



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية
Civil engineering department



N° d'ordre : M/GCA/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

CARBONATATION DU BETON

Présenté par :

- CHEIKR Nebia

- GRINE Bahya

Soutenu le 07 /07/ 2022 devant le jury composé de :

Président : Mr BELHOUARI FETHI

Examinatrice : Mme BELAS NADIA

Encadrant : Mr BELARIBI OMAR

Année Universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions « **ALLAH** » d'avoir fait grande en nous cette foi qui nous a permis de garder volonté et force afin d'assurer la tâche qui nous a été incombée de la façon la plus parfaitement possible.

Nos remerciements et notre reconnaissance vont, ensuite à notre encadrant, Mr **BELARIBI OMAR** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à apporté lors des différents suivis.

Nos remerciements vont aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail et de manière particulière à Mr **BELHOUARI FETHI** pour avoir accepté de présider ce jury ainsi que Mme **BELAS NADIA** pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Que l'ensemble de nos enseignants de la faculté des sciences et technologies de l'université de Mostaganem, trouvent en ces les expressions d'une gratitude et d'une reconnaissance pour avoir fait de notre niveau ce qu'il est aujourd'hui.

À nos chers parents pour leur soutien constant et leurs encouragements aussi à nos chères familles et amis proches.

Au final à toutes personnes qui ont contribué à notre succès de près et de loin.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES NOTATIONS	
ملخص	
RÉSUMÉ	
ABSTRACT	
INTRODUCTION GÉNÉRAL	1

CHAPITRE I: NOTION SUR LA DURABILITÉ DU BÉTON

I.1. INTRODUCTION	4
I.2. FACTEURS INFLUENÇANT LA DURABILITÉ	4
I.3. LES ATTAQUES CHIMIQUES DES BÉTONS	6
I.3.1. Actions des acides	6
<i>I.3.1.1. Sources des acides</i>	<i>6</i>
<i>I.3.1.2. Mécanisme d'attaque</i>	<i>6</i>
<i>I.3.1.3. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides</i>	<i>7</i>
I.3.2. Actions des sulfates	9
<i>I.3.2.1. Source des sulfates</i>	<i>9</i>
<i>I.3.2.2. Mécanisme d'attaque</i>	<i>9</i>
<i>I.3.2.3. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques sulfatiques</i>	<i>12</i>
I.3.3. La carbonatation	13
<i>I.3.3.1. Les mécanismes de carbonatation</i>	<i>13</i>
<i>I.3.3.2. Effets des ajouts minéraux sur la carbonatation des bétons</i>	<i>14</i>
I.3.4. Attaque par L'eau de mer, point de vue chimique	15
I.3.5. La corrosion des armatures induite par les ions chlorure	16
<i>I.3.5.1. L'amorçage et la propagation</i>	<i>16</i>
<i>I.3.5.2. Conséquence de la corrosion</i>	<i>17</i>
I.3.6. La position de la norme NF EN 206-1	17
<i>I.3.6.1. Classes d'exposition</i>	<i>18</i>
<i>I.3.6.2. Classes de chlorures</i>	<i>18</i>
<i>I.3.6.3. Exigences de la norme</i>	<i>19</i>
I.4. CONCLUSION	22

CHAPITRE II: LA CARBONATATION DU BÉTON

II.1. INTRODUCTION	24
II.2. GÉNÉRALITÉS SUR LE DIOXYDE CARBONE	25
II.3. LA CARBONATATION	25
II.3.1. Carbonatation des hydrates du béton	25
<i>II.3.1.1. La Carbonatation de la portlandite $Ca(OH)_2$</i>	<i>25</i>
<i>II.3.1.2. La Carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H)</i>	<i>26</i>
<i>II.3.1.3. La carbonatation des autres constituants des matériaux cimenterie</i>	<i>26</i>

II.4. PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA CARBONATATION	27
II.4.1. Paramètres liés au milieu environnant	27
II.4.2. Paramètres liés au processus de fabrication	28
II.4.3. Conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires	29
II.4.3.1. Evolution de la microstructure	30
II.4.3.2. Evolution de la teneur en eau.....	30
II.4.3.3. Evolution des performances mécaniques	30
II.4.3.4. Evolution des propriétés de transfert	30
II.5. DÉPASSIVATION PAR CARBONATATION DU BÉTON	30
II.6. PLUSIEURS PARAMÈTRES INFLUENT SUR LA CINÉTIQUE DE CARBONATATION	31
II.7. LES BIENFAITS DE LA CARBONATATION POUR LE BÉTON	32
II.8. EFFETS DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LA CARBONATATION DES BETONS	33
II.9. CONCLUSIONS	35

CHAPITRE III: MÉTHODE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS

III.1. INTRODUCTION	37
III.2. PRESENTATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA CONFECTION DES BETON	37
III.2.1. Le Ciment	37
III.2.2. Granulats.....	37
III.2.3. La Vase Calcinée.....	39
III.2.4. Granulométrie	40
III.2.5. Les masses volumiques et surface spécifique	40
III.2.6. L'adjuvant.....	41
III.3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	42
III.3.1. La formulation étudiée	42
III.3.2. La carbonatation naturelle	43
III.4. LA RÉSULTAT OBTENUS	45
III.5. CONCLUSION.....	48
CONCLUSION GÉNÉRAL.....	50
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIE	52

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique.....	8
Figure I.2: Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l'acide citrique.....	8
Figure I.3: Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium.....	11
Figure I.4 : Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium.....	12
Figure I.5 : Expansions linéaires mesurées sur des éprouvettes de bétons d'ouvrages d'art (BOA) avec ou sans métakaolin flash	13
Figure I.6: Variabilité des performances due à la durée de la cure humide et au type de cendres	15
Figure I.7: Schéma de la cinétique de corrosion d'un ouvrage	16
Figure I.8 : Dégradation due à la corrosion des armatures.....	17
Figure II.1: Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	26
Figure II.2 : Influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation.....	27
Figure II.3 : Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative	28
Figure II.4: Influence de la cure sur la résistance d'un béton de rapport E/C = 0,5	29
Figure II.5: Profondeur de carbonatation après 9 mois.....	33
Figure II.6: Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons de classe 50 MPa.....	34
Figure II.7 : Variation de la profondeur de carbonatation dans le temps pour les troiscétons, selon l'essai accéléré (Âge du béton au début de l'essai: 60 jours).....	34
Figure III.1: Courbes granulométriques des différents granulats utilisés	38
Figure III.2: Les étapes de la préparation de la vase	39
Figure III.3 : Courbe granulométrique de la vase utilisée.....	40
Figure III.4a : Analyse DRX de la boue calcinée	41
Figure III.4b : Analyse EDS de la boue calcinée	41
Figure III.5 : Les éprouvettes destinées à la carbonatation naturelle	43
Figure III.6 : La presse utilisée pour les écrasements.....	44
Figure III.7 : La phénolphtaléine	44
Figure III.8 : Schéma illustrant le principe des mesures.....	45
Figure III.9a : Carbonatation naturelle après 12 mois	45
Figure III.9b : Carbonatation naturelle après 6 ans	46
Figure III.10: Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 12 mois et 6 ans à l'air libre de laboratoire.....	46
Figure III.11: Différence des fronts de carbonatation entre 2016 et 2022	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Résultats de résistance en compression à 28 jours et en fin d'essai de vieillissement accéléré pour les bétons d'ouvrage d'art testés	13
Tableau I.2 : Concentration des principales espèces présentes dans l'eau de mer	15
Tableau I.3 : Classes de chlorure	18
Tableau I.4 : Définition des classes d'exposition. Extraits du tableau 1 de la norme NF EN 206-1	20
Tableau I.5 : Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés du béton	21
Tableau III.1 : Composition chimique du ciment.....	37
Tableau III.2 : Composition minéralogique (%) du clinker.....	37
Tableau III.3 : Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel	38
Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques des granulats utilisés.....	38
Tableau III.5 : Caractéristiques chimiques des vases après calcination	40
Tableau III.6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de la vase.....	40
Tableau III.7 : Caractéristiques du PLASTIMENT® BV 40	42
Tableau III.8 : composition des bétons d'étude	42
Tableau III.9 : caractéristiques des bétons d'étude	42

Liste des notations

BOT 0%	Béton Ordinaire Témoin avec 0% de vase
BOV10%	Béton Ordinaire avec 10% de vase
BOV20%	Béton Ordinaire avec 20% de vase
BOV30%	Béton Ordinaire avec 30% de vase
CO ₂	Gaz carbonique
pH	Opposé du logarithme décimal de la concentration en ions H ₃ O ⁺ des solutions
C-S-H	Silicate de Calcium Hydraté
E/C	Rapport massique Eau sur Ciment
E/L	Rapport massique Eau sur Liant Ca Atome de calcium -
Ca(OH) ₂	Portlandite
CaCO ₃	Carbonate de calcium
C3A	Aluminate tricalcique

ملخص

تعد ديمومة الخرسانة عنصرًا مهمًا لمقاومة الهياكل، لكن هناك عوامل مؤثرة عليه، مثل الكربنة واختراق الكلوريد في الهياكل الخرسانية المسلحة. الكربنة ظاهرة الشخوخة الطبيعية التي تؤثر على جميع أنواع الخرسانة. واحدة من عواقبها الرئيسية هي لصالح تعزيز تآكل حديد التسليح من خلال تحييدها. لذلك تستحق هذه الظاهرة أن تُدرس من أجل فهم أفضل للأمراض التي تصادف غالبًا في الهياكل الخرسانية، وبالتالي تقليل قدرتها على التحمل.

الهدف الرئيسي لعملنا هو استكمال القياسات التجريبية التي تم إجراؤها من طرف صافر[1] عن تطور حول عمق الكربنة الطبيعية في عينات من الخرسانة المهتزة (عينات بدون إضافات وأخرى تحتوي علي إضافات) تعود لعام 2016. بالفعل فإن العمل الذي نقدمه يبرز استخدام الطين المحروقة من سد الشرفة (معسكر) بهدف استغلاله كجزء مستبدل نسبيًا من للإسمنت (10 و 20 و 30%) وتأثيره على تقدم الكربنة على المدى الطويل. بعد ست سنوات من التصلب في الهواء الطلق. أظهرت نتائج قياس عمق الكربنة الطبيعية التي تم الحصول عليها أن الخرسانة التي تحتوي على 20% (BOV20%) طين محروقة قريبة جدا من الخرسانة بدون طين محروقة (BOT) مع تفوق طفيف على الخرسانة (BOV10%) و (BOV30%) على المدى الطويل (6 سنوات).

الكلمات المفتاحية: الديمومة، الكربنة، الطين المحروقة، الخرسانة المحتوية على الطين، عمق الكربنة.

RESUME

La durabilité du béton est un élément important pour la résistance des structures, mais il existe des facteurs naturels qui l'affectent, tels que la carbonatation et la pénétration de chlorures dans les structures en béton armé.

La carbonatation est un phénomène naturel de vieillissement qui affecte tous les types de béton. L'une de ses principales conséquences est de favoriser l'érosion des armatures en les neutralisant. Ce phénomène mérite donc d'être étudié afin de mieux comprendre les maladies souvent rencontrées dans les ouvrages en béton, et ainsi diminuer leur capacité portante.

L'objectif principal de notre travail est de compléter les mesures expérimentales effectuées par Safer [1] sur l'évolution de la profondeur de carbonatation naturelle des échantillons de bétons vibrés (témoin et avec ajout) qui datent de 2016. Effectivement, le travail que nous présentons met en évidence l'utilisation de la vase calcinée du barrage de Chorfa (Mascara), dans le but de son exploitation en substitution partielle au ciment (10, 20 et 30%) et son influence sur l'avancement de la carbonatation à long terme après six années de durcissement à l'air libre.

Les résultats de mesure du front de carbonatation naturelle obtenus montrent que le béton contenant 20 % de vase (BOV20%) est très proche du béton témoin sans vase (BOT) avec une légère supériorité pour les bétons (BOV10%) et (BOV30%) à long terme (6 ans).

Mots clés : Durabilité, Carbonatation, Vase calcinée, Béton ordinaire, Profondeur de carbonatation.

ABSTRACT

The durability of concrete is an important element for the resistance of structures, but there are natural factors that affect it, such as carbonation and chloride penetration in reinforced concrete structures.

Carbonation is a natural phenomenon of aging which affects all types of concrete. One of its main consequences is to promote the erosion of the reinforcements by neutralizing them. This phenomenon therefore deserves to be studied in order to better understand the diseases often encountered in concrete structures, and thus reduce their bearing capacity.

The main objective of our work is to complete the measures experiments carried out by Safer [1] on the evolution of natural carbonation of depth vibrated concrete samples (witness and with addition) which date from 2016. Indeed, the work we present evidence the use of calcined mud from the dam of Chorfa (Mascara), for the purpose of its exploitation in partial substitution of cement (10, 20 and 30%) and its influence on the advancement of long-term carbonation after six years of curing in the open air.

The natural carbonation front measurement results obtained show that concrete containing 20% mud (BOV20%) is very close to concrete control concrete without mud (BOT) with a slight superiority for concrete (BOV10%) and (BOV30%) in the long term (6 years).

Keywords: Durability, Carbonation, Calcined mud, Ordinary concrete, Depth of carbonation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La durabilité des ouvrages en béton est une caractéristique très importante, car c'est la garantie d'une sécurité et d'une durée de service accrues de ces ouvrages. Cette durabilité garantit aussi une économie considérable sur le long terme, car de tels ouvrages nécessiteront peu ou pas de réparations, d'où une économie de coûts induits par des réparations, qui peuvent être très élevés, et peuvent même dépasser les coûts initiaux de construction.

L'élaboration de tels ouvrages doit passer obligatoirement par la maîtrise et la compréhension des facteurs affectant leur durabilité. Cette connaissance permettra de situer les causes pour pouvoir proposer des solutions de prévention adaptées lors de la conception. D'autre part, elle permettra en cas de dégradations, de faire un diagnostic correct pour pouvoir réparer durablement.

Parmi les problèmes affectant la durabilité on cite la carbonatation. Elle traduit l'action de la diffusion du CO_2 dans les pores du béton et les réactions consécutives de dissolution/précipitation avec les hydrates, notamment de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui joue un rôle de tampon sur le pH. Lorsque la portlandite est consommée par la réaction de carbonatation, le pH chute à une valeur inférieure à 9, amorçant ainsi la dépassivation des aciers et engendre la corrosion.

Le phénomène de carbonatation est très lent, il se produit par la dissolution du CO_2 dans l'eau contenue dans les pores. Ainsi le rapport eau/ciment, l'humidité relative du milieu environnant et la pression du gaz carboniques à la surface du béton sont les paramètres qui jouent un rôle majeur dans le comportement du béton vis-à-vis de la carbonatation.

Ce travail représente la continuité de l'étude engagée par Safer [1] dans un but écologique, économique et technique, et ce en valorisant la vase traitée thermiquement issue du barrage de Chorfa comme étant un matériau de construction à partentière substituable en partie au ciment entrant dans la composition des bétons ordinaires sur lesquels le comportement à face la carbonatation naturelle a été suivi.

Ce travail sera présenté sous trois chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude bibliographique à partir de laquelle nous avons abordé les facteurs affectant la durabilité des bétons et l'effet des ajouts minéraux sur les différentes propriétés de durabilité des bétons. Les recherches publiées concernant

l'influence du type d'addition minérale sur les propriétés de durabilité des bétons sont également présentés dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur la carbonatation et les paramètres influençant cette pathologie, la dépassivation par carbonatation du béton ainsi que les effets des ajouts minéraux sur la carbonatation des bétons.

Quant au troisième, il décrit les matériaux entrant dans la composition des bétons étudiés par Safer [1], formulés à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport E/C identique ainsi que les méthodes d'essais qui nous ont permis de mesurer la grandeur de durabilité par l'attaque du dioxyde de carbone (CO_2) à travers la carbonatation naturelle, et finalement les résultats des essais de carbonatation naturelle des bétons comparés à ceux déjà effectués sur ces mêmes bétons six ans auparavant.

Enfin, nous clôturons cette étude par une conclusion générale qui recouvrera les principaux résultats dégagés et les perspectives envisageables pour le futur.

CHAPITRE I
NOTIONS SUR LA
DURABILITE DU BETON

I.1. INTRODUCTION

La durabilité des bétons dépend beaucoup de la porosité, cette dernière conditionne l'intensité des interactions du béton avec les agents agressifs. Les pores à l'intérieur de l'ouvrage facilitent le processus d'endommagement, lequel s'initie généralement en surface. [2]

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par trois grandeurs physiques : la perméabilité, la diffusivité et l'absorption. Ces trois paramètres sont considérés comme des « indicateurs de la durabilité ».

Ces indicateurs de la durabilité correspondent à trois mécanismes bien distincts de transport de matière : la perméabilité décrit un écoulement (d'eau ou de gaz par exemple) qui se produit sous gradient de pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que de leur interconnexion. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur interconnexion, L'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires, elle dépend des pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant.

Le transport de matière par perméabilité ou diffusivité, caractérise l'aptitude à l'usage de béton. Plus la résistance du béton augmente contre les phénomènes de transport, plus la durabilité est augmentée. C'est la raison pour laquelle, la compréhension des mécanismes de transport dans un milieu poreux est très importante.

Les transferts dans une pièce de béton durci s'établissent par l'intermédiaire :

- D'un réseau poreux, qui apparaît normalement dans la structuration de la pâte au cours de son hydratation.
- D'un réseau des fissures qui résulte lui-même du fonctionnement normal de certaines structures en béton armé (dalles, poutres) et éventuellement de diverses causes accidentelles. Dans ce cas, l'augmentation de la capacité de pénétration de ces agents dans le béton facilite la détérioration de la structure. [3]

I.2. FACTEURS INFLUENÇANT LA DURABILITE

La durabilité peut être altérée par diverses actions physiques ou chimiques néfastes qui font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. Par conséquent, la caractérisation dimensionnelle des bétons vibrés nécessitent la détermination de certaines propriétés physico-chimiques.

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une décalcification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physicochimiques et mécaniques. D'une part cette augmentation de porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité.

En plus, les sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant le processus de dégradation chimique.

La perméabilité, la diffusion et l'absorption sont les trois principaux processus qui peuvent amener des substances agressives à pénétrer dans le béton et affecter ses qualités mécaniques et protectrices (à l'égard de la corrosion des armatures principalement). La perméabilité concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression, la diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. D'autre part, les trois fluides naturels qui peuvent se déplacer selon les processus mentionnés ci-dessus et remettre en cause la durabilité du béton sont : l'oxygène, l'eau (contenant ou non des ions agressifs) et le dioxyde de carbone.

La durabilité du béton dépend donc de sa capacité à résister à la pénétration de ces fluides à l'intérieur du matériau suivant les trois mécanismes d'écoulement possibles.

Bien que dans la réalité les différents mécanismes de transfert agissent simultanément, ceux-ci sont examinés (en laboratoire) séparément afin d'apprécier les propriétés fondamentales en jeu. Différents essais ont donc été réalisés pour quantifier les propriétés révélatrices de ces processus de dégradation physico-chimique du matériau béton. La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons courants sont les (norme XP 18-305 maintenant NF EN 206-1).

Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel – dégel, la pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du processus de corrosion des armatures, Les réactions chimiques internes, mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau, telles que l'alcali-réaction ou les attaques sulfuriques, sources de gonflement et de fissuration du béton. Les caractéristiques microstructurales des bétons sont principalement influencées par : [4 ;5 ;6].

- Un volume de pâte.
- La présence d'additions en quantité importante.
- Un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

L'influence des additions [7 ;8 ;9 ;10 ;11]. Sur la matrice cimentaire dépend de la taille des particules, de leurs compositions chimiques et minéralogiques. Les plus fines d'entre elles permettent d'accroître la compacité du squelette granulaire et aussi de diminuer l'épaisseur et la porosité des auréoles de transition (interfaces pâte – granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros). En ce qui concerne la densité du réseau de bulles d'air, celle-ci dépend de l'utilisation ou non d'un entraîneur d'air spécifique mais également de l'effet entraîneur d'air du super plastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. La durée de malaxage est également un facteur important : un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus.

I.3. LES ATTAQUES CHIMIQUES DES BETONS

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très liées. De part sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [12]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les acides, par les sulfates et par le dioxyde de carbone.

I.3.1. Actions des acides

Les environnements agressifs du point de vue de la lixiviation et des attaques acides peuvent être assez variés, et combinés à d'autres types d'agressions. Mais les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisées, en particulier en calcium, et neutres (pH= 7) voire acides (pH <7).

Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium Ca^{2+} et hydroxyde OH^- [13]. Leur transport vers le milieu extérieur est donc diffusif, ce qu'ont permis de confirmer les modélisations du phénomène [14 ;15].

La solution interstitielle n'étant plus saturée en ions calcium et en hydroxyde, les composés solides contenant ces espèces se dissolvent. La teneur en calcium des produits solides décroît avec la diminution de la concentration en calcium dans la solution porale. La lixiviation commence par la dissolution de la portlandite, puis des monosulfoaluminates, l'ettringite et les C-S-H se décalcifient [16 ;17 ;18].

I.3.1.1. Sources des acides

Les milieux acides les plus fréquents sont :

Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.

Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires.

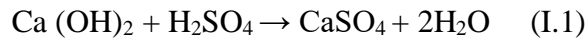
Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.

Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.

I.3.1.2. Mécanisme d'attaque

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

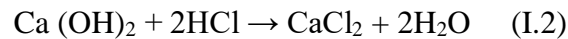
L'acide sulfurique (formule I.1) est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau

L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminat de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'étrangéité ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) moins soluble dans l'eau.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La (formule I.2) décrit la réaction entre l'acide chloridrique et la portlandite.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → chlorure de calcium + eau

Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [5].

1.3.1.3. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides

Les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de lixiviation et de l'attaque acide. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en portlandite dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité et des CSH plus denses et stables. D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et globalement cela se traduirait par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles [7]. Ainsi les liants comprenant des additions pouzzolanique telles que les fumées de silice ou les cendres volantes font preuve d'une meilleure résistance à la lixiviation et aux attaques acides [8 ;16]. La littérature est riche en résultats sur l'effet des ajouts minéraux sur la résistance des matériaux cimentaires dans les milieux acides, nous citons à titre d'exemple quelques travaux essentiels :

Kostuch et al [17] ont montré qu'en substituant 10% de métakaolin la résistance aux attaques acides est augmentée. Il associe ce phénomène à deux paramètres qu'induit la substitution de métakaolin dans la matrice cimentaire :

- Le métakaolin diminue le coefficient de transfert donc l'avancée de la solution acide.
- La réaction pouzzolanique transforme la Portlandite en CSH qui a un coefficient de solubilité plus bas et donc améliore la résistance du béton envers ces attaques.

Enfin, d'après Roy [18], la résistance aux attaques acides des liants avec métakaolin augmente avec le taux de substitution. La perte de masse diminue de 4,5 % à 2 % lorsque le taux de substitution augmente de 7,5 à 22,5 %.

Rahmani et Ramzani pour [19] ont suivi la perte de masse des mortiers et bétons soumis à l'attaque de l'acide sulfurique. Leurs résultats la Figure I.1, après 6 mois d'immersion, montrent une perte de masse de 17,8 % pour le béton à base de filler (C2), de 18,6% pour l'addition binaire filler + fumée de silice (C3) et de 10 % pour le filler + pouzzolane

naturelle(C4). Pour les bétons témoins (C1), la perte de masse était plus importante, cependant l'addition binaire filler + pouzzolane naturelle (C4) conserve sa meilleure résistance dans un environnement d'acide sulfurique.

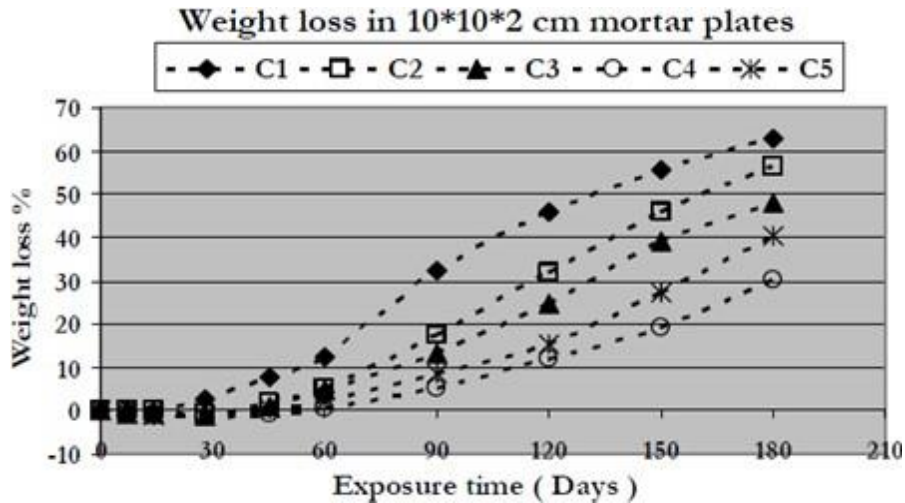


Figure I.1: Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [20]

Ghrici et al. [21] ont trouvé que le filler calcaire présente une meilleure résistance dans la solution d'acide sulfurique que celle avec de l'addition pouzzolane naturelle et l'addition binaire pouzzolane naturelle + filler calcaire. Cependant dans la solution d'acide chlorhydrique le béton à base de pouzzolane naturelle présente une faible perte de masse.

Tamimi [22] a remarqué que la substitution de ciment par 50 % de cendre volante est très bénéfique en termes de résistance des bétons à haute performance vis-à-vis de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique. Avec 60 %, l'effet positif de cendre volante diminue et la perte de masse augmente.

D'après les travaux de Rackel [23] la Figure I.2, les pâtes avec métakaolin sont moins résistantes à l'attaque vis-à-vis de l'acide citrique que celle avec 100% de CEMI.

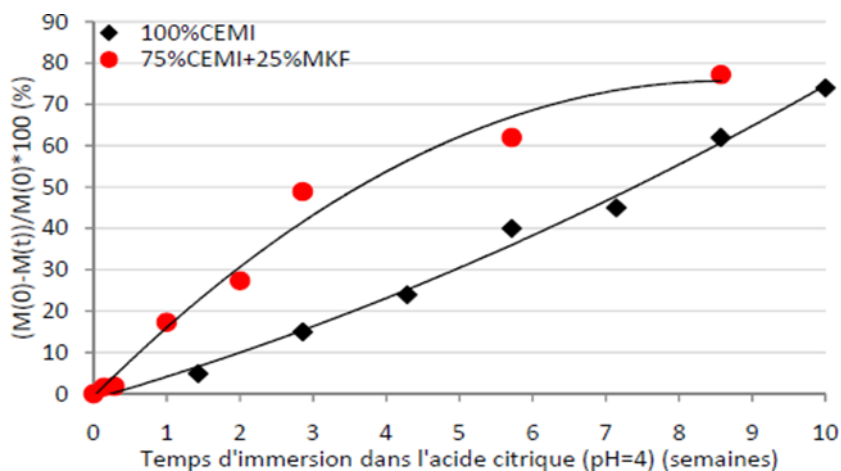


Figure I.2: Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l'acide citrique [23]

D'un point de vue des attaques à l'acide citrique, les matrices avec métakaolin sont, d'après les résultats, moins résistante [23]. La seule hypothèse pour expliquer ce phénomène est la pression des sels d'acide citrique. Les sels se formant dans les pores de la matrice, exercent une pression capable de la fissurer.

Comme les pores sont plus fins dans les matrices avec métakaolins la matrice subit plus rapidement cette pression, ce qui accélère la ruine des éprouvettes, comparée à celles avec 100% de CEMI.

I.3.2. Actions des sulfates

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition – XA, environnements chimiquement agressifs [3].

L'attaque sulfatique externe est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les CSH ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide, ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

I.3.2.1. Source des sulfates

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut rencontrer des concentrations élevées (>5%) telles que :

- Afrique du Nord
- Prairies Canadiennes
- Région parisienne : Na_2SO_4 (58g/l), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (194g/l), $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (440g/l) et CaSO_4 (2,1g/l)

Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions SO_4^{2-} . Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec la formation d'acide sulfurique. Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).

Les sources de sulfates peuvent aussi être internes :

- Contamination des granulats par du plâtre
- Granulats gypseux
- Sulfures dans certains granulats

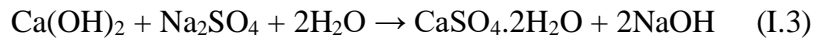
I.3.2.2. Mécanisme d'attaque

Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et anhydrite CaSO_4), et des sulfates de magnésium (epsomite

MgSO₄B. 2HB₂BO) forment la source externe de sulfates la plus présente dans la nature. Cependant, ce n'est que lorsque ces sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton, réagir avec les hydrates et changer leur structure.

Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [24] :

Formation du gypse secondaire : (formule I.3)

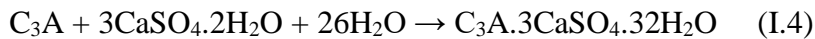


NaOH : Alcalinité élevée → stabilisation des CSH.

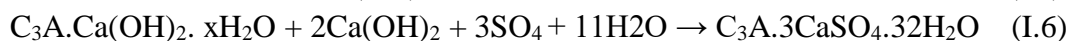
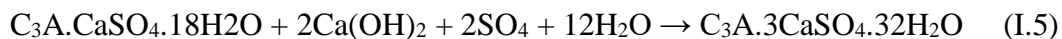
CaSO₄.2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, il n'y a pas ou peu d'expansion. Cependant, son dispositif agit pour diminuer la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment due à la dissolution de la portlandite CH et le gel et la décalcification du C-S-H qui est responsable des propriétés liantes de la pâte de ciment [25].

Formation d'ettringite secondaire :

a) À partir du C₃A anhydre résiduel : (formule I.4)



b) À partir des aluminates hydratés : (formules I.5 et I.6) (Ettringite secondaire)



La précipitation de l'ettringite secondaire conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieures au volume du solide initial.

La Figure I.3 schématise le mécanisme proposé par Santhanam et al [26] dans le cas de l'attaque par les sulfates de sodium. L'étape 1 décrit l'état initial du processus. Dans le cas d'une solution à bas pH (6-8), le temps du déclenchement de l'expansion est réduit [27 ;28]. Toutefois, le taux d'expansion après cette initiation (au cours de l'étape 2), n'est pas différente lorsque le pH est faible [28]. Dans l'étape 2, le gypse et l'ettringite commencent à se former à la surface. Ainsi, comme il est décrit dans l'étape 3, une force de compression résultante est produite à la surface. Des fissures à l'intérieur du mortier sont provoquées (étape4) avec un dépôt de produits au niveau des fissures et même dans la pâte. Le gypse se dépose dans les fissures et dans les vides parce que ceux-ci fournissent les meilleurs sites de nucléation. Il existe trois zones distinctes dans le mortier : zone de surface désintégrée, la zone de dépôt des produits d'attaque, et à l'intérieur la zone de fissures qui est chimiquement inchangée.

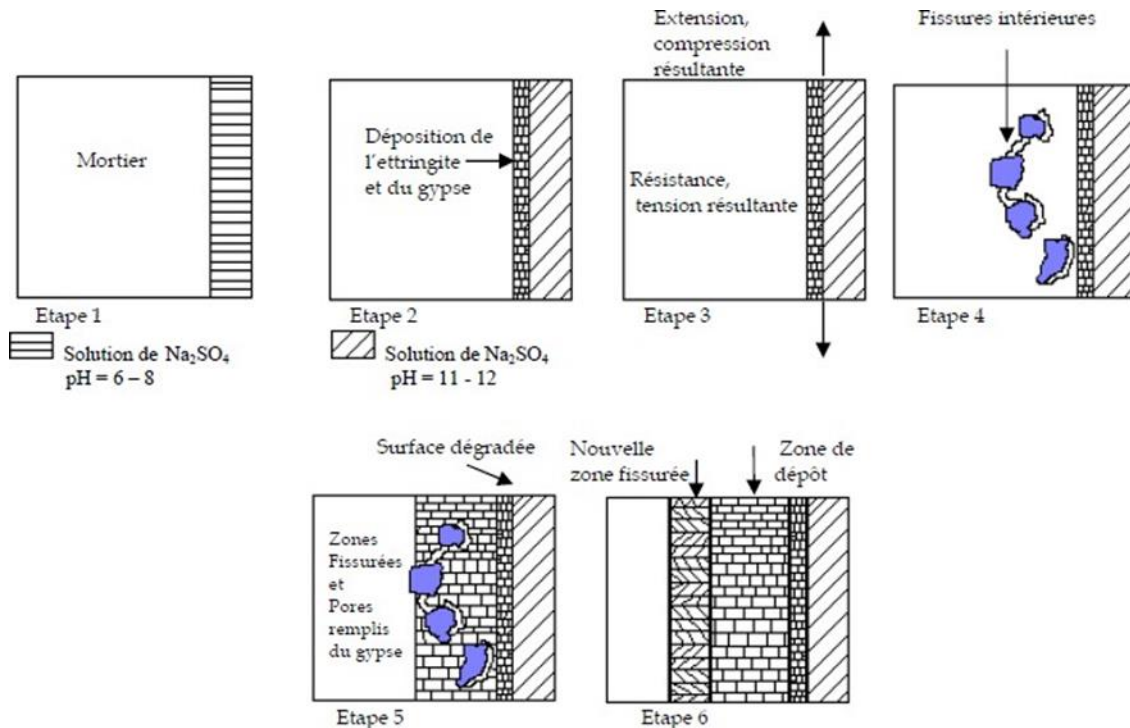
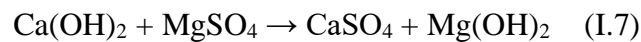


Figure I.3: Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium [28]

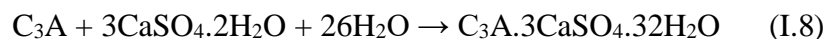
Les mécanismes de dégradation sont dépendant également de la nature du cation (Ca^{2+} ; K^+ ; Mg^{2+} ...etc.) qui est associée aux ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium [29].

Le sulfate de magnésium réagit par double action (formules I.7, I.8 et I.9) :

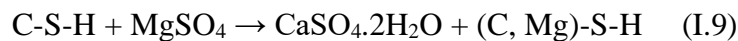
En présence de magnésium la portlandite réagit pour former de la brucite, le gypse et l'ettringite :



$\text{Mg}(\text{OH})_2$: Brucite (faible solubilité, alcalinité faible, pH faible)



Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les CSH :



(C, Mg) -S-H : gel faiblement cohésif.

Le mécanisme proposé dans le cas de l'attaque par les sulfates de magnésium est schématisé dans la Figure I.4. Une couche de brucite (hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$) se forme rapidement sur la surface de l'échantillon en raison de la réaction de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec la solution. La couche de brucite est souvent complétée par une couche de gypse qui se forme à la suite de la même réaction à l'intérieur de la couche de brucite d'où une augmentation du taux d'expansion [30]. Une fois que les canaux d'écoulement sont établis à travers la surface de la couche de brucite, une attaque directe des CSH peut se produire. À la suite de cette attaque, la formation de MSH et de gypse secondaire aura lieu (étape 4). La détérioration finale du mortier est la conséquence de la perte de résistance du fait de la transformation de la pâte en MSH. (Ettringite secondaire).

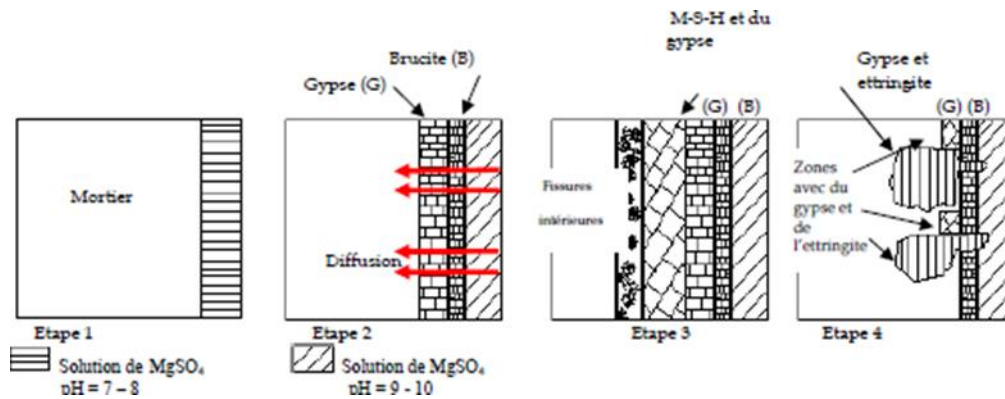


Figure I.4 : Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium [30]

Les eaux souterraines ou l'eau de mer sont souvent riches en sulfates de magnésium ($MgSO_4$). Dans ce cas, les deux ions, cations et anions, participent à la réaction. Les ions SO_4^{2-} réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions Mg^{2+} peuvent réagir avec les ions OH^- et former de la brucite ($Mg(OH)_2$) ou causer un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les CSH. Le silicate de magnésium hydraté (MSH) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente [30].

1.3.2.3. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques sulfatique

Dans une étude de la résistance du béton à l'attaque par des sulfates [16], il constater l'augmentation du gain de masse avec la diminution de la classe de résistance et ainsi avec l'augmentation du rapport E/L équ. En effet, quand le rapport E/C diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, et rendent donc la pénétration des agents agressifs plus difficile [16].

D'autre part, la présence d'une forte concentration en Al_2O_3 dans le système permet aussi de contrecarrer la formation d'ettringite. Ceci est confirmé par les études de Ramlochan et al. [31] qui observent que les matériaux pouzzolaniques tels que les métakaolins, les cendres volantes et la fumée de silice, diminuent le phénomène d'expansion lié à la formation d'ettringite différée, mais aussi retardent l'initiation de cette expansion en ralentissent sa cinétique.

Rackel [23] à testé l'effet des attaques sulfatiques externes sur les bétons d'ouvrage d'art (BOA) formulés avec 100% de CEMI et 75% CEMI+25% de MKF, selon le mode opératoire non normalisé développé par Messad [32]. La Figure I.5 présente les résultats des suivis de l'expansion unidirectionnelle des éprouvettes de béton en fonction du temps d'immersion dans une solution de sulfate de sodium de concentration 6g/l de SO_4 maintenue à 25°C et pH 7.

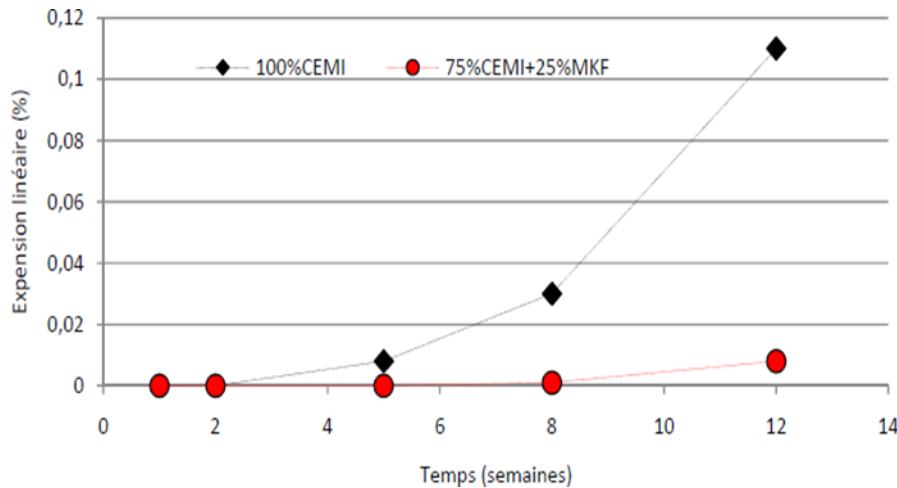


Figure I.5 : Expansions linéaires mesurées sur des éprouvettes de bétons d'ouvrages d'art (BOA) avec ou sans métakaolin flash [23]

L'expansion du béton testé diminue très fortement lorsque 25% du CEMI de métakaolin flash est substitué. Ainsi après 12 semaines de test, l'expansion du béton avec MKF est inférieure à 0.01% alors que celle du béton témoin dépasse 0.1%.

Rackel [23] a vu que lorsque le métakaolin flash est présent dans la matrice cimentaire le pH diminuait légèrement pour atteindre 12, ce pH étant celui de la dissolution de l'ettringite secondaire. Grâce à cette légère diminution, si une quantité d'ettringite secondaire se formait, elle ne serait pas stable à un tel pH, et pourrait donc de nouveau se dissoudre.

Il a aussi mesuré les résistances en compression des bétons avant et après les 12 semaines de vieillissement accéléré (Tableau I.1). L'attaque sulfatique induit une perte de résistance mécanique plus grande pour le béton témoin que pour celui contenant 25% de MKF en substitution, 9% pour le béton témoin contre 4.4% pour le béton avec MKF

Tableau I.1 : Résultats de résistance en compression à 28 jours et en fin d'essai de vieillissement accéléré pour les bétons d'ouvrage d'art testés [23] Résistances (MPa)

Résistances (MPa)	100%CEMI	75%CEMI+25%MKF
à 28 jours	50.1	52.4
après 12 semaines d'essai	45.6	50.1
Perte relative en %	9.0	4.4

Il a donc conclut [23], autant au niveau de l'expansion, de la profondeur dégradée que de la résistance mécanique, que le métakaolin flash augmente la durabilité des bétons vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe.

I.3.3. La carbonatation

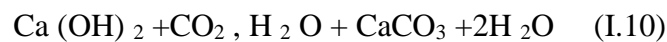
I.3.3.1. Les mécanismes de carbonatation

La carbonatation atmosphérique repose sur l'action du gaz carbonique CO_2 de l'atmosphère qui diffuse à travers le réseau poreux ou fissural du béton, et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification du milieu induit une dissolution de la

portlandite qui constitue la réserve de basicité du béton. Au contact de la solution interstitielle, le gaz carbonique CO_2 provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, comme la portlandite Ca(OH)_2 et les CSH, en carbonates de calcium CaCO_3 .

La carbonatation entraîne une baisse du pH (initialement entre 12,5 et 13,5) dans la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9. La solution interstitielle perd sa capacité protectrice envers les armatures subissant alors une initiation de la corrosion.

Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de Ca(OH)_2 [33 ;34 ;35 ;36] est synthétisé par la réaction chimique hétérogène suivante (formules I.10) :



Cette équation indique que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération de l'eau de structure.

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

1.3.3.2. Effets des ajouts minéraux sur la carbonatation des bétons

Certaines études mettent en garde contre l'utilisation de quantités d'additions importantes, en particulier des teneurs en cendres volantes supérieures à 30 % [37] et en laitiers supérieures à 50 %. L'influence négative de ces additions sur la résistance à la carbonatation a été vérifiée par d'autres études, mais il a été montré que son amplitude pouvait dépendre fortement de la durée de cure humide. Les fillers calcaires et siliceux semblent avoir une influence positive dans le cas d'une conservation humide (28 jours), et une influence négative dans le cas d'une conservation sèche trop prématuré, c'est-à-dire un démoulage à environ 30 % de la résistance moyenne à 28 jours [38].

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.

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, mais qu'elle augmente avec le taux de substitution du ciment [39].

La profondeur de carbonatation dépend aussi de la nature de l'addition, en particulier de la teneur des cendres volantes en CaO. Plus cette teneur est élevée, moins la profondeur de carbonatation est importante. Dans une étude sur les bétons à fortes proportions de cendres [40], il a été montré l'influence de la cure et de la composition des cendres sur la profondeur de carbonatation la Figure I.6. Par ailleurs des profondeurs de carbonatation identiques ont été mises en évidence sur des bétons de mêmes taux de substitution volumique en cendres volantes et en filler calcaire (sans activité pouzzolanique) [41]. Ces résultats confirment l'hypothèse de la dilution mais pas celle de la consommation de la portlandite par réaction pouzzolanique.

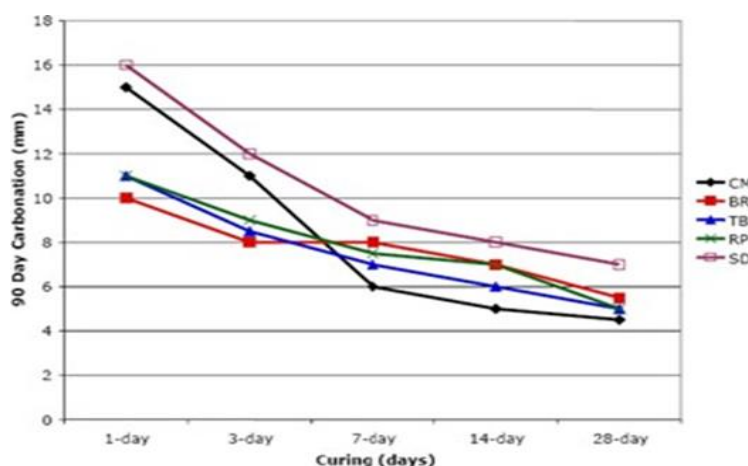


Figure I.6: Variabilité des performances due à la durée de la cure humide et au type de cendres [40]

I.3.4. Attaque par l'eau de mer, point de vue chimique

La composition d'une eau de mer est très différente de la solution interstitielle du béton, à cause de ses différences de composition. Des échanges ioniques vont se mettre en place.

Suivant les régions du monde, l'eau de mer peut avoir des compositions chimiques différentes. Elle se caractérise généralement par une grande concentration de sels dissous. La salinité peut varier de 10 g/kg dans la mer Baltique, à 40 g/kg dans la mer rouge, voire pratiquement 400 g/Kg dans les mers Caspienne et Morte. L'océan Atlantique et plus proche de nous, la mer Méditerranée a une salinité qui avoisine 30 g/kg. Par contre, les proportions relatives des principaux sels restent constantes. En pratique, on retient comme constituants majeurs ceux qui sont présents en concentration supérieur à 1 g/kg [42]. Ils sont énumérés dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : Concentration des principales espèces présentes dans l'eau de mer [42]

Espèces	Concentrations*	
	g Kg-soln ⁻¹	Mol Kg-soln ⁻¹
Ion sodium Na ⁺	10.77	0.4685
Ion magnesium Mg ⁺	1.290	0.05308
Ion calcium Ca ⁺²	0.4121	0.01028
Ion potassium K ⁺	0.399	0.01021
Ion strontium Sr ⁺²	0.0079	0.000090
Bore total B(OH) ₃ +B(OH) ₄ ⁻	0.0045	0.00042
Ion chlorure Cl ⁻	19.354	0.54591
Ion sulfate SO ₄ ⁻²	2.712	0.02823
Hydrogénocarbonate HCO ₃ ⁻ +carbonate CO ₃ ⁻²	0.118-0.146	0.00194-0.00240
Ion bromure Br ⁻	0.0673	0.000842
Ion fluorure F ⁻	0.0013	0.00007

Ces concentrations se rapportent au Kg de solution (Kg-soln). C'est-à-dire au Kg d'eau de mer (eau+sels dissous)

Les plus grandes concentrations ioniques sont les Na^+ et les Cl^- . En réalité, le chlorure de sodium présente 75 à 85% de la salinité d'une eau de mer. Par sa prépondérance dans un tel environnement naturel, cette solution est très souvent étudiée en négligeant les concentrations de toutes les autres espèces en solution.

I.3.5. La corrosion des armatures induite par les ions chlorures

La corrosion des armatures est le problème majeur susceptible de réduire la durée de vie d'une structure en béton armé. Il est d'abord important de souligner que la durabilité de telles structures est conditionnée par le béton qui protège physiquement et chimiquement l'acier de la corrosion. En effet, la forte alcalinité de la solution interstitielle contenue dans les pores du béton ($\text{pH} \approx 13$) permet la formation d'une couche passivante d'oxydes et d'hydroxydes de fer qui protège les aciers de la corrosion. Cependant, certaines espèces chimiques délétères, provenant du milieu environnant, peuvent traverser la barrière physique que constitue le béton d'enrobage, perturber la stabilité chimique de la couche passivante et corroder les armatures.

La pénétration des ions chlorures (provenant de l'eau de mer, des embruns marins ou des sels de déverglaçage) est une cause principale de ce phénomène.

I.3.5.1. L'amorçage et la propagation

Selon Tuuti [43], la dégradation du béton d'enrobage et de l'armature d'acier peut être illustrée en deux étapes successives représentées par le schéma de la figure I.7.

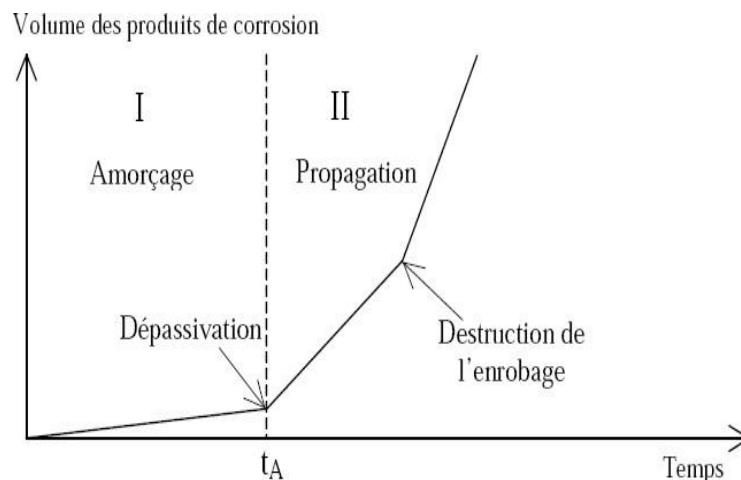


Figure I.7: Schéma de la cinétique de corrosion d'un ouvrage [43]

La première étape est la période d'amorçage ou d'incubation : l'armature d'acier est passivée initialement par les propriétés de la solution interstitielle du béton où des processus physicochimiques à l'origine de la corrosion des armatures peuvent avoir lieu à l'échelle microscopique, mais aucune dégradation n'est visible à l'échelle macroscopique d'observation.

La période d'amorçage se termine par la dépassivation du métal, et initie la phase de la propagation de la rouille par le développement des réactions d'oxydation à la surface des

armatures. Les produits d'oxydation vont alors affecter le béton d'enrobage et diminuer la capacité fonctionnelle de la structure. Comme la durée de la phase d'amorçage t_A est primordial pour la conservation des armatures, les bétons d'enrobage doivent être conçus pour retarder ou empêcher la dépassivation des aciers. La durée t_A dépend d'un certain nombre de paramètres comme la perméabilité du béton, l'épaisseur du béton d'enrobage et la capacité de fixations des chlorures par la pâte de ciment hydraté, etc.

1.3.5.2. Conséquence de la corrosion

La corrosion des barres d'acier a principalement deux effets, le premier réside dans le fait que les produits de corrosion occupent un volume beaucoup plus grand que le volume initial de l'acier. En effet, une armature oxydée peut occuper un volume jusqu'à neuf fois plus grand que le métal initial. La formation de la rouille exerce une pression interne dans le béton, ce qui entraîne éventuellement une fissuration et un éclatement. Donc la corrosion des barres d'acier, lorsque celle-ci est amorcée dans une structure, s'amplifie avec le temps. En effet, la fissuration du béton facilite le transport des agents agressifs jusqu'au niveau de l'acier, et donc augmente la vitesse de corrosion. Le deuxième effet est observée au niveau de la section de la barre d'acier, la progression de la corrosion réduit la section effective de la barre et donc diminue la résistance mécanique de celle-ci la Figure I.8.



Figure I.8 : Dégradation due à la corrosion des armatures [44]

1.3.6. La position de la norme NF EN 206-1

Au courant de l'année 2004, la norme NF EN 206-1 a été publiée en France afin de remplacer l'ancienne norme expérimentale XP P 18-305, concernant la fabrication des bétons de structure. Cette norme a entraîné des modifications au niveau des critères de résistance, des contrôles à effectuer, des classes d'environnement des bétons.

En ce qui concerne les bétons de structure, trois types de production de produits béton existent : les BPE (Bétons Prêts à l'Emploi faits par les centrales à bétons), les bétons faits par une centrale sur chantier et enfin les éléments en béton préfabriqués.

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de cette norme et une des raisons de son évolution. Les

environnements sont redéfinis et pour chacun de ces environnements où « expositions », l'obligation de moyens et l'obligation de résultats sont présentés comme deux alternatives à l'ancienne Norme. Autrement dit, les exigences relatives aux performances du béton ne se superposent pas à celles relatives à sa composition, mais peuvent les remplacer, pour une même durabilité visée [45].

I.3.6.1. Classes d'exposition

11 classes d'environnement de la norme XP P 18-305, 18 classes d'exposition pour la norme NF EN 206-1

Le choix de cette classe d'exposition est important pour la durabilité du béton. Ainsi le client prescripteur est responsable de la détermination de la classe d'exposition en fonction des paramètres liés au chantier.

Les classes d'exposition à prendre en compte sont les suivantes :

X0 : absence de risque de corrosion ou d'attaque

XC : risque de corrosion par carbonatation (XC1/XC4)

XD : risque de corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer (XD1/XD3)

XS : risque de corrosion par les chlorures de l'eau de mer (XS1/XS3)

XF : attaque par le gel-dégel (XF1/XF4)

XA : attaques d'origines chimiques (XA1/XA3)

I.3.6.2. Classes de chlorures

On répertorie quatre classes de chlorure : 0,20 ; 0,40 ; 0,65 ; 1,0. Ces taux correspondent à la teneur maximale en ions Cl⁻ rapportée à la masse de ciment.

La teneur en chlorures d'un béton, exprimée en pourcentage en masse d'ions chlorures rapportée à la masse de ciment, ne doit pas dépasser la valeur mentionnée dans le Tableau I.3, pour la classe sélectionnée.

Ce taux en chlorure est extrêmement important dans la durabilité du béton. En effet, les chlorures jouent un rôle catalyseur dans l'oxydation des armatures.

Tableau I.3 : Classes de chlorure [46]

Classes de chlorure	Teneur maximal en ions chlorure (Cl ⁻) rapportées à la masse du ciment	
Cl 0,20	0,20%	Béton contenant des armatures de précontrainte en acier
Cl 0,40	0,40%	Bétons contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées
Cl 0,65	0,65%	Bétons contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulés avec des ciments de type CEM III
Cl 1,0	1,0%	Bétons ne contenant ni armatures en acier ni pièces métalliques noyées

Le chlorure de calcium et les adjuvants à base de chlorures ne doivent pas être ajoutés au béton contenant une armature en acier, où une armature de précontrainte en acier, où des pièces métalliques noyées.

1.3.6.3. Exigences de la norme

Les exigences relatives à cette approche sont détaillées dans la norme EN 206-1, « Valeurs limites pour la composition du béton ». Elles portent principalement sur :

- Les propriétés des constituants
- Le rapport maximal eau/ciment
- Le dosage minimal en ciment

Les valeurs limites sont données dans l'annexe – normative – NA.F de la norme NF EN 206-1 (2004), sous forme de deux tableaux s'appliquant à certaines familles d'éléments en béton préfabriqués.

- NA.F.1, Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition,
- NA.F.2, Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton des produits en béton préfabriqués en usine en fonction de la classe d'exposition. Le tableau de référence est donc le tableau NA.F.1, le tableau NA.F.2 s'appliquant à certaines familles d'éléments en béton préfabriqués. Les valeurs limites données prennent en compte des exigences sur la base d'une durée de vie présumée d'au moins 50 ans pour la structure, sous réserve que l'enrobage des armatures, la mise en place et la cure du béton soient conformes et adaptés.

La norme européenne différencie bien les classes d'exposition en fonction du taux de saturation du béton, qui est un paramètre majeur pour la pénétration des chlorures [45]. Dans un béton partiellement saturé le principal mécanisme de pénétration est l'absorption, dans un béton quasi saturé, le principal mécanisme de pénétration est la diffusion.

Tableau I.4 : Définition des classes d'exposition. Extraits du tableau 1 de la norme NF EN 206-1

2. Corrosion induite par carbonatation		
Lorsque le béton contenant des armatures soudées pièces métalliques noyées est exposé à l'air et à l'humidité, les différentes classes d'expositions sont classées ci-après:		
Désignation De la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
XC1	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau.
XC2	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondations.
XC3	Humide modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie.
XC4	Alternance d'humidité et de séchage	Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.
3. Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine		
Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage, les différentes classes d'exposition sont classées comme suit :		
XD1	Humidité modérée	Surfaces de bétons exposées à des chlorures transportés par voie aérienne
XD2	Humide, rarement sec	Piscines. Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	Alternance d'humidité et de séchage	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures; Chaussées. Dalles de parc de stationnement de véhicules
4. Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer		
Lorsque le béton contenant une armature ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin, les différentes classes d'exposition sont:		
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structures sur ou à proximité d'une côte
XS2	Immergé en permanence	Éléments de structures marines
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	Éléments de structures marines

Pour les parties d'ouvrages situées en site maritime par exemple, seules les classes XC1 et XC4 sont utilisées. La classe XD peut concerner les ouvrages sur lesquels sont stockés des produits en vrac contenant des chlorures ayant une origine autre que marine ou les ouvrages en régions froides nécessitant l'utilisation de fondants. Selon la norme EN 206-1, quelques données complémentaires sur les conditions d'environnement et la détermination de la classe d'exposition XS sont précisées : Sont à classer en XS3 les éléments de structures en zone de marnage et/ou exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière des lieux. Sont à classer en XS1 les éléments de structures situés au-delà de la zone de classement XS3 et situés à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie particulière. Tous les ouvrages situés à proximité des côtes (moins de 5 km) ou les structures marines sont donc concernées par ce type d'actions environnementales (NE 206-1). La norme EN 206-1 fixe dans une annexe informative les valeurs limites spécifiées applicables pour la composition et les propriétés du béton. Alors, pour chacune de ces classes d'exposition citées dans le Tableau I.4, sont définies des valeurs limites : rapports E/C maximaux teneurs minimales en ciment et classes de résistances minimales à la compression (Tableau. I.5).

Tableau I.5 : Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés du béton

	Classes d'exposition									
	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures					
					Eau de mer			Chlorures autres que l'eau de mer		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3
Rapport E/C maximal	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45
Classe de Résistance minimale	C20/ 25	C25/ 30	C30/ 37	C30/ 37	C30/ 37	C35/ 45	C35/ 45	C30/ 37	C30/ 37	C35/45
Teneur minimale en ciment (kg/m ³)	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320
<ul style="list-style-type: none"> • Les valeurs du Tableau F.1 sont fondées sur l'hypothèse d'une durée de vie de la structure prévue de 50 ans. • Les valeurs du Tableau F.1 correspondent à du ciment de type CEM I conforme à l'EN 197-1, et à des granulats dont la dimension nominale maximale est comprise entre 20 mm et 32 mm. • Les classes de résistance minimales ont été déterminées à partir de la relation existant entre le rapport eau / ciment et la classe de résistance du béton fabriqué à partir de ciment appartenant à la classe de résistance 32,5. 										

I.4. CONCLUSION

À travers les études menées sur la durabilité de différents bétons, nous avons constaté qu'il existe une relation entre le type d'addition et/ou le substitut (dans le cas des ciments composés) utilisée dans la pâte de ciment, les propriétés de transfert (perméabilité, diffusion, absorption) et les propriétés de résistance chimique (carbonatation, attaque sulfate, attaque par l'eau de mer et attaque acide) de ces matériaux cimentaires. Cependant, les additions minérales utilisées dans ses travaux ne permettent pas de tirer des conclusions pertinentes sur la durabilité des bétons. En effet, ces derniers qui possèdent un volume élevé de pâte et d'addition minérale semblent plus influencés par le type et la quantité des ajouts ou des substituts de ciment.

Ce qui signifie clairement qu'un besoin en recherche est nécessaire dans l'étude de l'effet de la nature et des proportions de nouvelles additions minérales et substituts de ciment sur la durabilité des bétons. C'est le cas de la vase provenant des barrages et ayant subi une calcination pour la rendre active.

CHAPITRE II
CARBONATATION DU
BETON

II.1. INTRODUCTION

Tout béton venant en contact avec l'air ambiant est exposé à l'agression du dioxyde de carbone CO_2 , qui réagit avec la matrice cimentaire. On dit alors que le béton se carbonate. Ce phénomène, que l'on nomme carbonatation, provoque des changements chimiques et minéralogiques de la Matrice, entraînant conséquemment des modifications significatives de la microstructure et de la Structure poreuse.

Le phénomène de la carbonatation est connu depuis longtemps [47]. À titre d'exemple, comme il a cité un article de ZSCHOKKE [48] qui a décrit déjà parfaitement la Carbonatation du béton et ces causes, la corrosion des armatures et les précautions à prendre pour limiter les dégâts. Jusqu'au moins au début des années soixante, les problèmes liés à la Carbonatation du béton et à la corrosion des armatures n'ont que peu touchés les ingénieurs Constructeurs qui se sont plutôt concentrés sur de nouvelles méthodes de construction. Toutefois, ces trois dernières décennies, l'augmentation très rapide des dégâts, le coût des réparations et de l'entretien ont crû de telle façon que de nombreuses personnes ont commencé à s'occuper du comportement à long terme du béton armé et précontraint. De nombreuses publications traitent la carbonatation du béton armé. Récemment, PARROTT L.J [49] a compilé une bibliographie et recensé 182 articles datant essentiellement des années Soixante jusqu'à quatre-vingt-dix. Cependant, bien que tous ces efforts ont certainement permis de mieux comprendre la carbonatation et les facteurs qui l'influencent, les méthodes de prévision de la durée de vie des constructions nouvelles ou existantes ne sont actuellement pas fiables.

Dans un premier temps, on décrit les mécanismes réactionnels entre les hydrates du béton et le CO_2 , On aborde ensuite quelques généralités sur la corrosion des aciers liée à la carbonatation ; ces rappels sont l'occasion de présenter l'importance de mesurer avec précision le degré de Carbonatation pour évaluer le risque réel de corrosion des armatures.

Les conséquences de la Carbonatation sur la microstructure et l'état hydrique du matériau sont également rappelées.

Ensuite, une discussion porte sur le choix des paramètres pertinents pour traduire la susceptibilité d'un béton vis-à-vis de la carbonatation. Enfin, l'influence d'utilisation des ajouts cimentaires est bien illustrée.

II.2. GENERALITES SUR LE DIOXYDE DE CARBONE

Les premières réflexions sur le comportement du béton laissaient entendre que la pâte de ciment hydraté dans celui-ci ne réagit pas avec l'aire constituant le milieu ambiant. Néanmoins, il s'est avéré qu'en réalité, le CO₂ contenu dans l'air, réagit avec le ciment hydraté en présence d'humidité.

L'action du CO₂ se manifeste à faibles concentrations telles que l'on retrouve en milieu rural, ou la fraction volumique en CO₂ est d'environ 0,03%. Dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1%.

II.3. LA CARBONATATION

La carbonatation du béton a pour origine la faible quantité de gaz carbonique contenue dans l'air, qui est en moyenne de 0,03 %. Cette teneur peut être influencée par des facteurs perturbateurs tels que la température, la pression atmosphérique et le milieu d'exposition. [50]

La carbonatation du béton commence par la diffusion du gaz carbonique dans les pores du béton, l'anhydride carbonique se dissout et s'hydrate sous forme d'acide carbonique, qui entre en réaction avec les constituants hydratés du ciment. L'augmentant la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère environnant le béton [51], et en maintenant une humidité relative proche de 65 %, ceci correspond aux conditions de réalisation des essais de carbonatation accélérée. [52]

II.3.1. Carbonatation des hydrates du béton

II.3.1.1. La Carbonatation de la portlandite Ca(OH)₂

La portlandite Ca(OH)₂ réagit avec l'acide carbonique pour former la calcite, selon les réactions suivantes : [51 ;52]



La carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure.

La figure II.1 illustre l'intervention combinée des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus de carbonatation du portlandien

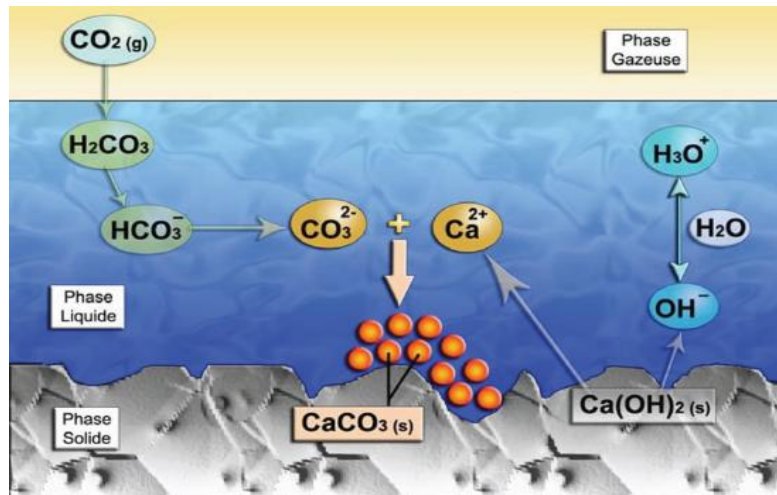


Figure II.1 : Mécanisme de carbonatation de Ca(OH)_2 . [53]

La transformation du dioxyde de carbone gazeux en ions CO_3^{2-} et la dissolution de la portlandite en ions Ca^{2+} et OH^- , conduit à la précipitation de cristaux de calcite autour des grains. [54]

Les cristaux de calcite formés ont une porosité faible. Ils vont donc progressivement isoler la portlandite et la chaux restante, réduisant ainsi la réaction de carbonatation. [55]

La portlandite est toujours présente après 80 jours de carbonatation et que l'avancement de la réaction est sensible à la granulométrie des grains. [56]

II.3.1.2. La Carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H)

La carbonatation des (C- $\bar{\text{S}}$ -H) et de CH est simultanée. La structure des C- $\bar{\text{S}}$ -H est conservée malgré leur décalcification. [57]

L'attaque chimique des C- $\bar{\text{S}}$ -H (notés ici $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) par le dioxyde de carbone s'effectue selon la réaction.



La dégradation des silicates de calcium hydratés s'accompagne d'une perte d'eau de structure, et donne naissance à un matériau siliceux hydraté amorphe. [58]

Les C- $\bar{\text{S}}$ -H de rapport C/S plus faible se carbonatent plus rapidement. [59]

II.3.1.3. La carbonatation des autres constituants des matériaux cimentaires

Le C_3A (la célite) s'hydrate avec l'eau pour former des aluminates de calcium hydratés.

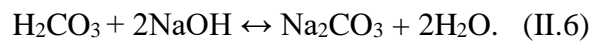
L'hydratation de C_3A donne de l'étrangéité et du monosulfoaluminate de calcium qui sont créés à partir des sulfates présents dans le ciment. [60 ; 61]

Les aluminates de calcium hydratés sont présents sous la forme de trois composés (C_3AH_6 , C_2AH_8 , C_4AH_{13}) et sont sensibles à la carbonatation. Elles donnent naissance à de carbonates de calcium, un gel d'alumine (Al(OH)_3) et de l'eau. La carbonatation de l'ettringite et du monosulfoaluminate de calcium produit du gypse qui est très soluble dans l'eau. [62]. Ainsi, si

les produits de carbonatation se trouvent en présence de portlandite et d'eau, il peut reformer de l'ettringite à partir des aluminates et du gypse libéré par la carbonatation. [63]

La carbonatation de ces hydrates et des bases présentes dans la solution interstitielle sous la forme de soude NaOH et de potasse KOH est très rapide au contact du dioxyde de carbone dissous, c'est pourquoi leur carbonatation est généralement négligée dans les modérations. [61]

La dégradation des bases par le dioxyde de carbone s'effectue selon les réactions (II.5) et (II.6)



II.4. PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA CARBONATATION

Des travaux effectués dans des laboratoires montrent l'influence des paramètres liés à la formulation de béton, au milieu environnant et au processus de fabrication sur l'intensité de la carbonatation.

La procédure expérimentale si elle doit se faire sur le phénomène naturel serait longue et lourde. Pour cette raison, la plupart des études se font avec des techniques accélérées (enceinte de carbonatation). Ceci ne correspond en rien à la réalité, et les résultats sont limités (quelques valeurs pour quelques formulations de béton).

II.4.1. Paramètres liés au milieu environnant

- **La concentration en dioxyde de carbone**

L'influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation a été étudiée par [49]. Dans les ambiances riches en dioxyde de carbone, les épaisseurs carbonatées mesurées ont tendance à être plus élevées.

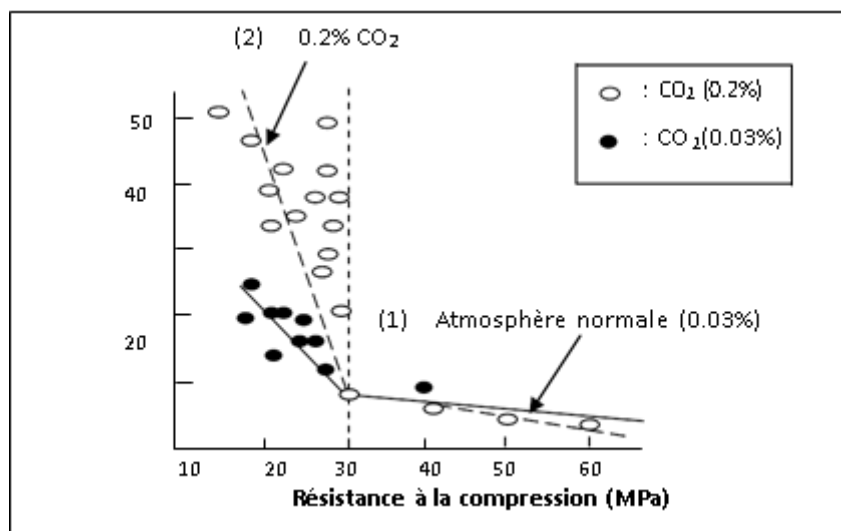


Figure II.2 : Influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation. [64]

- **L'humidité relative**

Les essais de carbonatation accélérée à 20°C des bétons traditionnels montrent que la vitesse maximale est obtenue pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 % la figure II.3.

La diffusion du gaz carbonique à travers la structure poreuse du béton est conditionnée par l'état hygroscopique des pores du matériau, et la vitesse de carbonatation du béton dépend principalement de la facilité avec laquelle le dioxyde de carbone pénètre à l'intérieur de la matrice cimentaire. [65]

Le dioxyde de carbone pénètre par l'intermédiaire de la phase gazeuse lorsque le réseau poreux accessible est désaturé ou par l'intermédiaire de la phase liquide, lorsqu'il y a transfert d'eau chargée en dioxyde de carbone dissous. [52]

Les fortes teneurs en eau correspondent à un degré de saturation élevé des pores, les processus de diffusion du dioxyde de carbone vers la surface des minéraux réactifs sont extrêmement faibles.

Le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone en phase liquide est 104 fois plus faible que sous forme gazeuse. [66]

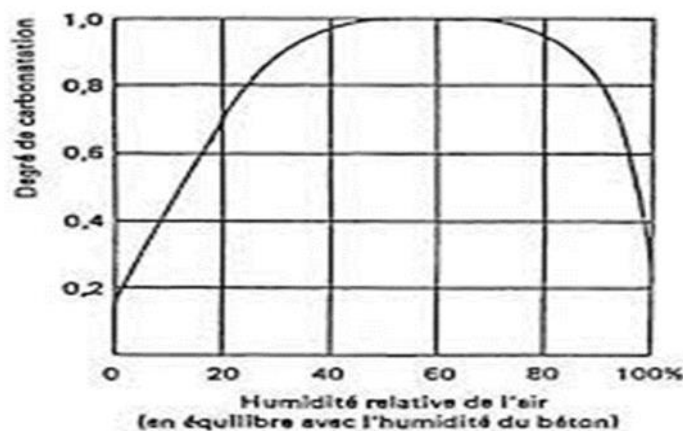


Figure II.3 : Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative. [65]

- **La température**

La température accélère le processus de carbonatation. L'échauffement du matériau favorise le séchage des pores et facilite l'accès du gaz carbonique dans la matrice cimentaire. [67 ;68]

Cependant, l'augmentation de la température diminue la vitesse de carbonatation des bétons, et que la portlandite se dégrade plus rapidement lorsque la température diminue. [52]

II.4.2. Paramètres liés au processus de fabrication

Certains facteurs influençant la carbonatation sont particuliers au domaine de la préfabrication. [64]

- **La mise en œuvre**

La vibration du béton élimine les vides d'air et lui confère une compacité maximale. Au cours de la vibration, le centre des gros granulats ne peut pas s'approcher près des parois du moule. Les zones proches des parois sont riches en particules fines. [69]

L'effet de paroi dû aux granulats qui ne peuvent se déplacer que dans des directions parallèles, conditionne en partie la microstructure du béton de peau est à l'origine d'une hétérogénéité de résistance. [69 ;70]

- **La cure**

La cure signifie les conditions appliquées aux bétons pour éviter le départ excessif de l'eau qu'ils contiennent. Elle est nécessaire pour obtenir des performances élevées en peau des bétons en maintenant l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment, donc la diminution de la taille des pores du béton.

En l'absence de cure, le béton d'enrobage perd rapidement son eau par dessiccation et l'hydratation de cette couche est ralenti. C'est pourquoi, l'effet d'une cure prolongée est bénéfique pour accroître la résistance du béton à la pénétration d'agents agressifs tels que le dioxyde de carbone et les chlorures. [71]

La durée de cure comprise entre trois et sept jours est suffisante pour optimiser la texture du matériau. [49 ;72]

La durée de cure de trois jours maximum en laboratoire serait assez proche de celle appliquée sur chantier. [73]

La figure II.4 : montre un accroissement progressif des résistances mécaniques sur des périodes de cure humide. [73]

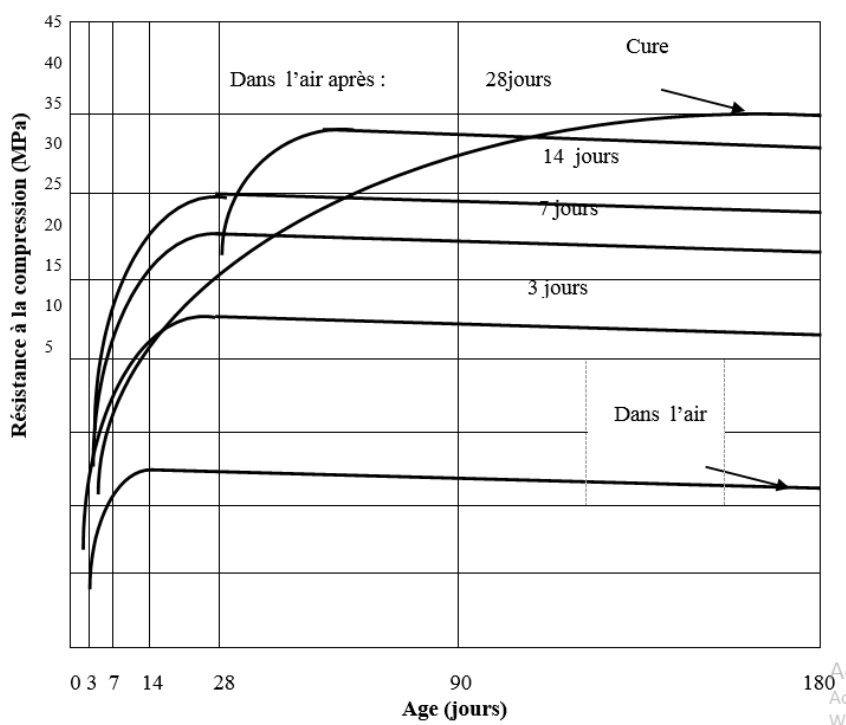


Figure II.4 : Influence de la cure sur la résistance d'un béton de rapport E/C=0,5.(73).

II.4.3. Conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires

Du point de vue du béton seul, on considère que la carbonatation a un effet bénéfique : elle réduit la porosité, améliore les performances mécaniques et limite la pénétration d'agents agressifs ; on parle d'un effet dit de « colmatage » des pores.

II.4.3.1. Evolution de la microstructure

La réaction de la carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation de la phase solide. Pour traduire dans les modèles l'effet du colmatage, il faut pouvoir relier la baisse de la porosité à l'évolution de la composition chimique du matériau cimentaire.

La distribution de la taille des pores est fortement modifiée par la carbonatation, les mesures de porosité par porosimétrie au mercure réalisées par [73], indiquent que le volume des pores de rayon inférieurs à $0.1\mu\text{m}$ est réduit sur des pâtes de rapport E/C compris entre 0.3 et 0.5.

II.4.3.2. Evolution de la teneur en eau

La carbonatation induit localement une accumulation d'humidité dans les pores, PIHLAJAVAARA observe sur matériaux carbonatés une augmentation de la teneur en eau évaporable par séchage à 150°C . [61]

La carbonatation libère une partie de l'eau de structure des hydrates, cette eau peut évidemment participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs.

II.4.3.3. Evolution des performances mécaniques

La réduction de la porosité par carbonatation et la calcite qui s'est formée consolide la microstructure, cette calcite est un excellent liant qui assure l'essentiel de la résistance mécanique des bétons.

Pour les bétons conservés dans une atmosphère de dioxyde de carbone, les résistances mécaniques peuvent augmenter de 30% par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de CO_2 . Cette augmentation de résistance est d'autant plus significatives pour des rapports E/C du matériau plus faibles. [64 ;74]

II.4.3.4. Evolution des propriétés de transfert

Le coefficient effectif de diffusion au gaz est diminué après la carbonatation de matériau à base de ciment. Il existe des interactions complexes entre les ions en solution et la surface des particules de C-S-H chargées négativement.

Ainsi, une double couche électrique présente à la surface des pores freine la diffusion des anions, le champ d'action de cette double couche est de l'ordre de grandeur du nanomètre ce qui justifie que son action sur la diffusion au gaz dans les pores du béton ne soit pas négligeable. [61]

II.5. DÉPASSIVATION PAR CARBONATATION DU BÉTON

Le métal à l'état actif subit une attaque uniforme et régulière au pourtour de sa surface. C'est le cas des armatures dans le béton carbonaté qui subissent une dissolution uniforme de la surface métallique après dépassement de l'armature. Cela résulte de la pénétration du gaz carbonique jusqu'à l'armature.

La combinaison de la portlandite contenue dans le ciment et de l'acide carbonique de l'air forme du calcaire en libérant de l'eau, qui en abaissant le pH élevé de la solution interstitielle

(pH = 12,7), va détruire la couche passive environnant l'armature. On dit que les aciers sont dépassivés permettant l'amorçage de la corrosion des armatures. Les produits de corrosion formés provoquent des décollements aux interfaces acier-béton. Pour un matériau cimentaire à porosité constante, la carbonatation devrait engendrer une expansion volumique du matériau carbonaté de 11% en raison du rapport des volumes molaires de la portlandite et de la calcite. [75]

Il a été démontré que le matériau se resature en eau dans la zone réactionnelle en raison de la réduction de porosité couplée à la quantité d'eau relarguée, ayant pour effet de ralentir l'énétration du dioxyde de carbone, et donc de ralentir l'avancement du front de carbonatation. [76]

Le taux de carbonatation dépend principalement de l'humidité relative, de la concentration en CO₂ et de la température de l'environnement où le béton est placé [77]. L'ordre de grandeur de la profondeur de pénétration du CO₂ est de 20 à 25mm en 50 ans pour un béton de porosité moyenne exposé sous nos climats.

Il a été démontré qu'à partir d'une distance de 25 à 30 mm à l'intérieur du béton, il n'y a plus d'échange gazeux dû aux dépôts de calcaire de la pâte du ciment [78]. Le pH reste stable autour de 11 et la corrosion ne se manifeste pas.

De même, les bétons immergés ne se carbonatent pas, compte tenu de l'absence d'échanges gazeux. [79]

L'état hydrique du béton influe sur sa perméabilité, la progression du CO₂ dépend de la perméabilité de celui-ci. Lors de la réalisation d'ouvrage en béton, un seuil de perméabilité est fixé de manière à limiter la pénétration d'agents agressifs comme le CO₂. Ce seuil dépend de l'exposition de l'ouvrage (état hydrique). [72]

On peut mesurer la profondeur de carbonatation de béton grâce à un essai destructif sur un prélèvement en pulvérisant un indicateur coloré, la phénolphtaléine.

La profondeur de carbonatation X(t) est exprimée en fonction du temps par la loi de Fick suivante :

$$X(t) = K\sqrt{D.t} \quad (\text{II.7})$$

Avec

D : coefficient de diffusion (diffusivité de la carbonatation) ;

K : facteur tenant compte des caractéristiques du matériau ;

t : temps (année) ;

II.6. PLUSIEURS PARAMÈTRES INFLUENT SUR LA CINÉTIQUE DE CARBONATATION

Il existe de nombreux modèles de carbonatation qui traduisent, plus ou moins directement, la résistance physico-chimique du béton contre la pénétration du front de carbonatation. Les paramètres utilisés se rapportent à :

- La porosité du béton qui conditionne la résistance « physique » du matériau à la diffusion du CO₂.
- La teneur en hydrates carbonables : plus elle est élevée, plus le béton est capable de freiner « chimiquement » la pénétration du front de carbonatation.

- La microstructure du matériau (taille des pores) dont dépend l'état hydrique du matériau qui conditionnera la cinétique de pénétration du phénomène. C'est alors essentiellement la perméabilité à l'eau liquide du matériau qui sera un indicateur de durabilité pertinent.

Ces modèles aboutissent généralement à une évolution lente en racine carrée du temps de la profondeur de carbonatation. Pour fixer les idées, avec un béton ordinaire conservé dans un environnement dont l'humidité relative est comprise entre 50 et 70 %, la profondeur de carbonatation est de 5 mm après une année, 10 mm au bout de 4 ans et 25 mm après 25 ans. Les modèles sont utilisés pour prédire la durée de vie du matériau béton vis-à-vis de l'initiation de la corrosion par carbonatation. Ils ont donc souvent comme défaut de ne pas tenir compte de la cinétique de corrosion et, dès lors, ils conduisent à un sur dimensionnement de l'épaisseur d'enrobage et à une formulation souvent trop sécuritaire du béton. Cette approche de la conception du béton est de plus en plus remise en cause dans le contexte actuel de préservation des ressources non renouvelables et de limitation de l'empreinte carbone de la construction en béton.

La carbonatation peut également être à l'origine de désordres au niveau des enduits de façade correspondant généralement à des mortiers à fort dosage en chaux grasse (Ca(OH)_2) partiellement carbonatée. L'acidification du milieu qui découle de l'attaque du CO_2 peut être à l'origine du développement de microorganismes (lichens, mousses, algues, etc.) qui ne croissent pas dans un milieu fortement basique. Ces micro-organismes sont à l'origine de salissures inesthétiques. Il est possible d'enlever temporairement ces traces par un lavage du mur avec de l'eau de Javel diluée ou en utilisant un produit fongicide adapté.

II.7. LES BIENFAITS DE LA CARBONATATION POUR LE BÉTON

À l'inverse des conséquences néfastes de la carbonatation sur la pérennité des structures en béton, la carbonatation est plutôt un phénomène bénéfique du seul point de vue du matériau béton lui-même. Il est en effet reconnu que la carbonatation des matrices cimentaires à base de ciment de type CEM I se fait avec un gain de masse correspondant à la fixation du CO_2 dans les hydrates. Le fait que le volume molaire du carbonate de calcium formé soit supérieur à celui des hydrates conduit à un colmatage de la microstructure qui rend le béton moins perméable aux agents agressifs (en l'occurrence les gaz CO_2 et O_2 , mais aussi les ions sulfates, les chlorures, et plus généralement, les eaux agressives de type eau de mer, eaux séléniteuses ou magnésiennes, etc.). Il a même été montré que la carbonatation permettait d'accroître la résistance mécanique des bétons (compression, chocs, usure, etc.) et de rendre le matériau plus stable chimiquement vis-à-vis des réactions de gonflement (réaction sulfatique interne ou externe, réaction alcali granulats, etc.).

En revanche, le module de rigidité ou module d'élasticité est augmenté, ce qui n'est pas toujours perçu comme un avantage car cela peut conduire à une fragilisation des pièces minces et à une hétérogénéité de résistance et de retrait dans le cas des enduits de façade partiellement carbonatés où on peut observer des fissures de surface qui s'arrêtent au niveau de la zone interne non carbonatée.

II.8. EFFETS DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LA CARBONATATION DES BÉTONS

D'après les données de la littérature, on peut remarquer que l'effet de la vase calciné sur la carbonatation des bétons est très peu étudié. Toutefois, les travaux dans ce domaine se concentrent sur l'influence des ajouts minéraux (filaires calcaires, pouzzolane, cendres volantes....) sur la carbonatation des bétons.

On peut citer quelques travaux sur la comparaison entre des BAP et des BOV [80]. Ces travaux montrent qu'en général, les BAP composés à partir d'un ajout de filler calcaire présentent une légère vulnérabilité par rapport aux BOV, mais il n'y a pas un important écart entre les valeurs de profondeurs de carbonatation de ces deux types de béton la Figure II.5.

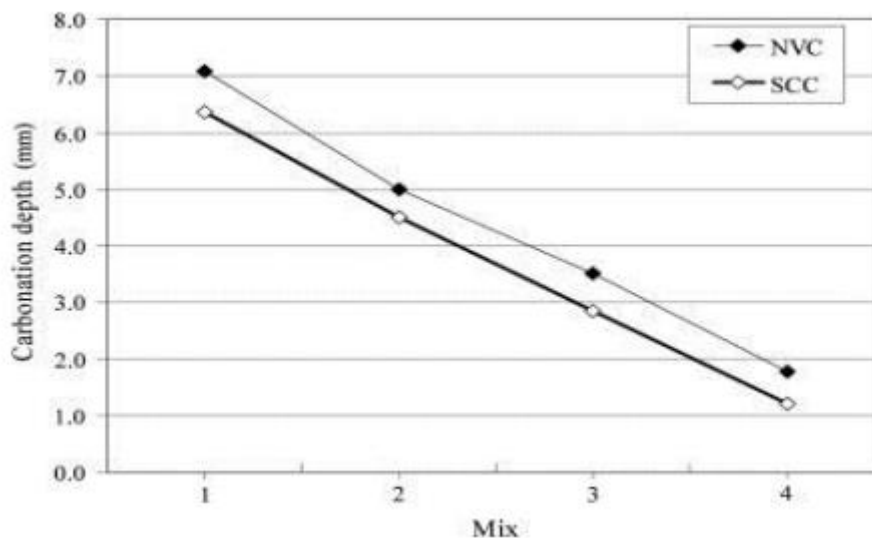


Figure II.5 : Profondeur de carbonatation après 9 mois [80]

Selon la recherche de SIAD HOCINE [81] qui a étudié l'évolution des profondeurs de carbonatation en fonction du temps d'exposition un béton ordinaire vibré (BOV), un BAP à base de pouzzolanes naturelles (BAP PZ), un BAP à base de fillers calcaires (BAP FC) et un BAP à base de cendres volantes (BAP CV), a trouvé les résultats montrés sur la figure II.6 que les valeurs des profondeurs carbonatées pour les BAP de classe 50 MPa sont comprises entre 0 et 3 mm. En revanche, celle du béton ordinaire vibré atteint une valeur de 6 mm à 56 jours. On remarque que la cinétique de carbonatation du BAP50 PZ est plus faible que celle du BAP50 CV qui à son tour est plus faible que celle du BAP50 FC.

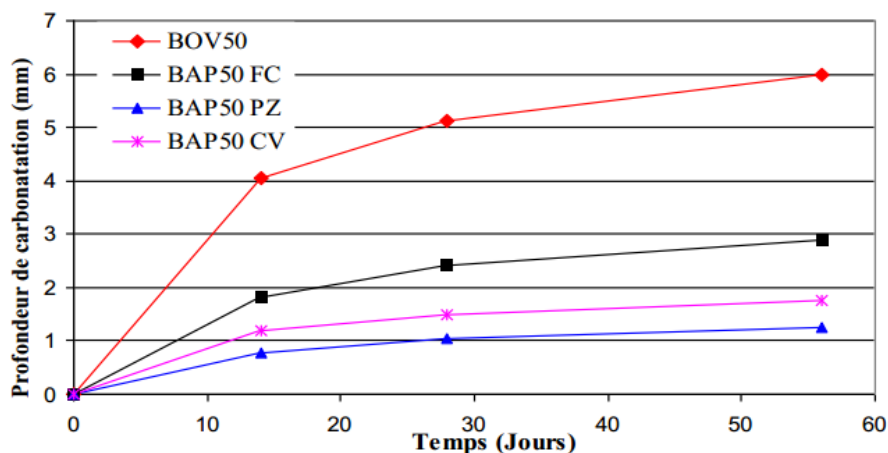


Figure II.6 : Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons de classe 50 MPa [81]

KAID NOURIA [82] a également étudié l'évolution de la profondeur de carbonatation jusqu'à deux mois pour trois bétons ('RefPz', 'RefCem', 'ConPz'), en utilisant la procédure accélérée dans l'AFPC-AFREM (l'âge des bétons au moment de l'essai était de 60 jours).

Chaque point représente la valeur moyenne de 20 mesures faites autour de la couche carbonatée des échantillons de bétons. Les résultats sont présentés dans la figure II.7

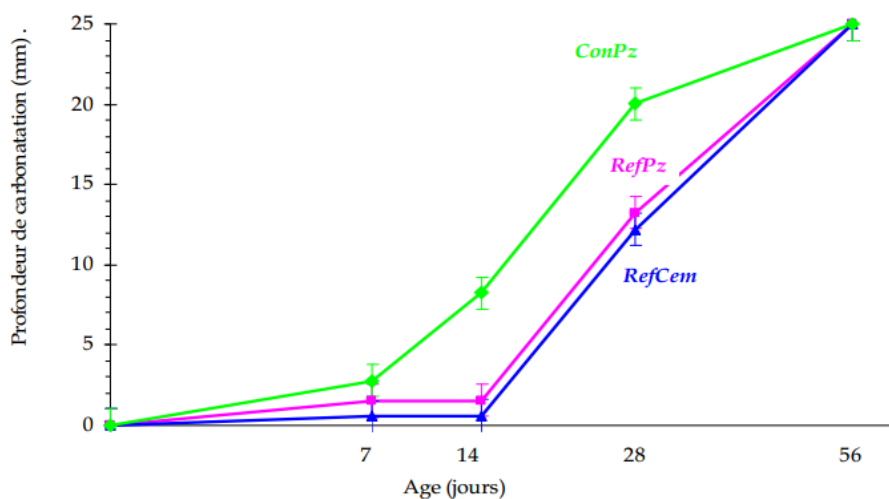


Figure II.7 : Variation de la profondeur de carbonatation dans le temps pour les trois bétons, selon l'essai accéléré (Âge du béton au début de l'essai: 60 jours) [82].

Les résultats montrent que la profondeur de carbonatation du béton 'ConPz' est de 7 millimètres, profondeur plus importante que celles des deux autres bétons ('RefCem' et 'RefPz'). Les bétons contenant des pouzzolanes sont habituellement moins résistants à l'attaque d'anhydride carbonique et plusieurs articles rapportent des résultats semblables à ceux présentés ici.

II.9. CONCLUSIONS

La bonne connaissance du phénomène de carbonatation permet de mettre à profit cette propriété soit en protégeant le béton, soit la limitant, soit au contraire en la favorisant si la compacité est recherchée (grâce à une carbonatation accélérée). Pour avoir un béton durable et résistant aux agressions. Quelques précautions simples sont suffisantes, dans la plupart des cas, pour assurer la pérennité des ouvrages :

- Le béton doit être un matériau compact, c'est-à-dire avoir une porosité minimale. Cette qualité est obtenue à partir de la notion de composition optimale où intervient le dosage en ciment, la taille des granulats et la teneur en eau.
- Prévoir une cure importante après coulage (maintenir la surface humide pendant plusieurs jours).
- Certains impératifs doivent également être respectés lors de la mise en œuvre du béton : serrage, délai de mise en place, ...
- Assurer la protection des armatures par un enrobage d'acier plus épais et plus compact.
- Protections des surfaces du béton en appliquant des enduits protecteurs sur la surface du béton ou en utilisant les peintures anti-carbonatation ou les traitements hydrofuges.
- Pour des ouvrages particuliers en milieux très exposés, il est possible d'utiliser des armatures zinguées, revêtues de composés époxydiques ou en acier inoxydable.

CHAPITRE III
METHODE
EXPRIMENTALE ET
RESULTAT

III.1. INTRODUCTION

Cette étude complète les mesures expérimentales effectuées par Safer [1] sur l'évolution de la carbonatation naturelle des échantillons de bétons vibrés (témoin et avec ajout) qui datent de 2016. Il s'agit d'un béton ordinaire constitué de ciment, de granulats, d'eau, d'adjuvants et d'ajouts. En effet, le travail que nous présentons met en évidence l'utilisation de la vase calcinée du barrage de Chorfa (Mascara), dans le but de son exploitation en substitution partielle au ciment (10, 20 et 30%) et son influence sur l'avancement de la carbonatation à long terme après six années de durcissement à l'air libre.

III.2. PRESENTATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA CONFECTION DES BETONS [1]

III.2.1. Le Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé pour des différentes compositions : un ciment CEMI 42,5 ES provenant de l'usine de Zahana (Ouest Algérien).

Il a une surface spécifique Blaine de 3180 cm²/g et une densité de 3,03. Le détail de sa composition chimique et minéralogique est donné dans les tableaux III.1 et III. 2.

Tableau III.1 : Composition chimique du ciment

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF	RI
Teneur en %	22.30	5.10	3.99	63.60	1.43	1.24	0.70	0.34	1.18	0.36

Tableau III.2: Composition minéralogique (%) du clinker

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO libre
53.13	23.55	6.76	12.13	< 01

III.2.2. Granulats

Les graviers utilisés dans la confection des bétons de classes 3/8 et 8/15 sont calcaires et proviennent de la carrière de Kristel située dans la région d'Oran. Tandis que les sables 0/3 ils sont d'origine calcaire pour le sable de carrière de Kristel et siliceuse pour le sable de mer de Sidi Lakhdar.

Les analyses chimiques et physiques du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel sont données dans les tableaux III.3 et III.4.

Tableau III.3 : Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel

Constituants chimiques	Sable de mer (%)	SC, G3/8, G8/15 (%)
Silice SiO ₂	88.78	2.06
Chaux CaO	9.80	54.58
Magnésie MgO	0.42	0.14
Alumine Al ₂ O ₃	1.37	-
Oxyde de fer Fe ₂ O ₃	0.94	0.13
Sulfates SO ₃	0.03	-
Nature	Siliceuse	calcaire

Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques des granulats utilisés

Caractéristiques		Sable de mer (SM)	S. de carrière (SC)	Graviers	
				(3/8)	(8/15)
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.50	1.52	1.42	1.41
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2.64	2.65	2.59	2.63
Equivalent de sable (%)	Visuel	95.89	93.55	-	-
	Piston	94.03	89.26	-	-
Module de finesse		1.39	3.2	-	-
Pourcentage de fines (%)		0.30	1.06	0.41	0.33
Absorption (%)		1.12	0.81	0.58	0.61

Les courbes granulométriques des granulats sont données par la figure III.1.

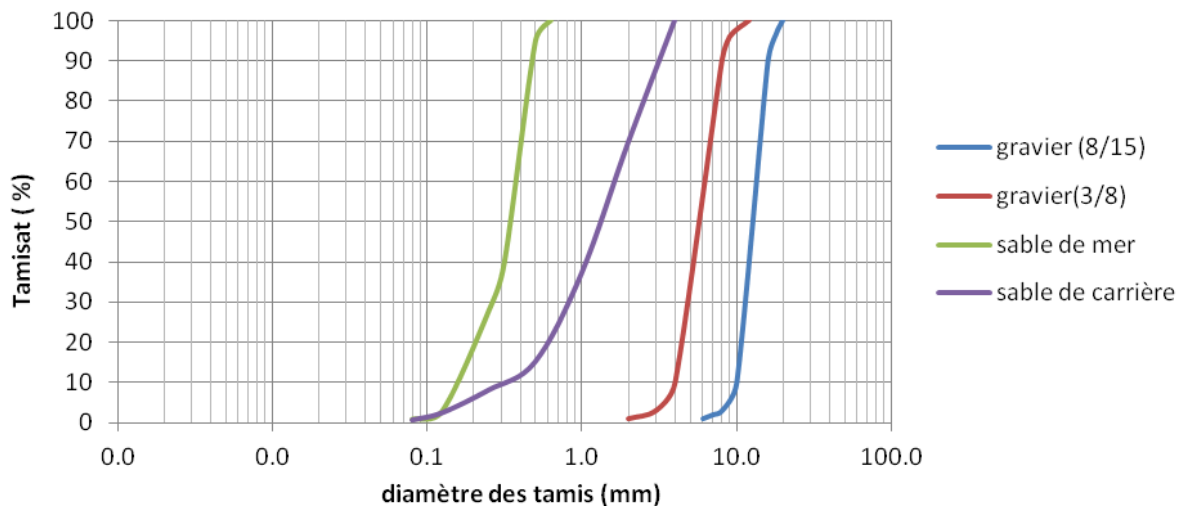


Figure III.1 : Courbes granulométriques des différents granulats utilisés

III.2.3. La Vase Calcinée

La vase utilisée par Safer dans la confection de ses bétons d'étude a été prélevée en aval du barrage de Chorfa dans la zone de rejet après dragage. Les étapes de préparation de la vase sont schématisées dans la figure III.2. [83]

Séchage : L'échantillon de vase est d'abord séché par pafin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage aini que son tamisage.

Concassage : La vase étuvée est concassée pour faciliter son broyage.

Broyage : La vase concassée est totalement broyée.

Tamisage : La vase broyée est tamisée par voie sèche à travers un tamis de 80 µm où seul le passant est considéré par la suite.

Calcination : C'est un traitement thermique effectué sur la vase préparée préalablement par cuisson à 750 °C [84], [85].

La vitesse de cuisson doit être réglée à 5 °C/min afin d'éviter les chocs thermiques, ensuite, la température de cuisson qui est de (750 °C ±5) est maintenue constante pendant 05 heures pour obtenir à la fin le produit final qui est la vase calcinée et qui doit être conservé à l'abri de l'air et de l'humidité dans des sacs hermétiques.

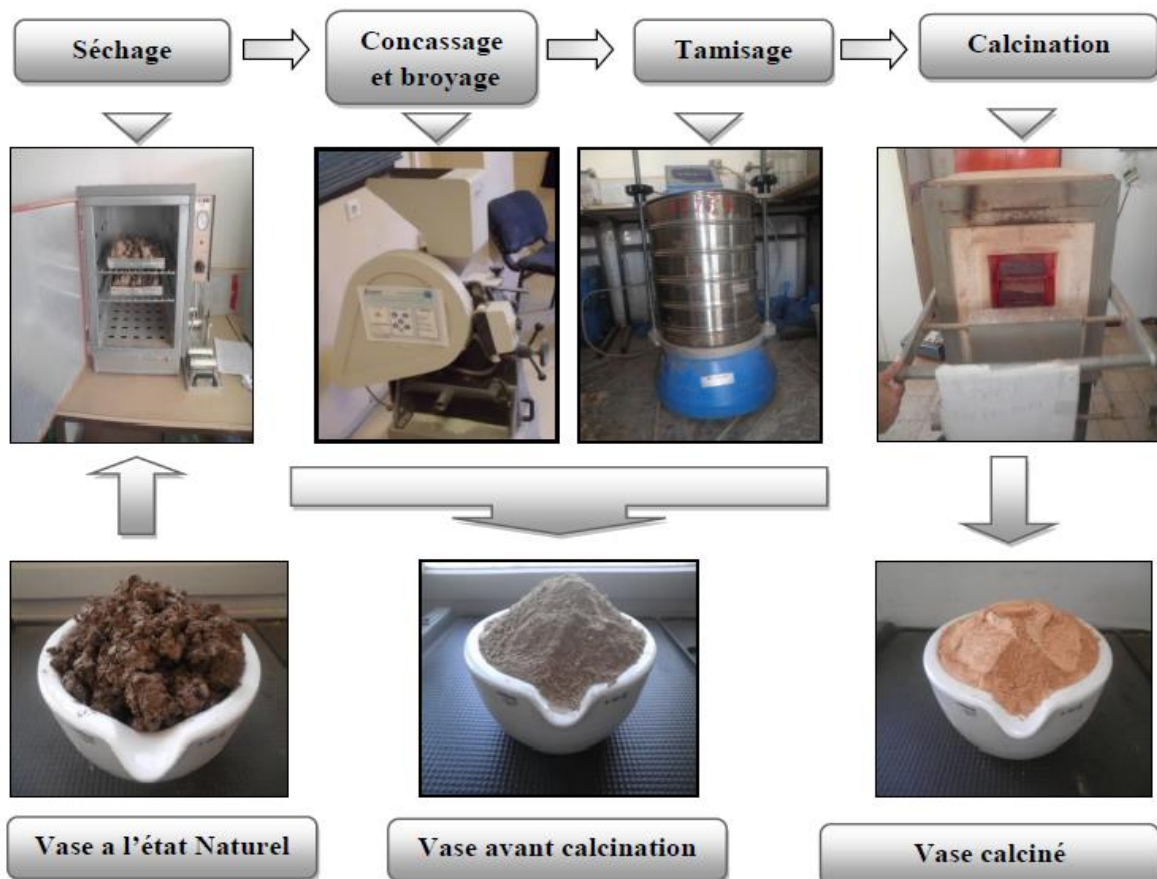


Figure III.2 : Les étapes de la préparation de la vase

Les caractérisations physiques, chimiques et minéralogiques sont données par [1].

Tableau III.5 : Caractéristiques chimiques des vases après calcination

Élément		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Teneur en %	Vase calcinée de Chorfa	47.36	15.75	7.43	23.08	2.67	0.17	2.97	0.37	1.76

Les méthodes et les manipulations utilisées pour la caractérisation physique de la vase sont les mêmes que celles utilisé pour le ciment.

III.2.4. Granulométrie

L'analyse granulométrique d'un échantillon de la vase utilisée est donnée par la figure III.3.

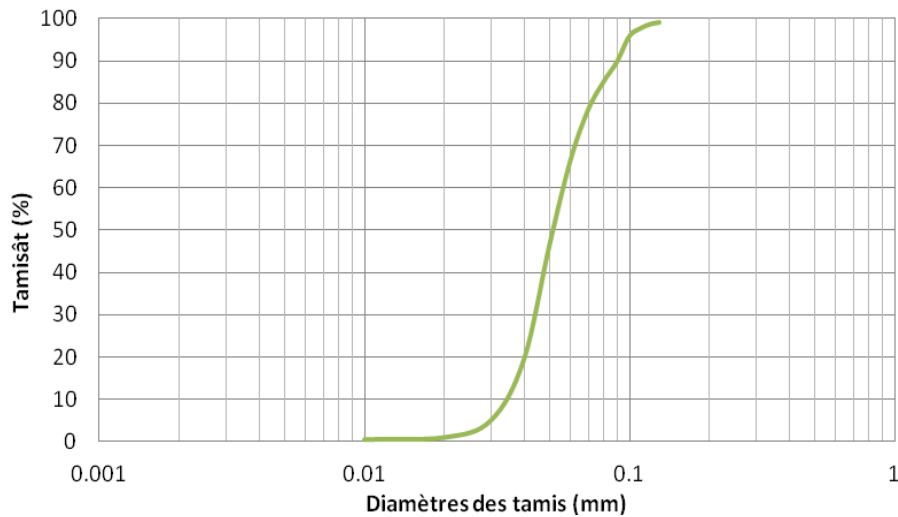


Figure III.3 : Courbe granulométrique de la vase utilisée

III.2.5. Les masses volumiques et surface spécifique

Elles sont représentées dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de la vase

Caractéristiques	Vase Chorfa
Masse volumique apparente de la vase (g/cm ³)	0.49
Masse volumique absolue de la vase (g/cm ³)	2.65
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g)	6446

L'analyse chimique et minéralogique de la vase étudiée la figure III.3a révèle la présence des minéraux essentiels, tels que la silice et l'alumine qui composent les liants hydrauliques les plus courants [86], [87]. La Figure III.3b montre l'apparence rugueuse et poreuse des grains

de vase calcinés. Il suffirait d'activer thermiquement les minéraux d'argile afin qu'ils puissent réagir avec de l'eau si la teneur en calcaire est adéquate, pour former des composés qui se durcissent à température ambiante [88], [89].

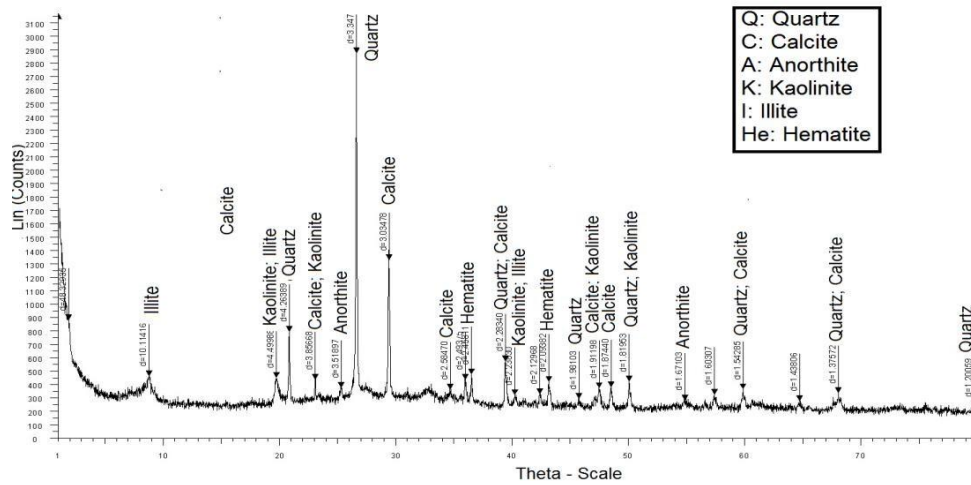


Figure III.4a : Analyse DRX de la boue calcinée

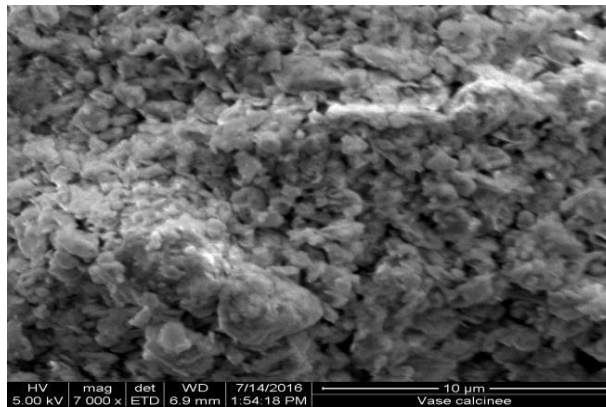


Figure III.4b : Analyse EDS de la boue calcinée

III.2.6. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé pour confectionner notre béton est un PLASTIMENT® BV 40 (SIKA) ; Plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.

Le PLASTIMENT® BV 40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité,
- facilite la mise en place du béton,
- permet éventuellement de réduire le dosage en ciment,
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Les caractéristiques de l'adjuvant utilisé sont données dans le Tableau III.7:

Tableau III.7: Caractéristiques du PLASTIMENT® BV 40

Caractéristiques	PLASTIMENT® BV 40
Aspect	Liquide brun foncé
Densité	1,180 ± 0,015
PH	4.5 ± 1
Teneur en Na ₂ O Eq	≤ 2 %
Extrait sec	38,5 ± 1,9 %
Teneur en ions Cl ⁻	≤ 0,1 %
Plage d'utilisation	à 1%

III.3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

III.3.1. Formulations étudiées

Quatre formulations de béton ont été élaborées ; trois incorporant différents dosages de vase (BOV 10%, BOV 20% et BOV 30%) et un témoin (BOT 00%) pour le besoin de comparaison, le tableau III.8 donne les compositions des différents bétons étudiés.

Tableau III.8: composition des bétons d'étude

Désignation	Ciment kg/m ³	P/L(%)	Addition kg/m ³	Gravier kg/m ³		Sable kg/m ³	Eau kg/m ³	E/L	P kg/m ³
				3/8	8/15				
BOT00%	402	00	00	179	912	663	201	0.5	00
BOV10%	363.6	0.3	35.33	179	912	663	199.4	0.5	1.19
BOV20%	324.8	0.4	71.02	179	912	663	197.9	0.5	1.58
BOV30%	286.3	0.6	107.31	179	912	663	196.8	0.5	196.8

Les caractérisations des bétons sont données par le tableau III.9.

Tableau III.9 : caractéristiques des bétons d'étude

Caractéristiques	BOT00%	BOV10%	BOV20%	BOV30%
E/L	0.5	0.5	0.5	0.5
Ajout/Ciment(%)	00	10	20	30
Volume de pâte (l/m ³)	334	334	334	334
G/S	1.65	1.65	1.65	1.65
Volume de squelette granulaire (l/m ³)	666	666	666	666
Masse volumique théorique (Kg/m ³)	2357	2353.7	2349.3	2347
Masse volumique réelle à l'état (Kg/m ³)	Frais	2475.6	2468.9	2454.5
	Durci	2461.7	2448.1	2433

III.3.2. La carbonatation naturelle

La carbonatation résulte de l'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur le béton, et affecte la durabilité des structures en béton, car elle peut entraîner la corrosion des armatures [90 ;91].

La teneur en CO₂ de l'air ambiant est comprise entre 0,03 % et 1 %. C'est dans ces conditions que se produit la carbonatation naturelle.

Les éprouvettes ont été placées à l'air libre au laboratoire pour suivre l'évolution de la carbonatation naturelle. L'échéance de mesure pour cette ambiance de conservation est de 12 mois (360 jours) la Figure III.4.



Figure III.5 : Les éprouvettes destinées à la carbonatation naturelle

Pour mesurer la profondeur de carbonatation, la pulvérisation d'un indicateur coloré tel que la phénolphthaléine permet de visualiser les zones carbonatées sur des surfaces fendues de béton. Elle est incolore sur les zones carbonatées et rose sur les zones saines, elle vire pour un pH d'environ 9.

Dans notre étude, nous avons effectué des mesures de carbonatation sur les mêmes échantillons que ceux de Safer âgés de 6 ans la figure III.5 et la figure III.6. Pour ce faire, les éprouvettes 7x7x28 cm³ ont été rompues par fendage grâce à une presse manuelle la figure III.5.



Figure III.6 : La presse utilisée pour les écrasements

La phénolphtaléine est un matériau nécessaire pour faire cet essai la figure III.7.



Figure III.7 : La phénolphtaléine

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée la Figure III.7.

La valeur de l'épaisseur de carbonatation correspondant à une échéance donnée est la moyenne des mesures effectuées sur les quatre faces de l'échantillon.

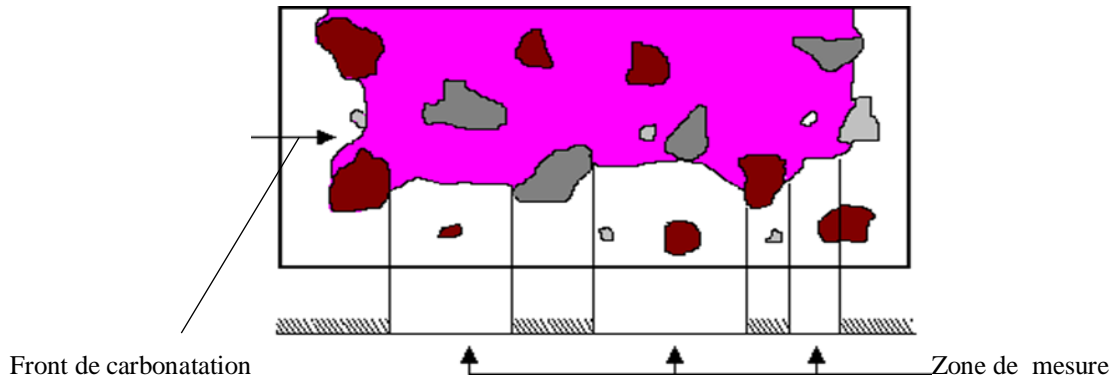


Figure III.8 : Schéma illustrant le principe des mesures [92]

III.4. RÉSULTATS OBTENUS

La mesure de la profondeur carbonatée a été faite après 6 ans d'exposition. Les zones carbonatées sont mises en évidence à la phénolphtaléine : les photos des sections des éprouvettes sont présentées sur figure III.9.



Figure III.9a : Carbonatation naturelle après 12 mois. [1]



Figure III.9b : Carbonatation naturelle après 6 ans.

Les profondeurs carbonatées après 12 mois et 6 ans d'essai sont représentés sur la figure III.10.

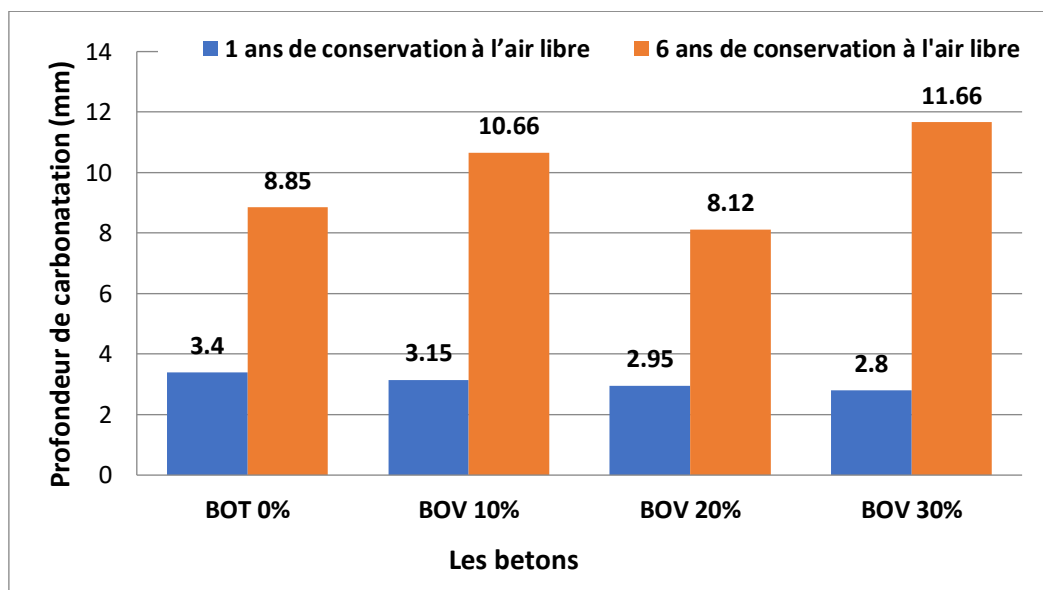


Figure III.10 : Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 12 mois et 6 ans à l'air libre de laboratoire

Les résultats obtenus la Figure III.10 montrent la comparaison entre les bétons étudiés après 1 et 6 ans de conservation à l'aire libre. Nous constatons la bonne résistivité de tous les bétons notamment le BOV 20% et le BOT les profondeurs carbonatées de ces derniers sont très faibles (<1mm) ou presque semblable.

Le taux de substitution de 20% de vase améliorerait la résistance à la carbonatation à long terme (6 ans).

La profondeur de carbonatation du BOV 30% et BOV 10% sont sensiblement supérieure à celle du BOV 20% (différence de 3.5 et 2.5 mm à 6 ans).

Les résultats montrent plus nettement l'effet positif de la vase calciné sur la résistivité des Bétons vis-à-vis de la carbonatation.

La Figure III.11 présente la différence des fronts de carbonatation entre 2016 et 2022.

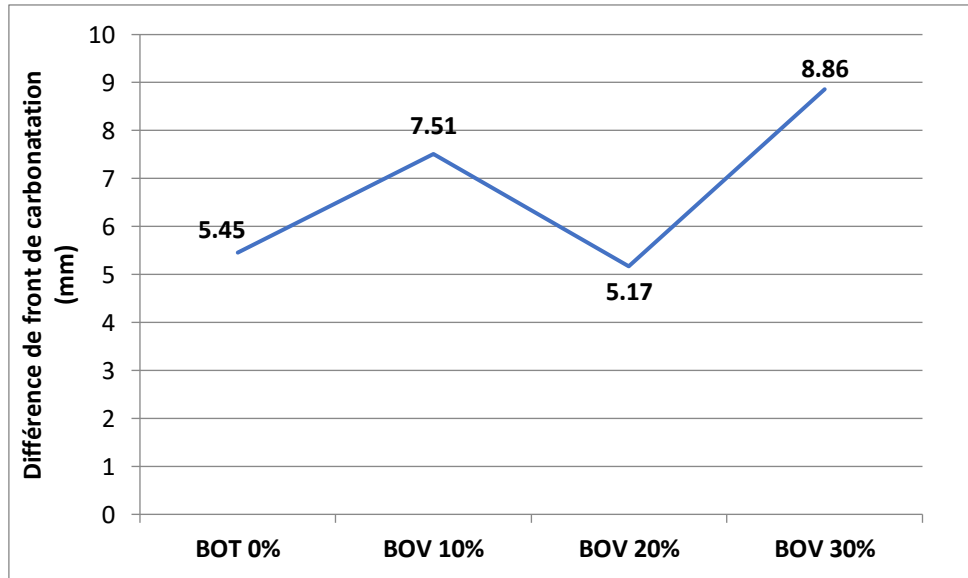


Figure III.11 : Différence des fronts de carbonatation entre 2016 et 2022

La comparaison des résultats de la carbonatation naturelle à l'âge e 1 et 6ans montre que la substitution de 20 % de vase donne la valeur la plus faible du font de carbonatation par rapport aux autres bétons. En comparant nos résultats avec Safer, un écart de 5.17 mm pour le BOV 20% et 8.86 mm pour BOV 30% est enregistré après six ans de conservation à l'air libre.

D'après les recherches de Siad [80], rapportent l'effet positif des additions pouzzolaniques tels que la cendre volante et la pouzzolane naturelle et qui peut être dû à la grande densification de la structure poreuse en présence des additions pouzzolaniques qui rend l'effet de la consommation de la portlandite un effet secondaire.

III.5. CONCLUSION

Nous avons présenté tous les matériaux entrant dans la composition des bétons ordinaires ce qui constitue une étape indispensable avant d'entamer l'étude expérimentale de ces bétons.

La vase issue du dragage de Chorfa a nécessité un traitement thermique qu'on appelle ; la calcination ; afin de la rendre réactive.

Nous concluons également :

- La présence de la vase dans la pâte des bétons réduit sensiblement le risque de carbonatation de ces bétons.
- Par comparaison entre les résultats des différents bétons, nous pouvons constater que le taux de substitution de 20% de vase calciné améliorerait la résistance à la carbonatation à long terme (6 ans).

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

D'après cette étude bibliographique et les résultats tirés de nos essais expérimentaux sur la carbonatation naturelle, Nous avons pu tirer quelques conclusions :

- Le béton doit être un matériau compact, c'est-à-dire avoir une porosité minimale. Cette qualité est obtenue à partir de la notion de composition optimale où intervient le dosage en ciment, la taille des granulats et la teneur en eau.
- Prévoir une cure importante après coulage (maintenir la surface humide pendant plusieurs jours).
- La diffusion du CO₂ dépend de l'humidité relative et de son incertitude. L'eau est élément indispensable à la réaction de carbonatation. Il est nécessaire d'avoir une certaine quantité d'eau pour dissoudre le CO₂ elle doit être limitée pour faciliter son accès à la surface solide, et par conséquent la carbonatation aura lieu rapidement.
- Les résultats de notre étude expérimentale sur la carbonatation naturelle ont montré qu'il existe une relation entre l'ajout de la vase à la pâte des bétons et le risque de carbonatation et son effet dans la résistance de béton. En comparant les résultats de différents bétons, on constate que le taux de remplacement de 20% de vase calcinée améliore la résistance à la carbonatation à long terme (6 ans).
- En comparant nos résultats avec Safer, un écart de 5.17 mm pour le BOV 20% et 8.86 mm pour BOV 30% est enregistré après six ans de conservation à l'air libre.

PERSPECTIVES

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivants :

- L'effet des paramètres tels que : cure – rapport E/C – adjuvants - sur la résistance des bétons vis-à-vis de la carbonatation naturelle et accélérée.
- L'influence d'autres types d'ajouts minéraux disponibles en Algérie sur la résistance mécanique et la durabilité des mortiers et bétons.
- Suivi de la carbonatation des éprouvettes de béton existantes au LCTPE et qui ont fait l'objet d'études de durabilité antérieures.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **SAFER.O**, « Optimisation de la formulation d'un éco-béton à base de sédiments de dragage et étude de sa résistance aux attaques chimiques » Thèse de doctorat à l'Université de Mostaganem, 2017.
- [2] **BENOUIS A., GRINI A., LABROUKI B**, "Pathologie des constructions", Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique – Université de Guelma 2008
- [3] **BOUKERROUCHE NEDJOUA**, "DURABILITÉ DES BÉTONS, Influence des paramètres de composition et de traitement", Université Mentouri Constantine 2009
- [4] **ZHU W., GIBBS J.C.**, «Use of deferent limestone and chalk powders in self compacting concrete». Cement and Concrete Research, Vol. 35, N_8:1457-1462, 2005.
- [5] **LAUER K. R.**, « Classification of concrete damage caused by chemical attack». Materials and Structures 23 pp 223-229 (1990).
- [6] **DOMONE P.L.**, «Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies». Cement and Concrete Composites, 28, 197-208, 2006.
- [7] **KAMALI S., GÉRARD B., MORANVILLE M.**, «Modelling the leaching kinetics of cement-based materials – influence of materials and environment», Cement and Concrete Composites 25, 451-458, 2003.
- [8] **CARDE C., FRANÇOIS R.**, «Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials». Cement and Concrete Research 27, 971-978, 1997.
- [9] **SONEBI M., BAHADORI-JAHROMI, A., BARTOS, P.J.M.**, «Development and optimization of medium strength self-compacting concrete by using pulverized fly ash». 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 514-524, 2003.
- [10] **PARK C.K., NOH M.H., PARK T.H.**, «Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures». Cement and Concrete Research, 35, 842-849, 2005.
- [11] **SHADLE, R., AND SOMERVILLE, S.**, «The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing SelfCompacting Concrete». First North American Conference on the Design and Use of SelfConsolidating Concrete, Chicago, 2002 IL: ACBM, 235-241.
- [12] **GUILLOIN E.**, « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles».Thèse de doctorat, d'école normale supérieure de Cachan, France 2004.
- [13] **RICHET C., GALLE C., LE BESCOP P., PEYCELON, BEJAOUI S., TOVENA I., POINTEAU I., L'HOSTIS V., LOVERA P.**, « Synthèse des connaissances sur le comportement a long terme des bétons application au colis cimentes ». Rapport CEA-R-6050, commissariat à l'énergie atomique, 2004.
- [14] **ADENOT F., BUIL M.**, «Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water». Cement and Concrete Research 22, 259-272, 1992.
- [15] **KAMALI S.**, « Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à différents ciments dans différents environnements », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2003.
- [16] **NGUYEN V.H., NEDJAR B., COLINA H., TORRENTI J.M.**, «A separation of scales analysis for the modeling of calcium leaching in concrete». Computer methods in applied mechanics and engineering, 195, 7196-7210, 2006.
- [17] **BADOZ C., FRANCISCO P., ROUGEAU P.**, «A Performance Test to Estimate Durability of Concrete Products Exposed to Chemical Attacks». In: Proceedings of the second International congress of FIB, June 5 -8, 2006, 2006.

- [18] **KOSTUCH J.A., WALTERS G.V., JONES T.R.**, «High performance concrete incorporating metakaolin: a review Concrete 2000». University of Dundee, p. 1799-1811, 1993.
- [19] **ROY D.M., ARJUNAN P., SILSBEE, M.R.**, «Effect of silica fume, metakaolin, and lowcalcium fly ash on chemical resistance of concrete». Cement and Concrete Research, 2001, Vol.31, 12, p1809-1813.
- [20] **RAHMANI H., RAMZANIANPOUR A.A.**, «Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes». Asian journal of civil engineering (building and housing) VOL. 9, NO. 3, 2008, pp 303-319.
- [21] **GHRICI M., KENAI S., SAID-MANSOUR M.**, «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements», Cement & Concrete Composites 29 (2007) 542–549.
- [22] **TAMIMI A. K.**, «High-performance concrete mix for an optimum protection in acidic conditions». Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 30, pp 188-191, 1997.
- [23] **RACKEL S.N.**, « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier, mai 2001.
- [24] **GCI – 714.**, « Cours : Durabilité et Réparations du Béton ». Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet 2009.
- [25] **MEHTA P.K.**, «Sulfate Attack on Concrete - A Critical Review». Materials Science of Concrete III, The American Ceramic Society, 1993 pp. 105-130.
- [26] **FERRARIS C.F., CLIFTON J.R., STUTZMAN P.E., GARBOCZI E.J.**, «Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack’, in: K.L. Scrivener, J.F. Young (Eds.) ». Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Systems, E & FN Spon, London, pp. 185– 192. 1997.
- [27] **BROWN P.W.**, «An evaluation of sulfate resistance of cements in a controlled environment». Cement and Concrete Research. (11): 719– 727. 1981.
- [28] **GOLOP R.S., TAYLOR H.F.W.**, «Microstructural and micro analytical studies of sulfate attack, III. Sulfate resisting Portland cement: reaction with sodium and magnesium sulfate solutions». Cement and Concrete Research, vol.25, 8, 1995, p.1581-1590.
- [29] **SANTHANAM M., COHEN M.D., OLEK J.**, «Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1’. Summary of experimental results». Cement and Concrete Research. 32 (6) 915– 921.2002.
- [30] **TAGNIT-HAMOU A., PETROV N.**, «Durability of Concrete in a Very Aggressive Environment». Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Cement Microscopy, Montréal, Québec, Canada, 29 Avril au 4 Mai, pp 420-430, 2000.
- [31] **RAMLOCHAN T., ZACARIAS P., THOMAS M.D.A., HOOTON R.D.**, «The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature». Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 807–814, 2003.
- [32] **MESSAD S.**, « Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente de la norme NF EN 206-1», Thèse de l'Université Paul Sabatier Toulouse III, 2009, 300p.
- [33] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.**, «Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete». ACI materials journal, vol. 88, n° 2, 1991, p. 186-196.
- [34] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.**, «Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation». ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, July-August 1991.
- [35] **THIERY M., DANGLA P., VILLAIN G., PLATRET G., MASSIEU E., DRUON M., BAROGHELBOUNY V.**, «Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires». Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 252-253, septembre-octobre-

novembre decembre 2004, pp. 153-187.

- [36] **THIERY M.**, «Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques». Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées 'LPC', OA 52, 2006.
- [37] **BARON J., GAGNE R., OLLIVIER J.P.**, « Chapitre 11 – Viser la durabilité ». dans ATILH, sous la direction de J. Baron et J.-P. Ollivier, Les Bétons, Bases et données pour leur formulation, Ed. Eyrolles, Chapitre 11, pp. 307-363, 1996.
- [38] **COQUILLAT G.**, « Rapport du CEBTP, Recherche collective Bétons avec additions ». Béton B 25 – Type « Bâtiment », Rapport Fina, 1996.
- [39] **PAPADAKIS V. G.**, «Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress». Cement and Concrete Research 30, 291-299, 2000.
- [40] **BURDEN D.**, «The durability of concrete containing high levels of fly ash». Thèse de doctorat, université de New Brunswick, dans PCA R&D Serial No. 2989, Portland Cement Association, 2006.
- [41] **KHOKHAR M.I.A, ROZIÈRE E., GRONDIN F., LOUKILI A.**, «Effect of mineral additives on some of durability parameters of concrete». International Conference on Advances in Cement Based Materials and applications to civil infrastructure, (ACBM-ACI), December 12-14, Lahore, Pakistan. Proposé, 2007.
- [42] **MEHTA, P. K.**, « Concrete: structure, properties and materials». Prentice hall, 1986 Ed., p.105-169.
- [43] **TUUTTI K.**, «Corrosion of steel in concrete». Swedish Cement and Concrete Research Institute, Ed. Stockholm, pp. 469, 1982.
- [44] **THANH S. N.**, «Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires ». thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse, 2006.
- [45] **E. ROZIERE**, «Étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle ». Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- [46] **NF EN 206-1, (2004).**, « Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité ». AFNOR, 65 p.
- [47] **HOUST Y.F.**,«Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie ». Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausann, 1992
- [48] **ZSCHOKKE**, «Ueber das résonner Eisenanlagen im Aisen beton» SCHWOB. BAUZ., LVII; 285-289 in[58] 1996.
- [49] **PARROTT L.J.**,«A review of carbonation in reinforced concrete». Cement and Concrete Association, 1987; 41.
- [50] **LAMBERT G** .«Les gaz à effet de serre». La Recherche, 1992; 23(243): 550-556.
- [51] **COWIE J, GLASSER FP.**«The reaction between cement and natural waters containing dissolved carbon dioxide». Advances in Cement Research, 1992; 4(15): 119-134.
- [52] **CHAUSSADENT T.** Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé .Rapport du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris), Thème de recherche OA9, 1997: 64.
- [53] **BADAOUI A.**«Sur la corrosion du béton armé». Thèse de Magister de l'Université de Houari Boumediene, Alger, 2003.
- [54] **DHEILLY R.M, TUDO J.**« Etude du système CaO – H₂O – CO₂ pour un stockage optimal de la chaux, Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux», 1996; 820 : 161-164
- [55] **TALAH A.**« Corrosion des BHP à base de pouzzolane».Thèse de Doctorat de l'Université de Houari Boumediene, Alger, 2012.
- [56] **DUNSTER A.M.**«An investigation of the carbonation of the cement paste using trimethylsilylation». Advances in Cement Research, 1989; 2(7): 99-106.

- [57] GROVES G.W, RODWAY D .I, RICHARDSON I.G.«The carbonation of hardened cement pastes». Advances in Cement Research, 1990; 3: 117-125.
- [58] MASSE S. «Synthèse hydrothermale d'hydrates et silicates tricalciques. Analyse structurale en phase solide. Etude comparative avec les ciments utilisés pour chemiser les puits de pétrole».Thèse de Doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, France, 1993.
- [59] BIN G, PARONG M, GUOBIN W. «Carbonation of hydrated calcium silicates». Chinese Journal of silicates sciences, 1984: 12.
- [60] SAUMAN Z, LASH V. «Long term carbonation of the phases $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ». Cement and Concrete Research, 1972 ; 2(4) :453- 446.
- [61] 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 Pontset Chaussées, France, 2005.
- [62] XIANTUO C, RUIZHEN Z, XIAORONG G. «Kinetic study of ettringite carbonation reaction». Cement and concrete research, 1994; 24(7): 1383-1389.
- [63] KOUZNETSOVA T, IVASCHENKOS S, SAMCHENKO S.«Stability of ettringite under carbonate corrosion at hydration of sulpho-aluminate». In 11th international congress on the chemistry of cement (ICCC), Durban (Afrique du sud), 2003; 2061-2076.
- [64] HYVERT N. «Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton». Thèse de Doctorat Université de Toulouse, 2009.
- [65] DAKHMOUCHE F. «Carbonatation de bétons adjuvantes à base de ressources locales algériennes». Thèse de Doctorat de l'Université de Mentouri, Constantine, Algerie, 2009.
- [66] THIERY, VILAIN, PLATRET. «3 Effect of carbonation on density, microstructure and liquid water saturation concrete ». Proc. 9th Eng. Conf. On Advances in cement and concrete, USA, 2003.;481-490.
- [67] RAHMAN A.A, GLASSER F.P.«Comparative studies of the carbonation of hydrated Cements».Advances in Cement Research, 1989; 2(6): 49-54.
- [68] NEVILLE A. «Properties of concrete». Fourth and Final edition, Ed. John Wiley and Sons, New York, 1995; 844.
- [69] SADOUKI H. « L'effet de paroi : son influence sur les propriétés du béton superficiel» .Chronique des Matériaux de Construction, 1987; 11-15.
- [70] KREIJGER P.C.«The skin of concrete – Composition and Properties». Materials and Structures,1984; 1 17(100): 275-283.
- [71] BARON J, OLLIVIER J.P. «Les bétons, bases et données pour leur formulation». Publication ATHIL, Eyrolles, 1996 ; 552.
- [72]EWERTSON C, PETERSSON P.E., « The influence of curing conditions on the permeability and durability of concrete». Results from a field exposure test. Cement and Concrete Research, 1993; 23(3): 683-692.
- [73] BALAYSSAC J.P, DETRICHE C.H, DIAFAT N. « Influence de la durée de cure humide sur la durabilité du béton de peau ». RILEM, Matériaux et Constructions, 1998 : 31(209).
- [74] BIER T.A, KROPP J, HILSDORF H.K. « Carbonation and realcalinisation of concrete and hydrated cement paste ». MASO Durability of construction materials, 1987: 927-934.
- [75] HUET B.«Comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté. Influence de la chimie de la solution interstitielle et d'une barrière de transport». Thèse INSA Lyon, 2005.
- [76] BARY B, SELLIER A. «Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete». Cement and Concrete Research, 2004; 34: 1859-1872.
- [77] NEVILLE A.«Consideration of durability of concrete structures: past, present and future». Materials and structures, 2001; 34:114-118.
- [78]GIRARD C. «La carbonatation du Béton Armé». Division ST-Technical Facilities

Management, CERN, workshop, Genève, Suisse, 1998.

[79] **VALLS S, VASQUEZ E.** «Accelerated carbonation of sewage sludge cement- sand mortars and its environmental impact», Article; 2002. novembre- decembre 2004, pp. 153-187.

[80] **BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G.,** «Experimental durability evaluation of self-compacting concrete with limestone filler», Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 297-303, 2005

[81] **SIAD H.,** «La durabilité des bétons autoplaçants à base des additions pouzzolaniques et fillers calcaires», Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.

[82] **KAID N., CYR M., JULIEN S., KHELAFI H.,** « Durability of concrete containing a natural pozzolan as defined by a performance-based approach ». Construction and Building Materials 23 (2009) 3457–3467.

[83] **EL OUARDI E.M.,** « Étude de la calcination du phosphate clair de Youssoufia, Maroc ». Afrique Science. 04 (2008) 199.

[84] **SEMCHA A.,** « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug ». Thèse de doctorat à l'Université de Reims Champagne-Ardenne . Génie Civil. Décembre 2006.

[85] **BELAS N., BESSEGHIER N., MEBROUKI A., BOUHAMOU N.,** « Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton ». Mater. Tech. 97 (2009) 231–240.

[86] **BENASLA M., HADJEL M., BENAMARA L., OUHBA K.,** « Characterization of sediment dam of Oued Fodda and valorization as an artificial addition in the cement ». Mater. Tech. 104 (2016) 304.

[87] **NAAMANE S., RAIS Z., CHAOUCH M.,** « Incorporation de la boue, d'épuration des eaux usées, traitée par lavage par eau dans le ciment », J. Mater. Environ. Sci. 5 (2014) 2515–2521.

[88] **GARCÉS P., PÉREZ CARRIÓN M., GARCÍA-ALCOCEL E., PAYÁ J., MONZÓ J., BORRACHERO M.V.,** Waste Manage. 28 (2008) 2495–2502.

[89] **BENASLA M., BENAMARA L., HADJEL M.,** « Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction », J. Mater. Environ. Sci. 6 (2015) 546–558.

[90] **G.V PAPANAKIS, G. COSTAS, VAYENAS ET MICHAEL N. FARDIS.,** « Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation ». ACI Material Journal, Vol.88, n°4, pp. 363-373, 1991.

[91] **G.V. PAPANAKIS, C.G. VAYENAS, N. F. MICHAEL,** «Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem». Chemical Engineering Science, Vol.46, n° 5-6, pp.1333-1338, 1991.

[92] **BELARIBI O.,** « Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane ». Thèse de doctorat à l'Université de Cergy-Pontoise et de l'Université de Mostaganem, 2015.

[93] **MESSAD S.,** « Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente de la norme NF EN 206-1», Thèse de l'Université Paul Sabatier Toulouse III, 2009, 300p.

[94] **PAPANAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.,** «Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation', ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, July-August 1991.

[95] **THIERY M., DANGLA P., VILLAIN G., PLATRET G., MASSIEU E., DRUON M., BAROGHEL- BOUNY V.,** « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires', Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 252-253, septembre-octobre