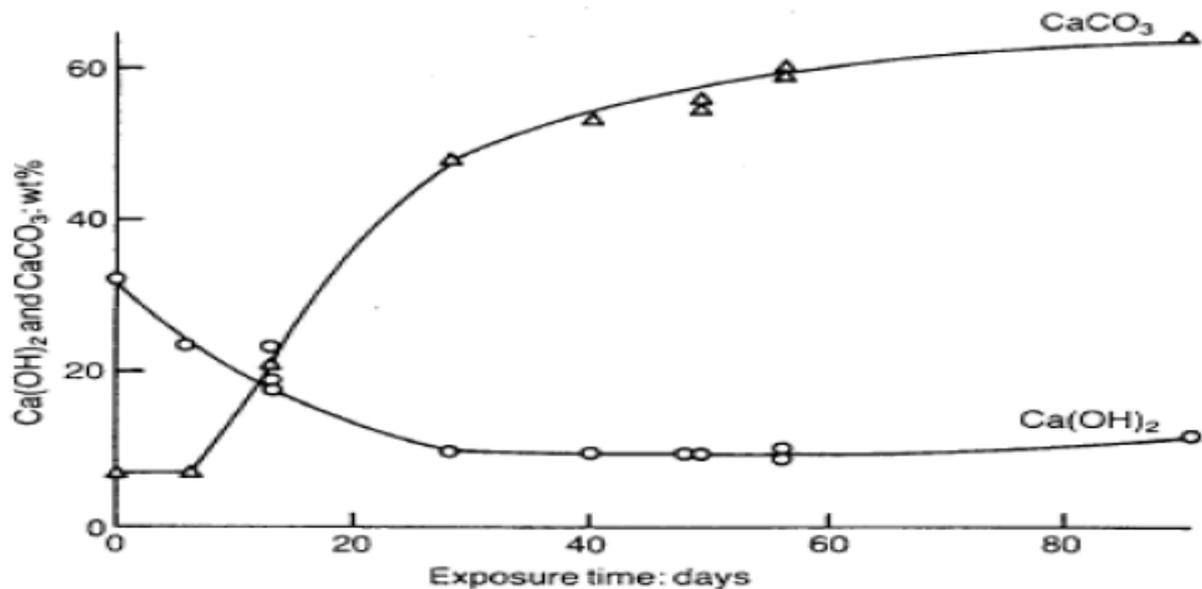


Figure 3.3: Variation des quantités de portlandite et de carbonate de calcium avec la durée d'exposition en air (20°C, 65 %HR) (30)

La nature des différents isomorphes de carbonate de calcium dépend principalement de l'humidité relative à laquelle les hydrates se carbonatent. La vaterite se forme préférentiellement à une humidité relative faible (65%) lorsqu'un très fin film d'eau recouvre la surface des hydrates. L'aragonite n'est observée que très rarement cet isomorphe pourrait être un intermédiaire réactionnel lors de la transformation de la vaterite en calcite. Quant à la calcite, elle est identifiée pour les humidités relatives élevées et/ou pour les durées importantes de carbonatation.

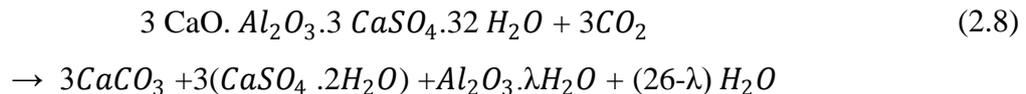
3.3.1.4. Dissolution des autres constituants du ciment

Le trisulfoaluminate de calcium (ettringite) AFt et le monosulfoaluminate de calcium AFm ont des structures cristallines complexes, en colonne pour l'ettringite et en feuillet pour le monosulfoaluminate. Pour ces deux structures, les anions sulfate, situés dans les canaux ou entre les feuillets, sont très mobiles et peuvent être substitués par d'autres anions (OH^- , Cl^- , CO_3^{2-}). Les aluminates hydratés sont sensibles à la carbonatation. Des études

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

indiquent qu'ils se carbonatent en produisant des carbonates de calcium, des hydroxydes d'aluminium et de l'eau. (26)

La carbonatation du monosulfoaluminate de calcium (AF m) produit du gypse. La décomposition par carbonatation du trisulfoaluminate de calcium (AF t) forme de la calcite et du gypse et un gel d'alumine (31), suivant la réaction (2.8) suivante :



3.3.2. Conséquence de la carbonatation sur le béton

3.3.2.1. Porosité

Une conséquence du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution de la porosité de la zone carbonatée de 10 à 15 %, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert. On dit alors que les pores sont colmatés. En effet, l'impact de la carbonatation sur les matériaux à base de ciment montre que la porosité, mesurée par intrusion de mercure, d'une pâte de ciment de E/C = 0,3 chute de 31,6% à 25,6% après 32 mois de carbonatation naturelle. Ce résultat est généralisé sur des pâtes de ciment à E/C variant de 0,3 à 0,8. La porosité subit une baisse en absolu allant de 10 à 15%. (32)

3.3.2.2. Evolution de la microstructure

La réaction de carbonatation entraîne une augmentation du volume de la phase solide. Le tableau (2.1) fournit les valeurs du volume molaire de la portlandite à comparer à celle des trois formes cristallines de carbonate de calcium.

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

Tableau 3.1: Volume molaire de la calcite, de la vatérite, de l'aragonite et de la portlandite. (29)

Cristaux	Volume molaire (cm ³ .mol ⁻¹)
$Ca(OH)_2$ Portlandite	33
$CaCO_3$ Calcite	35
$CaCO_3$ Vatérite	38
$CaCO_3$ Aragonite	34

Par le dépôt de $CaCO_3$, la porosité totale diminue et le mode poreux des capillaires est déplacé vers les plus grands rayons (la porosité capillaire augmente). (29)

3.3.2.3. Retrait de carbonatation

La carbonatation de $Ca(OH)_2$ entraîne une augmentation du volume des solides, de 10 à 15 % selon que le produit de la réaction est de la calcite ou de la vatérite. Il paraît illogique que cette réaction entraîne un retrait et non un gonflement. Pourtant toutes les expériences mettent en évidence un retrait. Pour expliquer cette apparente contradiction, plusieurs explications ont été avancées :

Selon Powers (33), le retrait de carbonatation est dû à la dissolution des cristaux d'hydroxyde de calcium alors que ceux-ci sont soumis à une contrainte de compression. Le retrait de carbonatation à humidité constante est proportionnel à l'augmentation temporaire de compressibilité de la pâte de ciment durcie résultant du transfert de l'hydroxyde de calcium des régions sous contrainte et du dépôt de carbonate de calcium dans des régions où celui-ci n'est pas sous contrainte. D'autre part, la carbonatation des particules de C-S-H, le silicate de calcium hydraté, a lieu par une réaction sans dissolution. La carbonatation du C-S-H ne provoque ainsi pas de déformation de l'échantillon.

La diminution de la quantité d'eau chimiquement liée, c'est-à-dire de l'eau faisant partie des particules de C-S-H, a également été avancée comme cause du retrait de carbonatation. Dans ce cas, il faut attribuer le retrait de carbonatation, non plus essentiellement à l'hydroxyde de

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

calcium, mais bien au C-S-H. Cette explication est basée sur l'observation qu'il y a moins d'une molécule d'eau libérée lors de la réaction d'une molécule de CO_2 avec la pâte de ciment durcie, alors que lors de la carbonatation de l'hydroxyde de calcium, une molécule de CO_2 libère une molécule d'eau. Selon Swenson et Sereda (34), le retrait de carbonatation serait lié à la déshydratation et la polymérisation du gel de silice formé lors de la carbonatation. Au cours de la carbonatation, le transfert de calcium des zones internes vers les zones externes des C-S-H pourrait conduire au retrait de carbonatation du matériau. Enfin, le retrait de carbonatation correspondrait à une forme de retrait de dessiccation associé à la production d'eau par carbonatation. Swenson et Sereda (34), signalent en 1968 que le transfert de l'eau libérée est freinée par la présence d'une gangue de $CaCO_3$ autour des cristaux de portlandite ; ce qui crée un gradient de teneur en eau à travers la couche de carbonates entre l'interface $Ca(OH)_2 - CaCO_3$ et les pores où l'humidité est plus facilement évacuée. Globalement, ce gradient hydrique serait suffisant pour occasionner la fissuration de la gangue de carbonates de calcium et du retrait. (29)

3.3.2.4. Evolution de la teneur en eau

La carbonatation libère une partie de l'eau qui était à l'origine liée chimiquement aux hydrates. La carbonatation des C-S-H hydratés n'affecte pas suffisamment la nature de l'eau chimiquement liée pour qu'elle se libère. L'eau libre relarguée, peut évidemment participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs. (27)

3.3.2.5. La résistance en compression

La baisse de la porosité liée à la carbonatation entraîne une augmentation de la résistance mécanique. En réalité, c'est toute la répartition des volumes poreux qui est modifiée. La calcite qui s'est formée consolide la microstructure. Il est bien connu que le carbonate de calcium est un excellent liant. La résistance à la compression et à la flexion de bétons au ciment conservé dans une atmosphère de CO_2 peut augmenter au maximum de 30 % par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de CO_2 . (27)

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

3.3.3. Conséquence de la carbonatation sur le béton armé

Même si la porosité du béton diminue suite au phénomène de carbonatation, elle n'empêche pas en parallèle le passage des agents agressifs venant de l'extérieur. En effet, elle est à l'origine de la diminution de sa capacité à isoler l'acier des substances agressives du milieu extérieur.

Elle entraîne la corrosion des armatures, suite à la baisse du pH de la solution interstitielle, qui ne seraient alors plus passivée. Les dégradations se manifesteront par l'éclatement du béton d'enrobage suite au gonflement des produits d'oxydations. (29)

3.3.3.1. Corrosion des armatures dans le béton armé

La solution dans les pores du béton est une solution alcaline qui a un pH proche de 13. Dans un tel milieu, l'acier est passivé. Or, la carbonatation du béton entraîne une baisse du pH à une valeur d'environ 9 (figure 2.4). Ainsi, le film passif est détruit. Dans ce milieu, l'armature voit alors son potentiel électrique chuter vers les valeurs négatives. Elle se retrouve dans une zone de corrosion qui se traduit par la formation de produits expansifs avec une augmentation de volume.

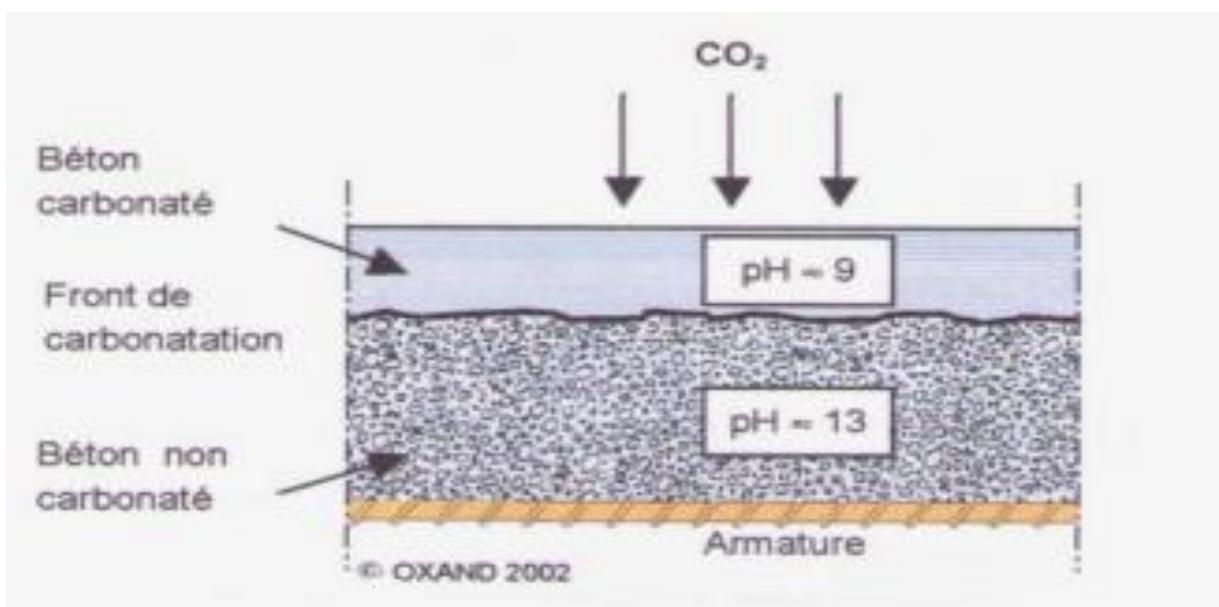


Figure 3.4: Progression de la carbonatation (35)

Les variations volumiques induisent des contraintes dans le béton d'enrobage et au-delà d'un certain seuil, l'apparition de petites fissures puis éclatement de la couche d'enrobage .

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

Apparaît ensuite une corrosion généralisée se traduisant par une diminution progressive de la section des armatures et menaçant la capacité portante de l'ouvrage. (29)



Figure 3.5: Exemples de corrosion par carbonatation et d'éclatement de béton d'enrobage

(source <http://fr.wikipedia.org/>)

Rappelons que l'état hydrique du béton est un paramètre déterminant vis-à-vis de la corrosion des armatures, d'une part pour le transport des espèces chimiques (nécessité d'une phase gazeuse pour le transport du CO_2) et d'autre part pour les réactions chimiques. En outre, la corrosion est un phénomène électrochimique. Elle nécessite donc un électrolyte, c'est-à-dire la présence d'eau. En dehors des zones d'immersion totale, cette eau ne peut être apportée au niveau de l'acier que par l'humidité de l'air ou par les précipitations atmosphériques. (29)

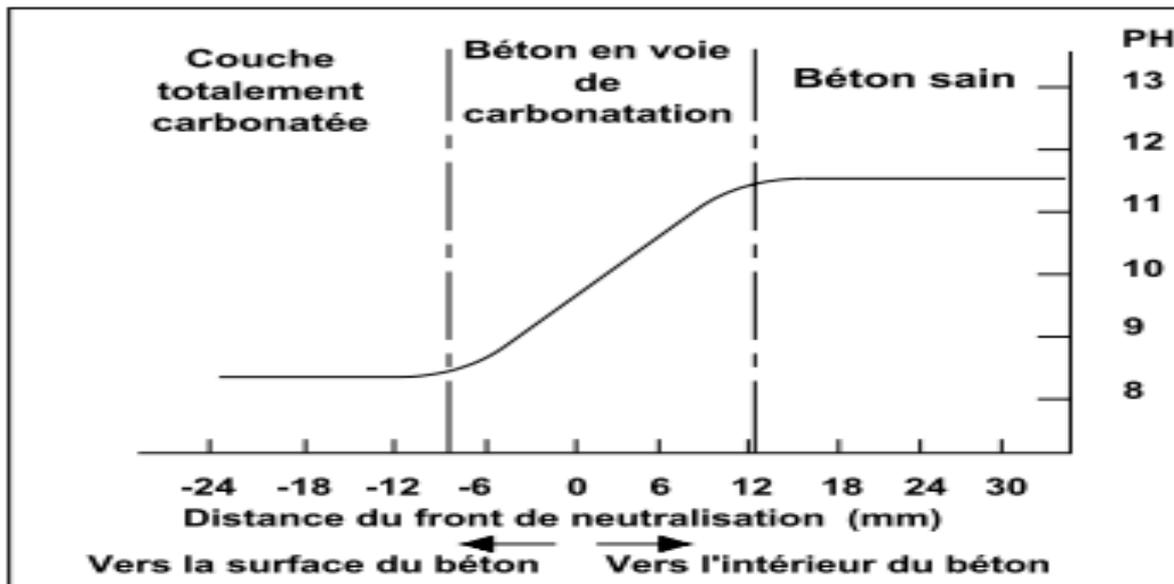


Figure 3.6: Gradient de pH en fonction de la profondeur carbonatée (36)

Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille (déjà présente autour des armatures), où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ($4.CaO.Fe_2O_3.13H_2O$). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier métallique et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer [$Fe(OH)_2$] et de calcium [$Ca(OH)_2$]. Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13. Il est à noter qu'au contact de la rouille initiale, l'hydratation du ciment est perturbée : il se forme localement une zone de transition, au-delà de laquelle le béton a des caractéristiques plus homogènes.

L'eau de gâchage du béton permet donc de former autour de l'acier des produits, qui le protègent par passivation. Une telle protection disparaît si la solution interstitielle a disparu (cas des grandes fissures qui atteignent les armatures) ou ne correspond plus à un béton sain. (29)

3.3.3.2. Les phases de corrosion (incubation et propagation)

La corrosion liée à la carbonatation de l'acier se déroule suivant 2 étapes distinctes, une phase d'initiation ou d'amorçage appelée aussi phase d'incubation et une phase de propagation (figure 2.7). Le passage de l'une à l'autre correspond à la « dépassivation » de l'acier (point A).

La phase « d'amorçage » correspond à la pénétration des agents agressifs (principalement le gaz carbonique, l'air et les chlorures) au travers de la couche d'enrobage, jusqu'au démarrage de la corrosion de l'armature (destruction du « film passif »). La période d'amorçage ou

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

d'incubation dépend en grande partie des processus assurant le transport des éléments agressifs jusqu'à l'armature, mais aussi des réactions chimiques se produisant au sein du béton et des réactions électrochimiques à l'interphase. La qualité de l'enrobage (perméabilité, épaisseur...) joue un rôle fondamental sur la pénétration des agents agressifs.

La phase de propagation de la rouille conduit à la fissuration, puis à la destruction de l'enrobage (point D). Ceci illustre la vie de service d'une structure armée. (37)

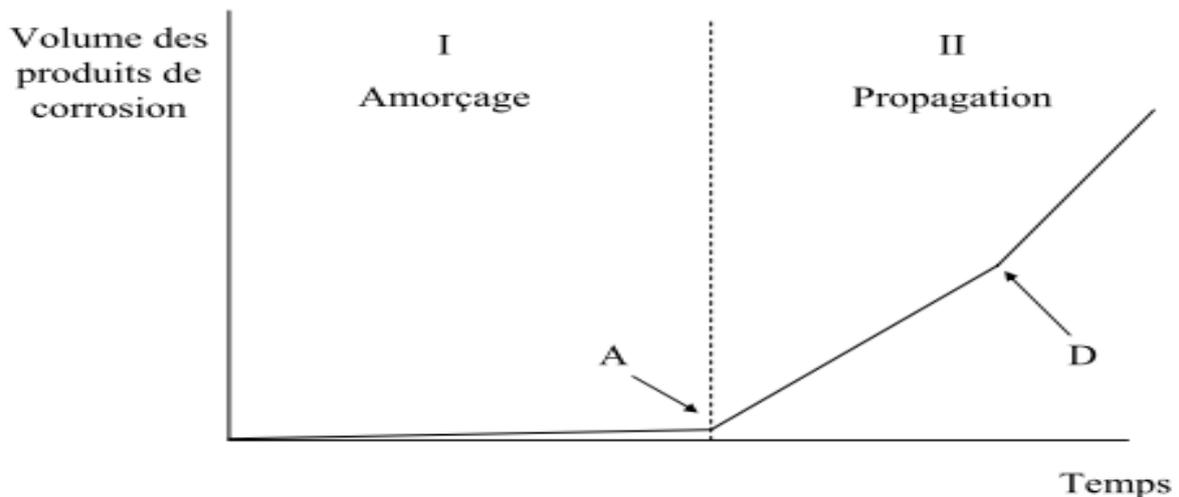


Figure 3.7: Evolution du comportement des armatures et du béton d'enrobage (37)

3.3.3.3. Dégradation des armatures

- **Du point de vue chimique :**

La corrosion des armatures en acier dans le béton est un processus électrochimique qui implique l'existence d'une anode, d'une cathode et d'un milieu électrolytique pour constituer une pile électrochimique. La création de ces piles sur l'armature conduit à la dissolution du métal dans les zones anodiques selon la réaction d'oxydation (2.9) :



Les électrons libérés par la réaction anodique sont consommés à la cathode par la réaction cathodique (2.9) ou (2.10) :

- en présence d'oxygène :

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons



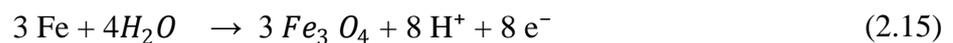
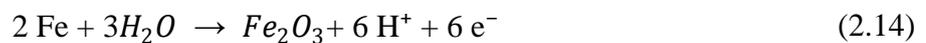
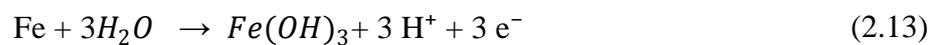
- en absence d'oxygène :



Ensuite, les ions ferreux réagissent avec les ions OH^- pour former de l'hydroxyde ferreux comme indiqué dans l'équation (2.11) :



Les réactions se poursuivent :



Puis, une oxydation lente conduit aux oxydes hydratés : γ -FeOOH (lépidocrocite) qui représente la rouille fraîchement formée, α -FeOOH (goethite) qui représente la rouille vieillie, et la magnétite $Fe_3 O_4$. La rouille formée sur les armatures est un mélange de ces trois constituants, en proportions variables dépendant de nombreux facteurs comme l'âge du béton et la nature du milieu environnant. La quantité de magnétite est toujours petite. La corrosion des aciers d'armature peut provoquer des dommages au béton environnant du fait que la rouille est formée de produits fortement expansifs. En effet, suivant l'état d'oxydation, le fer métallique forme des oxydes dont le volume peut être jusqu'à six (6) fois supérieur au volume initial. (29)

Chapitre 3 : La carbonatation des bétons

3.3.4. Facteurs influençant la carbonatation

Plusieurs facteurs peuvent influencer le mécanisme de la carbonatation qui peut se produire dans une pâte de ciment. Les facteurs internes tels que le rapport eau/ciment, la composition chimique de la pâte de ciment et de l'humidité relative interne peuvent influencer le taux de carbonatation. Les facteurs externes influençant le phénomène comprennent l'humidité relative, la température, la concentration de dioxyde de carbone, et la texture de la surface. Le plus important facteur interne qui a une incidence sur la carbonatation est le rapport eau/ciment (E/C) ou eau/liant (E/L) selon le cas. La vitesse de carbonatation est d'autant plus faible que le rapport E/L des bétons est réduit. La carbonatation est souvent réduite dans les bétons ayant E/L inférieur à 0,40. Une réduction de la profondeur de carbonatation d'environ 50% est observée lorsque le rapport E/L est réduit de 0,6 à 0,4. Un dosage élevé en liant diminue la profondeur de carbonatation car il réduit la porosité du béton, améliore sa compacité et augmente la quantité de produits carbonatables. La profondeur de carbonatation varie inversement avec la résistance en compression caractéristique du béton à 28 jours. Par contre elle suit le même sens de variation que la perméabilité au gaz. (38), (39)

L'humidité relative présente dans les pores capillaires peut également influencer des réactions de carbonatation. La carbonatation est minimale à 100% d'humidité relative, car le dioxyde de carbone ne peut pas facilement pénétrer dans les pores saturés. Le vieillissement du béton a tendance à le sécher de l'extérieur vers l'intérieur. Par conséquent, le taux de carbonatation est plus élevé dans les parties "sèches" de l'extérieur du béton et faible dans les parties "humides" de l'intérieur. La diminution du taux de carbonatation est non seulement le résultat de l'augmentation de l'humidité relative, mais aussi de la diminution de la diffusion en raison de la réduction de la perméabilité du béton carbonaté. La température et l'humidité les plus propices pour un maximum de carbonatation varient de 20 à 25 ° C et 50 à 70%, respectivement. À 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. La concentration du dioxyde de carbone dans le milieu extérieur influence le taux et la profondeur de carbonatation. Pour des concentrations faibles du CO_2 , la carbonatation est lente. Ce qui semble expliquer les faibles taux de carbonatation dans les environnements naturels (40)

3.4. Influence des ajouts cimentaires sur la carbonatation

Les matériaux pouzzolaniques, tels que les cendres volantes, ont généralement tendance à augmenter le taux de carbonatation, du moins au début. Dans certains cas, on pouvait observer que les bétons incorporant des cendres volantes peuvent augmenter la résistance à la carbonatation sur de plus longues périodes de temps. L'utilisation de matériaux pouzzolanique réduit la teneur en portlandite dans la pâte de ciment. Cette réduction de portlandite semble augmenter la carbonatation, puisqu'il y a moins d'hydroxyde à réagir mais l'effet pouzzolanique réduit la perméabilité de la pâte. Ainsi, lorsque la réduction de la perméabilité prédomine celle de la teneur en portlandite, la carbonatation se trouve ralentie voire réduite. Puisque les ajouts minéraux génèrent des bétons de faible teneur en portlandite et réduisent la porosité et l'effet négatif peut être annulé. Cependant, plusieurs études rapportent l'augmentation de la profondeur de carbonatation des bétons contenant des ajouts minéraux. L'utilisation de quantités d'additions minérales importantes, en particulier des teneurs en cendres volantes supérieures à 30 % et en laitiers supérieures à 50 % est proscrite. L'influence négative de ces additions sur la résistance à la carbonatation a été vérifiée par d'autres études ; mais il a été prouvé que son amplitude pouvait dépendre fortement de la durée de cure humide. Les fillers calcaires et siliceux semblent avoir une bonne influence dans le cas d'un préconditionnement humide (28 jours), et une influence négative dans le cas d'une conservation sèche trop prématurée, c'est-à-dire un démoulage à environ 30 % de la résistance moyenne à 28 jours. (31)

En effet, les additions peuvent à priori intervenir à trois niveaux : dilution de la chaux du clinker et des additions entraînant la réduction de la quantité initiale de portlandite, consommation de la portlandite par réaction pouzzolanique, diminution de la compacité au démoulage due à la faiblesse de l'indice d'activité au jeune âge. (29)

Il a été observé que la profondeur de carbonatation diminue quand le taux de substitution des granulats par des additions telles que la fumée de silice ou les cendres volantes augmente (figure 1.21), mais qu'elle augmente avec le taux de substitution du ciment.

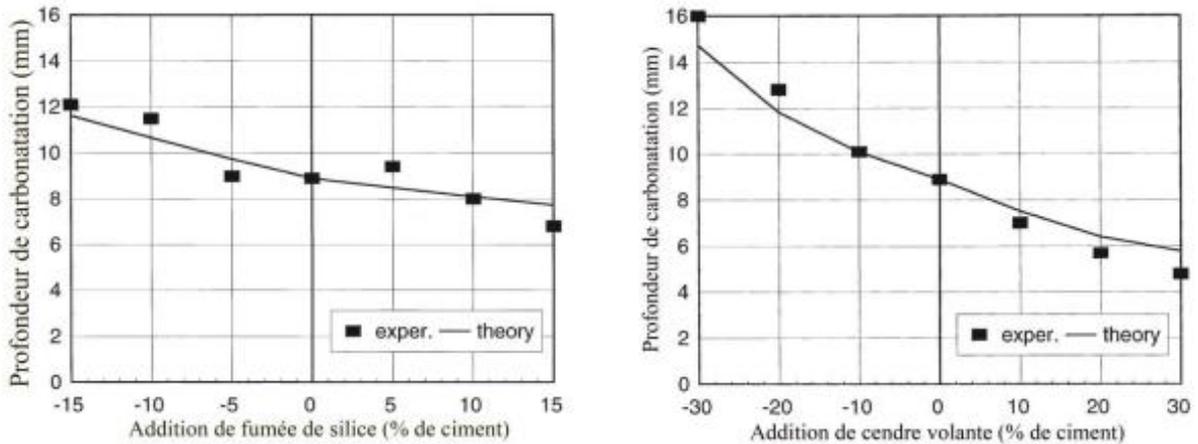


Figure 3.8: Résultats expérimentaux et modèle prédictif de profondeur de carbonatation avec substitution de quantité de fumée de silice et de cendre volante. La partie droite du graphe concerne la substitution des agrégats et la partie gauche du graphe la substitution du ciment. (29)

3.5. Influence de la poudre de verre sur la carbonatation

la profondeur de carbonatation augmente avec le taux d'incorporation de la poudre de verre et ceci quel que soit le rapport E/L. 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, la densification de la matrice à la suite de la réaction pouzzolanique limite la diffusion du CO_2 et donc ralentit le phénomène de carbonatation dans ces bétons. Ceci s'explique par le développement d'un réseau poreux formé 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 CO_2 . (31)

3.6. Conclusion :

Les ajouts cimentaires semblent relativement affecter négativement la résistance à la carbonatation des bétons. La résistance aux agents agressifs des bétons incorporant des ajouts dépend quelquefois du type et du taux d'incorporation des ajouts. La profondeur de carbonatation est généralement plus élevée dans les bétons avec ajouts minéraux dû à la faible teneur en portlandite de la matrice dans laquelle ils sont incorporés, conséquence de leur réaction pouzzolanique. L'effet de chaque ajout sur la résistance du béton aux agents agressifs extérieurs est étroitement lié aux facteurs impliqués dans les mécanismes d'attaques par l'agent agressif concerné.

Chapitre 4

Objectif et méthodologie expérimentale

4.1. Introduction

Cette étude a pour objectif d'analyser des bétons à base de poudre de verre avec différents rapports E/L réalisés par Ablam ZIDOL (Université de Sherbrooke), et procédé par des essais de carbonatation accélérés pour montrer l'influence de la poudre de verre sur la résistance à la carbonatation. Les caractéristiques des matériaux ont été données dans le projet de fin d'études. (41)

4.2. La poudre de verre (31)

a-Description

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible. Il est constitué le plus souvent d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) et de fondants. Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodocalcique. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. La poudre de verre est un ajout cimentaire obtenu par broyage du verre mixte (déchets de verre de différentes couleurs).



Figure 4.1: La poudre de verre

Chapitre 4: Objectif et méthodologie expérimentale

b- Caractéristiques techniques

Les principales caractéristiques de la poudre de verre sont résumées au tableau (3.1)

Tableau 4.1: Caractéristiques techniques de la poudre de verre

Densité	2,54
Finesse Blaine (m ² /kg)	440
Diamètre moyen (µm)	10,9

c- Dosage

Le dosage de cet ajout cimentaire alternatif varie de 20 à 30% du poids du ciment. L'incorporation de la poudre de verre à dosage désiré dépend des performances recherchées.

d- Mode d'emploi

La poudre de verre doit être mélangée à sec avec le ciment, avant l'ajout de l'eau de gâchage, ses propriétés chimiques sont données au tableau (3.2).

Tableau 4.2:Composition chimique de la poudre de verre en %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
72.66	1.57	0.39	11.41	1.24	0.07	0.54	12.89	0.38

4.3. Composition des bétons

Les compositions des bétons utilisés pour la carbonatation sont données dans notre projet de fin d'études qui sont résumées dans des tableaux pour différent rapport (E/L). (41)

Chapitre 4: Objectif et méthodologie expérimentale

4.4. Essai de carbonatation accéléré (selon la norme l'AFPC-AFREM (1997))

L'essai de carbonatation accéléré a été effectué pour trois (3) rapports E/L (0.55 – 0.45 et 0.40) selon la norme AFPC-AFREM (1997), les résultats obtenus seront présentés et discutés dans le prochain chapitre.

L'essai consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur de béton carbonaté dans des bétons conservés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone.

4.4.1. Appareillage

- Etuve ventilée pouvant être contrôlée à $40 \pm 2^\circ\text{C}$, situé dans un local dont la température est de $20 \pm 2^\circ\text{C}$;
- Installation expérimental comportant une enceinte pouvant maintenir une humidité relative à 65% et un système d'alimentation en mélange gazeux (50% de CO_2 et 50% d'air) ;
- Balance d'une précision de 0.01 g ;
- Solution de phénolphthaléine en flacon pulvérisateur dosé à 1/100 dans l'alcool ;
- Réglet gardé au mm

4.4.2. Corps d'épreuve confectionné par moulage

Les corps d'épreuve sont de forme prismatique. Les dimensions recommandées sont au minimum trois fois le diamètre de plus gros granulat. Les corps d'épreuve sont confectionnés à l'aide de la table vibrante normalisés (p18-421). Quatre corps d'épreuve subiront l'essai de carbonatation accéléré : 3 seront utilisées pour les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté, sera utilisé pour suivre l'évolution de la masse au cours de l'essai.

- Option. Deux corps d'épreuve supplémentaires pourront être confectionnés afin de suivre l'évolution de carbonatation naturelle. Ils pourront alors être conservés en atmosphère ambiante dans une salle dont la température est de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité relative de $65 \pm 5^\circ\text{C}$;

La durée de cure recommandée en ambiance humide (humidité relative supérieur à 95 % ou dans l'eau) est de 28 jours.

Chapitre 4: Objectif et méthodologie expérimentale

4.4.3. Prétraitement avant démarrage de l'essai

Avant le démarrage de l'essai de carbonatation accéléré, les corps d'épreuve sont pesés et subissent un conditionnement (prétraitement) qui comporte deux phases successives.

Une première phase où les corps d'épreuves sont saturé en eau suivant la procédure spécifiée dans la recommandation AFREM pour la détermination de la masse volumique apparente et de la porosité. A l'issue de cette phase, les corps d'épreuve sont pesés.

Une seconde phase où les corps d'épreuve sont placés dans une étuve réglée a une température de $40 \pm 2^\circ\text{C}$. La durée de séchage est de deux jours. A l'issue de cette phase, les corps d'épreuve sont pesés.

Le prétraitement des échantillons a pour but d'obtenir une teneur en eau inférieure à celle de la saturation. A l'issue de la cure humide les matériaux ont une hygrométrie très élevée, leur carbonatation sous condition accélérée est donc défavorisée parce que l'eau résiduelle dans le matériau empêche la diffusion du CO_2 . Trois principaux critères doivent être remplis :

- l'obtention d'un état hydrique homogène dans l'échantillon ;
- la limitation du temps et de la température de séchage afin de réduire les effets secondaires indésirables (altération des hydrates, microfissuration, déshydratation du matériau...);
- la bonne reproductibilité des mesures.



Figure 4.2: Enceinte climatique assurant l'homogénéisation (29)

Chapitre 4: Objectif et méthodologie expérimentale

4.4.4. Procédure d'essai

4.4.4.1. Principe de l'essai

A l'issue du conditionnement, les corps d'épreuve sont disposés dans l'enceinte (figure 3.2), et conservés en atmosphère ambiante pour la carbonation naturelle si cette option est retenue. Dans l'enceinte, les corps d'épreuve sont distants les uns des autres d'au moins 2cm.

Après introduction des corps d'épreuve, l'humidité relative et la température de l'enceinte sont mesurées au cours de l'essai (au moins une fois par jour). Il est également nécessaire de s'assurer que le mélange gazeux circule faiblement dans l'enceinte.

A chaque échéance, les corps d'épreuve sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté ainsi que les masses sont mesurées.

4.4.4.2. Echancier des mesures

À l'échéance de mesures, les corps d'épreuve sont sortis de l'enceinte. Pour les corps d'épreuve confectionnés par moulage, un morceau de béton (épaisseur 6 ± 1 cm) est prélevé sur chaque éprouvette par fracturation par fendage. Les corps d'épreuve résiduels sont ensuite remplacés immédiatement dans l'enceinte.

4.4.5. Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté

La profondeur de carbonatation correspond à la distance entre la surface externe et le front de coloration. Les mesures de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphaléine. La solution de phénolphaléine révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée.

Les mesures correspondantes aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration. Elles sont effectuées sur le front de coloration en dehors des zones suivantes :

- dans les coins :
- lorsque le front de coloration passe par une interface granulats/matrice. Sont concernés les granulats $D > 3$ mm.

Cinq (5) distances sont déterminées pour chaque face. Les valeurs données dans les tableaux sont : la distance la plus faible, la distance la plus importante, la moyenne relative aux trois

Chapitre 4: Objectif et méthodologie expérimentale

distances intermédiaires (pour chaque face. L'épaisseur du béton carbonaté à une échéance donnée est la moyenne, arrondie au millimètre des quatre valeurs moyennes obtenues sur chacune des faces (Norme NF P18-458).



Figure 4.3: Mise en évidence de l'épaisseur carbonatée par la solution de phénolphtaléine (29)

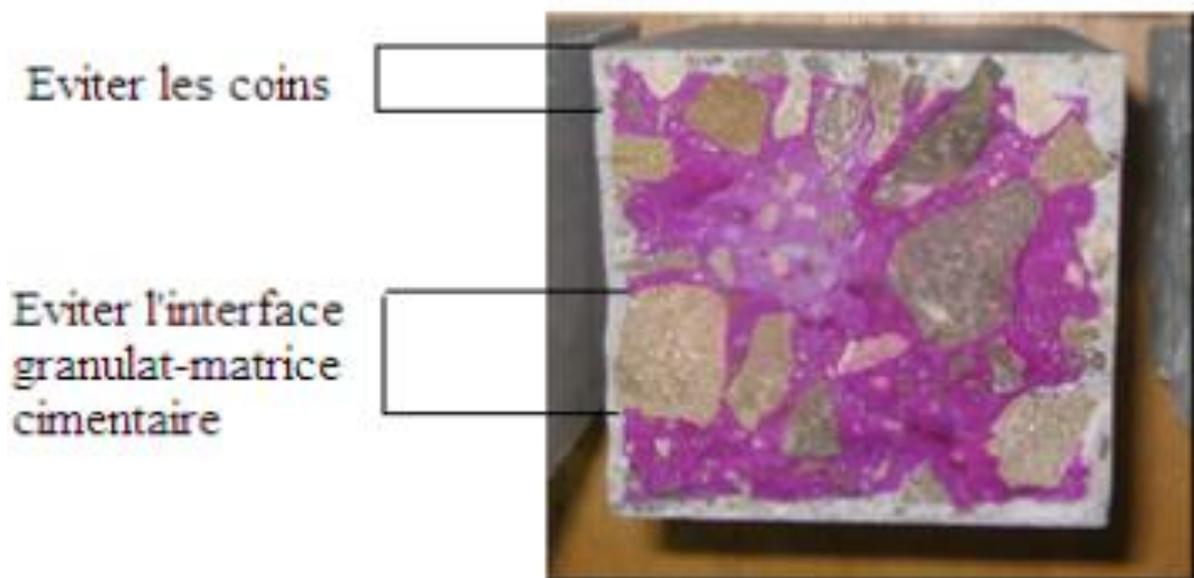


Figure 4.4: Principe de mesure de l'épaisseur carbonatée sur éprouvette 7/7/28 (29)

Chapitre 4: Objectif et méthodologie expérimentale

4.4.6. Prédiction de la profondeur de carbonatation dans le béton

En admettant que le profil de pression partielle de dioxyde de carbone est linéaire sur l'épaisseur carbonatée, et qu'il s'agit d'un phénomène à front raide, la profondeur de carbonatation théorique peut être supposée proportionnelle à la racine carrée du temps :

$$x_c(t) = x_{c,0} + K\sqrt{t}$$

Avec :

- x_c : épaisseur carbonatée (mm),
- $x_{c,0}$: épaisseur carbonatée initiale,
- K : coefficient dépendant d'un ensemble de facteurs liés aux caractéristiques du béton (le rapport E/C, la nature du ciment, etc.) et aux conditions environnementales (la concentration du dioxyde de carbone, l'humidité relative, etc.).

La technique expérimentale la plus répandue pour identifier la profondeur de carbonatation est le test à la phénolphthaléine qui permet d'identifier un virage de pH de la solution interstitielle. Le béton non carbonaté se colore en rose tandis que le béton carbonaté ne change pas de couleur. La profondeur de carbonatation mesurée par la phénolphthaléine correspond à un pH dans la gamme 8,3 - 9,5.

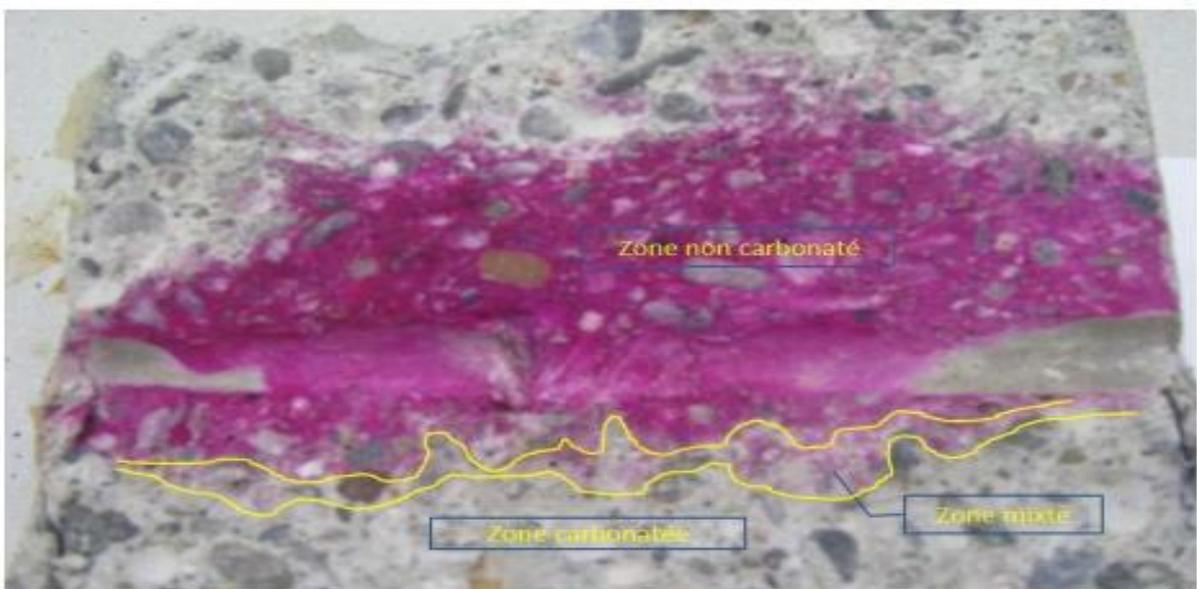


Figure 4.5: Existence des trois zones caractéristiques (carbonatée, mixte, saine) (42)

Chapitre 4: Objectif et méthodologie expérimentale

De manière générale, plusieurs auteurs montrent que la zone de virage de la phénolphthaléine est toujours en amont de la zone de formation de carbonate de calcium. Il existe différentes zones caractéristiques depuis la surface extérieure (Figure 3.5) :

- zone carbonatée dans laquelle la portlandite a totalement disparu,
- zone mixte où la quantité de carbonate de calcium décroît et celle de portlandite croît,
- zone saine dans laquelle aucune modification minéralogique n'est relevée.

4.5. Conclusion

Les essais réalisés ont permis de collecter différents résultats qu'on interprétera au chapitre suivant consacré à leur traitement en traçant des courbes pour montrer l'influence des paramètres étudiés notamment sur la résistance à la carbonatation.

Chapitre 5

Présentation et interprétation des résultats

5.1. Introduction

Les essais réalisés dans le cadre de ce projet de recherche ont produit de nombreux résultats. Il est à signaler qu'il était question que des étudiants de l'ENP se rendent à l'Université de Sherbrooke (Canada) dans le cadre de la convention existant entre les deux institutions. Ce déplacement de trois à quatre mois aurait permis aux stagiaires d'effectuer différents essais sur plusieurs sortes de bétons et d'interpréter les résultats obtenus. Malheureusement n'ayant pu bénéficier de ce stage qui hélas était programmé, nous avons tenu à réaliser notre projet de fin d'études sur le thème qui nous a proposé en exploitant et interprétant les résultats obtenus par Ablam ZIDOL étudiant en Génie civil à l'Université de Sherbrooke. Les essais et résultats de A. ZIDOL sont présentés dans ce chapitre avec référence en annexes lorsque nécessaire. On s'intéressera essentiellement à la poudre de verre et son comportement vis-à-vis de la carbonatation en indiquant l'influence du temps et aussi les effets de la variation du rapport (E/L). Nous avons exploité les résultats bruts de Zidol et nous avons procédé nous-mêmes à les représenter sous forme de courbes respectifs et à les interpréter.

5.2. Résultats des essais de carbonatation accéléré (selon la norme AFPC-AFREM (1997))

Les essais de carbonatation accélérée ont été faits sur différents bétons comme indiqué au chapitre 3. Les résultats obtenus seront illustrés dans des courbes tirés des résultats comme montré dans le tableau (4.1).

Chapitre 5 : Présentation et interprétation des résultats

Tableau 4.1 : Profondeur de carbonatation en fonction de la durée d'exposition

	PROFONDEURS en (mm)			Durées en Jours
	Témoin	20 % PV	30 % PV	
E/L=0.55	0	0	0	0
	5	7.3	10.5	7
	8.5	10.6	14.8	14
	12.5	20.5	21.5	28
	16.2	24.3	25.3	42
	18.5	29.5	30.2	56
	20,2	31.5	32.6	70
	21	32.6	34.0	91
E/L=0.45	0	0	0	0
	4.3	5.7	9.2	7
	4.6	7.3	10.5	14
	5.1	10.3	14.3	28
	6.7	11.34	17.0	42
	9.7	14.8	20.8	56
	11.1	15.10	21.1	70
	11.6	17.3	22.4	91
E/L=0.40	0	0	0	0
	4.3	5.7	9.2	7
	4.6	7.3	10.5	14
	5.1	10.3	14.3	28
	6.7	11.34	17.0	42
	9.7	14.8	20.8	56
	11.1	15.10	21.1	70
	11.6	17.3	22.4	91

Chapitre 5 : Présentation et interprétation des résultats

5.2.1. En fonction du temps

➤ Pour un rapport $E/L=0.55$:

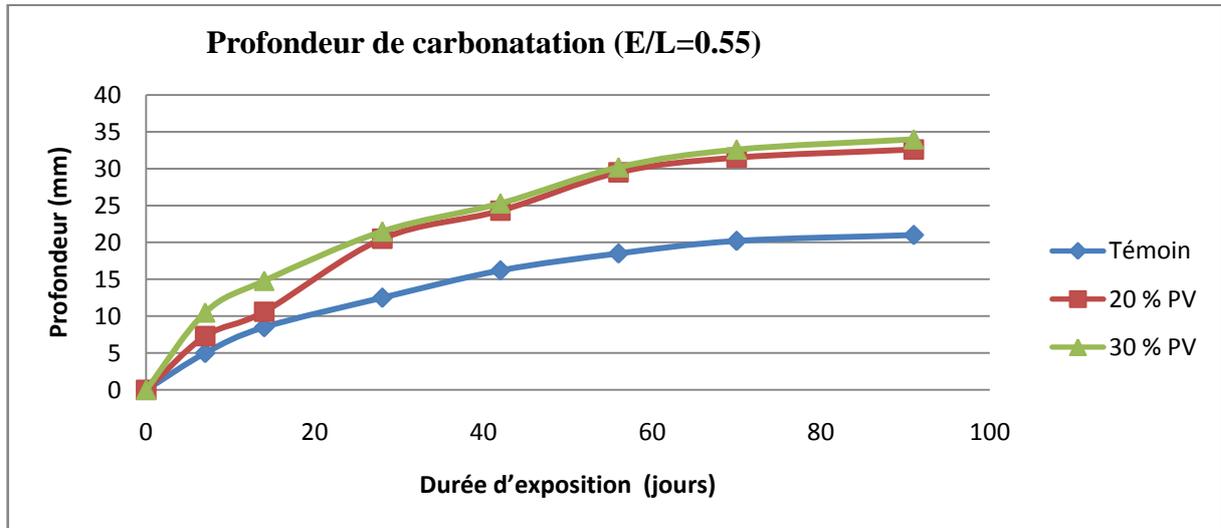


Figure 5.1: Profondeur de carbonatation (E/L=0.55)

➤ Pour un rapport $E/L=0.45$:

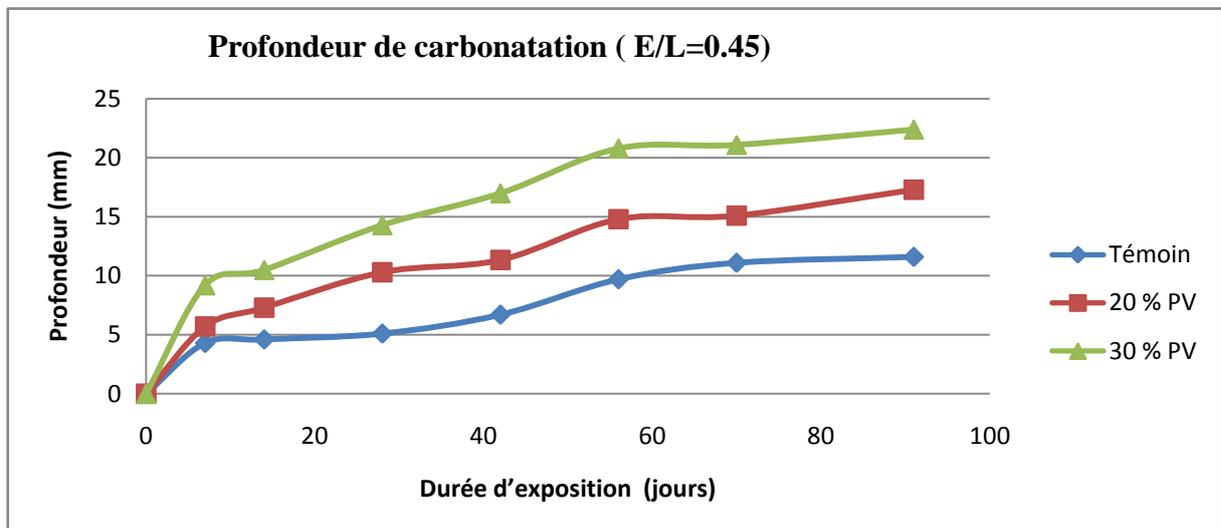


Figure 5.2: Profondeur de carbonatation (E/L=0.45)

➤ Pour un rapport $E/L=0.40$:

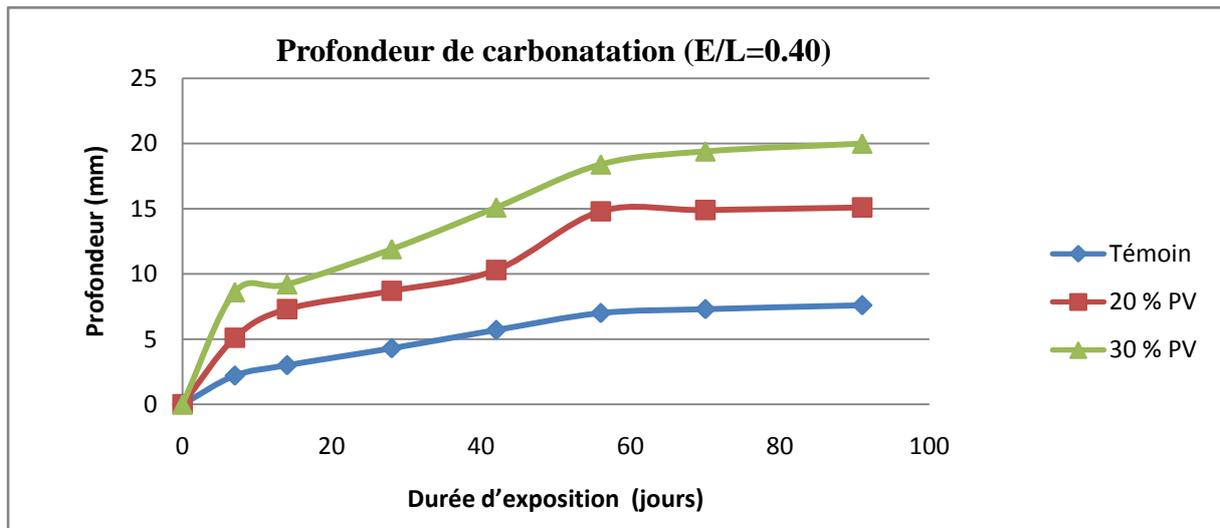


Figure 5.3: Profondeur de carbonatation (E/L=0.40)

- La progression de la carbonatation dans les bétons est exprimée par la profondeur, cette dernière augmente avec le temps pour les différents rapports (E/L). On remarque aussi que la profondeur de carbonatation diminue avec la diminution du rapport (E/L).
- Le béton témoin résiste mieux à la carbonatation en le comparant avec les autres bétons avec ajouts.
- Le béton avec 20 % de poudre de verre semble résister mieux que celui avec 30 % et cela quelque soit le rapport (E/L).
- La carbonatation est très forte au jeune âge mais sa cinétique est ralentie à moyen et long terme.

5.3. Interprétation des résultats

L'incorporation de la poudre de verre diminue la résistance des bétons à la carbonatation. Toutefois, ces bétons ont une faible teneur en clinker dans la mesure où une partie de leur ciment est remplacée par de la poudre de verre. Par conséquent, ils ont une faible quantité de Portlandite. Sachant que la cinétique de carbonatation est plus importante lorsque la quantité de Portlandite (principal produit carbonatable) présente est plus faible, la cinétique de carbonatation est donc accélérée en présence de la poudre de verre.

De surcroît, les bétons incorporant de la poudre de verre ont une plus faible teneur en Portlandite car celle-ci réagit avec la silice contenue dans la poudre de verre, de sorte qu'une

Chapitre 5 : Présentation et interprétation des résultats

plus petite quantité de CO_2 est nécessaire pour consommer toute la Portlandite en produisant du $CaCO_3$. Cependant, la réaction pouzzolanique (un bon mûrissement est nécessaire afin que cette réaction se produise) densifie la structure de sorte que la diffusivité est réduite et que la cinétique carbonatation s'en trouve ralentie.

5.4. Conclusion

A cause de sa composition chimique, la poudre de verre ajoutée aux bétons induit la diminution de la résistance à la carbonatation, cependant l'utilisation des bétons avec un faible rapport (E/L) peut produire des solutions pour augmenter la résistance à la carbonatation lors de l'utilisation de la poudre de verre, ajouter à cela une bonne utilisation des adjuvants pour assurer l'hydratation du liant.

Conclusion générale

Conclusion générale

À l'instar de tous les produits, procédés et matériaux, le béton doit faire l'objet d'une optimisation quant à l'impact environnemental de sa fabrication et de son utilisation. De ce point de vue, la première démarche consiste à optimiser les procédés d'obtention de ses différents constituants. Parmi ceux-ci, la fabrication du ciment se trouve être la première source générant des rejets ayant un impact sur l'environnement, notamment celui du dioxyde de carbone comme gaz à effet de serre. Ainsi, l'optimisation peut être menée en réduisant la quantité de ciment dans le béton. Une partie du ciment est alors remplacée par des additions minérales durant le malaxage, pour obtenir des bétons qui ont un bon impact environnemental.

Compte tenu de la non biodégradabilité des déchets de verre et les problèmes rencontrés par les décharges pour s'en débarrasser, l'utilisation de ces déchets dans l'industrie du ciment et du béton peut fournir des solutions environnementales et économiques très pratiques pour valoriser ces types de déchets.

L'étude menée a permis de connaître l'effet de l'incorporation de la poudre de verre comme ajout cimentaire sur la durabilité en général et la carbonatation en particulier, les bétons avec poudre de verre ne montrent pas des résistances satisfaisantes vis-à-vis de la carbonatation. La résistance à la carbonatation diminue lorsque le taux d'incorporation augmente, l'incorporation massive de la poudre de verre affecte donc la durabilité du béton.

L'utilisation des faibles rapports (E/L) peut s'avérer une solution pratique pour diminuer les effets induits par la poudre de verre, néanmoins l'utilisation des faibles rapports (E/L) doit être accompagnée par une utilisation adéquate des adjuvants pour assurer une bonne hydratation et une résistance satisfaisante notamment au jeune âge.

L'utilisation des bétons avec poudre de verre doit toutefois être compensée par une composition adaptée du béton, une cure suffisamment longue et un enrobage satisfaisant des armatures.

Bibliographie

Bibliographie

1. Topcu.IB, Canbaz. M ,*Properties of concrete containing waste glass. Cement and Concrete Research* 34 (2004) 267–274.
2. WSDTED, *Washington State Department of Trade and Economic Development, Glass Feedstock Evaluation Project.*, (1993)USA.
3. Samtur H , *Glass recycling and reuse. University of Wisconsin, National Science Foundation*,(1974), NTIS PB239674.
4. Ahmed.I, *Use of waste materials in highway construction. Purdue University*,(1991), FHWA/INJHRP-91/3.
5. Phillips JC et al ,*Reuse glass aggregate in Portland cement concrete,Proceedings of the Third Mineral Waste Utilization Symposium*,(1972), US Bureau of Mines, Chicago,Illinois.
6. Din Z. *The Physical Chemistry of Silicates (in Chinese). 1979, Chinese Construction Industry Press,,Beijing, China.*
7. Zachariasen WH. *The atomic arrangement in glass. J Am Chem Soc* 1932;54:3841–51.
8. Isa.H.,*The need for waste management in the glass industries: a review, Scientific Research and Easy* 3 (2008) 276-279.
9. Jani.Y, Hogland, *Waste glass in the production of cement and concrete, Journal of Environmental Chemical Engineering* 2 (2014) 1767- 1775.
10. Ling.T C et al , *Management and recycling of waste glass in concrete products : current situations in Hong Kong, Resources , Conservation and Recycling* 70 (2013) 25-31.
11. Shao et al ,*Studies on concrete containing ground waste glass,Cement and Concrete Research* 30 (2000) 91–100 .
12. Shayan A, Xu A. *Value-added utilisation of waste glass in concrete. Cement and Concrete Research* 36 (2006) 457 – 468.
13. Shuhua Liu et al ,*Effect of curing temperature on hydration properties of waste glass powder in cement-based materials,Akade´miai Kiado´, Budapest, Hungary* 2014.
14. Dhir, R. K., and Dyer, T. D. (1999). "Suitability of glass cullet for use as a cement component in concrete." *Final Rep. for EPSRC WMR3 Programme.*

Bibliographie

15. Taha.B, Nounu.G, *Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder*, *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 497–505.
16. Serpa D, Santos Silva A, de Brito J, Pontes J, Soares D. *ASR of mortars containing glass*. *Constr Build Mater* 2013;47:489–95.
17. Maraghechi.H et al, *Pozzolanic reactivity of recycled glass powder at elevated temperatures: Reaction stoichiometry, reaction products and effect of alkali activation*, *Cement & Concrete Composites* 53 (2014) 105–114.
18. Taha.B, Nounu.G, *Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement* *Construction and Building Materials* 22 (2008) 713–720.
19. Shi.C et al , *Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders*, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 987–993.
20. Yahia.A, *cours "technologie du béton"*, université de sherbrooke, 2011.
21. <http://www.gramme.be/unite9/pmwikiOLD/pmwiki.php?n=BETON0607.IndicateursDeDurabilite>.
22. Amouri.C, *Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité)*, thèse de doctorat de l'université Mentouri, Constantine, 2009. .
23. <http://doc.lerm.fr/lutilisation-cendres-volantes-beton/>.
24. Ali-Boucetta. T, *contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performance*, thèse de doctorat de l'université Badji Mokhtar, Annaba, 2014.
25. Chaussadent.T, *"Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé"*, (1997) *Rapport du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris)*, Thème de recherche OA9.
26. Vu.N.T, *Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste*, thèse de doctorat de l'université de Toulouse, (2011).
27. Thiery.M, *"Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons – Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique"*, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (2005).
28. Yoon I.K et al, *"Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete"* *Atmospheric Environment Journal*, (2007), 41: 7274 – 7285.

Bibliographie

29. Moro.R.F, *Approche de performance pour la durabilité des bétons exposés à la carbonatation*, thèse de magister de l'université d'Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2012.
30. Dunster A.M, "An investigation of the carbonation of cement paste using trimethylsilylation". *Advances in Cement Research*, 1989, 2: 99-106. .
31. Zidol.A, *Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre*, Thèse de l' université de Sherbrooke, 2014. .
32. Ngala V. T. et Page G. L., « Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes », *Cement and Concrete Research*, 27(7):995-1007, 1997. .
33. Powers, T. C., "A hypothesis on carbonation shrinkage". *J. Res. Dev. Portld Cem. Ass.*, 4(2) : 40-50, 1962.
34. Swenson.E. G, Sereda.J, *Mechanism of the carbonatation shrinkage of lime and hydrated cement*, *Journal of Applied Chemistry*, 18(4): p 111-117, 1968.
35. Oxand, *solutions for durability, fiche technique corrosion des armatures carbonatation*, 2002 .
36. Baron J., Ollivier J.P., "La durabilité des bétons", *Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris, p. 453, 1992. .
37. Tuutti, K., "Corrosion of steel in concrete", *Swedish Cement and Concrete Research Institute*, Stockholm, 1982. .
38. Neville, A, *Can we determine the age of cracks by measuring carbonation? Dans Anonyme, Part 1, Concrete International (2003).*
39. Neville, A., *Can we determine the age of cracks by measuring carbonation? Dans Anonyme, Part 2, Concrete International, (2004).*
40. Parrott, L. J. , *A Review of Carbonation in Reinforced Concrete. British Cement Association. 126 p, (1987).*
41. Leghreib.M, Tamaoust.A, *Etude des bétons à la poudre de verre, Projet de Fin d'Etude , Ecole Nationale Polytechniques*, 2015.
42. Hyrvet. N, "Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton", *Thèse de l'Université Paul Sabatier –, Toulouse III, 2009.*