

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة عمار تـلـدـجـي بالـاـغـواط
UNIVERSITE AMAR TELDJI LAGHOUAT
كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de MASTER

Domaine : Sciences et technologies
Filière : Génie civil
Option : Matériaux de construction

Thème

Effet des ajouts calcaires sur la carbonatation du béton

Présenté par

- BHAZ Moussa
- HALMOUS Abdenasser

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mme : KOUIDRI Zohra	M.A.A	Université de Laghouat	Présidente
Mme : BENDJILALI Khadra	M.C. B	Université de Laghouat	Examinatrice
Mr. MERAH Ahmed	M.C. B	Université de Laghouat	Encadreur
Mr. KROBBA Benharzallh	M.A.A	Université de Laghouat	Co-Encadreur

Année Universitaire 2016/2017

REMERCIEMENTS

Louange au Dieu le tout puissant qui nous a accordé la foi, le courage et la patience pour mener ce travail.

*Nous tenons tout d'abord à remercier monsieur **MERAH Ahmed** et monsieur **Krobba Benharzallh**, nos encadreurs de mémoire, pour tout le soutien, l'aide, l'orientation, la guidance qu'ils nous ont apportés durant nos cursus ainsi que pour leurs précieux conseils et leurs encouragements lors de la réalisation des notre mémoire.*

*Nous remercions Madame **KOUIDRI Zohra**, d'avoir accepté de présider le jury de mémoire, et Madame **BENDJILALI Khadra**, qui a bien accepté d'examiner ce travail et faire partie de notre jury.*

Nous remercions nos parents pour le soutien inconditionnel dont ils ont fait preuve depuis que notre projet de fin d'étude est défini. Merci pour leur soutien financier, moral et psychologique. Si nous somme ici aujourd'hui, c'est grâce à vous!

*Nous remercions également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce mémoire, Spécialement mon cher et mon ami proche **ZIREGUE BELKACEM**.*

Nous remercions tous les professionnels qui ont participé à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude, aussi à tout mes collègues et amis de l'université de Laghouat et du cité universitaire 3000.

Enfin, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à l'université de Laghouat représentée par les enseignants du département de génie civil ainsi que le personnel administratif, pour leur aide, leurs conseils précieux.

Dédicace

Avec l'aide et la grâce de mon Dieu, Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents qui m'ont éclairé le chemin de la vie par leur grand soutien et leurs encouragements dans les moments les plus difficiles.

A mes sœurs et mes frères

A toute ma famille

A tous mes amis (es) et tous mes collègues.

A toute personne qui a contribué de près et de loin à la réalisation de ce modeste travail.

BAHAZ et HALMOUS

Résumé -Abstract-

هذه الظاهرة التي تؤثر بشكل كبير على متانة المنشآت الخرسانية المسلحة، وتستخدم الخرسانة المصنوعة من الاسمنت مع إضافات بشكل كبير في انجاز المنشآت الخرسانية.
الكميات الكبيرة من العناصر الرخام المتشكلة من مسحوق هي نتيجة النفايات التي تؤثر على البيئة المحيطة من إنتاج المحاجر والرخام، وبالتالي نوجه عملنا لاستخدام هذا المسحوق كبديل للأسمنت مع تعديل نسبة لتقليل كمية الاسمنت في صناعة الخرسانة.
الخلطات مختلفة الخرسانية نتيجة من التغيير في استبدال و تغيير وذلك لدراسة الديمومة لهذه الظاهرة الطبيعية باستخدام اختبار تجريد.

وتظهر النتائج أن هناك زيادة في عمق الكربنة بينما الانخفاض في قوة الضغط بعد استبدال الاسمنت CEM I /42.5 مع النسب المئوية (10 30).

المفتاحية: الديمومة، الكربنة، قوة CEM I / 42.5 الإضافات الإسمنتية

Résumé

La carbonatation est un phénomène qui influe de manière significative sur la durabilité des structures en béton armé. Les bétons formulés avec des ciments avec ajouts sont de plus en plus utilisés dans la réalisation des ouvrages en béton armé.

La quantité importante de la poudre issue du façonnage des éléments en marbre constitue un déchet qui affecte l'environnement immédiat des carrières de production de marbre, de ce fait notre travail s'est orienté vers l'utilisation de cette poudre comme remplacement du ciment avec variation de pourcentage de substitution afin de minimiser la quantité de ciment dans le béton.

Ces différents mélanges de bétons issus de la variation de pourcentage de substitution sont étudiés de point de vue durabilité vis-à-vis du phénomène naturel de carbonatation en utilisant un essai accéléré appelé carbonatation accélérée.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une augmentation du front de carbonatation tandis la diminution de la résistance à la compression après la substitution de ciment CEM I /42.5 par la poudre de marbre avec des pourcentages (10% à 30%).

Mots clés : Durabilité, carbonatation, résistance à la compression, CEM I/42.5, ajouts cimentaires, poudre de marbre.

Abstract

Carbonation is a phenomenon that significantly influences the durability of reinforced concrete structures, concretes formulated with cements with additions are increasingly used in the construction of reinforced concrete structures.

The large quantity of the powder produced by the shaping of the marble elements constitutes waste which affects the immediate environment of the quarries producing marble, our work has therefore turned to the use of this powder as a replacement for cement with Percentage change in substitution in order to minimize the amount of cement in the manufacture of the concrete.

These various mixtures of concretes resulting from the percentage change of substitution are studied from a sustainability point of view with regard to the natural phenomenon of carbonation using an accelerated test called accelerated carbonation.

The results obtained show that there is an increase in the carbonation front while the reduction of the compressive strength after the substitution of CEM I / 42.5 cement by marble powder with percentages (10% to 30%).

Key words: Durability, carbonation, compressive strength, CEMI/42.5, Cementitious additions, marble powder.

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I.1: Concentration moyenne du CO ₂ relevées à l'observation de Mauna loa-hawai.....	2
Figure I.2 : Mécanisme de carbonatation de Ca(OH) ₂	5
Figure I.3 : Evolution de la profondeur carbonatée en fonction de la racine carrée du temps	7
Figure I.4 : Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment	8
Figure I.5 : Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation pour des bétons confectionnés avec des rapports E/C de 0.6 (courbe 1) et 0.8 (courbe 2) et conservés 16 ans à 20°C	9
Figure I.6 : Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite (CO ₂ =50%), en fonction de la température.....	10
Figure I.7 : Relation entre résistance à la compression à 28 jours et profondeur carbonatée	12
Figure I.8 : Cendres volantes	13
Figure I.9: Laitiers de haut fourneau	14
Figure I.10 : Fumée de silice	14
Figure I.11 : Additions calcaires	15

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et protocoles d'essais

Figure II.1 : Ciment CEM I 42.5	20
Figure II.2: Essai d'équivalent de sable	24
Figure II.3 : Mesure d'équivalence de sable.....	25
Figure II.4 : Résultats de l'analyse granulométrique des graviers 3/8 et 8/15	28
Figure II.5 : la méthode de Dreux-Gorisse	30
Figure II.6: Mesure de l'affaissement à l'aide du cône d'asrams.....	31
Figure II.7 : Résultats de l'analyse granulométrique (sable + graviers 3/8 et 8/15).....	32
Figure II.8 : Echantillons prismatiques (7×7×28 cm ³).....	32

Liste des figures

Figure II.9 : Remplissage les moules en béton.....	33
Figure II.10: Conservation des échantillons.....	33
Figure II.11: Presse d'écrasement à la compression.....	34
Figure II.12 : Schéma de système de carbonatation.....	35
Figure II.13 : Préparation des échantillons pour l'essai de carbonatation.....	36
Figure II.14 : Mise en évidence de l'épaisseur carbonatée par la solution de phénolphaléine.	37
Figure II.15 : Principe de mesure l'épaisseur carbonatée sur l'échantillon.....	37
Figure II.16: L'enceinte de la carbonatation accélérée.....	38

Chapitre III : Résultats expérimentaux et interprétations

Figure III.1 : Courbes granulométriques (sable 0/5 +gravier3/8 +gravier 8/15).....	42
Figure III.2 : Gain de masse des échantillons pour les différents bétons en fonction de la durée d'exposition au CO ₂	50
Figure III.3 : L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour le béton B1.....	52
Figure III.4: L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B2.....	54
Figure III.5: L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B3.....	56
Figure III.6: L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B4.....	58
Figure III.7 : L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour les différents bétons.....	59
Figure III.8 : Evolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonatation.....	60
Figure III.9 : Evolution de la résistance à la compression de béton avec différentes pourcentages d'ajouts.....	61

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et protocoles d'essais

Tableau II.1 : Caractéristiques minéralogique du ciment CEM I 42.5	20
Tableau II.2 : Caractéristiques physiques du ciment CEM I 42.5	21
Tableau II.3 : Caractérisation mécaniques du ciment CEM I 42.5	21
Tableau II.4 : Les caractéristiques minéralogique de Poudre de marbre	22
Tableau II.5 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.....	26
Tableau II. 6 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.....	26
Tableau II. 7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	27
Tableau II. 8 : Analyse granulométrique du gravier calcaire 8/15.....	28

Chapitre III : Résultats expérimentaux en interprétations

Tableau III.1 : Propriétés physiques des agrégats utilisés	39
Tableau III.2 : Valeurs de l'équivalent de sable	39
Tableau III.3 : Formulation de béton Après la correction.....	43
Tableau III.4 : Quantité de poudre de marbre sur les différents bétons.....	44
Tableau III.5 : Résultats de la résistance à la compression.....	44
Tableau III.6 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons du béton (B1).....	45
Tableau III.7 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons du béton(B2).....	46
Tableau III.8 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons du béton(B3).....	47
Tableau III.9 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons du béton(B4).....	48
Tableau III.10 : Masse volumique et teneur en eau pour des différents bétons.....	49
Tableau III.11 : Résultats de la masse d'échantillons pour les différents bétons, d'après (7,14 et 28 jours).....	49

Liste des Tableaux

Tableau III.12 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B1 (0% d'ajout).....	51
Tableau III.13 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B2 (10% d'ajout).....	53
Tableau III.14 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B3 (20% d'ajout).....	55
Tableau III.15 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B4 (30% d'ajout).....	57
Tableau III.16 : Résultats des tableaux (III.12, III.13 et III.14, III.15).....	58

Table des matières

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Résumés.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des Tableaux.....	VI
Table de matières.....	VII

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction	2
I.2 Provenance du dioxyde de carbone	2
I.3 Carbonatation... ..	3
I.3.1 Carbonatation des constituants du béton	4
I.4 Paramètres influençant la carbonatation	6
I.4.1 Rapport E/C	6
I.4.2 Dosage en ciment	7
I.4.3 Résistance à la compression.....	8

Table des matières

I.4.4	Humidité relative.....	8
I.4.5	Effet de la cure humide	9
I.4.6	Température	9
I.4.7	Concentration de CO ₂	10
I.5	Conséquences de la carbonatation.....	11
I.5.1	La corrosion des armatures	11
I.5.2	Evolution de la porosité.....	11
I.5.3	Evolution de la teneur en eau.....	11
I.5.4	Evolution des paramètres mécaniques	11
I.6	Vitesse de carbonatation.....	12
I.6.1	Cinétique de la carbonatation	12
I.7	Généralité sur les ajouts cimentaires	13
I.7.1	Classification des ajouts	13
I.7.2	Importance des additions dans l'industrie cimentière	15
I.8	Effet des ajouts cimentaires sur la carbonatation du béton.....	16
I.8.1	Les cendres volantes	16
I.8.2	Les laitiers de haut fourneau	16
I.8.3	Les pouzzolanes	16
I.8.4	Les fumées de silice.....	17
I.9	L'effet des ajouts calcaires	17
	Conclusion.....	18
 Chapitre II : Caractérisation des matériaux et protocoles d'essais		
II.1	Introduction.....	19
II.2	Caractérisation des matériaux	19
II.2.1	Ciment.....	19
II.2.2	Poudre de marbre (PM).....	21

Table des matières

II.2.3 Agrégats (sable et graviers)	22
II .3 Formulation du béton.....	29
II.3.1 Méthodes de formulation du béton	29
II.3.2 Formulation de béton par la méthode de Dreux-Gorisse.....	29
II .4 Confection et conservation des échantillons	32
II.5 Compagne expérimentale	34
II.6 Essai de carbonatation accélérée	35
Conclusion.....	38

Chapitre III : Résultats expérimentaux et interprétations

III .1 Introduction	39
III. 2 Formulation du béton témoin.....	39
III.2.1 Propriétés physiques des agrégats utilisés.....	39
III.2.2 Equivalent de sable	39
III.2.3 Analyse granulométrique des agrégats.....	40
III.2.4 Maniabilité.....	40
III.2.5 Résultats de la formulation de béton (METHODE DE DREUX-GORISS).....	41
III.2.6 Résistance à la compression pour les différents bétons carbonatés	44
III.3 Masses volumiques et teneurs en eau des échantillons.....	44
III.4 Evolution de la masse des échantillons dans la chambre de carbonatation	49
III.5 Evolution de la profondeur de carbonatation avec différents pourcentages d'ajouts	49
III.5.1 Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B1 (0% d'ajout)	51
III.5.2 Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B2 (10% d'ajout)	53

Table des matières

III.5.3 Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B3 (20% d'ajout)	55
III.5.4 Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B4 (30% ajout)	57
III.6 Comparaisons de la profondeur de carbonatation des différents bétons	58
III.7 Evolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonations	60
III.8 Effets de la carbonatation sur la résistance à la compression	60
Conclusion	62
Conclusion générale	63
Annexe	
Références bibliographiques	

Introduction générale

Parmi les agents agressifs qui peuvent avoir un effet néfaste sur la durabilité des structures en béton armé, on peut citer le gaz carbonique CO_2 présent dans l'atmosphère. Celui-ci se dissout dans la solution interstitielle de la porosité ouverte du béton faisant ainsi la diminution du PH suite à la transformation des composés hydratés du ciment, et plus particulièrement la portlandite en calcite. Les aciers se trouvent ainsi sans protection et la corrosion est amorcée. Ce processus de réactions chimiques, s'appelle carbonatation.

Les additions minérales sont souvent utilisées par les producteurs de bétons. Puisqu'il s'agit généralement de sous-produits industriels, Leur prise en compte dans la formulation des bétons par le respect du dosage minimum en ciment revêlent un intérêt particulier sur le plan économique (réduction des émissions de CO_2 et de la consommation de ressources non renouvelables).

En Algérie, la plupart des bétons sont fabriqués à partir des ciments avec ces additions minérales (calcaire, etc.), et dans le but d'étudier leur durabilité vis-à-vis de la carbonatation, nous avons fait varier le pourcentage des ajouts calcaires en remplacement du ciment (10%, 20% et 30%) pour voir leurs effets sur la carbonatation.

Ce mémoire est composé de trois chapitres structurés comme suit :

Au premier chapitre on donne une synthèse bibliographique sur la provenance du CO_2 , une présentation de la carbonatation, avec un résumé sur les paramètres qu'ils l'influencent, ainsi que les effets des ajouts cimentaires sur ce phénomène et plus particulièrement les ajouts calcaires, et ses conséquences sur la durabilité.

Au deuxième chapitre, on présente la caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation de béton ainsi que les différents modes opératoires. Une attention particulière est donnée à l'essai de carbonatation accélérée ainsi qu'à l'essai de la résistance à la compression.

Dans le dernier chapitre, on présente les différents résultats obtenus, en particulier de l'essai de carbonatation accélérée, avec des interprétations et des commentaires.

Enfin on termine ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

I.1 Introduction

De nombreuses agressions environnementales sont connues pour influencer de manière significative la durabilité des structures en béton armé, parmi ces agressions, on peut citer le phénomène de carbonatation du béton. Celui-ci provoque la corrosion des armatures et par conséquent diminue la durée de vie des structures en béton armé.

Dans ce chapitre, on fait un aperçu sur la provenance du CO_2 , une présentation de la carbonatation, les paramètres influençant et ses conséquences sur la durabilité des structures en béton armé, ainsi que les effets des ajouts cimentaires sur ce phénomène et plus particulièrement les ajouts calcaires.

I.2 Provenance du dioxyde de carbone

La consommation de combustibles fossiles libère des gaz présents à l'état de traces dans l'atmosphère qui influent sur le climat, comme le méthane, le dioxyde de soufre, l'azote et le dioxyde de carbone. Ce dernier étant responsable pour moitié de l'effet de serre [1]. Mauna-loa [2] montré que la teneur de l'atmosphère, moyennée à l'échelle du globe, en dioxyde de carbone (CO_2) atteint le seuil, aussi symbolique que significatif, de 400 parties par million (ppm) pour la première fois en 2015 et a affiché de nouveaux records en 2016 (Figure I.1).

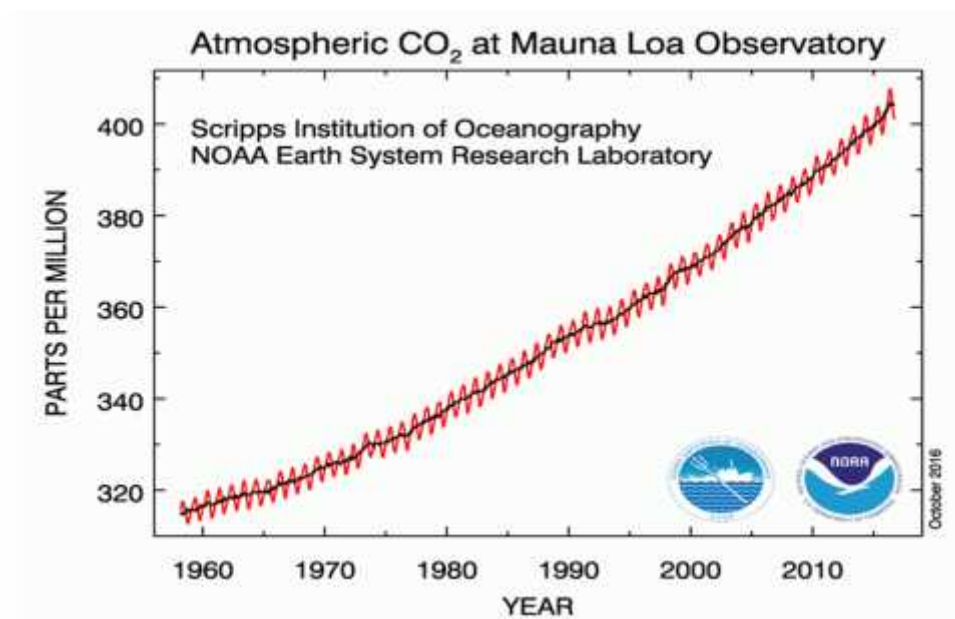


Figure I.1: Concentration moyenne du CO_2 relevées à l'observation de Mauna loa-hawai [2].

Dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3 % et peut atteindre 1 %. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de CO₂ [3].

Le développement industriel provoque une augmentation forte et rapide de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, Cette action du CO₂ se manifeste même à de faibles concentrations, telles celles que l'on retrouve en milieu rural où la fraction volumique en CO₂ est d'environ 0,03 % dans un local mal ventilé. Ce pourcentage peut atteindre 0,1 %. [3].

On note que pendant la fabrication du ciment Portland, 1 kg de clinker nous donne grossièrement 1 kg de CO₂ émis dans l'atmosphère [4]. Cette libération de CO₂ provient pour environ 30 % des combustibles brûlés pour la cuisson et pour 70 % de la décarbonatation du calcaire. Pour limiter l'émission due à la consommation d'énergie fossile, on utilise en cimenterie de plus en plus de combustibles de substitution. Ceux-ci proviennent de déchets industriels aussi variés que les pneus usagés, les solvants et huiles ou de la biomasse (sciures de bois, boues de stations d'épuration...).

I.3 Carbonatation

La carbonatation est l'un des facteurs principaux de détérioration des structures en béton armé exposées à l'atmosphère, et plus encore pour les structures exposées à de fortes concentrations de dioxyde de carbone.

Le dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'air pénètre sous forme gazeuse dans le béton par le réseau poreux. En présence d'eau (qui existe au moins dans les pores les plus petits), il provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée, dite de carbonatation. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, notamment la portlandite Ca(OH)₂ et les C-S-H en carbonates de calcium CaCO₃. Ce processus, nommé carbonatation, engendre la réduction du pH de la solution interstitielle du matériau d'une valeur avoisinant 13 à environ 9. Les armatures protégées par le milieu initialement très basique s'exposent à la corrosion qui provoque des désordres dans la construction par gonflement et fissuration.

La carbonatation a pour conséquence une modification lente de la structure du matériau et un changement de son comportement. Celle-ci est à l'origine de deux principaux effets qui s'avèrent antagonistes [5] :

- elle est bénéfique en améliorant la résistance mécanique et la résistance aux eaux agressives ;

- elle est néfaste en réduisant la protection chimique des armatures.

La carbonatation du béton concerne plusieurs constituants hydratés du ciment.

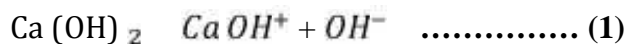
I.3.1 Carbonatation des constituants du béton

La carbonatation est un processus physico-chimique complexe qui met en jeu des réactants et réactifs à l'état gazeux (CO_2 , H_2O), dissous (CO_2 , OH^- , etc....) et solides (les composés anhydres et hydratés du béton).

I.3.1.1 Carbonatation de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

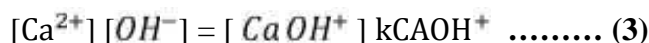
La portlandite est produit responsable du maintien du PH basique de la solution interstitielle des pores, sa consommation par la réaction de carbonatation induit une baisse du PH, provoquant ainsi le dépassivation des armatures et par conséquence induit la corrosion des armatures.

La carbonatation de la portlandite se fait par dissolution et en deux étapes d'ionisation :



D'après Hoyle [6] et Shakhashiri [7], la portlandite s'ionise totalement dans un matériau cimentaire, c'est-à-dire que les molécules de la portlandite solide n'existent pas dans la solution interstitielle du matériau cimentaire, car elles passent directement de la phase solide à la phase ionisée sous forme de trois espèces ioniques: CaOH^+ , Ca^{2+} , OH^- .

L'équilibre chimique entre ces trois espèces reste maintenu dans la solution, il est décrit par l'équation suivante :

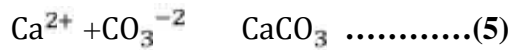


Où : $[\text{Ca}^{2+}]$, $[\text{OH}^-]$ et $[\text{CaOH}^+]$ expriment les activités des ions considérés.

La valeur de la constante d'équilibre à 20° C et 10^5 Pa est égale à :



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



La figure I.2 illustre l'intervention combinée des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus de carbonatation de la portlandite. Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de Ca(OH)_2 est synthétisé par la réaction chimique suivante :

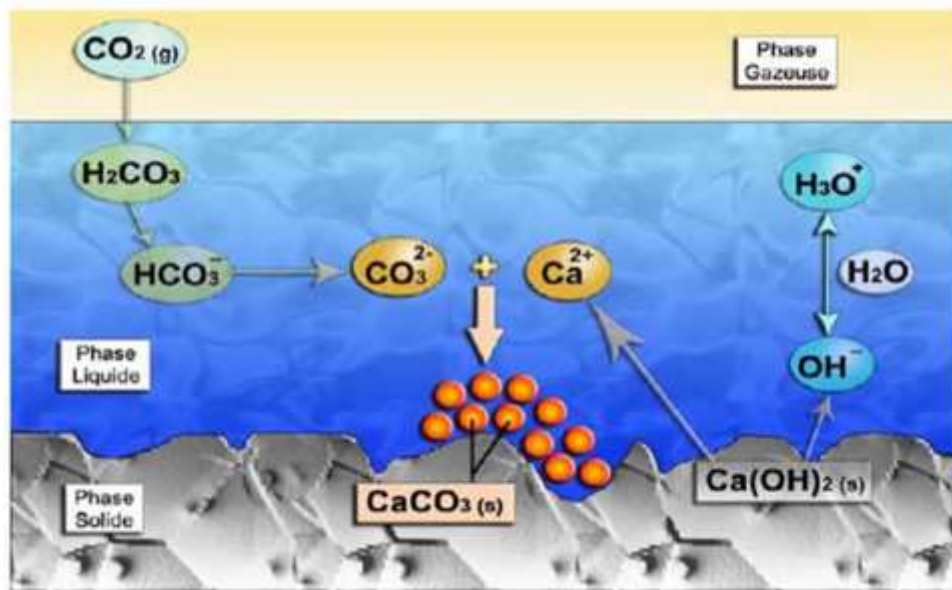
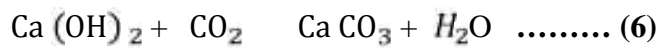
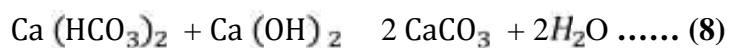
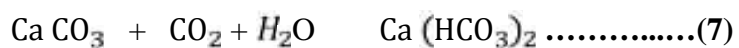


Figure I.2 : Mécanisme de carbonatation de Ca(OH)_2 [12].

L'inconvénient de cette formulation est qu'elle masque toutes les étapes intermédiaires du mécanisme. En revanche, elle a l'avantage d'indiquer que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure [3]. Au-delà d'un certain degré de carbonatation, l'acide carbonique forme par dissociation des ions carbonates qui, à leur tour, par réaction avec la portlandite, forment de la calcite.



I.3.1.2 Carbonatation des C-S-H

Les C-S-H, qui représentent la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment, confèrent au matériau béton l'essentiel de sa résistance mécanique. En revanche, leur pouvoir

tampon sur le pH de la solution est plus faible que celui de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, donc leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation n'est pas primordial [8].

I.3.1.3 Carbonatation de l'ettringite et monosulfoaluminate :

Grandet [9], Kouznetsova et al [10], indiquent que la carbonatation de l'ettringite et du monosulfoaluminate de calcium produit du gypse. Ces hydrates sont présents en petite quantité dans les matériaux cimentaires, c'est pourquoi leur carbonatation est négligée.

I.3.1.4 Carbonatation des aluminates de calcium hydratés

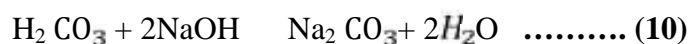
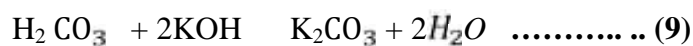
Saunan et Lach [11] indiquent que les aluminates de calcium hydratés se carbonatent en produisant des carbonates de calcium, des hydroxydes d'aluminium et de l'eau.

I.3.1.5 Carbonatation du C_3S et C_2S

Les constituants anhydres, principalement les silicates C_3S et C_2S , ne se carbonatent que s'il y'a suffisamment de l'eau libre dans les pores. Généralement, la carbonatation des silicates se fait en concomitance avec leur hydratation. Cette phase de couplage de l'hydratation avec la carbonatation constitue l'unique possibilité de carbonatation des silicates [12].

I.3.1.6 Carbonatation des alcalins

Les bases présentes dans la solution interstitielle sous la forme de soude (NaOH) et de potasse (KOH), se carbonatent rapidement au contact du dioxyde de carbone dissous. La dégradation des bases alcalines par le dioxyde de carbone s'effectue selon les réactions :



Miragliotta R [13], ont remarque que l'augmentation de la teneur en alcalins entraine une carbonatation plus importante du béton.

I.4 Paramètres influençant la carbonatation

I.4.1 Rapport E/C

Le rapport E/C a une importance considérable sur l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent sur la perméabilité du béton et sur la diffusité des espèces gazeuses ou ioniques au sein du béton [14].

La relation linéaire entre la profondeur de carbonatation et la racine carrée du temps est observée expérimentalement confirmant ainsi que la diffusion est le phénomène dominant dans le processus de carbonatation et ce dans une large gamme de rapports E/C [15] (Figure I.3).

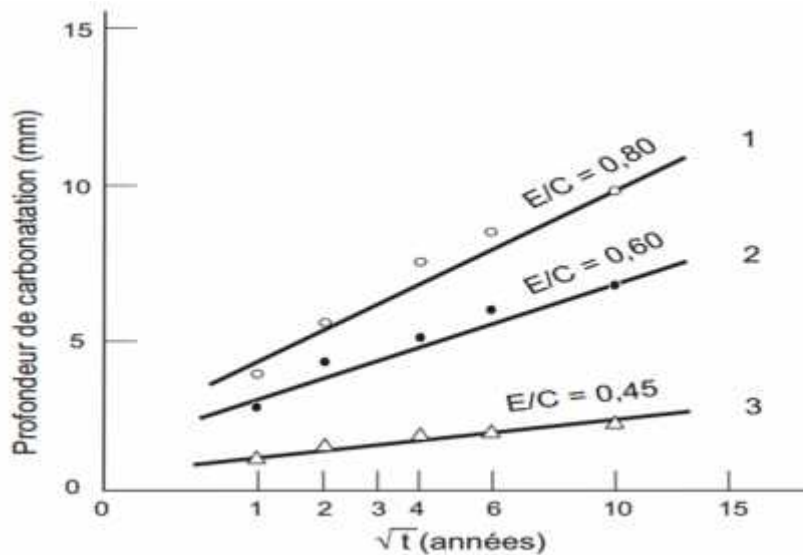


Figure I.3 : Evolution de la profondeur carbonatée en fonction de la racine carrée du temps. [15].

I.4.2 Dosage en ciment

La figure (I.4) montre l'influence du dosage en ciment sur la profondeur de carbonatation de bétons préparés avec du CEM I et conservés à 20 °C et 50 % HR pendant 5 ans. On constate que la profondeur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage en ciment est important car la porosité du béton, et donc la diffusion, sont réduites [15].

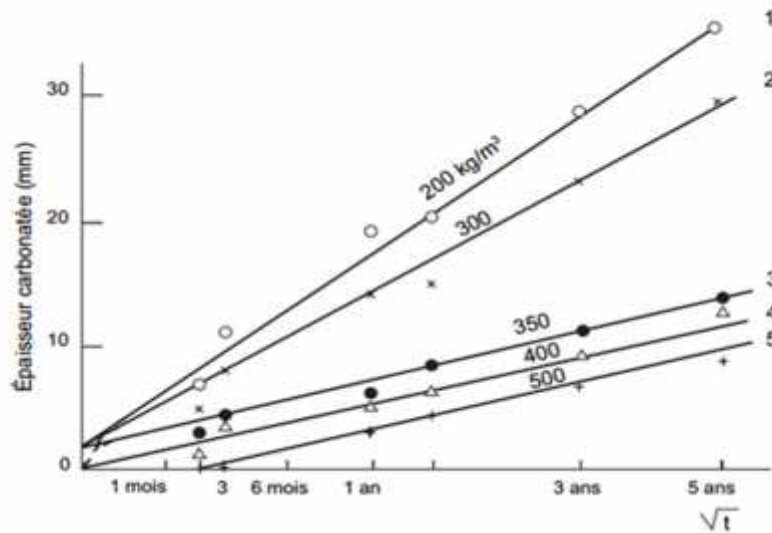


Figure I.4 : Relation entre épaisseur carbonatée et le dosage en ciment [15].

La profondeur de la carbonatation on augmente avec le rapport E/C.

I.4.3 Résistance à la compression

La profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression à 28 jours augmente. Cependant, deux bétons de même résistance mécanique peuvent avoir deux rapports E/C distincts et donc deux comportements différents vis-à-vis de la carbonatation [16].

I.4.4 Humidité relative

La figure (I.5) montre que la vitesse de carbonatation est maximale entre 50 et 70 % d'humidité relative. En dessous de 50 % et au-dessus de 90 à 95 % la vitesse est très faible ou nulle [16].

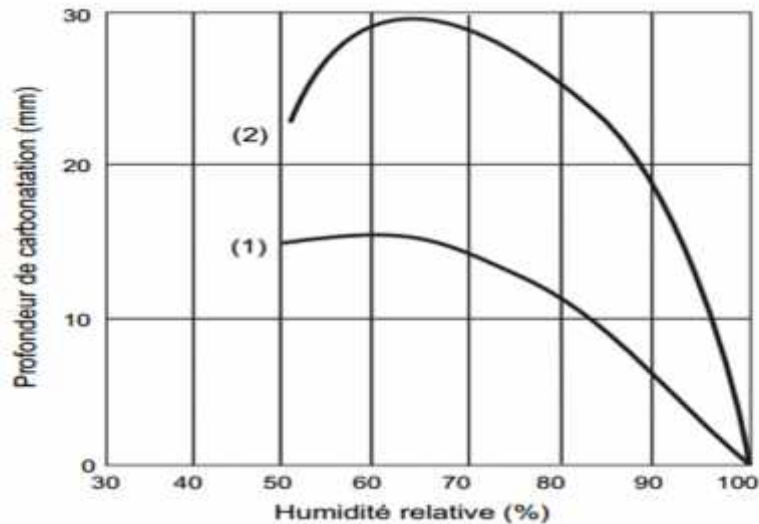


Figure I.5 : Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation pour des bétons confectionnés avec des rapports E/C de 0.6 (courbe 1) et 0.8 (courbe 2) et conservés 16 ans à 20°C [17].

Pour que la carbonatation soit maximale, l'humidité relative doit être suffisamment faible pour qu'une phase gazeuse connectée permette la diffusion du CO_2 gazeux et suffisamment élevée pour que la réaction de carbonatation proprement dite puisse avoir lieu en phase aqueuse [18].

Dans la même démarche il était montré que l'humidité relative qui correspond à la carbonatation accélérée maximale est de l'ordre de 66 % [18].

I.4.5 Effet de la cure humide

Une bonne cure humide, qui consiste à maintenir le béton dans des conditions de température et d'humidité relative propices à une meilleure hydratation, diminue la vitesse de carbonatation. Contrairement à une conservation à l'air libre, une cure dans l'eau favorise l'hydratation du ciment et réduit ainsi la porosité du béton ce qui conduit à un béton plus résistant à la carbonatation, cette résistance à la carbonatation est d'autant plus importante que la cure est longue [19]. ;

I.4.6 Température

Chaussadent [20], montre qu'une augmentation de la température fait diminuer la vitesse de carbonatation des bétons. Pour ceci, il s'appuie sur la solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau et sur des expérimentations réalisées par Dheilley et al [21] selon lesquelles la portlandite se dégrade plus rapidement lorsque la température diminue. D'autre part elle favoriserait le

séchage des pores, donc faciliterait l'accès du dioxyde de carbone gazeux dans la matrice cimentaire (Figure I.6)[15].

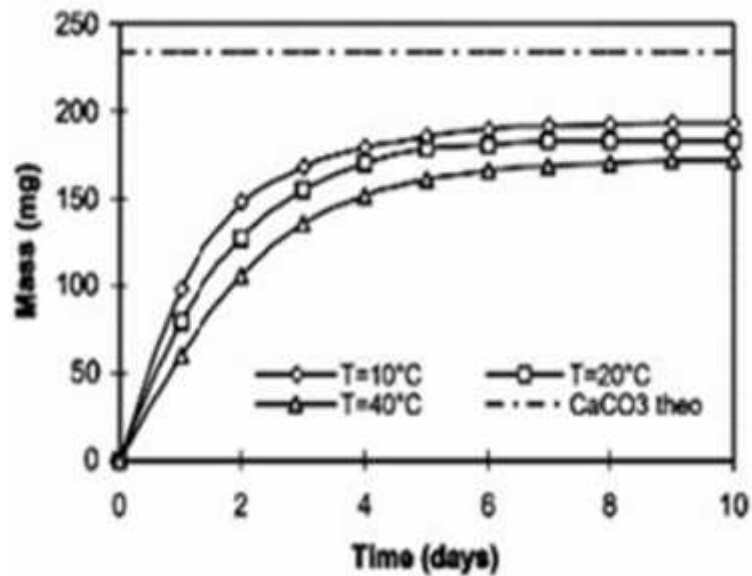


Figure I.6 : Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite ($\text{CO}_2=50\%$), en fonction de la température [21].

I.4.7 Concentration de CO_2

L'augmentation de la concentration de CO_2 accroît la vitesse de carbonatation. Les quantités qui contiennent de CO_2 suffisantes, il est plus carbonaté et plus consommé, aussi, le front de carbonatation avance plus vite [15].

I.5 Conséquences de la carbonatation

I.5.1 Corrosion des armatures

La corrosion est le principal facteur à prendre en compte lorsqu'on veut étudier la durabilité des différents types d'ouvrages (bâtiments, résidentiels, ouvrages de génie civil tels que les ponts, les structures portuaires...).

La corrosion reste la cause de détérioration la plus coûteuse en terme de maintenance. Elle est à l'origine de nombreux défauts apparents qui, s'ils n'engendrent pas de pertes de capacité portante de la structure, se révèlent nuisibles à l'exploitation de l'ouvrage, parmi les causes principales de cette dégradation, on peut citer le phénomène de carbonatation [15].

I.5.2 Evolution de la porosité

La carbonatation n'est pas nocive pour le béton dans un premier temps mais protège le béton en modifiant sa structure poreuse. La distribution des tailles de pores s'en trouve modifiée et on enregistre une réduction du volume poreux et de la surface spécifique du matériau. Le CaCO_3 formé obture certains pores, donc la porosité totale diminue, les plus gros pores ne semblent pas être affectés, mais le volume des plus petits est réduit d'un facteur 2 [17].

I.5.3 Evolution de la teneur en eau

Thiery [3] illustre par gammadensimétrie l'augmentation du taux de saturation en eau liquide qui résulte de la carbonatation. Il démontre que cette augmentation est liée physiquement à la diminution de porosité engendrée par la carbonatation, et chimiquement à la seule carbonatation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

I.5.4 Evolution des paramètres mécaniques

Dans la pratique des ingénieurs, la résistance à la compression est l'indicateur le plus couramment utilisé pour caractériser un béton durci. **La figure I.7** représente la relation entre résistance mécanique et profondeur de carbonatation pour différents bétons. Une relation quasi linéaire est observée. On constate également qu'au-delà d'environ 50 MPa, la carbonatation devient négligeable du fait d'une porosité de plus en plus faible [15].

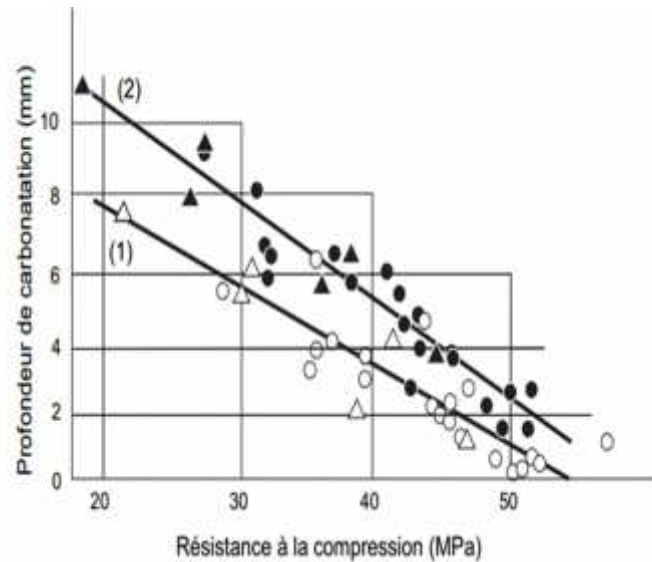


Figure I.7 : Relation entre résistance à la compression à 28 jours et la profondeur carbonatée [15].

I.6 Vitesse de carbonatation

Comme beaucoup de paramètres interférant sur la vitesse de carbonatation, seule une détermination expérimentale peut donner une information importante. La vitesse de progression du front de carbonatation diminue avec le temps parce que le CO_2 doit diffuser à travers la zone de surface du béton déjà carbonatée [22]. Cette vitesse dépend des caractéristiques du matériau (porosité, nature du ciment, etc.). L'humidité relative du milieu environnant, qui détermine la teneur en eau du béton conformément aux isothermes de désorption et d'absorption de vapeur d'eau qui lui-même varie en fonction de la distance à partir de la surface, est un paramètre également fondamental.

I.6.1 Cinétique de la carbonatation

La pénétration du CO_2 et sa réaction avec les hydrates de la pâte divise le béton en deux : une zone carbonatée et une zone non carbonatée. Malgré la complexité des phénomènes, on admet généralement que l'épaisseur de la zone carbonatée $x(t)$, à un instant donné t de la vie d'un ouvrage, est donnée par la relation (11) [15]:

$$X(t) : x_0 + K \sqrt{t} \quad \dots\dots\dots(11)$$

où :

x_0 : L'épaisseur carbonatée initiale ;

K : Constante prenant en compte à la fois la composition du béton (rapport E/C, dosage et nature du liant...) et les conditions d'environnement (humidité relative, température, pression...);

t : Durée d'exposition (années).

I.7 Généralités sur les ajouts cimentaires

I.7.1 Classification des ajouts

Généralement, on utilise dans les ciments et les bétons les ajouts minéraux suivants [23] :

- Les cendres volantes, Les laitiers de haut fourneau, Les fillers calcaires, Les pouzzolanes.

I.7.1.1 Cendres volantes

C'est une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique, dérivée de la combustion du charbon pulvérisé, ayant des propriétés pouzzolaniques et composée essentiellement de SiO_2 et Al_2O_3 , la proportion de SiO_2 réactive, définie et déterminée comme dans l'ENV 197-1, constituant au moins 25% en masse (Figure I.8) [23].



Figure I.8 : Cendres volantes [23].

I.7.1.2 Laitiers de haut fourneau

Le laitier vitrifié moulu est un ajout, il provient du laitier vitrifié (granulé ou bouleté), coproduit de la fabrication de la fonte, obtenu par trempe du laitier de haut fourneau en fusion (Figure I.9) [23].



Figure I.9: Laitiers de haut fourneau [23].

I.7. 1. 3 Fumée de silice

Il s'agit d'une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium. Elle est entraînée par les gaz, depuis la zone de combustion des fours, vers le système de captage (Figure I.10) [23].



Figure I.10 : Fumée de silice [23].

I.7. 1. 4 Additions calcaires

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisement de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles, dont les caractéristiques sont définies par la norme [23].

Les fillers calcaires obtenus dans le secteur de production de la chaux sont des produits principalement secs et particulièrement riches en calcite ($\text{CaCO}_3 > 95\%$)(Figure I.11).



Figure I.11 : Additions calcaires.

✓ **La problématique des Additions calcaires (la demande en eau)**

L'eau dans le béton joue un double rôle : elle est nécessaire pour hydrater le ciment, mais aussi pour assurer la maniabilité du béton à l'état frais. En général, l'augmentation de la quantité de particules fines dans un béton accroît la demande en eau pour le maintien de son ouvrabilité, puisqu'il faut davantage d'eau pour enrober et donc lubrifier les grains. Dans le cas particulier des fillers riches en calcite, la finesse des particules joue un rôle, bien que limité, sur cette caractéristique. Pour les fillers issus des autres secteurs, l'étude a démontré que la contamination par des particules argileuses actives (mise en évidence par un essai d'adsorption du bleu de méthylène) était le paramètre prédominant. L'argile est en effet responsable de la mobilisation d'une partie de l'eau de gâchage nécessaire à l'ouvrabilité du béton [24].

I.7. 2 Importance des additions dans l'industrie cimentière

Dans le domaine des travaux publics et du bâtiment, le ciment Portland artificiel sans ajout ne dépend plus à lui seul à toutes les exigences (mécaniques, durabilité, coût, ...). De plus, dans une même cimenterie et pour répondre aux différentes demandes commerciales, on a tendance à ne plus fabriquer qu'un seul clinker et à le broyer plus ou moins finement avec des additions minérales de provenances diverses pour fabriquer des ciments composés (CEM II). Si l'on se fie aux recueils de normes produits, d'après Von Euw [25], de nombreux pays autorisent ce type d'addition : 35 pays prévoient l'utilisation des ciments au laitier, 14 pays des ciments aux cendres, 31 pays des ciments à la pouzzolane et 15 pays des ciments aux fillers calcaires.

Alors qu'en France l'utilisation de filler dans le ciment n'a débutée qu'en 1979, date à laquelle la normalisation française a autorisé leur fabrication et leur commercialisation [NF P15-300 et NF P15-301], en Algérie, le développement de ciment utilisant des fillers calcaires n'a commencé qu'à partir de 1990.

I.8 Effet des ajouts cimentaires sur la carbonatation du béton

La substitution partielle d'une certaine quantité de ciment Portland par un ou plusieurs ajouts minéraux.

Lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse non seulement du point de vue économique, écologique, rhéologique mais aussi du point de vue résistance.

I.8.1 Les cendres volantes

Marcelo Henrique Farias de Medeiros et al [26] ont étudié l'effet du remplacement partiel du ciment par les cendres volantes (entre 10% et 30% en masse), les résultats de cette recherche ont montré que la résistance à la compression diminue tandis que la profondeur de carbonatation augmente .

I.8.2 Les laitiers de haut fourneau

Selon Litvan et Meyer à une modification de la distribution poreuse de la couche carbonatée, corrélativement une perte à la résistance de la compression et un accroissement de la perméabilité sont absorbés dans ces bétons carbonatés [27].

Selon Osborne, des bétons à 70 et 80 % de substitution massive du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau se carbonatent, en conditions naturelles, beaucoup plus que des bétons au seul ciment Portland, d'après Bouikni et al, des bétons à 65 % de substitution massive du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau se carbonatent, en conditions naturelles, entre 15 et 30 % plus que des bétons à 50 % de substitution [25].

I.8.3 Les pouzzolanes

Les travaux de SISOMPHON et L.FRANKE ont montré que les bétons pouzzolaniques ont été long temps considérés moins capables de résister à la carbonatation que ceux avec des ciments portlands à cause de leur contenu en portlandite [29].

I.8.4 Les fumées de silice

Les fumées de silice ont une place particulière puisqu'elles permettent de confectionner des bétons à hautes performances. L'ajout de fumées de silice consomme la portlandite et ceci peut donc modifier la vitesse de carbonatation. On peut retenir les éléments suivants [15] :

- les bétons contenant des fumées de silice sont plus sensibles que les bétons de ciment Portland aux effets d'une cure médiocre ;
- la présence de fumées de silice ne donne lieu à une carbonatation importante que dans le cas des bétons de résistance à la compression moyenne ou médiocre.

Certains chercheurs [30] ont combiné deux types d'ajouts (cendres volantes et fumée de silice) avec des pourcentages allant de 25 à 40% pour les cendres volantes et de 5 à 20% pour la fumée de silice afin de voir leur effet sur la résistance à la carbonatation est augmenté tandis la résistance à la compression est démunie .

I.9 L'effet des ajouts calcaires

Des études [RAN 89] montrent que l'ajout de fillers calcaires (15 et 20 % en masse par rapport au ciment) et de fillers siliceux (10 et 25 %) à des clinkers conduit à des épaisseurs de carbonatation du même ordre de grandeur que celles obtenues avec des ciments Portland de même classe de résistance. Par contre, avec un CEM II à 15 % de laitier de haut-fourneau, les bétons se carbonatent plus qu'avec des CEM II aux fillers calcaires ou siliceux de même classe [27].

D'après l'étude expérimentale de Frédéric Michel et al [31], ils se montrent qu'il ya une perte de résistance à la compression tandis la profondeur de carbonatations augmenté en cas d'utilisation des filler calcaire avec de pourcentage (34%) .

Dans le même contexte Falih Rafie Moro et al [24] , montrent aussi que les ajouts calcaires augmentent la profondeur de carbonatation avec une perte de résistance à la compression et une augmentation des porosités capillaires avec des pourcentages (30% à 72%) .

Luca Bertolini et al [32] , montrent aussi qu' il ya augmentation de profondeur de la carbonatation avec la perte de résistance à la compression et une augmentation des la teneur en calcaire en cas d'utilisation des filler calcaire avec des pourcentages (10% à 30%) .

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une synthèse bibliographique sur le phénomène de carbonatation, les paramètres qu'il l'influence et ses conséquences sur la durabilité des structures en béton armé.

Une revue bibliographique sur les ajouts cimentaires et leur effet sur la profondeur de carbonatation a montré que pratiquement tout ces ajouts font augmenter la profondeur de carbonatation et diminuer la résistance à la compression.

De même une intention particulière a été donnée aux ajouts calcaires sujets de notre étude ou il a été montré à travers des études antérieures que ces ajouts augmentent le front de carbonatation tandis que la résistance à la compression est diminuée.

II.1 Introduction

Ce deuxième chapitre sera consacré à la caractérisation physicochimique des matériaux entrant dans la composition du béton et de présenter les principales techniques et méthodes expérimentales utilisées. Le béton est un matériau de construction, obtenu par un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, granulats, et le plus souvent, adjuvant qui doivent constituer un ensemble homogène.

Pour la confection du béton utilisé dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le sable alluvionnaire, deux classes de gravier concassé, le ciment, la poudre de marbre et l'eau potable.

Dans ce chapitre , on commence par la partie expérimentale que nous avons réalisé au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat, en présentant une description des différents essais nécessaires pour la caractérisation des matériaux qui ont servi à la formulation du béton, par des proportions de poudre de marbre .

II.2 Caractérisation des matériaux

II.2.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme de poudre minérale s'hydratant en présence d'eau, en formant une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air .C'est le constituant fondamental du béton puisque c'est lui qui joue un rôle de cohésion des différents constituants.

Le ciment utilisé est de type CEM I/42,5 provenant de l'usine Biskria de BISKRA, utilisé pour les bétons de bâtiment. Ses propriétés physico-minéralogique sont données dans le **(tableau II.1)** et le **(tableau II.2)**, et les propriétés mécaniques sont données dans le **(tableau II.3)**.



Figure II.1 : Ciment CEM I 42.5

Tableau II.1 : Caractéristiques minéralogique du ciment **CEM I 42.5** (voir annexe).

Eléments	Teneur %	Garanties
SO ₃	2.30	(NA 237) < 3.5%
CL	0.028	(NA 5080) 0.1%
P.A.F	2.04	(NA 237) 5%
C ₃ S clinker	62	Calculé selon Bogue
C ₂ S clinker	13	Calculé selon Bogue
C ₃ A clinker	1.5	Calculé selon Bogue
C ₄ AF clinker	17	Calculé selon Bogue

Tableau II.2 : Caractéristiques physiques du ciment **CEM I 42.5 (voir annexe).**

Désignation	Mesures	Garanties
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	3420	(NA231)
Début de prise (min)	180	(NA233) 60 min
Expansion a chaud (mm)	0.5	10mm(NA232)
Consistance (%)	25.7	T(NA290)

Tableau II.3: Caractérisation mécanique du ciment **CEM I 42.5 (voir annexe).**

Caractéristiques mécaniques			
Résistance a la compression (MPa)	2 jours	10	21
	28 jours	62.5 R 42.5	49.5

II.2.2 Poudre de marbre (PM)

La poudre de marbre est un déchet résultant de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbres. Cette poudre a été fournie par la société MCA (Marbre Carrelage et Agglo-marbre installée à Bordj Bou Arrérdj). Les propriétés physiques et minéralogiques de la poudre de marbre sont données dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Les caractéristiques minéralogiques de la Poudre de marbre [33].

Poudre de marbre %	Element
55.6	CaO
0.6	SiO ₂
0.4	AL ₂ O ₃
0.2	Fe ₂ O ₃
0.1	MgO
90	NaCO ₃
0.1	CL
43	LOI
2.7	Densité
2126 (cm²/g)	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)

II.2.3 Agrégats (sable et graviers)

Le sable utilisé est un sable alluvionnaires (0-5 mm) qui provient d'Oued M'ZI (Laghouat), les graviers calcaires utilisés sont de deux classes (3-8 mm et 8-15 mm) qui proviennent de la carrière de concassage OUAZZAN (Laghouat).

II.2.3.1 Caractéristiques physiques des agrégats

a) Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du matériau, déterminée selon la norme NEF 18-555 par relation suivante [34]:

$$\rho_{app} = \frac{M1 - M0}{V_{app}} \dots\dots\dots (12)$$

Avec :

ρ_{app} : masse volumique apparente du matériau [g/cm^3] ;

M_1 : masse du récipient plein du matériau [g] ;

M_0 : masse du récipient vide [g] ;

V_{app} : volume du récipient [cm^3]. ($V_{app}=1000cm^3$)

b) Masse volumique absolue

C'est la masse de l'unité de volume absolu sans vides du matériau, déduction faite de tous les vides . Déterminée selon la norme NEP 18-555 [34] par la relation suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots (13)$$

Avec :

ρ_{abs} : masse volumique absolue du matériau [g/cm^3] ;

M : masse d'agrégats[g] ;

V_2 : volume total [cm^3] ;

V_1 : volume de l'eau [cm^3] ;

c) Coefficient d'absorption

✓ Sable

Il est défini comme étant le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon du sable après imbibition par l'eau, à sa masse sèche. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C.

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. En plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement, on vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant. Le coefficient d'absorption est déterminé par la relation (14) selon la norme NF P 18-554 [35].

$$A_b = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \dots\dots\dots (14)$$

Avec :

A_b : coefficient d'absorption [%] ;

M_s : masse de l'échantillon sec [g] ;

M_h : masse de l'échantillon imbibé à surface sèche [g].

✓ **Graviers**

Il s'agit d'immerger l'échantillon dans l'eau pendant 24h à 20 C° à la pression atmosphérique, ensuite peser l'échantillon après l'avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant.

Le coefficient d'absorption sera calculé en utilisant la même équation (14) donnée précédemment.

II.2.3.2 Equivalent de sable

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une quantité de solution lavante dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution lavante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable lavé, (Figure II.2).



Figure II.2: Essai d'équivalent de sable.

Après 20 min, les hauteurs sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport de la hauteur du sable sur la hauteur totale, exprimé en pourcentage.

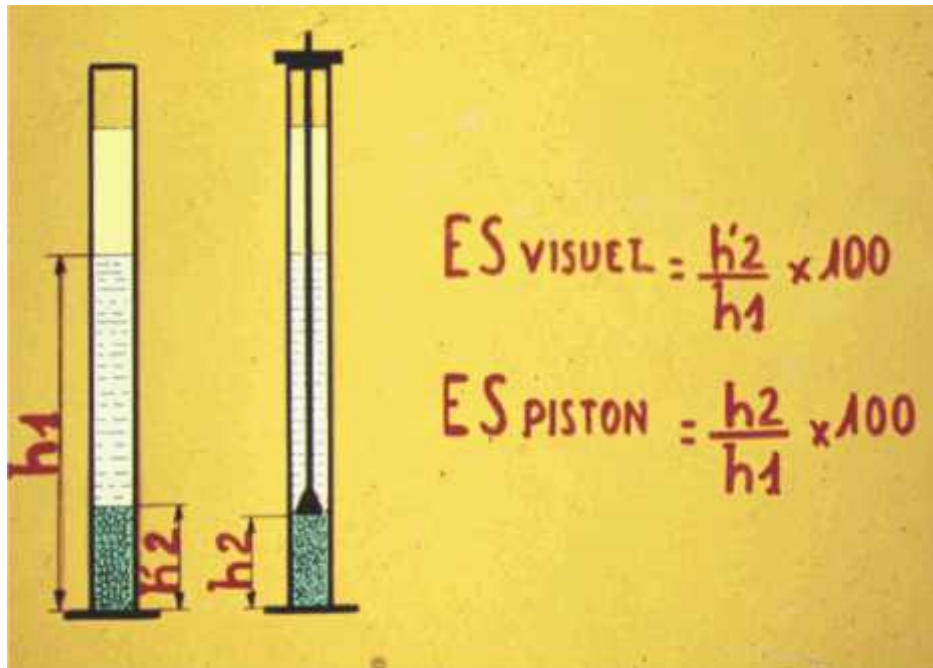


Figure II.3 : Mesure d'équivalent de sable.

Equivalence de sable est donnée selon la norme NF P18-598[36] par les relations suivantes :

$$ESV = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 \dots \dots \dots (15)$$

$$ESP = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \dots \dots \dots (16)$$

Avec:

ESV : équivalent de sable visuel (%);

h'_2 : hauteur de grains propre visuelle (mm);

h_2 : hauteur a l'aide de piston (mm);

h_1 : hauteur totale (mm);

ESP: équivalent de sable à piston (%).

Tableau II.5 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable [37].

PS	Nature et qualité du sable
< 60	"Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq PS < 70$	"Sable légèrement argileux" de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS < 80$	"Sable propre" à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 80$	"Sable très propre" l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.2.3.3 Analyse granulométrique des agrégats

L'essai consiste à déterminer la répartition granulaire des granulats supérieurs à 80 microns par tamisage à sec, réalisé selon la norme NF EN 933-1[38].

a) Sable

L'analyse granulométrique réalisée sur un échantillon de 2000 (g) du sable alluvionnaire (tableau II.6 et figure II.4) permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

Tableau II. 6: Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

Provenance : Carrière de oued M'zi Laghouat.				
Echantillon : sable alluvionnaire.				
Poids initial sec : 2000 g.				
Tamis (mm)	Refus Partiel(g)	Refus Cumulé(g)	Refus Cumulé(%)	Passant (%)
6.300	0	0	0	100
5.000	26	26	1.3	98.7
4.000	26	52	2.6	97.4
2.500	52	104	5.2	94.8
1.000	166	270	13.5	86.5
0.500	440	710	35.5	64.5
0.315	956	1666	83.3	16.7
0.125	296	1962	98.1	1.9
0.080	20	1982	99.1	0.9
Fond	16	1998	99.9	0.1

✓ **Module de finesse**

A partir de l'analyse granulométrique, on peut déduire le module de finesse de sable, la norme (NF EN 933-1)[38], qui est défini comme le 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5 mm.

$$Mf = \frac{\sum \text{refus cumulés}}{100} \dots\dots\dots(17)$$

✓ **Coefficient d'uniformité Cu**

Le coefficient d'uniformité caractérise la répartition en taille des éléments qui composent un matériau de type sable. Il se calcule de la façon suivante [38]:

$$Cu = D_{60}/D_{10} \dots\dots\dots(18)$$

Cu : Le coefficient d'uniformité ;

D₆₀ : Le tamis correspondant à 60% du passant sur la courbe granulométrique ;

D₁₀ : Le tamis correspondant à 10% du passant sur la courbe granulométrique.

b) Gravier

Les résultats de l'analyse granulométrique des graviers 3/8 et 8/15 sont regroupés sur le Tableau II.7 et le Tableau II.8 et présenté dans la figure II.4.

Tableau II. 7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Echantillon : gravier calcaire 3/8. Poids initial sec : 3000 g.				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Refus cumulé(%)	Passant(%)
10	00	00	00	100
8,0	120	120	4	96
6,3	1206	1326	44.2	55.8
5,0	1152	2478	82.6	17.4
4,0	464	2942	98.06	1.94
3,15	16	2958	98.60	1.4
Fond	40	2998	99.93	0.07

Tableau II. 8 : Analyse granulométrique du gravier calcaire 8/15.

Provenance : OUAZZANE				
Echantillon : gravier calcaire 8/15.				
Poids initial sec : 3000 g.				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé(%)	Passant(%)
20	00	00	00	100
16	16	16	0.53	99.47
12.5	352	368	12.26	87.74
10	1456	1824	60.8	39.2
8	986	2810	93.66	6.34
6.3	154	2964	98.8	1.2
Fond	17.6	2981.6	99.38	0.61

La figure suivante regroupe les résultats de l'analyse granulométrique des graviers 3/8 et 8/15 .

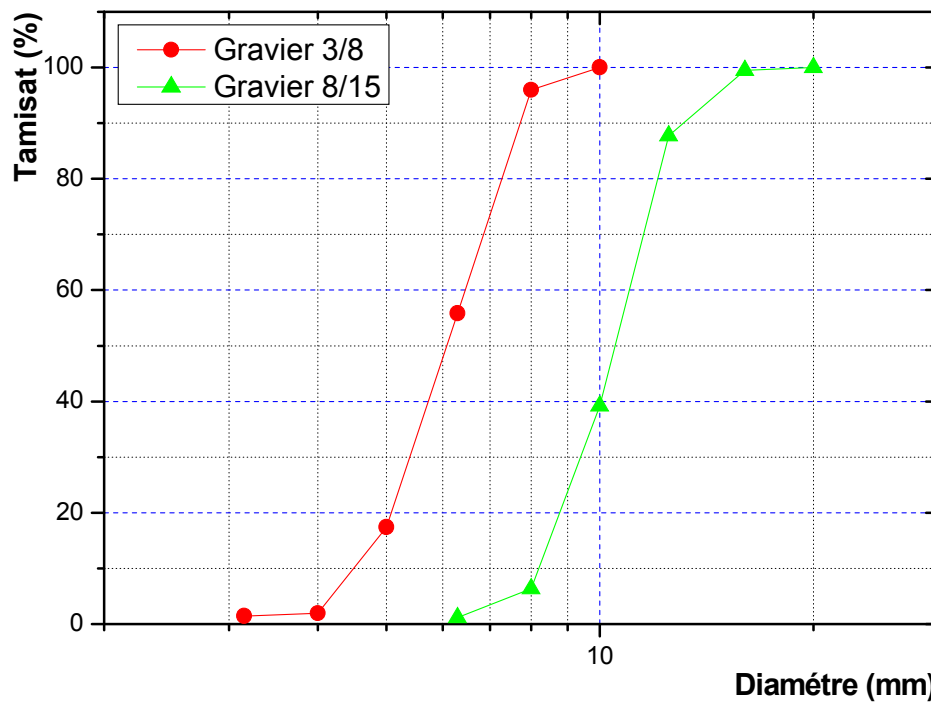


Figure II.4 : Résultats de l'analyse granulométrique des graviers 3/8 et 8/15.

II.2.3.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection du béton est l'eau de robinet de laboratoire de département de Génie civil de Laghouat.

II .3 Formulation du béton

L'étude de la composition d'un béton, qui répond aux exigences de durabilité de la norme NF EN 206-1 [39], consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage.

L'objectif de cette partie de ce travail est d'obtenir une maniabilité plastique et une résistance mécanique à la compression de l'ordre de 25 MPa.

II.3.1 Méthodes de formulation du béton

La formulation d'un béton consiste à déterminer les quantités d'agréats (sable et gravier), de ciment et d'eau nécessaires à mettre pour obtenir un mètre cube de béton avec la prise en compte de deux critères :

- La résistance à obtenir.
- L'ouvrabilité désirée.

De nombreuses méthodes sont proposées pour composer un béton telles que : Bolomey , Faury, Vallette, Dreux-Gorisse, Scramtaiev Etc.[40].

Pour notre étude, la formulation du béton est élaborée selon la méthode de Dreux-Gorisse, et optimiser en utilisant la méthode de Baron Lesage [41].

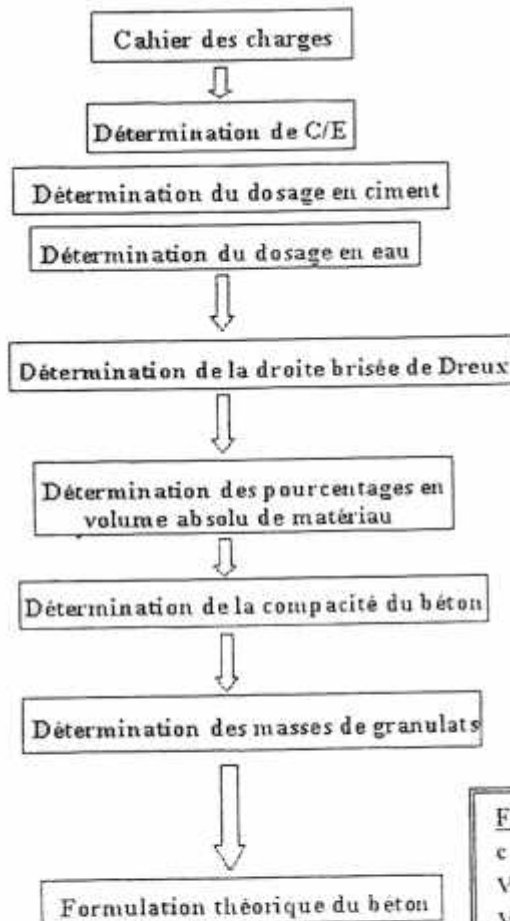
II.3.2 Formulation de béton par la méthode de Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse est largement utilisée pour les bétons courants. Elle a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et ayant données satisfaction. Les démarches de la formulation par cette méthode sont résumées sur l'organigramme suivant (Figure II.5) [42].

FORMULATION DES BETONS : METHODE DE DREUX-GORISSE

Caractéristiques des granulats :	Sable	Gravette	Gravier	Caractéristiques du ciment :
Forme (Roulé - Concassé)				Dénomination :
Qualité (Excellente - Bonne - Passable)				Classe vraie (σ'_c) :
Coefficient d'absorption $A_b(\%)$				Masse volumique absolue (ρ_j) :
Module de finesse : M_f				Caractéristiques des adjuvants :
Masse volumique absolue : ρ_s				Dénomination :

$f_{c28} =$



- Aff. = Vibration :
- $\sigma'_{28} =$
- $D_{max} =$
- G = C/E =
- $C_{opt} =$
- $C_{avant correction} =$ $E_{avant correction} =$
 Correction sur le dosage de pâte % = E =
- C = E =
- X = K =
- $K' =$ $K_s =$
- Y = $K_p =$
- % S =
- % g =
- % G =
- c = $c_0 =$
- $V_c =$ $c_1 =$
- V = $c_2 =$
- $c_3 =$
- $V_s =$ S =
- $V_g =$ g =
- $V_G =$ G =

Formules :

$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$

$V_c = C / \rho_{s(c)}$

$V = (c - V_c)$

$V_s = V * S \% \dots \dots \dots S = 1 - c * S \% * \rho_{s(c)}$

$V_g = V * g \% \dots \dots \dots g = V * g \% * \rho_{s(g)}$

$V_G = V * G \% \dots \dots \dots G = 1 - c * G \% * \rho_{s(G)}$

E_{eff} =

E_{ab} =

E_{tot} =

E_{tot}/C = ; (G+g)/S =

Figure II.5 : Méthode de Dreux-Gorisse[42].

II.3.2.1 Essai d'affaissement

Pour déterminer la maniabilité, on a procédé à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Selon la norme NFP 18-451 [43], cet essai consiste à mouler un tronc de cône en béton (20 cm de diamètre de base et 10 cm de diamètre de la partie haute et de hauteur 30 cm) (Figure II.6). On remplit le cône en 3 couches piquées chacune de 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre, la surface du béton sera arasée. Ensuite le moule sera soulevé avec délicatesse et l'on mesure aussitôt après l'affaissement.



Figure II.6 : Mesure de l'affaissement du béton témoin à l'aide du cône d'Abrams.

À l'aide des essais d'affaissement, on trouve la composition adéquate correspondant à la valeur optimale de l'affaissement obtenue.

En suivant les étapes indiquées sur l'organigramme, on aboutit à la courbe du mélange (Figure II.7) qui nous permet de calculer les différentes proportions des constituants de la formulation.

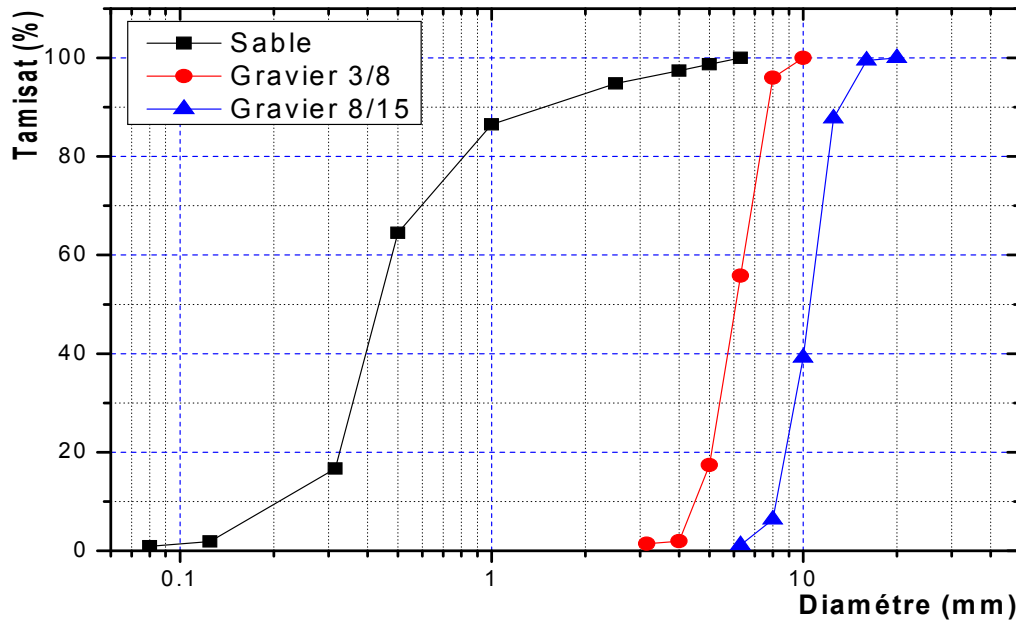


Figure II.7 : Résultats de l'analyse granulométrique (sable + graviers 3/8 et 8/15).

II.4 Confection et conservation des échantillons

Avant le gâchage des bétons, les agrégats, préalablement lavés et séchés dans l'étuve à $110 \pm 5^\circ\text{C}$ pendant un jour (24 h) puis refroidis à l'air ambiant, sont introduits, selon les proportions massiques prédéterminés. Avant le malaxage du béton il faut préparer les moules (nettoyer, huiler).



Figure II.8 : Echantillons prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$).

Pour la mise en œuvre des bétons nous procédons au remplissage des moules selon le type de l'essai à réaliser :



Figure II.9 : Remplissage les moules en béton.

Des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) sont confectionnées pour la détermination de la résistance de compression ainsi que pour les essais de carbonatation accélérée.

Tous les échantillons sont conservés dans les moules pendant 24 heures sous un film plastique, après démoulage, ils sont immergés dans l'eau à $T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ conformément à la norme NA 426 [44] pendant 28 jours et selon la recommandation de L'AFPC AFREM [45], jusqu'à les échéances prévues pour le lancement des essais.



Figure II.10: Conservation des échantillons.

II.5 Compagne expérimentale

Les échantillons de béton confectionnés seront conditionnés puis soumis à deux campagnes d'essais.

1. Essai de carbonatation accélérée

Il s'agit de la détermination de la profondeur de la zone du béton de peau carbonatée pour les différents bétons (B1, B2, B3, B4) à l'âge de 7,14 et 28 jours.

2. Essai de résistance mécanique

Il s'agit de la détermination de la résistance à la compression des cubes du béton carbonatée pour les différents bétons à l'âge de 7,14 et 28 jours.

Les essais de résistance à la compression sont effectués sur des échantillons cubiques $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ conformément à la norme NF P18-406[46] en utilisant une presse hydraulique de vitesse de chargement 0.5 MPa/Sec avec une capacité de 3000 KN , la contrainte de rupture est donnée directement par la machine d'essais avec une précision de 0.5 MPa (Figure II.12).



Figure II.11: Presse d'écrasement à la compression.

La résistance en compression est calculée par la formule de la résistance des matériaux suivante :

$$e = \frac{F}{S} \dots\dots\dots(19)$$

e : contrainte de compression (en MPA) ;

F : charge de rupture (en KN) ;

S : Surface de l'échantillon soumis à la compression (en cm^2).

II.6 Essai de carbonatation accélérée

Après 28 jours de conservation dans l'eau, les échantillons de béton sont placés dans une enceinte hermétique (figure II.12).

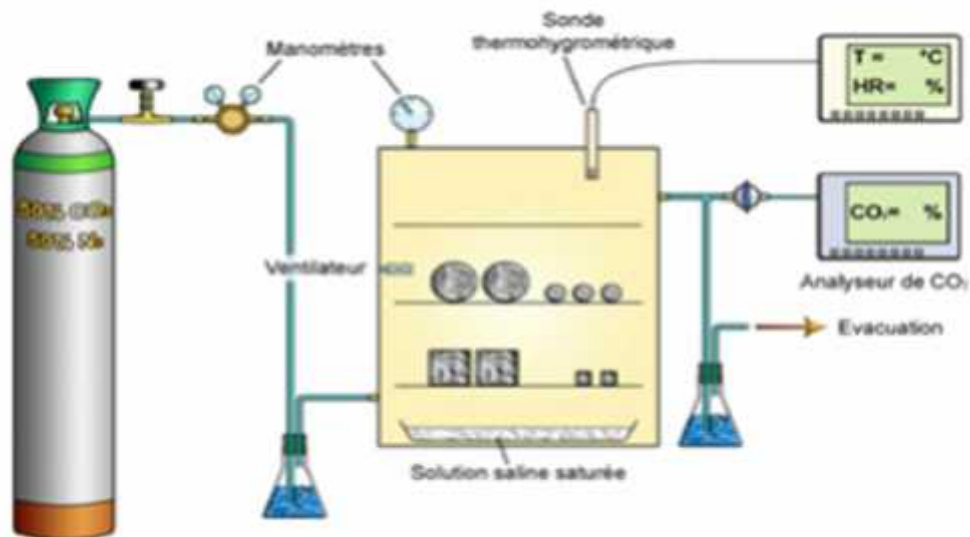


Figure II.12 : Schéma de système de carbonatation.

✓ Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur de béton carbonaté dans des bétons conservés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone à une humidité relative de 65%.

La chambre de carbonatation est composée d'un système d'alimentation en mélange gazeux (50% de CO_2 et 50% d'air) [45].

Selon les recommandations AFREM [45] , et avant le démarrage de l'essai de carbonatation accélérée , les échantillons qui ont subi une cure en ambiance humide (dans l'eau) pendant 28 jours seront soumis a une phase de pré-conditionnement .cette phase se compose d'une phase ou les échantillons sont saturés en eau pour la détermination de la masse volumique apparente et de la teneur en eau , suivie d'une seconde phase ou elles sont placés dans une étuve réglée à une température de 40 ± 2 °C pendant deux jours .

Les deux faces carrés de chaque échantillons sont recouvertes de papier aluminium adhésif afin d'orienter la diffusion du CO_2 (Figure II.13) les échantillons sont ensuite pesés avant le démarrage de l'essai.



Figure II.13 : Préparation des échantillons pour l'essai de carbonatation.

Les échantillons sont ensuite mis dans l'enceinte, le gaz carbonique CO_2 est injecté à 50% avec le même volume d'air à une humidité relative toujours maintenue à $60 \pm 5\%$, avec une température de 20 ± 2 °C, espacés de 2 cm l'un de l'autre. Les échantillons tester sont retirés de l'enceinte après (7,14et 28 jours) et sont pesés.

Pour la mesure des épaisseurs de béton carbonaté, les échantillons sont fendus en deux et la lecture se fait immédiatement à l'aide d'un indicateur appelé, la phénolphtaléine qui est aussi préconisé par le mode opératoire de la norme NF P18-458 [47]. Il colore de béton non carbonaté en rose tandis que le béton carbonaté ne change pas de couleur.

Après quelque minute de la pulvérisation de la solution de phénolphtaléine sur une fracture fraîche, et pour chaque face, la profondeur de carbonatation est mesurée selon le mode opératoire AFREM, à l'aide d'une règle graduée en millimètres.



Figure II.14 : Mise en évidence de l'épaisseur carbonatée par la solution de phénolphtaléine.

Les mesures correspondent aux distances en millimètres entre la surface externe de béton et le front de coloration, en dehors des coins et lorsque le front de carbonatation passe par une interface granulats-matrice, sont concernées les granulats dont le $D \leq 3$ mm.

Cinq mesures sont déterminées pour chaque face. Nous retenons comme résultat la moyenne arithmétique des épaisseurs mesurées à savoir :

- L'épaisseur la plus faible.
- L'épaisseur la plus importante.
- La moyenne relative aux trois épaisseurs intermédiaires.

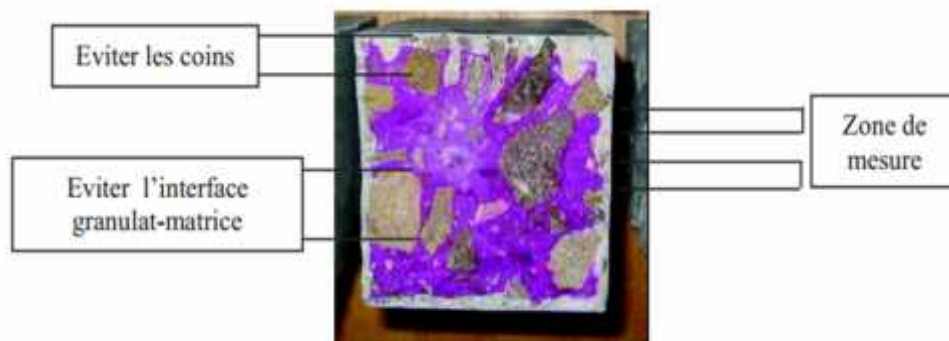


Figure II.15 : Principe de mesure de l'épaisseur carbonatée sur l'échantillon.

Pour l'essai de carbonatation accélérée on a utilisé des échantillons de béton de dimensions cubes ($7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$) pour chaque composition.

L'enceinte de carbonatation accélérée qui se trouve au laboratoire de génie civil est dotée des indicateurs de température et du gaz, par contre l'humidité à l'intérieur pourra être contrôlée à l'aide d'un hygromètre (Figure II.16).



Figure II.16: L'enceinte de la carbonatation accélérée.

Conclusion

La caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation de différentes compositions du béton a été traitée à travers ce chapitre, les résultats obtenus par la méthode de Dreux Gorrise, ont montré une maniabilité plastique et une résistance mécanique à la compression de l'ordre de 25 MPa.

Ce chapitre comprend aussi une présentation des méthodes expérimentales utilisées à savoir la méthode de formulation de béton et l'essai de carbonatation accélérée et ces étapes.

A partir des résultats obtenus, on a fait varier le pourcentage de la poudre de marbre en remplacement du ciment (10%, 20% et 30%), à ce sujet on a confectionné des échantillons cubiques ($7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$) pour l'essai de carbonatation accélérée et l'essai de résistance à la compression.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats obtenus, à savoir les résultats de la formulation de béton témoin, les masses volumiques et les teneurs en eau des différents bétons, ces grandeurs physiques sont nécessaires pour l'essai de carbonatation accélérée. Les échantillons (cubique $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$) issus des différentes compositions de béton ont été soumis à l'essai de la carbonatation accélérée selon les recommandations d'AFPC AFREM 1997[45].

Ce chapitre comprend aussi, les résultats des profondeurs de carbonatation des bétons avec différents pourcentages d'ajouts calcaires à différentes âges ainsi que leur résistance à la compression.

III.2 Formulation du béton témoin

III.2.1 Propriétés physiques des agrégats utilisés

Le tableau III.1, regroupe les résultats des propriétés physiques des agrégats utilisés.

Tableau III.1: Propriétés physiques des agrégats utilisés.

Caractéristique des agrégats	Norme d'essai	Granulats		
		Sable	Graviers	
		0/5	3/8	8/15
Masse volumique apparente (g/cm^3)	NF P 18-554	1.564	1.319	1.255
Masse volumique absolue (g/cm^3)		2.6	2.65	2.65
Coefficient d'absorption (%)		1	1.5	1.5

III.2.2 Equivalent de sable

Le tableau III.2, montre les résultats de l'équivalent de sable.

Tableau III.2: Valeurs de l'équivalent de sable.

Equivalent de sable .ESP (avec piston)	82.12%
Equivalent de sable .ESv (visuel)	86%

Les résultats des essais d'équivalent de sable trouvés E_{Sp} 80 et visuel E_{Sv} 85 (Tableau III.2) nous avons constaté que le sable utilisé est un sable très propre .

III.2.3 Analyse granulométrique des agrégats

a) sable

✓ Module de finesse

$$Mf = \frac{\sum \text{refus cumulés}}{100} = 2.23$$

Un bon sable pour béton devrait avoir un module de finesse compris entre 2.20 et 2.80 [27]. Dans le cas de la granulométrie du sable. Le module de finesse de notre sable égale à : 2.23, donc le sable peut être utilisé pour la confection de béton.

✓ Coefficient d'uniformité C_u

$$C_u = d_{60}/d_{10}$$

$$C_u = 0.48/0.22 = 2.18 ;$$

$C_u > 2$ Alors la granulométrie est dite **uniforme**.

b) Gravier 3/8 et Gravier 8/15

Pour les deux graviers, le pourcentage de la quantité perdu au cours de l'essai est de $0.07\% < 2\%$ et de $0.61\% < 2\%$ respectivement, de ce fait, les résultats de ces analyses sont acceptés. Les graviers concassés adhèrent bien à la pate de ciment et offrent au béton de bonnes caractéristiques mécaniques.

III.2.4 Maniabilité

A partir des résultats obtenus par la méthode de Dreux Gorisse, l'affaissement de 8 cm, indique une maniabilité plastique et une résistance mécanique à la compression de l'ordre de 25 MPa.

III.2.5 Résultats de la formulation de béton témoin (METHODE DE DREUX-GORISSE)

Caractéristiques des granulats	Sable	Gravette	gravier	Caractéristique du ciment :
Forme (Roulé - concassé)	R		C	Dénomination :
Qualité (Excellente - Bonne - Passable)			E	Classe Vraie ('c) : 42.5MPa
Coefficient d'absorption	1%		1.5%	Masse volumique absolue (s) :3050 Kg/m ³
Modula de finassa : Mf	2.23			Caractéristiques des adjuvants :
Massa volumique absolue: s	2600		2650	Dénomination : CEMI42.5

$$F_{c28}=25 \text{ MPa}$$

Cahier des charges

AFF= 8cm vibration : normale

$$f'_{28}= 28.75 \text{ MPa}$$

$$D_{\max} =16 \text{ mm}$$



Détermination de C/E

Détermination du dosage en ciment

Détermination du dosage en eau

$$C/E= 1.73$$

$$C_{\text{opt}}=360 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_{\text{avant correction}} = 360 \quad E_{\text{avant correction}} =208.1 \text{ L}$$

Correction sur le dosage de pate% = 4%

$$C= 369.77 \quad E=216.42$$



Détermination de la droite brisée de Dreux

$$X = 8\text{mm}$$

$$k = +1$$

$$K' = -0.44$$

$$k_s = -1.44$$

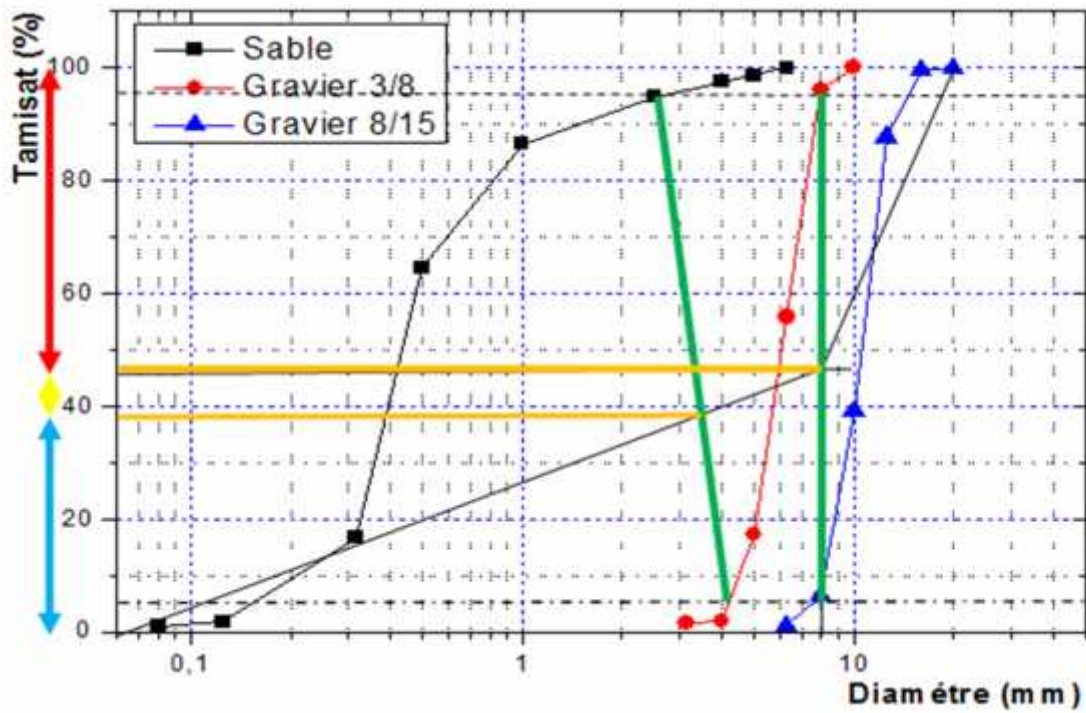
$$Y= 45.56$$

$$k_p = 0(\text{pompable})$$



Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau

Pour la détermination des pourcentages en volume absolu de matériau en trace les courbes granulométriques (sable +gravier3/8 +gravier 8/15) [42].



↕ Sable 0/5 : 38%
 ↕ Gravier 3/8
 ↕ 8% Gravier 8/15 : 54%

Figure III.1 : Courbes granulométriques (sable 0/5 +gravier3/8 +gravier 8/15).

Sable 0/5 = 38%

Gravier 3/8 = 8%

Gravier 8/15 = 54%



Détermination de la compacité du béton

C= 0.813

C0=0.819

$$V_c = 0.121m^3 \quad C_1 = - 0.01$$

$$V = 0.692m^3 \quad C_2 = 0$$

$$C_3 = 0.003954$$



Détermination des masses de granulats

$$V_s = 0.262m^3 \quad S = 683.7Kg$$

$$V_g = 0.05536m^3 \quad g = 146.7Kg$$

$$V_G = 0.3726m^3 \quad G = 990.25Kg$$



Formulation théorique du béton

$$E_{eff} = 208.1 L$$

$$E_{ab} = 23.88 L$$

$$E_{tot} = 231.98$$

$$E_{tot}/c = 0.62 \quad (G+s)/s = 1.66$$

Formule :
 $C = C_0 + C_1 + C_2 + C_3$
 $V_c = C / \rho_{ps(c)}$
 $V_s = v * s\% \dots \dots \dots s = v * s\% * \rho_{ps(g)}$
 $V_g = v * g\% \dots \dots \dots g = v * g\% * \rho_{ps(g)}$
 $V_G = v * G\% \dots \dots \dots G = v * G\% * \rho_{ps(g)}$

D'après la correction et vérification, on a abouti à la formulation suivante Tableau III.3.

Tableau III.3 : Formulation de béton témoin Après la correction.

		Sable (kg/m ³)	Gravier 3/8 (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Ciment (CEM I) (kg)	Eau (L)	Affaissement (cm)
S/G	E/C						
0.60	0.57	683.7	146.7	990.25	374.4	216.42	8

L'affaissement du béton témoin est de AFF 8cm, il indique clairement sa bonne maniabilité selon la norme NF EN 206-1[39].

D'après les résultats obtenus pour la formulation du béton témoins, quatre mélanges (B1, B2, B3, B4) sont préparés en substituant le ciment avec la poudre de marbre selon les pourcentages suivants : (0 %,10% ,20% et 30%).

Le tableau III.4 montre le quantité de la poudre de marbre sur les différents bétons.

Tableau III.4 : Quantité de ciment et la poudre de marbre dans les différents bétons.

Les différents bétons	Ciment (Kg)	Poudre de marbre (Kg)
B1 : béton témoin sans ajout (0% d'ajouts)	374.4	0
B2 : béton avec (10% d'ajouts)	336.96	37.44
B3 : béton avec (20% d'ajouts)	299.52	74.88
B4 : béton avec (30% d'ajouts)	262.08	112.32

III.2.6 Résistance à la compression pour les différents bétons carbonatés

Le tableau suivant (III.5) montre les Résultats de la résistance à la compression pour les différents bétons.

Tableau III.5: Résultats de la résistance à la compression.

Age (jours)	Valeur de la résistance à la compression (fc moyenne (MPa))			
	B1(Témoin)	B2	B3	B4
28	59.2	55.4	52.9	46.4

La résistance à la compression pour tous les bétons montre qu'il s'agit de béton de bonne qualité.

III.3 Masses volumiques et teneurs en eau des échantillons

Selon les recommandations d'AFPC AFREM 97[45], dans la première phase de pré-conditionnement, il faut déterminer la masse volumique apparente et la teneur en eau des échantillons avant l'essai de carbonatation accélérée.

- Les tableaux (III.6- III.7 et III.8 - III. 9) donnent les résultats des masses volumiques et les teneurs en eau des différents bétons.

Tableau III.6: Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons du béton (B1).

Désignation des échantillons	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Masse volumique (kg/m ³)	Teneur en eau (%)
01	864.64	843.8	2460.05	2.47
02	924.72	905.0	2638.48	2.18
03	870.82	851.0	2481.04	2.33
04	846.14	826.8	2410.49	2.34
05	865.85	844.0	2460.64	2.59
06	785.91	766.3	2234.11	2.56
07	953.82	931.2	2714.86	2.43
08	882.17	859.9	2506.99	2.59
09	868.51	847.5	2470.84	2.48
10	872.92	853.8	2489.21	2.24
11	927.53	906.5	2642.85	2.32
12	869.77	851.3	2481.92	2.17
13	825.54	807.3	2353.64	2.26
14	834.41	813.9	2372.88	2.52
15	810.26	792.2	2309.62	2.28
16	888.59	867.6	2529.44	2.42
17	910.13	888.2	2589.50	2.47
18	885.83	865.5	2523.32	2.35
19	856.23	836.9	2439.9	2.31
20	864.47	846.2	2467.05	2.16

Tableau III.7 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons du béton(B2).

Désignation des échantillons	Masse humide (g)	Masse sèche(g)	Masse volumique (kg/m ³)	Teneur en eau (%)
01	870.48	852.0	2483.96	2.17
02	925.60	905.5	2639.94	2.22
03	868.52	849.5	2476.67	2.24
04	874.87	854.7	2491.83	2.36
05	852.91	832.6	2427.40	2.44
06	873.91	854.6	2491.54	2.26
07	929.87	910.3	2653.93	2.15
08	870.58	852.6	2485.71	2.11
09	871.69	851.6	2482.79	2.36
10	895.88	876.0	2553.93	2.27
11	840.51	820.9	2393.29	2.39
12	914.14	892.2	2601.16	2.46
13	889.63	870.4	2537.60	2.21
14	865.53	845.5	2465.01	2.37
15	868.77	848.0	2472.30	2.45
16	872.60	851.9	2483.67	2.43
17	956.50	934.0	2723.03	2.41
18	820.29	801.7	2337.31	2.32
19	875.05	853.3	2487.75	2.55
20	866.47	846.5	2467.93	2.36

Tableau III.8 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons du béton(B3).

Désignation des échantillons	Masse humide (g)	Masse sèche(g)	Masse volumique (kg/m ³)	Teneur en eau (%)
01	837.75	817.0	2381.92	2.54
02	892.33	871.0	2539.35	2.45
03	887.03	866.5	2526.23	2.37
04	910.29	890.0	2594.75	2.28
05	943.96	923.1	2691.25	2.26
06	888.10	869.4	2534.69	2.14
07	819.71	801.6	2337.02	2.26
08	857.38	838.6	2444.89	2.24
09	854.35	834.9	2434.11	2.33
10	958.19	937.2	2732.36	2.24
11	859.63	838.5	2444.60	2.52
12	995.22	971.8	2833.23	2.41
13	926.73	905.1	2638.77	2.39
14	863.11	844.2	2461.22	2.24
15	825.54	807.3	2353.64	2.26
16	964.67	944.0	2752.18	2.19
17	896.52	875.0	2551.02	2.46
18	941.75	918.7	2678.42	2.51
19	895.73	876.2	2554.51	2.23
20	837.58	820.2	2391.25	2.12

Tableau III.9: Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons du béton(B4).

Désignation des échantillons	Masse humide (g)	Masse sèche(g)	Masse volumique (kg/m ³)	Teneur en eau (%)
01	877.66	858.6	2503.2	2.22
02	1017.86	994.4	2899.12	2.36
03	1043.25	1019.4	2972.01	2.34
04	971.35	948.4	2765.01	2.42
05	873.89	853.0	2486.88	2.45
06	908.75	886.5	2584.54	2.51
07	826.66	806.5	2351.31	2.50
08	794.80	775.5	2260.93	2.49
09	853.71	834.1	2431.77	2.35
10	840.92	822.1	2396.79	2.29
11	885.13	865.4	2523.03	2.28
12	880.88	861.0	2510.20	2.31
13	896.61	876.8	2556.26	2.26
14	931.11	909.9	2652.76	2.33
15	804.74	786.5	2293	2.32
16	862.99	842.6	2456.5	2.42
17	836.99	816.9	2381.63	2.46
18	909.74	889.9	2594.46	2.23
19	871.03	852.2	2484.5	2.21
20	897.46	877.8	2559.18	2.24

Le tableau III.10 suivant regroupe les résultats de la masse volumique et la teneur en eau pour des différents bétons.

Tableau III.10 : Masse volumique et teneur en eau pour des différents bétons.

Différent bétons	Masse volumique (kg/m ³) (moy)	Teneur en eau (%) (moy)
B1	2478.8415	2.37
B2	2507.8375	2.32
B3	2543.7705	2.32
B4	2533.154	2.34

D'après ces résultats, on remarque qu'il n'y a pas une grande variation en masse volumique et de teneur en eau, ce qui indique que les conditions d'essai sont respectées et qu'on peut entamer l'essai de carbonatation accélérée.

III.4 Evolution de la masse des échantillons dans la chambre de carbonatation

Le tableau III.11 montre les résultats de l'évolution de la masse des échantillons pour les différents bétons après 7,14 et 28 jours d'exposition au CO₂ dans la chambre de carbonatation.

Tableau III.11 : Résultats de la masse d'échantillons pour les différents bétons, d'après (7,14 et 28 jours).

Age (jours)	Masse (g)			
	B1 (Témoins)	béton B2	béton B3	béton B4
7	853.24	865.92	881.7	913.3
14	856.8	869.2	886.8	923.1
28	858.2	870.6	889.1	925.6

D'après ce tableau, on trace les courbes de la masse des échantillons pour les différents bétons à l'âge de 7,14 et 28 jours .

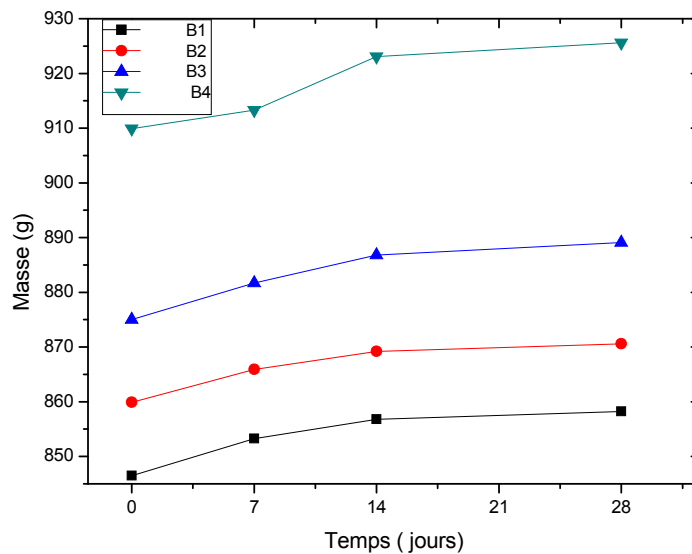


Figure III.2 : Gain de masse des échantillons pour les différents bétons en fonction de la durée d'exposition au CO_2 .

D'après la figure III.2, on remarque que la carbonatation fait augmenter la masse des échantillons en fonction de l'augmentation du taux de la substitution de ciment par la poudre de marbre (10%, 20%, 30%).

Cette augmentation est due principalement à ce que la carbonatation du béton effectue des changements au niveau de la microstructure (remplacement de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par la calcite CaCO_3).

III.5 Evolution de la profondeur de carbonatation avec les différents pourcentages d'ajouts

La grandeur issue de l'essai de carbonatation accéléré est la profondeur carbonatée, elle est déterminée, selon le mode opératoire AFPC-AFREM 97 [48], par une méthode colorimétrique, sur la section des éprouvettes ($7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$) coupées en deux, à l'échéance de 7, 14 et 28 jours.

- Les tableaux III.12, III.13 et III.14 et III.15 représentent les résultats de la profondeur de carbonatation en fonction de l'âge d'exposition pour les différents bétons (B1, B2 et B3, B4).

III.5.1 Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B1 (0% d'ajout)**Tableau III.12** : Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B1 (témoin).

Age (jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy (mm)	Pr MOY (mm)
7 j	1	1	1.5 -2 -1	2	1	1.5	1
		2	1 - 1 -1	1	1	1	
	2	1	0.5 - 0.5 - 0.5	0.5	0.5	0.5	
		2	1 - 1 -1	1	1	1	
	3	1	0.5 - 0.5 - 0.5	0.5	0.5	0.5	
		2	2 - 1 -1	2	1	1.5	
14 j	1	1	3 - 2 - 1	3	1	2	2
		2	1 - 1 - 1	1	1	1	
	2	1	3 - 2.5 -2	3	2	2.5	
		2	4 -3 - 2	4	2	3	
	3	1	3 - 2.5- 2	3	2	2.5	
		2	1 - 1 -1	1	1	1	
28 j	1	1	3 - 3.5 - 5	5	3	4	3
		2	2.5 - 2 - 4	4	2	3	
	2	1	4 - 5 - 6	6	4	5	
		2	1.5 - 1 - 3	3	1	2	
	3	1	4 -3 - 2	4	2	3	
		2	1 - 1 - 1	1	1	1	

- ✓ Le courbe III.4 montre l'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B1.

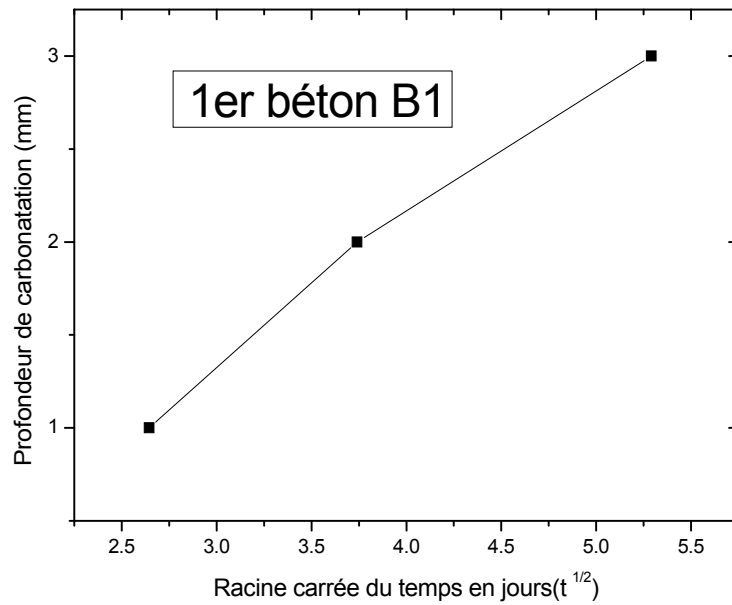


Figure III.3 : L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour le béton B1.

D'après cette courbe III.3, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente avec l'augmentation de la durée d'exposition au CO_2 pour le béton témoin, cette augmentation suit une droite.

III.5.2 Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B2 (10% d'ajout)

Tableau III.13 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B2.

Age (jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy (mm)	Pr MOY (mm)
7 j	1	1	3- 3.5 -5	5	3	4	3
		2	2.5 - 2 - 4	4	2	3	
	2	1	4 - 5 - 6	6	4	5	
		2	1.5 - 1 - 3	3	1	2	
	3	1	4 - 3 - 2	4	2	3	
		2	1 - 1 - 1	1	1	1	
14 j	1	1	4 - 5 - 8	8	4	6	5
		2	7 - 4 - 3	7	3	5	
	2	1	3.5 - 3 - 5	5	3	4	
		2	9 - 5 - 6.5	9	5	7	
	3	1	2 - 3.5 - 4	4	2	3	
		2	5 - 2 - 8	8	2	5	
28 j	1	1	7 - 6 - 5	7	5	6	6
		2	7 - 8 - 9	9	7	8	
	2	1	8 - 4 - 6	8	4	6	
		2	6 - 5 - 4	6	4	5	
	3	1	9 - 7 - 8	9	7	8	
		2	3 - 4 - 2	4	2	3	

✓ Le courbe III.4 montre l'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B2.

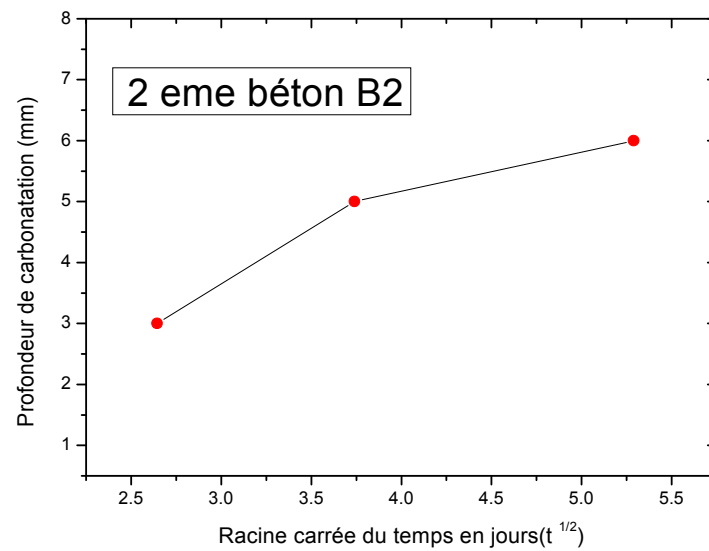


Figure III.4: L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B2.

D'après cette courbe III.4, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente aussi avec l'augmentation de la durée d'exposition au CO_2 . L'évolution de la carbonatation n'est pas totalement linéaire, vu que la quantité de portlandite est diminuée par la substitution.

III.5.3 Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B3 (20% d'ajout)**Tableau III.14 :** Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B3 .

Age (jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy (mm)	Pr MOY (mm)
7 j	1	1	5 - 4 - 3	5	3	4	4
		2	6 - 5 - 4	6	4	5	
	2	1	3 - 4 - 5	5	3	4	
		2	3 - 2 - 4	4	2	3	
	3	1	4 - 5.5 - 6	6	4	5	
		2	3.5 - 2 - 4	4	2	3	
14 j	1	1	9 - 8 - 7	9	7	8	7
		2	5 - 7 - 9	9	5	7	
	2	1	10 - 9 - 8	10	8	9	
		2	9 - 5 - 4	6	4	5	
	3	1	9 - 6 - 5	9	5	7	
		2	6 - 4 - 8	8	4	6	
28 j	1	1	9 - 8 - 7	9	7	8	7.5
		2	10 - 9 - 8	10	8	9	
	2	1	6 - 5 - 9	9	5	7	
		2	7 - 6 - 6	7	6	6.5	
	3	1	7 - 6 - 8	8	6	7	
		2	9 - 6 - 8	9	6	7.5	

- ✓ Le courbe III.5 montre l'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B3.

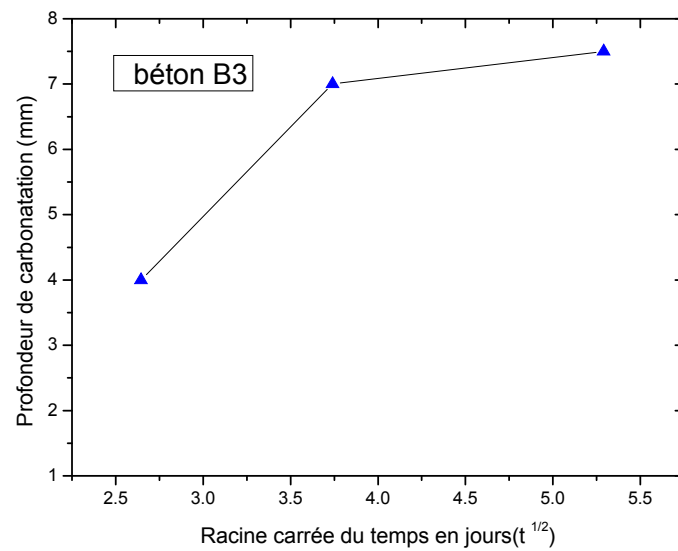


Figure III.5: L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B3.

D'après cette courbe III.5, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente toujours avec la durée d'exposition au CO₂, mais cette fois ci, l'augmentation n'est pas linéaire. Elle est accentuée de 7 à 14 jours, presque constante de 14 à 28 jours d'exposition.

III.5.4 Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B4 (30% d'ajout)**Tableau III.15 :** Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton B4.

Age (jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy (mm)	Pr MOY (mm)
7 j	1	1	7 - 6 - 8	8	6	7	6
		2	6 - 4 - 5	6	4	5	
	2	1	8 - 5 - 4	8	4	6	
		2	5 - 4 - 8	8	4	6	
	3	1	9 - 7 - 7.5	9	7	8	
		2	6 - 5 - 2	6	2	4	
14 j	1	1	8 - 8 - 10	10	8	9	8
		2	8 - 8 - 8	8	8	8	
	2	1	7 - 9 - 8	9	7	8	
		2	12 - 9 - 8	12	8	10	
	3	1	6 - 7 - 5	7	5	6	
		2	7 - 7 - 7	7	7	7	
28 j	1	1	10 - 10 - 10	10	10	10	9.5
		2	9 - 8 - 10	10	8	9	
	2	1	8 - 8 - 8	8	8	8	
		2	9 - 8 - 10	10	8	9	
	3	1	10 - 13 - 9	13	9	11	
		2	11 - 10 - 9	11	9	10	

- ✓ Le courbe III.6 montre l'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B4.

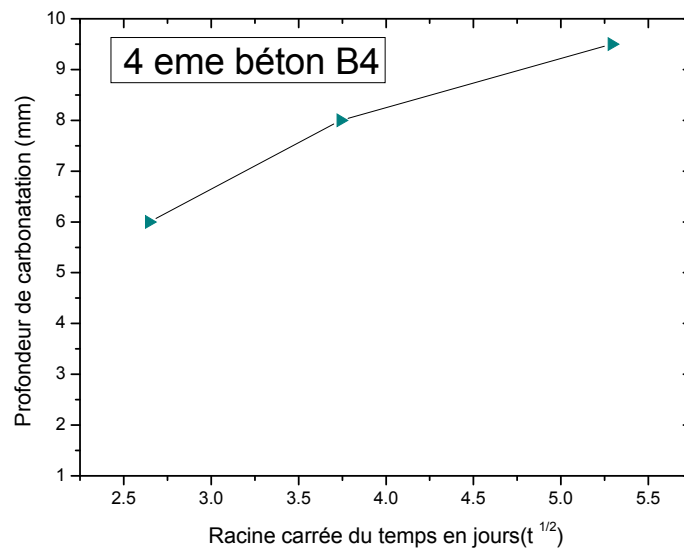


Figure III.6: L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour le béton B4.

D'après cette courbe III.6, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente avec la durée d'exposition au CO_2 , mais cette fois devient linéaire de 7 à 28 jours.

III.6 Comparaisons de la profondeur de carbonatation des différents bétons

Le tableau suivant III.16 regroupe les résultats des tableaux (III.12, III.13 et III.14, III.15).

Tableau III.16 : Résultats des tableaux (III.12, III.13 et III.14, III.15).

Age (jours)	La profondeur de la carbonatation (mm)			
	B1 (Témoins)	B2	B3	B4
7	1	3	4	6
14	2	5	7	8
28	3	6	7.5	9.5

A partir des résultats du tableau (III.16), on trace les courbes représentant l'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour les différentes compositions (B1, B2, B3, B4).

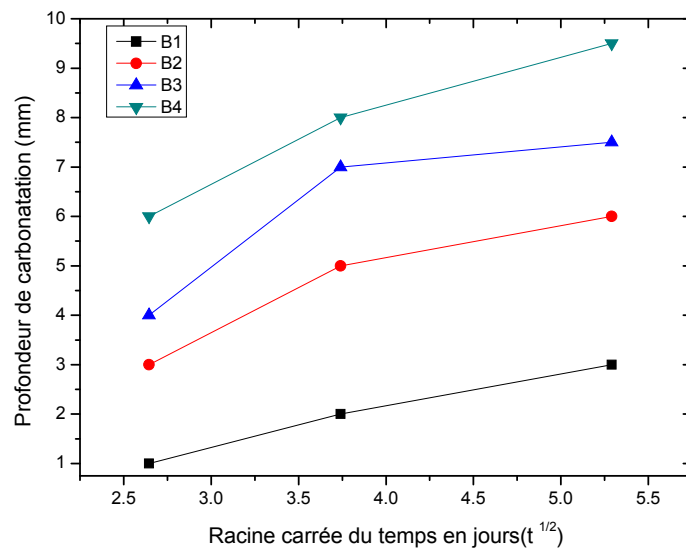


Figure III.7 : L'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour les différents bétons.

D'après la courbe III.7 de l'évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour des différents bétons, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente à cause de la substitution de ciment par la poudre de marbre

En plus, on peut observer d'après la courbe précédente (figure III.7) que l'évolution de la profondeur de carbonatation est relativement rapide à partir de 7^{ème} jour jusqu'au 14^{ème} jour et se stabilise à des valeurs presque constantes jusqu'aux 28^{ème} jour. Cela pour tous les bétons (B1, B2, B3, B4). Ce résultat peut être expliqué comme suit :

- ✓ Durant la période de 7 à 14 jours, la quantité disponible de la portlandite est plus importante, ce qui fait que la carbonatation est plus rapide avec formation de calcite.
- ✓ Pour la période entre 14 et 28 jours, la quantité disponible de portlandite devient faible, vu qu'elle est consommée pendant la première période. cela va réduire la vitesse de carbonatation.

Cette réduction est causée par colmatage des pores provoqué par la formation de la calcite qui possède un volume molaire $36.9 \text{ cm}^3/\text{mol}$ supérieure au volume molaire de la portlandite $33.2 \text{ cm}^3/\text{mol}$.

D'autre part, on peut conclure que la profondeur de carbonatation augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajouts.

III.7 Evolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonatation

La courbe (III.8) montre l'évolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonatation

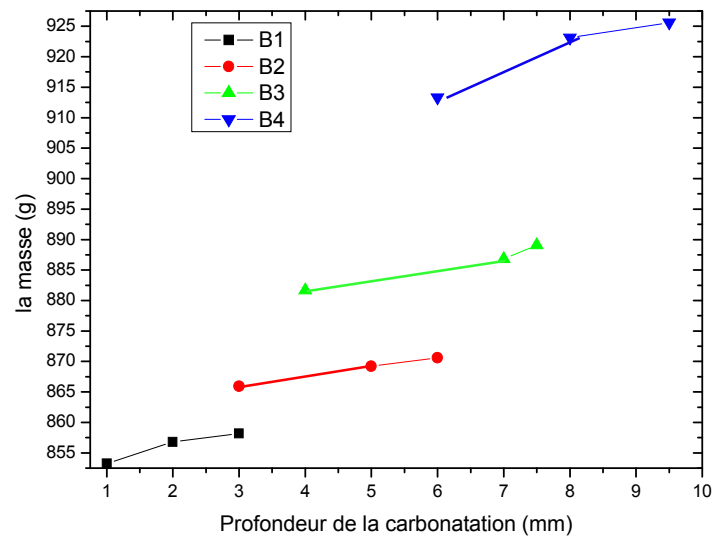


Figure III.8 : Evolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonatation.

D'après la figure on remarque que la masse des échantillons carbonatés augmente avec l'augmentation de la profondeur de carbonatation, ce qui met évidence une relation importante entre le gain de la masse et la profondeur de carbonatation, ce qui laisse à penser qu'il existe une relation qui lie le gain de masse à la profondeur de carbonatation, c'est à dire qu'on peut estimer la profondeur de carbonatation à partir d'une simple pesée, en évitant ainsi l'utilisation de solution de phénol.

III.8 Effets de la carbonatation sur la résistance à la compression

Le tableau III.17 montre les résultats de la résistance à la compression des échantillons à différentes compositions, à 28 jours d'âge.

A partir de tableau III.5 , on trace les courbes de variation de la résistance à la compression des échantillons à différentes compositions (28jours).

La courbe III.9 , montre l'évolution de la résistance à la compression des bétons avec différents pourcentages d'ajouts.

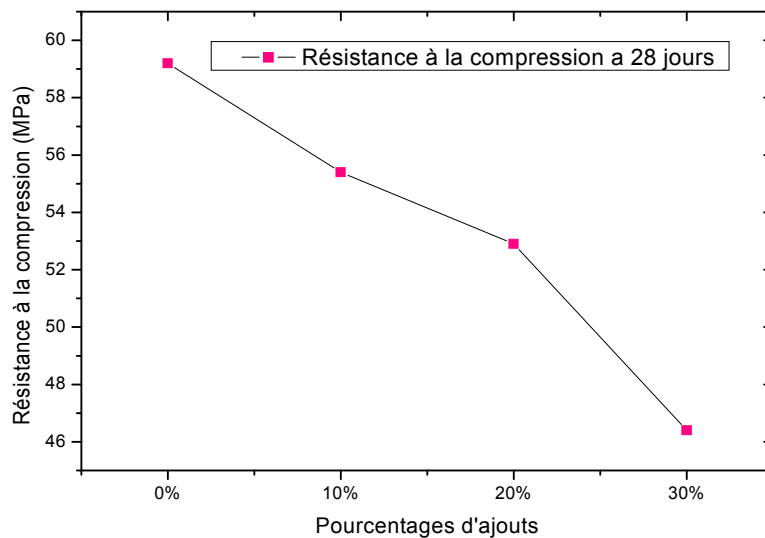


Figure III.9 : Evolution de la résistance à la compression de béton avec différentes pourcentages d'ajouts.

D'après cette courbe, on remarque que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajouts (10%, 20%, 30%).

Le taux de diminution de la résistance à la compression est de 7% pour le béton B2 par rapport au béton témoin B1, ce taux est de 10% pour le béton B3, de 22% pour le béton B4. Cette diminution de la résistance peut être expliquée par ce qui suit :

- ✓ La substitution du ciment par les ajouts diminue le dosage en ciment ce qui va diminuer la résistance à la compression.

Conclusion

A travers ce chapitre, on a formulé un béton témoin en utilisant la méthode de Dreux gorisse, les résultats obtenus montrent que le béton formulé est de bonne qualité.

En utilisant la formulation de béton témoin obtenu, quatre mélanges ont été préparés en faisant substituer une partie de ciment par la poudre de marbre (10%,20%,30%), afin de mener l'essai de carbonatation accélérée.

L'évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition au CO₂ a été étudiée.

Ces résultats peuvent être résumés dans ce qui suit :

- La profondeur de la carbonatation augmente avec la durée d'exposition ;
- La Poudre de marbre fait augmenter la profondeur de carbonatation ;
- L'augmentation de la profondeur d carbonatation implique l'augmentation de la masse
- La poudre de marbre fait diminuer la résistance à la compression.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet des ajouts calcaires sur la carbonatation du béton, vu que ces ajouts cimentaires influence ce phénomène en agissant sur les propriétés mécaniques et par voie de conséquence sur la durabilité des structures en béton armé.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres, dans le premier chapitre, nous avons fait une présentation de la carbonatation avec tout les aspects, une revue bibliographique sur les effets des ajouts cimentaires sur la profondeur de carbonatation ou il était montré que pratiquement tout ces ajouts font augmenter la profondeur de carbonatation et diminuer la résistance à la compression, des études antérieures montrent que les ajouts calcaires augmentent le front de carbonatation et la résistance à la compression diminue.

Pour le deuxième chapitre, et à travers la partie expérimentale que nous avons réalisée au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat, on a caractérisé les matériaux utilisés pour la formulation des différentes compositions du béton par la variation de pourcentage des ajouts calcaires en remplacement du ciment (10%, 20% et 30%), d'après les résultats obtenus par la méthode de Dreux Gorisse, il s'agit d'un béton qui a une bonne ouvrabilité, ce chapitre comprend aussi une présentation de l'essai de carbonatation accéléré et l'essai de la résistance mécanique.

Dans la dernière partie de ce travail on a présenté les résultats obtenus, et qui peuvent être résumés comme suit :

- La profondeur de la carbonatation augmente avec la durée d'exposition.
- La substitution de ciment par l'ajout calcaire augmente la profondeur de la carbonatation.
- La masse des échantillons carbonatés augmente avec l'augmentation de la profondeur de carbonatation
- La résistance à la compression diminue par la substitution de l'ajout calcaire par le ciment.
- La substitution de ciment par la poudre de marbre augmente la profondeur de la carbonatation et diminue la résistance à la compression.

Conclusion générale

Afin de continuer ce travail, on recommande pour les futures promotions d'étudier les axes de recherches suivants :

- ✓ Augmenter les pourcentages à plus de 30% d'ajouts,
- ✓ Allonger la durée d'exposition à la carbonatation à plus de 28 jours,
- ✓ Combiner deux ajouts cimentaires et voir leurs effets sur la durabilité du béton soumis à la carbonatation.

Références Bibliographiques

- [1] Zawadzky.K, « Energies renouvelables ». La technique Moderne, N°11-12, pp44. (1996).
- [2] Mauna-loa . « Concentration moyenne mensuelle du CO₂ relevées à l'observation ».
<https://claudegrandpeyvolcansetglaciers.com/2015/05/10/le-mauna-loa-hawaii-et-les-mesures-du-CO2-mauna-loa-hawaii-and- CO2-monitoring>.
- [3].Thiery M. « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurelles et hydriques », Thèse de doctorat, Paris, LCPC 2005.
- [4] Fratini N. « Solubilita dell'idrato di calcio in presenza di idrato potassio e idrato di sodio, ann, chim.Applicata, 39,pp 616-620. (1949).
- [5] Chang C-F., Chen J-W. « The experimental investigation of concrete carbonation depth » Cement and Concrete Research 36 (2006) pp 1760-1767.
- [6] Hoyle D. “some aspects of Meakawa Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory”. In proceedings of JSCE, Vol 47, Tokyo 2000.
- [7] Shakhashiri B.Z. « Chemical demonstrations”: Handbook for teachers Chemistry University of Wisconsin, 1989.
- [8] Houst Y. « Le retrait de carbonatation », chantier, vol20 N°1, pp55-60. (1989).
- [9] Grandet J. « Contribution à l'étude de la prise et de la carbonatation des mortiers au contact des matériaux poreux ». Thèse de doctorat es sciences physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse.FRANCE. (1975).
- [10] Kouznetsova T. V., Ivaschenko S. I. et Samchenko S.V. “ Stability of ettringite under carbonate corrosion at hydration of sulpho aluminates ”. In; 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), pp2076-2081, Durban (Afrique du Sud). The Cement and Concrete Institute of South Africa. (2003).
- [11] Sauman et Lach. “ Long term carbonation of the phases 3CaO.Al₂.6H₂O and 3CaO.Al₂O₃.SiO₂.4H₂O ”. Cement and concrete Research, 2(4)pp453-446. (1972).
- [12] Delmi M. « Etude de l'hydratation et du couplage carbonatation-échanges hydriques dans les mortiers et bétons ». Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle, 2004.

Références Bibliographiques

- [13] Miragliotta R. “Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués – prise en compte des effets de paroi ». Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 2000.
- [14] Chaussadent T., Baroghel-Bouny V., Hornain H., Rafai N. et Ammouche A. « Effects of water-cement ratio of cement pastes on microstructural characteristics related to carbonation process. In : Malhotra.V, éditeur: 5th C.A.N.M.E.T./A.C.I. International Conference on durability of concrete, Barcelogne (Espagne).A.C.I. pp 523-237. (2000).
- [15] Jean-Pierre OLLIVIER. « Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement ». Page 315-317.
- [16] Mohamed Rabehi. « Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d’enrobage par l’utilisation des tests d’absorption capillaire». Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [17] H.Wierig. “Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure RIEM Seminar” Hannover, 1984.
- [18] Fatima-Zohra Dakhmouche Chabil “Carbonatation de bétons adjuvantés à base de ressources locales algériennes ”. Thèse de doctorat, l’Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [19] AFPC-AFREM. “Durability of concretes, recommended methods for measurement of quantities associated with the durability”.compte rendu des Journées techniques AFPC AFREM .Toulouse (France) ; 1997.P.283.
- [20] Chaussadent T. « Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé » Septembre, 1999.
- [21] Dheilly R M., Tudo J., Sebai Y. and Queneudec M. “Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca (OH)₂”. Construction and Building Materials, (16):155161, 2002.
- [22] Norme EN-197-1, “Ciment –Partie 1:Composition, spécifications et critères et conformité des ciments courants”,2000.
- [23] AMOURI Chahinez “Contribution à l’étude de l’influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) ”.Thèse de doctorat, université mentouri constantine 2009,P 27.
- [24] Falih Rafie Moro. « La carbonatation des bétons aux fortes additions calcaires ». Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 29 au 31 Mai 2011.

Références Bibliographiques

- [25] Von Euw V., « Ciment contenant des additions minérales, Preceding of the 8^{ème} Congrès International de la Chimie des Ciments ». RIO de Janeiro-Brasil, V7 pp 170-177, 1986.
- [26] Marcelo Henrique et al. “Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve” .41024-017-0023-z, 2017.
- [27] Dauval R. « La durabilité des armatures et du béton d’enrobage » In : Barans JOLLIVIER .la durabilité des bétons , Presses ENPC .Paris ,1992,pp.320.
- [28] Akli Younsi, “Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales ”.Thèse de doctorat, l’Université DE LA ROCHELLE.2011, P41.
- [29] Kritsada Sisomophon et Lutz Franke ,carbonation of concretes containing high volume of pozzolanic materials –department of building physics and building materials , technical University Hamburg-harburg , Ei endorfestra e 42 ,21071,Hamburg ,Germany Received 20 april 2005; accepted 17 August 2007 .
- [30] Kazim Turk et al, “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress ”, thèse doctorat en article. Université Denmark, 1999.
- [31] Frédéric Michel “ Application du concept de performance équivalente aux bétons addionnés de fillers calcaires”, thèse doctorat en article. Université Belgique, 2008.
- [32] Luca Bertolini .“ The Effect of Ground Limestone Addition on Carbonation and Chloride Resistance of Concrete”. thèse doctorat en article. University Porto, PORTUGAL, 2011.
- [33] T. Bouziani. “Corrélation Between V-funnel and Mini-slump Test Results with Viscosity” S12205-013-1569-1, 17 Avril, 2012.
- [34] La Norme NEF 18-555, Essai de détermination de la masse volumique absolue, Version Décembre 1990).
- [35] Les Normes NF P 18-554, Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d’absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, Octobre1997.
- [36] Norme AFNOR ,P 18-598, Granulats-Equivalent de sable, Paris1990.
- [37]DREUX.G, FESTA.J, « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Edition Eyrolles, Huitième Edition,1998.
- [38] Norme EN933-1, Mai 1996-partie2 : détermination de la granularité-Tamis de control, dimensions nominales des ouvertures. Indice de classement P18-622-2.

Références Bibliographiques

- [39] Norme, européennes .206-1, les bétons de structures prêts à l'emploi ou des bétons réalisés sur chantier.2005.
- [40] Fouad ,G « cours de TP sur les matériaux de construction » ,Université de Tlemcen 2014.
- [41] Laid ,Guermi « contribution à l'amélioration de certaines caractéristique du béton de structures à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques »Ouargla 2013, thèse doctorat en article.
- [42] Méthode de Dreux gorisse , [www.eitigc.fr/labo/beton/ deux granulats .htm](http://www.eitigc.fr/labo/beton/deux_granulats.htm).2011.
- [43] Norme, Française. NFP P18- 451, Essai de béton-document sur internet.1989.
- [44]Norme, Algérienne, NA, 426 Béton sv-Essais de béton-document sur internet.1989.
- [45] AFPC-AFREM “Durability of concretes, recommended methods for measurement of quantities associated with th durability”,Compte rendu des Journées Technique AFPC AFREM. Toulouse, (France); 1997.P283.
- [46] Norme, française.NF P18-406 .Essai de compression.1981.
- [47] Norme, Française .XP P 18-458, Essai de carbonation accélérée, Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté.1981.
- [48] Norme XP-P18-458 accelerated carbonation teste , depth carbonation measuring of carbonated concrete. AFPC-AFREM-concrete durability, 1997, pp 153-158,

Chapitre I

Etude

Bibliographique

Chapitre II

Caractérisation des matériaux

Et protocoles d'essais

Chapitre III

Résultats

Expérimentaux

Et interprétations

Annexe

Références Bibliographiques

Introduction

Générale

Conclusion

Générale



شركة ذات أسهم البسكريّة للإسمنت

S.P.A BISKRIA CIMENT

ش.ذ.أ. - رأسمالها الاجتماعي : 870.000.000 DA - Société par actions au capital social de : 870.000.000 DA

N° Identification Fiscale : 000907024263696 - N° Article d'Imposition : 07030013436 - N° Registre de Commerce : 0700-0242636 B 09

FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5 CRS

Mise à jour du 09 Janvier 2017

Caractéristiques chimiques

Eléments	Garanties	Teneur %
SO ₃	(NA 237) < 3.5%	2.30
Cl	(NA 5080) ≤ 0.1%	0.028
P.A.F	(NA 237) ≤ 5 %	2.04
C3S Clinker	Calculé Selon Bogue	62
C2S Clinker	Calculé Selon Bogue	13
C3A Clinker	Calculé Selon Bogue	1.5
C4AF Clinker	Calculé Selon Bogue	17

Caractéristiques physiques

Désignation	Unité	Garanties	mesures
Surface spécifique Blaine	Cm ² /g	(NA 231)	3420
Début de prise	min	(NA 233) ≥ 60 min	180
Expansion à chaud	mm	≤ 10mm (NA 232)	0.5
Consistance	%	T (NA 229)	25.7

Caractéristiques mécaniques

Résistance à la compression MPa	02 jours	≥ 10	21
	28 jours	62.5 ≥ R ≥ 42.5	49.5

SPA BISKRIA CIMENT Siège sociale : DIAR BELAHRACHE BRANIS WILAYA DE BISKRIA (Algérie)

☎ : +213 (0) 31 81 74 82 Fax : +213 (0) 31 81 73 81 MOBILE ☎ : +213 (0) 560 960 470 Email ✉ : biskria.spa@gmail.com