

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT
كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de MASTER

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

Par :

OUIRROU Rostom

THEME

Contribution à l'étude de l'influence de la carbonatation accélérée sur la résistance à la compression et la ductilité des poutres en béton armé

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

<i>Mr. AZZOUZ Lakhdar</i>	<i>Pr Université de Laghouat</i>	<i>Président</i>
<i>Mme. MERGHOUB Massaouda</i>	<i>M.A.A Université de Laghouat</i>	<i>Examinatrice</i>
<i>Mr. MERRAH Ahmed</i>	<i>M.A.A Université de Laghouat</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mr. KROBBA Benharzallah</i>	<i>M.A.A Université de Laghouat</i>	<i>Encadreur</i>

Année Universitaire 2015/2016

Remerciements

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

*Je tiens à remercier infiniment mon Encadreur, Monsieur **MERRAH Ahmed** et Monsieur **KROBBA Benharzallh**, pour leur patience remarquable leurs directives, et leurs suggestions pendant nos activités, sans eux on aurait commis des erreurs graves. Permettez-moi Monsieur de vous exprimer ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères.*

*Je remercie également Monsieur **AZZOUZ Lakhdar**, (Professeur à l'université de Laghouat), pour l'intérêt qu'il a porté au travail effectué en acceptant d'être président du jury de ce mémoire.*

*Merci à Mme **MERGHOUB Massaouda**, (Maître assistant à l'université de Laghouat), pour avoir accepté de participer à ma soutenance en tant qu'examinatrice.*

Merci aussi à tous mes collègues et amis de l'université de Laghouat et de la cité universitaire 3000.

Finalement, je tiens à témoigner ma profonde gratitude à l'université de Laghouat représentée par les enseignants du département de génie Civil ainsi que le personnel administratif, pour leur gentillesse, leur aide, leurs conseils précieux.

Rostom

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents,

A mes frères et sœurs,

A toute ma famille,

A tous mes amis,

A tous ceux avec qui j'ai partagé de bons instants,

A tous ceux qui veulent savoir.

Liste des figures

Figure I. 1 : Image en M.E.B de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite (1µm)	4
Figure I. 2 : Image en M.E.B de cristaux de portlandite (10 µm)	4
Figure I. 3 : Micrographie d'une fracture de béton montrant une pelote	5
Figure I. 4 : Principales agressions et attaques du béton	6
Figure I. 5 : Augmentation de la concentration du CO ₂ dans l'atmosphère à l'échelle mondiale	6
Figure I. 6 : Mécanisme de carbonatation de Ca(OH) ₂	8
Figure I. 7 : Concentration du système des carbonates (H ₂ CO ₃ , HCO ₃ ⁻ et CO ₃ ²⁻) en fonction du pH (à 20°C et à l'équilibre)	9
Figure I. 8 : Mesure expérimentale de la profondeur de carbonatation.	11
Figure I. 9 : Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative	12
Figure I. 10 : Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment.	13
Figure I. 11 : Variation de la carbonatation en fonction du dosage en ciment pour une	14
Figure I. 12 : Profondeur carbonatée à un an en fonction du dosage en ciment pour.....	14
Figure I. 13 : Profondeurs moyennes de carbonatation accélérée des bétons mesurées après 14 jours dans l'enceinte en fonction de leurs porosités accessibles à l'eau mesurées à l'âge de 28 jours Conservation« Air ».	15
Figure I. 14 : 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 D'après Wierig.....	16
Figure I. 15 : Notion de ductilité. Idéalisation de la courbe force-déplacement	18
Figure I. 16 : Types de ductilité	20
Figure I. 17 : Courbes de Charge-déplacement	21
Figure II. 1: Ciment (CEM 42.5)	22
Figure II. 2: Ciment (CEM II/B 42.5 N).....	22
Figure II. 3 : Essai d'équivalent de sable.	26
Figure II. 4 : Mesure d'équivalent de sable.	27
Figure II. 5 : Organigramme de la méthode de Dreux-Gorisse	32
Figure II. 6 : Mesure de l'affaissement à l'aide du cône d'Abrams	33
Figure II. 7 : Courbe granulométriques et droite de référence pour les agrégats de la composition	34
Figure II. 8 : Eprouvettes prismatiques pour les essais.	35
Figure II. 9 : Ferrailage des poutres.....	36

Figure II. 10 : conservation les échantillons	36
Figure II. 11 : Presse d'écrasement à la compression	38
Figure II. 12 : Schéma du système de carbonatation	39
Figure II. 13 : Préparation des échantillons pour l'essai de carbonatation.....	40
Figure II. 14 : L'enceinte de la carbonatation accélérée.....	40
Figure II. 15 : Mise en évidence de l'épaisseur carbonatée par la solution de phénolphtaléine	41
Figure II. 16: Principe de mesure de l'épaisseur carbonatée sur échantillon	42
Figure II. 17 : Dispositif de flexion quatre points	43
Figure II. 18 : Dispositif d'essai flexion quatre points	44
Figure II. 19 : mesurée La flèche.....	45
Figure III. 1 : Evolution de la résistance à la compression de béton avec CEM I et CEM II (témoin et carbonaté) en fonction du temps	50
Figure III. 2: Evolution de la résistance à la compression (échantillons carbonatés) pour les deux types de ciments (CEM I et CEM II)	50
Figure III. 3 : Profondeur de carbonatation de béton avec CEM I et CEM II en fonction de la racine carrée du temps	52
Figure III. 4 : Profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour CEM I et CEM II	53
Figure III. 5 : Courbes de Charge –Fleche des poutres carbonatées avec CEM I et CEM II..	54
Figure III. 6 : Courbes de Force-flèche pour CEM I et CEM II.....	55
Figure III. 7 : facteur de ductilité en fonction de l'âge du béton (témoin et carbonaté CEM I).....	56
Figure III. 8 : Facteur de ductilité en fonction de l'âge du béton (témoin et carbonaté CEM II)	57
Figure III. 9 : Courbes de ductilité en déplacement pour CEM I et CEM II.....	58

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Les principaux constituants du clinker	3
Tableau I. 2 : Les notations cimentières	3
Tableau I. 3 : Porosités obtenues par intrusion au mercure sur des mortiers de E/C=0,5	18
Tableau II. 1 : Les propriétés physiques et chimiques du ciment (CEM I) [22]	23
Tableau II. 2 : Les propriétés physiques et chimiques du ciment (CEM II/B)	23
Tableau II. 3 : Propriétés physiques des agrégats utilisés	26
Tableau II. 4 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable	27
Tableau II. 5 : Valeurs de l'équivalent de sable.....	27
Tableau II. 6 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable	28
Tableau II. 7 : Analyse granulométrique du gravier calcaire 3/8.	29
Tableau II. 8 : Analyse granulométrique du gravier calcaire 8/15.	29
Tableau II. 9 : Composition chimique de l'eau de gâchage	30
Tableau II. 10 : Formulation du béton de la 1 ^{ère} composition (CEM I)	34
Tableau II. 11 : Formulation du béton de la 2 ^{ème} composition (CEM II)	35
Tableau II. 12 : Résultats de Ferrailages des poutres.	36
Tableau II. 13 : Valeurs de la résistance à la compression du béton des deux compositions.....	38
Tableau III. 1 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons (Cubes 10× 10×10) de la 1 ^{ère} composition (CEM II/B)	47
Tableau III. 2 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons (Poutre 10× 10×40) de la 1 ^{ère} composition (CEM II/B)	47
Tableau III. 3 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des (Cubes 10× 10×10) échantillons de la 2 ^{ème} composition (CEM I)	48
Tableau III. 4 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons (poutre 10× 10×40) de la 2 ^{ème} composition (CEM I)	48
Tableau III. 5 : résistance à la compression des échantillons témoins et carbonatés	49
Tableau III. 6 : Résultats de mesure de l'épaisseur de la zone carbonatée en fonction de la durée d'exposition au gaz carbonique, béton avec (CEM I).	51
Tableau III. 7 : Résultats de mesure de l'épaisseur de la zone carbonatée en fonction de la durée d'exposition au gaz carbonique, béton avec (CEM II/B).	52
Tableau III. 8 : les résultats charge - flèches pour (CEM I et CEM II).....	54
Tableau III. 9 : Ductilité en déplacement (CEM I 42.5)	56
Tableau III. 10 : Ductilité en déplacement (CEM II/B 42.5)	56

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace	II
Liste des figures	III
Liste des tableaux	V
Sommaire	VI
Résumé	VIII
Introduction générale.....	1

Chapitre I Synthèse bibliographique

I.1	Introduction.....	2
I.2	Durabilité du béton et carbonatation.....	2
I.2.1	Composition du béton.....	2
I.2.2	Structure de la pâte de ciment hydraté.....	3
I.2.3	Les principales agressions du béton.....	5
I.2.4	L'évolution de La concentration du CO ₂ dans l'atmosphère.....	6
I.2.5	La carbonatation du béton.....	7
I.2.5.1	Phases d'une structure du béton et processus de carbonatation.....	7
I.2.5.2	Profondeur de carbonatation dans le béton.....	10
I.2.5.3	Méthodes de mesures de profondeur de carbonatation par le test de phénolphtaléine.....	10
I.2.5.4	Vitesse de progression de la carbonatation du béton.....	11
I.2.5.5	Principaux paramètres influençant la carbonatation des bétons.....	13
A.	Paramètres intrinsèques aux bétons.....	13
B.	Paramètres extrinsèques aux bétons.....	16
I.2.5.6	Principales conséquences de la carbonatation.....	17
I.3	Définition de la ductilité.....	18
I.3.1	Différentes types de ductilités.....	19
I.3.2	Influence de la carbonatation sur la ductilité.....	20
I.4	Conclusion.....	21

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et protocoles d'essais

II.1	Introduction.....	22
II.2	Caractérisation des matériaux	22
II.2.1	Béton.....	22
II.2.1.1	Ciment.....	22
II.2.1.2	Agrégats (sable et graviers)	23
II.2.1.2.1	Caractéristiques physiques des agrégats	24
II.2.1.3	Eau de gâchage	30
II.3	Formulation du béton.....	31
II.3.1	Méthodes de formulation du béton	31
II.3.1.1	Formulation de béton par méthode de Dreux-Gorisse.....	31
II.3.1.2	Essai d'affaissement.....	32
II.4	Confection et conservation des échantillons.....	35
II.5	Compagne expérimentale.....	37
II.5.1	La résistance à la compression.....	37
II.5.2	Essai de carbonatation accélérée.....	39
II.5.2.1	Principe d'essai	39
II.5.2.2	Protocole d'essai	39
II.6	L'effet de la carbonatation sur la ductilité	42
II.6.1	Essai de flexion à quatre points des poutres	42
II.6.2	Description du dispositif expérimental	43
II.7	Conclusion.....	45

Chapitre III Résultats expérimentaux et interprétations

III.1	Introduction.....	46
III.2	Masses volumiques et teneurs en eau des échantillons.....	46
III.3	Effet de la carbonatation sur la résistance à la compression.....	49
III.4	Evolution de la profondeur de carbonatation pour les deux compositions.....	51
III.5	Effet de la carbonatation sur la ductilité	54
III.6	Conclusion.....	58
	Conclusion générale.....	59
	Perspectives.....	61
	Références bibliographiques.....	
	Annexe.....	

ملخص

ان ضعف ديمومة الخرسانة تنجم من التدهور الناتج عن عوامل خارجية او داخلية, وتعتبر ظاهرة التكرين من اهم العوامل المؤثرة على تحقيق ديمومة الخرسانة المسلحة.

ويندرج هذا العمل في اطار دراسة ديمومة الخرسانة و علاقتها المباشرة بظاهرة الكربنة, من خلال دراسة تأثيرها على اثنتين من اهم خصائص الخرسانة وهي مقاومة الضغط و الليونة وهي عامل ذو أهمية حيوية في الحد من مخاطر الزلازل.

وتوضح النتائج أن ظاهرة الكربنة تزيد من قوة الضغط وتقلل من ليونة هياكل الخرسانة المسلحة، ونلاحظ ان الخرسانة من الاسمنت CEM II أكثر حساسية لهذه الظاهرة مقارنة مع الخرسانة من الاسمنت CEM I.

الكلمات المفتاحية : الديمومة, الكربنة, مقاومة الضغط, ليونة, الاسمنت CEM I, الاسمنت CEM II

Résumé

Dans notre travail, on s'est intéressée à étudier la durabilité des bétons vis-à-vis du phénomène de carbonatation, à travers l'étude de son effet sur deux caractéristiques importantes à savoir, la résistance à la compression et la ductilité, ce facteur est d'une importance vitale dans la réduction du risque sismique.

Les résultats obtenus montrent que ce phénomène augmente la résistance à la compression et diminue la ductilité des structures en béton armé et que les ciments CEM II sont plus sensibles à ce phénomène comparé aux bétons avec CEM I.

Mots clés : Durabilité, carbonatation, résistance à la compression, ductilité, CEM I, CEM II

Abstract

In our work, we were interested to study the durability of the concretes against the carbonation phenomena, through this work we study effect of these phenomena, on two important characteristics, namely the compressive strength and ductility, this factor has vital importance in the reduction of the seismic risk.

The results obtained show that this phenomenon increases the compressive strength and decreases the ductility of the reinforced concrete structures and that cements CEM II are more sensitive to this phenomenon compared with the concretes with CEM I.

Key words: Durability, carbonation, compressive strength, ductility, CEM I, CEM II

Introduction

générale

Introduction générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc.

Le milieu agressif le plus usuel que nous pourrions citer est l'air ambiant qui agit d'une façon néfaste sur la durabilité des structures par la présence du gaz carbonique CO_2 qu'il contient. C'est en fait, l'évolution de la phase aqueuse interstitielle dont le pH diminue à la suite de la transformation des composés hydratés du ciment, qui n'offre plus de protection à l'acier. Il s'agit principalement de la réaction de carbonatation due au CO_2 contenu dans l'air qui est impliqué dans ce processus.

Dans ce but, l'objectif principal de ce mémoire est d'étudier l'influence de la carbonatation accélérée sur la résistance à la compression et la ductilité des poutres en béton armé

Ce mémoire composé de trois chapitres est structuré comme suit :

Au premier chapitre on a donné une synthèse bibliographique sur les composantes du ciment hydraté, ainsi que leur relation avec le phénomène de carbonatation, en citant les principaux facteurs qui l'influencent, et ses conséquences sur la durabilité.

Ce chapitre est clôturé par des définitions de la ductilité des structures en béton ainsi une revue bibliographique sur l'Influence de la carbonatation sur la ductilité.

Au deuxième chapitre, on présente la caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation de béton ainsi que les différents modes opératoires de chaque essai ainsi que ses résultats.

Une attention particulière est donnée à l'essai de carbonatation accélérée ainsi qu'à l'essai de flexion quatre points qui nous permet par la suite de calculer la ductilité

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats des différents essais, en particulier l'essai de carbonatation et l'essai de ductilité, avec des commentaires et interprétations.

Enfin on termine ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

La durabilité du béton s'explique, en grande partie, par la difficulté de pénétration des agents agressifs dans le réseau poreux du béton, une structure durable est celle qui continue à remplir ses fonctions tout au long de sa durée de vie sans que ces propriétés soient affectées. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux agents de dégradations (physiques et chimiques) auquel il peut être exposé par son environnement [1].

Parmi ces dégradations chimiques, notre étude s'est focalisée sur le phénomène de carbonatation du béton, Celui-ci provoque la corrosion des armatures et peut générer des coûts de réparations importants.

Dans ce chapitre, on commence par une présentation du matériau béton et les composantes de la pâte de ciment hydraté. Les phénomènes physico-chimiques de carbonatation du béton sont aussi décrits. Ce chapitre comprend un résumé sur les paramètres influençant la carbonatation. De plus cette étude met en évidence les conséquences de la carbonatation des matériaux cimentaires

Enfin, ce chapitre donne un aperçu sur l'influence de la carbonatation sur la ductilité des structures en béton armé et l'influence de la carbonatation sur ce paramètre important.

I.2 Durabilité du béton et carbonatation

I.2.1 Composition du béton

Le béton, sous sa forme générale, est constitué d'une matrice (pâte de ciment) qui relie les granulats entre eux (sable, graviers). Cette pâte résulte de l'hydratation du liant utilisé, le ciment Portland anhydre étant le plus utilisé. Ce dernier est composé de clinker, de gypse (3 à 5%) et d'ajouts éventuels (fillers, laitiers, cendres volantes...) (<5%).

Le clinker est obtenu en cuisant, vers (1450°C), des mélanges appropriés de calcaire (80%) et d'argile (20%), Les Compositions minéralogiques principales d'un clinker de ciment Portland, d'après Taylor [2], sont regroupées dans le (**Tableau I.1**).

Tableau I. 1: Les principaux constituants du clinker [2]

Nom du constituant	Formule chimique	Notation cimentière	Proportions moyennes (%)
Silicate tricalcique (alite)	3CaO, SiO ₂	C ₃ S	60 à 65
Silicate bicalcique (bélite)	2CaO, SiO ₂	C ₂ S	20 à 25
Aluminate tricalcique	3CaO, Al ₂ O ₃	C ₃ A	8 à 12
Aluminoferrite tétracalcique	4CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8 à 10

Une notation cimentière a été établie pour simplifier l'écriture des phases solides. Les équivalences sont les suivantes (**Tableau I. 2**)

Tableau I. 2 : Les notations cimentières

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	H ₂ O
C	S	A	F	S	H

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon leur composition (NF EN197-1 [3]), (voir Annexe) : CEM I (ciment Portland), CEM II (ciment Portland composé), CEM III (ciment de haut fourneau), CEM IV (ciment pouzzolanique), CEM V (ciment composé).

L'eau gâchage incorporé lors de la confection du béton, lui confère à l'état frais la maniabilité et l'ouvrabilité, et développe la réaction d'hydratation du ciment et contribue à la résistance mécanique du béton au durcissement.

Les granulats sont issus de roches carbonatées (CaCO₃, MgCO₃, CaMg (CO₃)₂) ou siliceuse (SiO₂). aggloméré par le ciment pour former une pierre artificielle. Selon le concept traditionnel, les granulats constituent le squelette du béton, et ils s'opposent à la propagation des microfissures provoqués par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance mécanique du béton [4].

I.2.2 Structure de la pâte de ciment hydraté

Après l'addition de l'eau au ciment, des réactions chimiques vont s'opérer.

En effet, sous l'action de l'eau les principaux composés du ciment se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des composés hydratés.

Les principaux composés de l'hydratation sont :

- Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) : Ils sont issus de l'hydratation des phases Alite et Bélite et représentent un volume de 50% à 60% de l'ensemble des hydrates formés dans un ciment Portland (**Figure I.1**) [5].

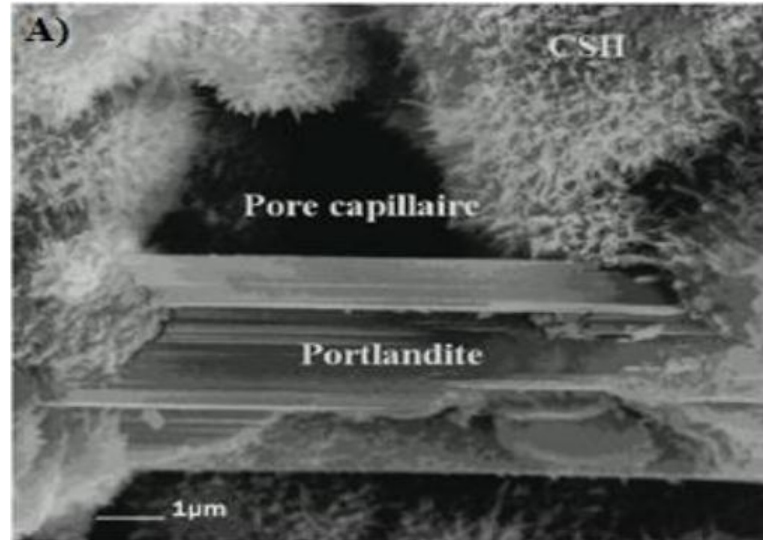


Figure I. 1 : Image en M.E.B de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite (1µm) [5]

- La portlandite est un composé cristallin de forme hexagonale prismatique et de formule chimique $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (**Figure I.2**). Il se forme par précipitation dans l'espace poreux de la pâte de ciment. Contrairement au C-S-H, la grande taille de ces cristaux confère à la portlandite une faible surface spécifique et par conséquent un caractère peu cohésif. Elle représente 20% du volume de la phase solide [6].

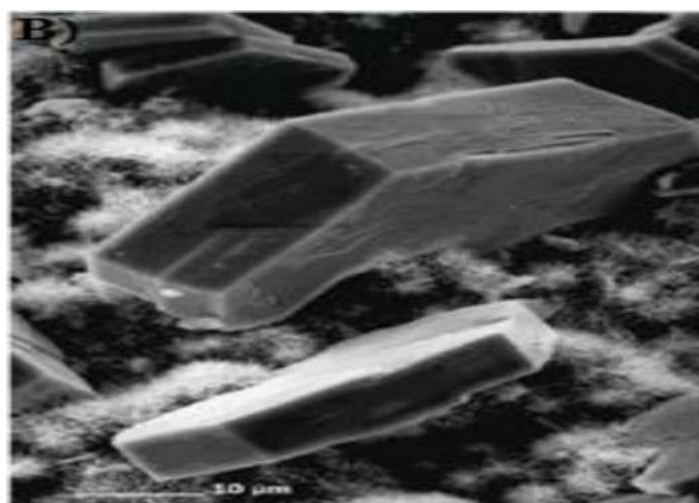


Figure I. 2 : Image en M.E.B de cristaux de portlandite (10 µm) [6]

- L'Ettringite ($C_3A_3 CSH_{32}$) se cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale (**Figure I.3**), souvent rayonnantes (oursins) autour des grains de ciment anhydres dans une pâte de ciment âgé.

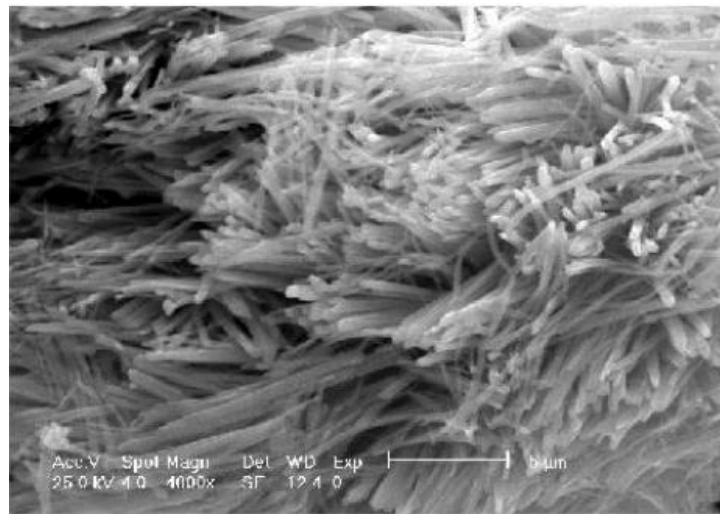


Figure I. 3 : Micrographie d'une fracture de béton montrant une pelote d'Ettringite (5 μm) [7]

I.2.3 Les principales agressions du béton

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes au béton. Les écoulements de fluide, transportant des agents agressifs sont donc préjudiciables à une bonne durabilité. Ainsi, l'attaque chimique par les sulfates, la corrosion des armatures dues à l'attaque par les chlorures ou la pénétration du gaz carbonique et la résistance au gel et au feu sont directement liées à la perméabilité du béton employé [8].

Les différentes actions peuvent être physiques, chimiques ou mécaniques (**Figure I.4**) :

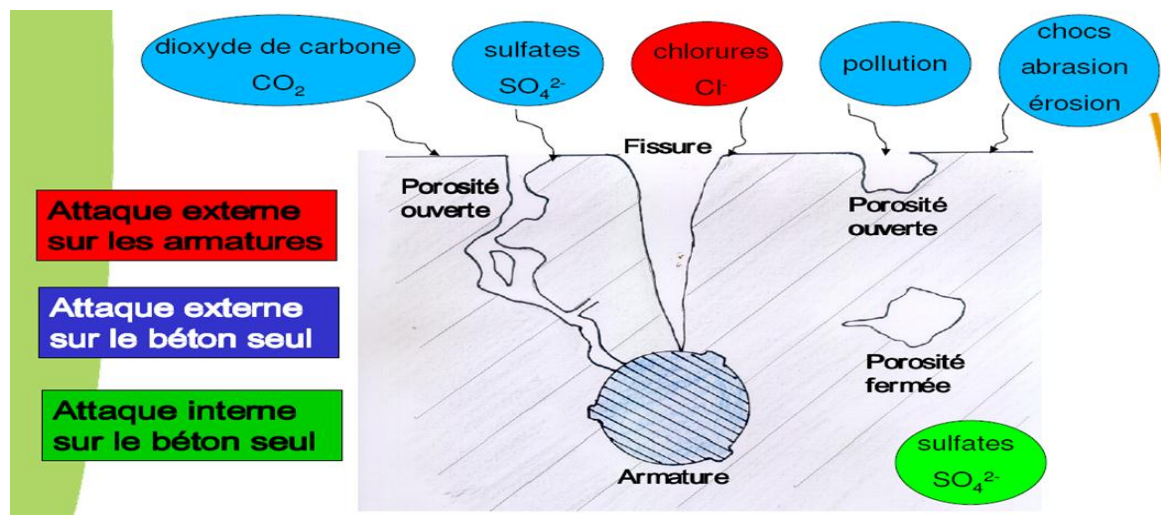


Figure I. 4 : Principales agressions et attaques du béton [9]

I.2.4 L'évolution de La concentration du CO₂ dans l'atmosphère

La concentration du CO₂ dans l'atmosphère est un facteur principal qui agit sur la vitesse de carbonatation du béton. Elle favorise la carbonatation et par suite la corrosion des armatures dans le béton. En milieu rural, la fraction volumique en CO₂ est d'environ 0,03%. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 1% ; dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1% [10]. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de CO₂.

Le réchauffement de la planète est dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, tel que le CO₂ : il s'agit d'un des problèmes environnementaux les plus critiques pour le 21^{ème} siècle. La concentration de CO₂ dans la couche atmosphérique a augmenté constamment depuis la révolution industrielle (**Figure I.5**).

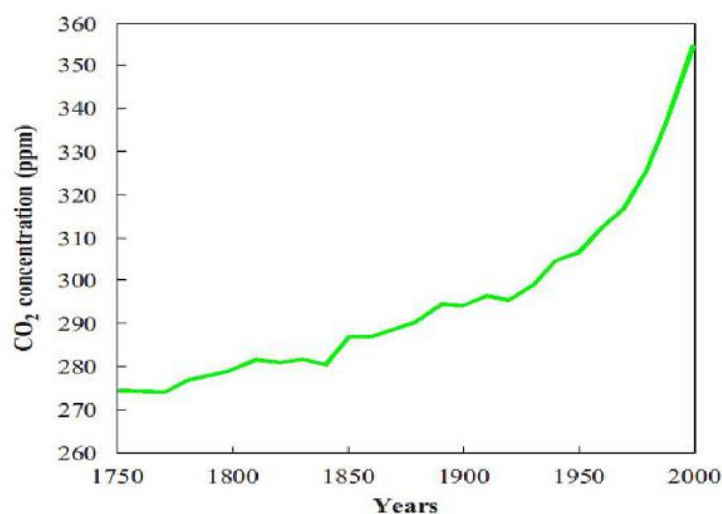


Figure I. 5 : Augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère à l'échelle mondiale [11]

Depuis 1950 elle augmente de 0,5 % par année sur une échelle globale, et particulièrement dans les zones urbaines [11]. Il est probable que le changement climatique ait ainsi dans le futur une incidence sur la carbonatation des structures en béton.

I.2.5 La carbonatation du béton

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 :



Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9 n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation). Ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures.

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton [12].

I.2.5.1 Phases d'une structure du béton et processus de carbonatation

La structure du béton est composée de trois phases :

- ✓ La phase solide qui comprend la pâte de ciment, les granulats et l'interface pâte granulats.
- ✓ La phase liquide comprenant les différents types d'eau existant dans le béton :
 - L'eau capillaire
 - L'eau adsorbée
 - L'eau liée chimiquement

- ✓ La phase gazeuse comprend de l'air et de la vapeur d'eau coexistant dans les pores de béton.

En effet la réaction de carbonatation a lieu en phase liquide, en solution aqueuse, mais fait aussi intervenir un gaz et un composé solide. La réaction de carbonatation nécessite ainsi le passage du CO_2 en phase aqueuse, des réactions acido-basiques impliquant les ions carbonates provoquent la dissolution de la portlandite et la précipitation du carbonate de calcium [8].selon les étapes suivantes (**Figure I.6**) :

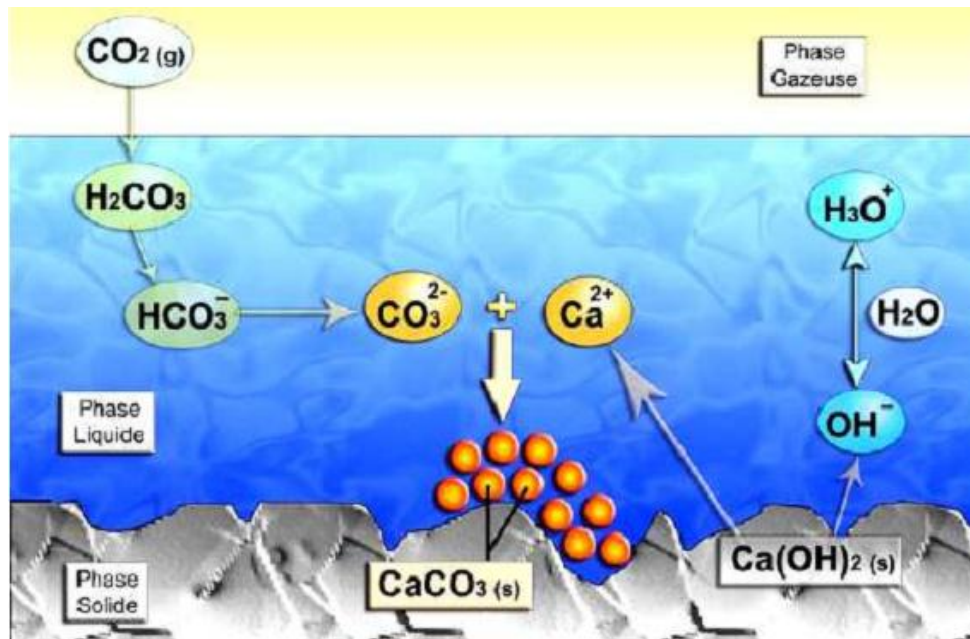
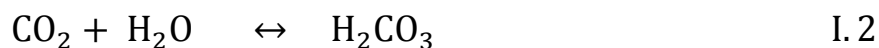


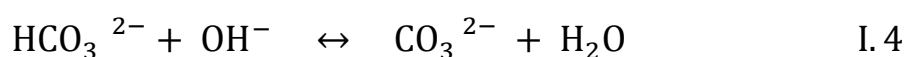
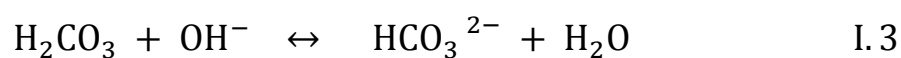
Figure I. 6 : Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [10]

- ✓ *Dissolution du gaz carbonique dans la solution porale*

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



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



A chacune de ces deux réactions de dissociation (I.3) et (I.4) correspond une acidité de l'acide carbonique H_2CO_3 . A l'équilibre, ces deux acidités ont des domaines de prédominance disjoints: à 20 °C, pour un pH supérieur à 10,3 c'est l'ion CO_3^{2-} qui prédomine et pour un pH compris entre 6,3 et 10,3 c'est l'ion HCO_3^- (Figure I. 7).

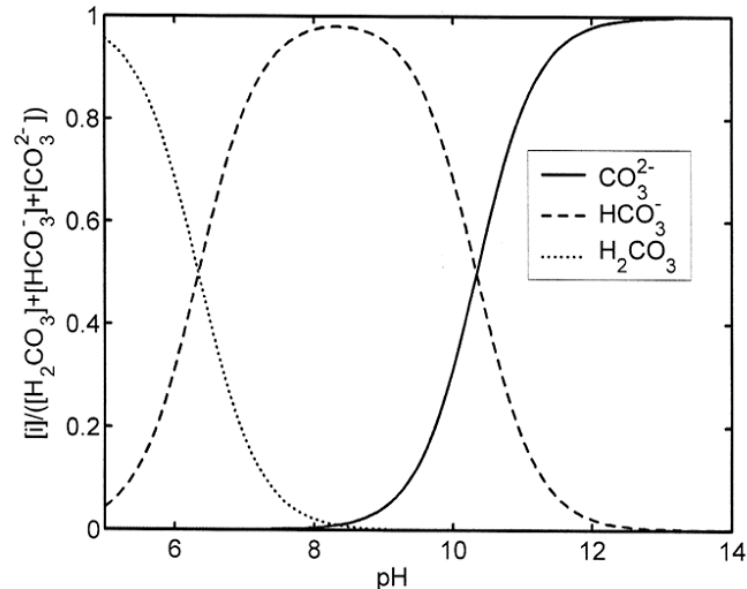
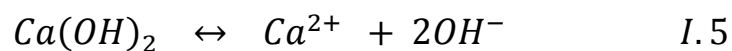


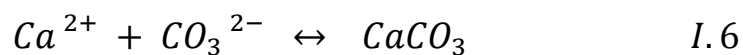
Figure I. 7 : Concentration du système des carbonates (H_2CO_3 , HCO_3^- et CO_3^{2-}) en fonction du pH (à 20°C et à l'équilibre) [10]

✓ *Dissolution de la portlandite $Ca(OH)_2$*

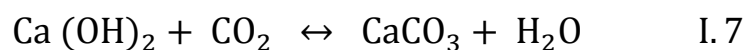
Le passage en solution du CO_2 suivant les réactions (I.5), (I.6) et (I.7) entraîne une baisse de la concentration en ion OH^- dans la solution interstitielle des pores, ce qui réduit le pH. Pour établir la basicité du milieu, la portlandite se dissout suivant la réaction:



Les ions calciums ainsi libérés précipitent avec les ions carbonates suivant la réaction (I.6) pour former du carbonate de calcium $CaCO_3$.



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



L'inconvénance 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 porlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure [10].

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

✓ *Dissolution des silicates de calcium hydratés C-S-H*

La carbonatation des C-S-H donne naissance à des carbonates de calcium, à un matériau siliceux hydraté (qualifié de gel de silice) et éventuellement à de l'eau libre.

Ces C-S-H, qui représentent la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment confèrent au matériau béton l'essentiel de sa résistance mécanique. En revanche, ils ont un pouvoir tampon sur le pH de sa solution interstitielle plus faible que la porlandite.

I.2.5.2 Profondeur de carbonatation dans le béton

En admettant que le profil de pression partielle de dioxyde de carbone est linéaire sur l'épaisseur carbonatée, et qu'il s'agit d'un phénomène à front raide, la profondeur de carbonatation théorique peut être supposée proportionnelle à la racine carrée du temps [13] :

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

Avec :

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

I.2.5.3 Méthodes de mesures de profondeur de carbonatation par le test de phénolphtaléine

La méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la profondeur de carbonatation est le test à la phénolphtaléine [14]. Il consiste à rompre à sec une éprouvette, puis à vaporiser sur la section obtenue l'indicateur qui colore en violet les parties non carbonatées. Le virage colorimétrique de cette solution se situe à pH 8,7. Ce test indique le front de carbonatation totale voir (**Figures I.8**) suivantes

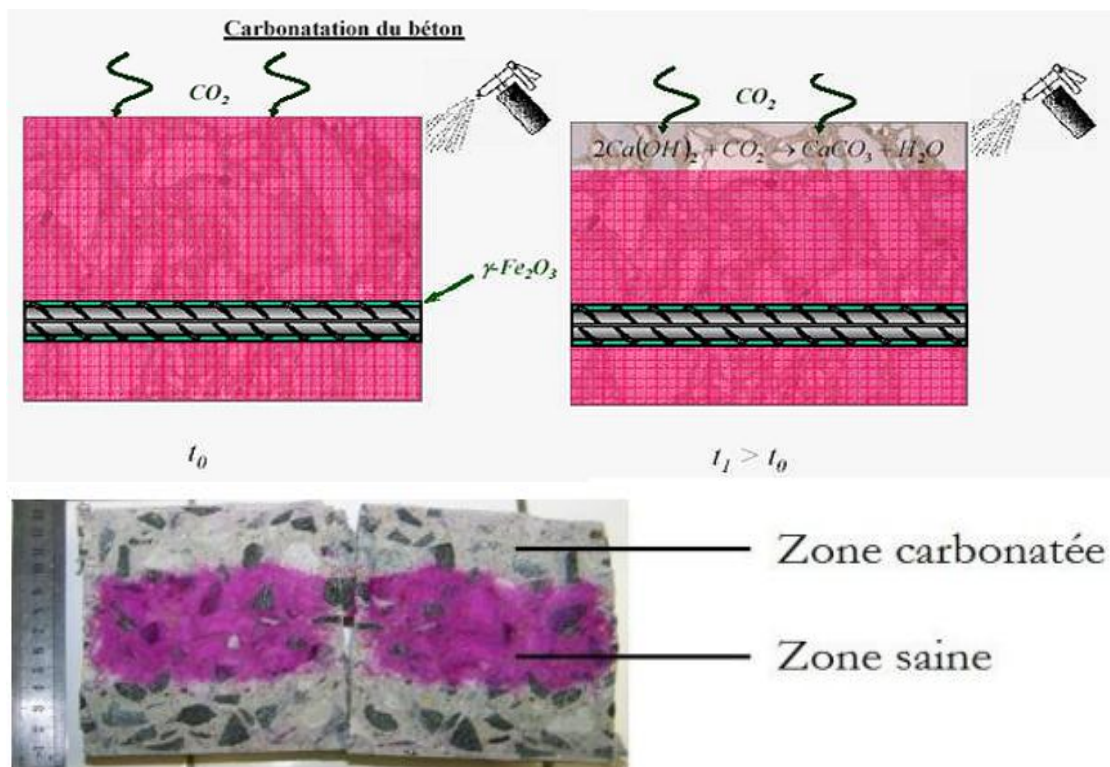


Figure I. 8 : Mesure expérimentale de la profondeur de carbonatation [14].

I.2.5.4 Vitesse de progression de la carbonatation du béton

Du point de vue de la corrosion liée à la carbonatation, la durée de service d'une structure en béton armé est subdivisée en une période d'initiation et une période de propagation de la corrosion.

Lors de l'inspection d'un ouvrage, il est donc indispensable de pouvoir estimer l'état de progression de la carbonatation dans la couche de béton d'enrobage, afin de savoir si le premier lit d'armature est en danger ou d'estimer quand il le sera. La vitesse de progression du front de carbonatation diminue dans le temps. En effet la formation des carbonates de calcium relargue de l'eau libre qui obstrue partiellement les pores (auto-protection par ralentissement de la diffusion du dioxyde de carbone), et rend les hydrates moins accessibles pour la dissolution (formation d'une gangue de carbonate de calcium à la surface des grains de portlandite, par exemple). En plus, la carbonatation modifie la structure poreuse du béton. Le volume molaire des C-S-H passe de 12 à 16 cm³/mol réduisant les vides capillaires initiaux et donc l'accessibilité du dioxyde de carbone [13].

La vitesse de carbonatation dépend des caractéristiques du matériau (porosité, composants chimiques du ciment, hydrates formés), et des conditions thermodynamiques (taux de saturation, humidité relative, la température).

Hyvert [15] montre ainsi sur des résultats expérimentaux, une différence de vitesse de carbonatation accélérée pour des éprouvettes de mortier à base de ciment CEM I, CEM II et CEM III : la vitesse la plus élevée est obtenue pour un mortier à base de CEM III, la plus faible pour un mortier à base de CEM I. Ce résultat est expliqué par la plus forte teneur en porlandite du mortier à base de CEM I.

La carbonatation ne se produit pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau. Les études réalisées sur la carbonatation accélérée des bétons montrent que la vitesse maximale

de carbonatation à 20°C pour les bétons traditionnels est obtenue pour une humidité relative comprise entre 50% et 70 % (**Figure I.9**). Ces conditions optimales sont définies pour un béton durci où les transferts hydriques à l'intérieur du matériau sont en équilibre avec l'hygrométrie extérieure.

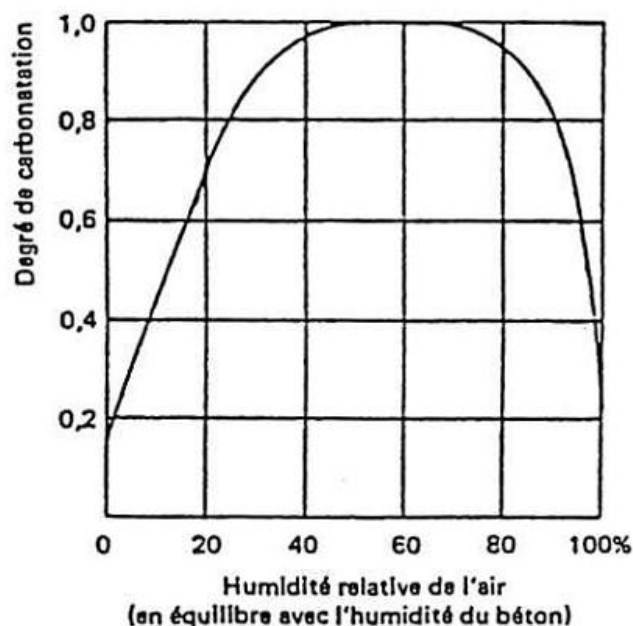


Figure I.9 : Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative [13]

La pression partielle de CO_2 a également une influence sur la vitesse de carbonatation. Expérimentalement Hyvert [15] montre ainsi que l'épaisseur carbonatée est accrue pour des pressions partielles respectives de 0,03%, 10%, 20% et 50%.

I.2.5.5 Principaux paramètres influençant la carbonatation des bétons

La cinétique de carbonatation des bétons est influencée par une multitude de paramètres liés aux caractéristiques des bétons et à leur milieu environnant.

A. Paramètres intrinsèques aux bétons

A.1 Rapport eau/ciment (E/C)

Toutes les études réalisées pour déterminer l'influence du rapport E/C sur la cinétique de carbonatation s'accordent à conclure que plus ce rapport est petit, plus la vitesse de carbonatation est faible (**Figure I.10**). En effet, la porosité d'un béton dépend en grande partie du rapport E/C. Plus il est élevé, plus la quantité d'eau libre évaporable est grande. En s'évaporant, cette eau laisse des vides qui favorisent la diffusion du CO_2 [1].

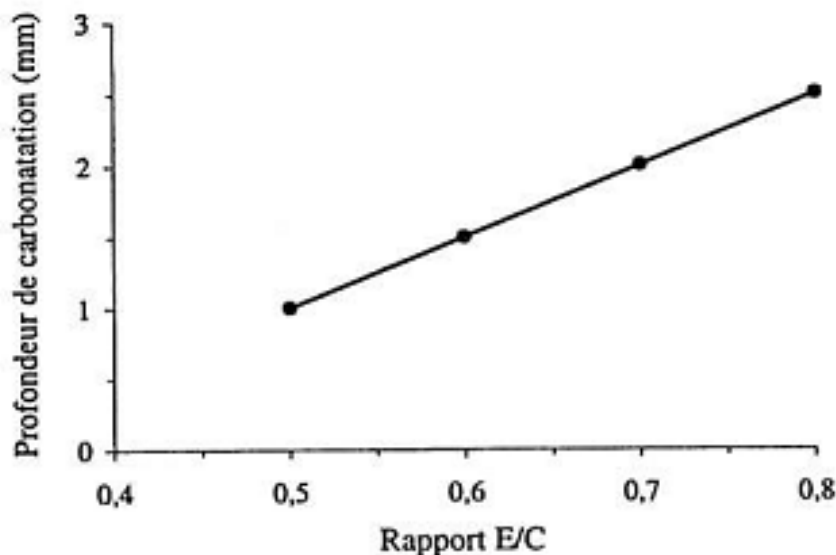


Figure I. 10 : Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment [1].

A.2 : Dosage en ciment

Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation car il réduit la porosité du béton (**Figure I.11 et Figure I.12**), améliore sa compacité et augmente la quantité de produits carbonatables[22].

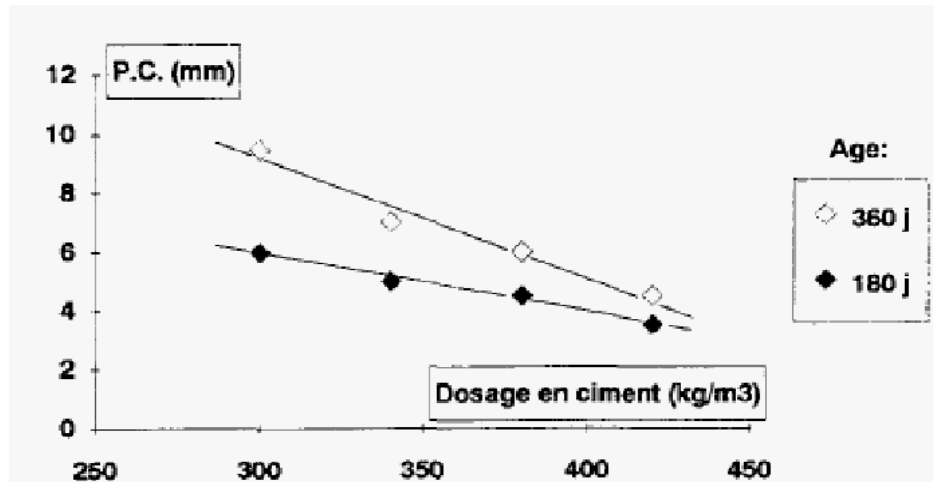


Figure I. 11 : Variation de la carbonatation en fonction du dosage en ciment pour une cure de 3 jours [22].

A.3 Type de ciment

L'utilisation d'additions minérales (laitiers de hauts-fourneaux, cendres volantes, fumées de silice, fillers) modifie les équilibres chimiques au sein du béton et peut avoir des conséquences sur le pH de la solution interstitielle. On Compare la résistance à la carbonatation de bétons préfabriqués à partir de ciment Portland ordinaire ou de ciment à base de fillers. Il ressort de leur étude [23] que les bétons de ciment à base de fillers (CPJ CEM II 32.5) se carbonatent beaucoup plus vite que les bétons de ciment Portland (CPA CEM I 42.5) pour un dosage en ciment identique.

Par exemple, pour un dosage en ciment de 250 Kg/m³ la profondeur carbonatée d'un béton de CPJ CEM II 32.5 est environ 30 % plus forte que celle d'un béton de CPA CEM I 42.5 quelle que soit la durée de cure (**Figure I.12**).

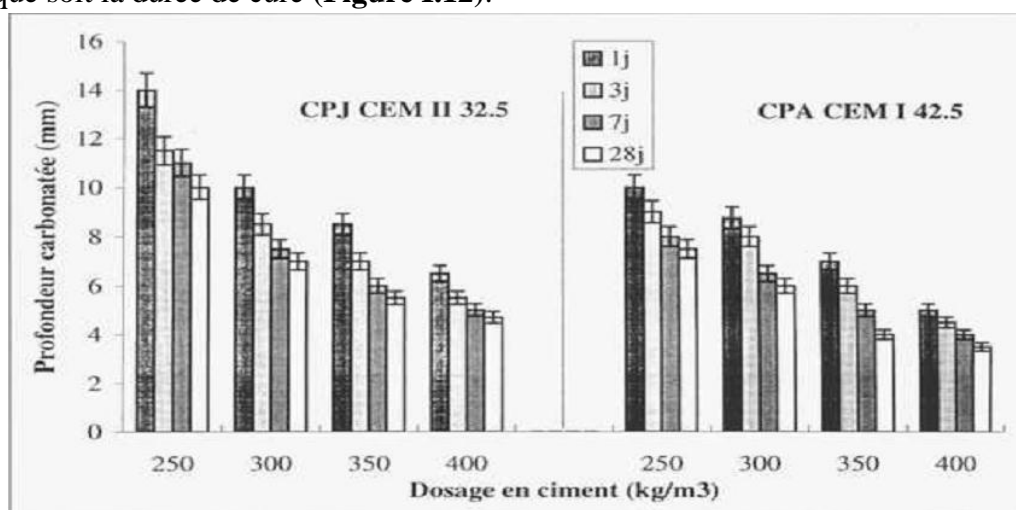


Figure I. 12 : Profondeur carbonatée à un an en fonction du dosage en ciment pour toutes les durées de cure [23].

Leurs résultats d'essais de carbonatation accélérée et de carbonatation naturelle montrent qu'une augmentation de la teneur en alcalins entraîne une carbonatation plus importante du béton.

Ces évaluations se fondent sur la connaissance de la microstructure et de la composition chimique de la pâte de ciment durcie résultant de l'utilisation de ciments composés. D'un point de vue chimique, les additions minérales conduisent à des matériaux à faible teneur en portlandite. Il résulte qu'une plus petite quantité de CO₂ est nécessaire pour consommer toute la portlandite, ainsi le pH chute plus facilement [1].

A.4 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 [1].

A.5 Porosité

La porosité du béton influence sur les propriétés mécaniques du béton et sur leur durabilité. La profondeur de carbonatation accélérée augmente lorsque la porosité accessible à l'eau augmente (**Figure I.13**) [16].

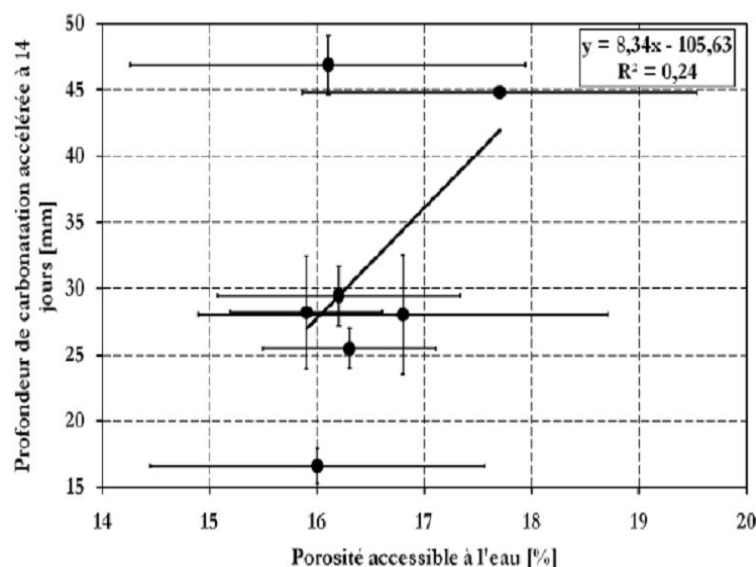


Figure I. 13 : Profondeurs moyennes de carbonatation accélérée des bétons mesurées après 14 jours dans l'enceinte en fonction de leurs porosités accessibles à l'eau mesurées à l'âge de 28 jours Conservation « Air » [16].

B. Paramètres extrinsèques aux bétons

B.1 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 durée de la cure est longue.

B.2 Humidité relative

La vitesse de carbonatation est considérablement influencée par l'humidité relative du milieu environnant [44]. 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. Selon les bétons, il est souvent admis que la vitesse de carbonatation est maximale entre 50 et 70 % d'humidité relative (**Figure I.14**). En dessous de 50 % et au-dessus de 90 à 95 % la vitesse est très faible ou nulle [1].

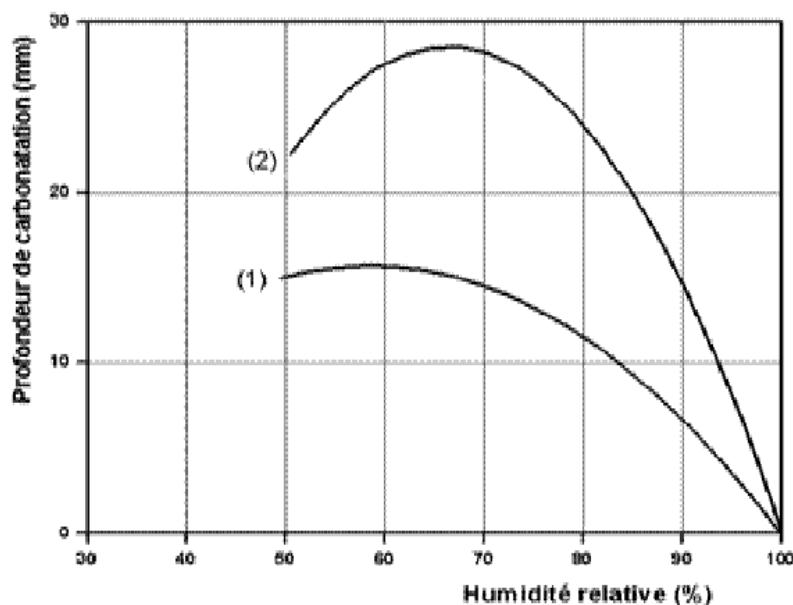


Figure I. 14 : Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation pour des bétons confectionnés avec des rapports E/C de 0.6 (courbe 1) et 0.8 (courbe 2) et conservés 16 ans à 20°C D'après Wierig [44].

B.3 Concentration en CO₂

Des études montrent qu'une augmentation de la concentration en CO₂ accroît la vitesse de carbonatation. En fournissant du CO₂ en quantités continuellement suffisantes, les produits carbonatables à une profondeur donnée se carbonatent rapidement et se consomment donc d'autant. Ainsi, le front de carbonatation avance plus vite [1].

B.4 Température

L'augmentation de température a deux effets opposés sur la vitesse de carbonatation : d'une part, elle accélère les réactions chimiques, favorise le séchage des pores et ainsi l'accès du CO₂ dans le réseau poral. D'autre part, elle diminue la solubilité du CO₂ et réduit sa concentration dans la phase gazeuse [1].

I.2.5.6 Principales conséquences de la carbonatation

a) Modification des propriétés mécaniques

Les microcristaux de carbonate de calcium qui se forment à partir de la carbonatation des hydrates colmatent en partie les pores du béton et augmentent ses résistances mécaniques. La résistance à la compression et à la flexion de bétons au ciment CEM I conservés dans une atmosphère de CO₂ peut augmenter au maximum jusqu'à 30 % par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de CO₂.

En revanche, la résistance mécanique après carbonatation diminue lorsque la teneur en clinker des ciments est inférieure à 40 % [1].

b) Modification de la porosité

La réaction de carbonatation des hydrates entraîne une augmentation du volume de la phase solide.

La nature du ciment intervient dans la variation de porosité. Elle est ainsi généralement plus forte pour des mortiers et béton à base de CEM I, plus faible s'ils sont à base de CEM III (**Tableau I.3**).

Tableau I. 3 : Porosités obtenues par intrusion au mercure sur des mortiers de E/C=0,5 [14].

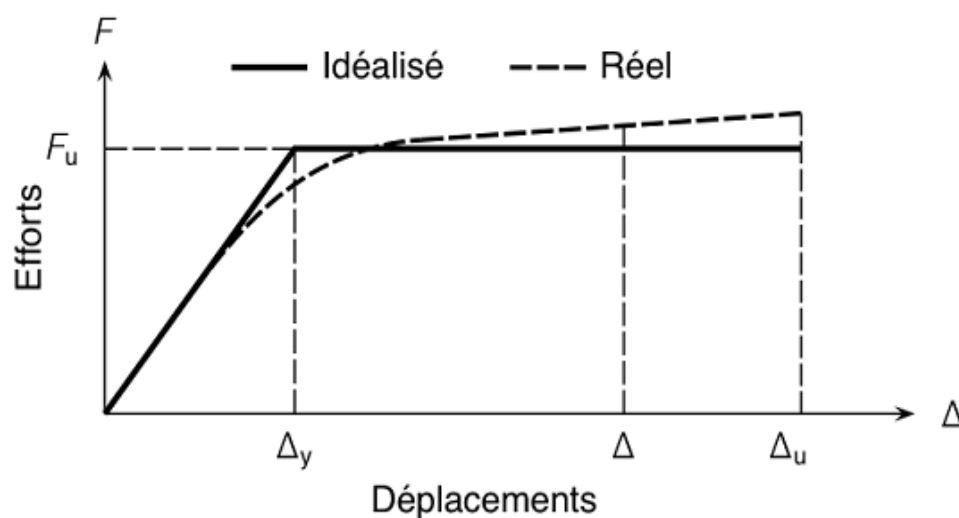
Mortier à base de	CEM I	CEM II	CEM III
▪ Mortier non carbonaté	14.4%	13.9%	12.3%
▪ Mortier carbonaté pendant 296 jours sous teneur atmosphérique de CO ₂	12.9%	12.2%	11.3%
▪ Mortier carbonaté pendant 157 jours dans une ambiance à 50% de CO ₂	8.8%	10.8%	8.3%

c) Modification de la teneur en eau

La réaction de carbonatation libère de l'eau de structure dans la solution interstitielle. Cette eau libérée, qui augmente la teneur en eau évaporable dans le réseau poral du béton, peut participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs [9]. Elle peut aussi augmenter le degré de saturation et ralentir ainsi la progression de la carbonatation.

I.3 Définition de la ductilité

La ductilité est définie comme l'aptitude d'un matériau, d'un élément ou d'une structure toute entière à pouvoir se déformer de façon inélastique en conservant une raideur et une résistance qui n'altèrent pas la capacité portante [17]. Par contre, la déformabilité est la capacité d'un élément de la structure ou de la structure entière de se déformer avant l'effondrement (**Figure I.15**) : Par conséquent, le facteur de ductilité est le rapport entre la déformation maximale et la déformation obtenue à la fin de la phase élastique [18].

**Figure I. 15**: Notion de ductilité. Idéalementisation de la courbe force-déplacement [17]

I.3.1 Différentes types de ductilités

L'analyse du comportement des structures nécessite la connaissance des critères caractérisant le domaine non linéaire de la structure et de leurs éléments. Pratiquement, on rencontre cinq types de ductilité qui sont les suivantes [19]:

- **Ductilité de déformation.**
- **Ductilité en courbure où ductilité locale.**
- **Ductilité en rotation, où ductilité intermédiaire.**
- **Ductilité de déplacement, où ductilité globale.**
- **Ductilité énergétique.**

- **Ductilité de déplacement, où ductilité globale**, leur facteur est exprimé par le rapport du déplacement ultime de la structure (Δ_u) et le déplacement à la fin de la phase élastique (Δ_y) ;
où

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Généralement, ce facteur traduit le comportement des structures dans les codes parasismiques.

On visualise ces trois manières de quantifier la ductilité dans la (**Figure I.16**)

Types de ductilité	Représentation	Définition
Ductilité de déformation		$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y}$
Ductilité de courbure		$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$
Ductilité de déplacement		$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$

Figure I. 16 : Types de ductilité [20]

I.3.2 Influence de la carbonatation sur la ductilité

J. Xiao et al. [21] montrent, La capacité portante des poteaux et des poutres est augmentée après que le béton soit carbonaté en surface, mais la capacité de déformation (ductilité) est diminuée et la rupture tend à être plus fragile.

De plus, Il conclut que la capacité de flexion maximale augmente, tandis que le déplacement final est diminué comparé au béton non carbonaté. Ce résultat est montré sur la (Figure I.17)

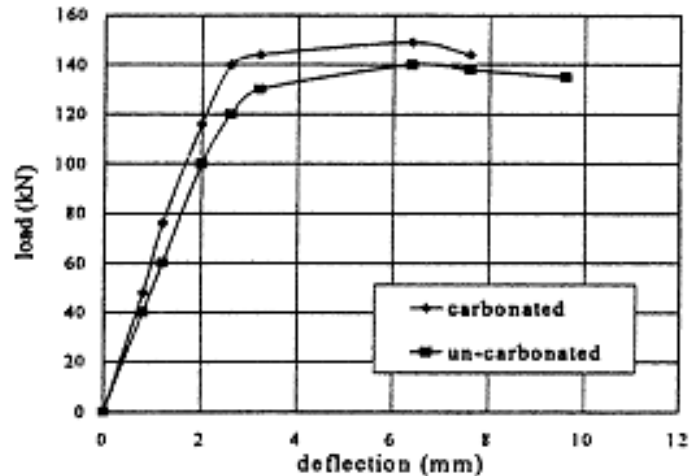


Figure I. 17 : Courbes de Charge-déplacement

L'inconvénient dû à la diminution de la ductilité et l'effet de la profondeur et de l'aspect aléatoire de la distribution de la carbonatation devrait être pris en considération quand l'évaluation d'anciennes structures en béton armé.

I.4 Conclusion

Parmi les dégradations chimiques qui diminuent considérablement la durabilité des structures en béton armé, on peut citer la carbonatation,

A travers ce chapitre, on présente les composants du matériau béton, une attention particulière est donnée au composant ciment, responsable de la carbonatation, en décrivant les principaux produits formés après l'hydratation et plus particulièrement la portlandite qui joue un rôle important dans la durabilité vu qu'elle maintient un PH basique, qui confère aux armatures une protection contre la corrosion.

Cette étude bibliographique comprend une partie traitant la carbonatation et ses conséquences sur les structures. La principale conséquence de ce phénomène est la corrosion des armatures, qui est déclenché une fois le front de carbonatation atteint les armatures et après consommation de la portlandite.

Enfin, ce chapitre fait le point sur une caractéristique importante dans le domaine parasismique appelé ductilité et sa relation avec la carbonatation, des études récentes montrent qu'elle est défavorable pour la capacité parasismique.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux et protocoles d'essais

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter la partie expérimentale de notre travail que nous avons réalisé au niveau du laboratoire de recherche de génie civil de l'université de Laghouat, en commençant par la description des différents essais nécessaires pour caractérisation des matériaux qui ont servi à la formulation du béton, puis on met une revue sur les différents protocoles d'essais utilisés notamment l'essai de carbonatation accélérée, essai de résistances mécaniques.

II.2 Caractérisation des matériaux

II.2.1 Béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, air, granulats et, le plus souvent, adjuvants qui doivent constituer un ensemble homogène. Chaque composant peut nous donner une idée sur les caractéristiques physiques et mécaniques du béton résultant.

II.2.1.1 Ciment

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

Dans notre étude, deux types de ciment portland ont été utilisés, **CEM I 42.5 HRS1** équivalent à l'ancien ciment CPA (sans ajouts) (**Figure II.1**), et le ciment composé **CEM II/B 42.5 N(CPJ)**, (**Figure II.2**).

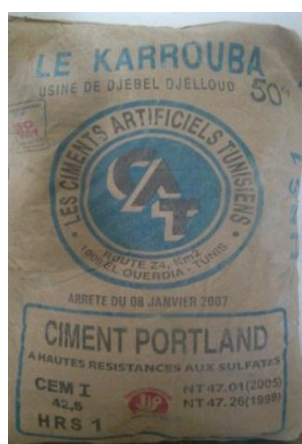


Figure II. 1 : Ciment (CEM I 42.5 HRS1).



Figure II. 2: Ciment (CEM II/B 42.5 N).

Ses propriétés physiques et chimiques sont données dans le (Tableau II.1) et (Tableau II.2).

Tableau II. 1: Les propriétés physiques et chimiques du ciment (CEM I) (Voir Annexe)

Propriétés physiques													
Masse volumique (g/cm ³)		Début de prise (min)			Fin de prise (min)			Surface spécifique (cm ² /g)					
3.07 - 3.23		110 – 220			157 – 312			2500 – 3263					
Propriétés chimiques (%)													
CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	PF	CaOl	SO ₃	MgO	RI	K ₂ O	CO ₂	Na ₂ O	CI	
62	23	4.7	4.07	2.66	0.5	1.00	0.71	0.75	0.35	0.18	0.07	0.01	
Composition minéralogique (Bogue) (%)													
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF		2C ₃ A+C ₄ AF					
54.0 – 65.0		10 – 35		3		13.45 - 1580		20					

Tableau II. 2 : Les propriétés physiques et chimiques du ciment (CEM II/B) (Voir Annexe)

Propriétés physiques										
Masse volumique (g/cm ³)		Début de prise (min)		Fin de prise (min)		Consistance normale (%)		Surface spécifique (cm ² /g)		
3.04		140 - 195		195 – 290		25 – 28.50		4150 – 5250		
Propriétés chimiques (%)										
CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaOl	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CI	
62.15	19.70	3.49	4.52	1.00	2.00-2.70	1.00 - 2.20	0.49	0.25	0.02	
Composition minéralogique (Bogue) (%)										
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF		2C ₃ A+C ₄ AF		
58 – 64		12 -18		6 – 8		10 - 12		4.19		

II.2.1.2 Agrégats (sable et graviers)

Le sable utilisé est un sable alluvionnaire (0/5) qui provient d'Oued M'zi (Laghout), les graviers calcaires utilisés sont de deux catégories (3/8, 8/15) proviennent de la carrière de concassage (Ouazan Laghout).

II.2.1.2.1 Caractéristiques physiques des agrégats

a) Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du matériau déterminée par la relation ci-dessous, selon la norme NFP 18-555[24].

$$\rho_{app} = \frac{M - M_0}{V_{app}}$$

Avec:

ρ_{app} : masse volumique apparente du matériau [g/cm³].

M: masse du récipient plein du matériau [g].

M₀: masse du récipient vide [g].

V_{app}: volume du récipient [cm³]. (V_{app} = 1000cm³)

b) Masse volumique absolue

C'est la masse de l'unité de volume absolue sans vides du matériau, déterminée selon la norme NFP 18-555 par la relation suivante:

$$\rho_{ads} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Avec:

ρ_{ads} : masse volumique absolue du matériau [g/cm³].

M: masse d'agrégats [g].

V₁: volume total [cm³].

V₂: volume de vide [cm³].

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 ci-dessous selon les normes NF P 18-554[25] et 18-555:

$$A_b = \frac{Ma - Ms}{Ms} \times 100$$

Avec:

A_b : coefficient d'absorption [%].

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C [g].

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

- Grapiers

Il s'agit d'immerger l'échantillon dans l'eau pendant 24h à 20° à la pression atmosphérique, en suite peser l'échantillon après l'avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant, soit M_a sa masse.

La dernière phase consiste à assécher les pores en entreposant la prise d'essai dans l'étuve jusqu'à obtenir une masse constante. Puis à peser ces granulats secs.

d) Teneur en eau

La teneur en eau c'est le rapport du poids de l'eau d'un échantillon par rapport au poids du sol sec.

La teneur en eau est donné par :

$$W = \frac{M_{eau}}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Avec :

M_h : Masse d'échantillon humide.

M_s : Masse d'échantillon sec.

Le (**Tableau II .3**) regroupe les résultats de caractérisation physique des agrégats

Tableau II. 3 : Propriétés physiques des agrégats utilisés

Caractéristiques des Agrégats	Norme d'essai	Classes granulaires		
		Sable	Graviers	
		0/5	3/8	8/15
Masse Volumique apparente (g/cm ³)	NF P18-555	1.564	1.319	1.255
Masse Volumique absolue (g/cm ³)		2.410	2.724	2.715
Teneur en eau (%)		5.50	2.22	2.00
Coef. d'absorption		0.60	1.5	2.30

e) Equivalent de sable

Le coefficient d'équivalent de sable quantifie la propreté du sable. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenus dans le sable, en plongeant une quantité de sable dans une éprouvette graduée normalisée remplie par une solution lavante, (**Figure II.3**).

**Figure II. 3** : Essai d'équivalent de sable.

Après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (h_1) et du sédiment floculant (h_2) (**Figure II.4**).

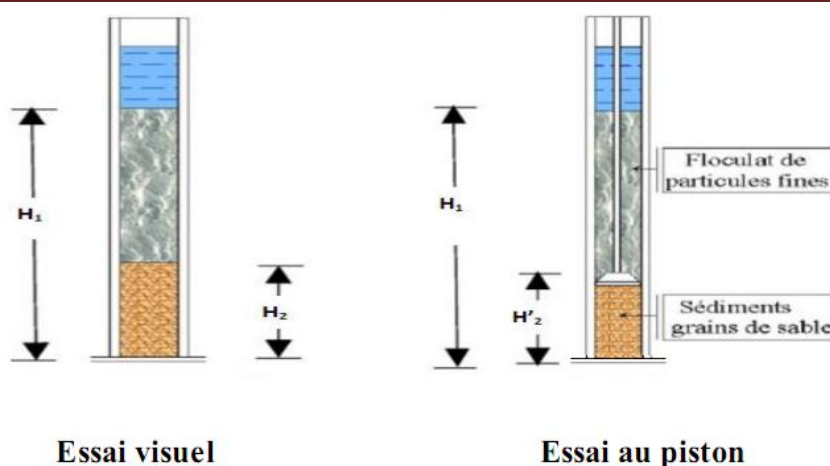


Figure II. 4 : Mesure d'équivalent de sable.

L'équivalent de sable est donné selon la norme NF P 18-598[26] par la relation ci-dessous.

$$ESV = h_2/h_1 * 100$$

$$ESP = (h'_2/h_1) * 100$$

Le (**Tableau II. 4**) suivante donne les Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable .

Tableau II. 4 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable [27].

ES à vue	ES piston	Qualité de sable
$ES_V < 65$	$ES_P < 60$	« Sable argileux » risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq ES_V \leq 75$	$60 \leq ES_P \leq 70$	« Sable légèrement argileux » de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$75 \leq ES_V \leq 85$	$70 \leq ES_P \leq 80$	« Sable propre » à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$ES_V \geq 85$	$ES_P \geq 80$	« 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.

Les résultats des essais d'équivalent de sable sont montrés sur le (**Tableau II.5**).

Tableau II. 5 : Valeurs de l'équivalent de sable.

Equivalent de sable . ES_P (avec piston)	83.33%
Equivalent de sable . ES_V (visuel)	85%

Ces résultats montrent que le sable utilisé est un sable très propre puisque nous avons eu un équivalent de sable au piston $ES_P \geq 80$ et visuel $ES_V \geq 85$.

f) Analyse granulométrique des agrégats

L'essai est réalisé selon la norme (EN 933-1[28] et EN 933-2[29]), il consiste à déterminer la répartition granulaire des granulats supérieurs à 80 microns par tamisages à sec.

✓ Sable

Les résultats de l'analyse granulométrique opérée sur un échantillon de 1200 g d'un sable alluvionnaire sont présentés dans le (**Tableau II.6**).

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

Provenance : Carrière de oued m'zi Laghouat. Echantillon : sable alluvionnaire. Poids initial sec : 1200 g.			
Tamis (mm)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)	Passant (%)
6,300	0	0	100
5,000	38	3	97
2,500	84	7	93
1,250	168	14	86
0,630	415	35	65
0,315	848	71	29
0,160	1110	93	8
0,080	1188	99	1
Fond	1200	100	0

• Module de finesse

A partir de l'analyse granulométrique, on peut déduire le module de finesse de sable, la norme NFP 18-540[30] 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.

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulés}}{100} = 2,23$$

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.

✓ Gravier calcaire 3/8 et Gravier calcaire 8/15

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).

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

Provenance : OUAZZANE. 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	28,30	28,30	0,94	99,1
6,3	695,8	724,1	24,14	75,86
5,0	994,4	1718,5	57,28	42,72
4,0	681,0	2399,5	79,98	20,02
3,15	370,2	2769,7	92,32	7,68
2,50	155	2924,7	97,49	2,51
Fond	61,9	2986,6	99,55	0,45

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

Provenance : OUAZZANE Echantillon : gravier calcaire 8/15. Poids initial sec : 6000 g.				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
20	00	00	00	100
16	36,2	36,2	0,60	99,4
12,5	1520,1	1556,4	25,94	74,06
10	2483,2	4039,6	67,33	32,67
8	1402,8	5442,4	90,70	9,30
6,3	471,2	5913,6	98,56	1,44
5	40,5	5954,1	99,24	0,76
4	7,3	5961,4	99,36	0,64
Fond	38,5	5999,9	99,99	0,01

Pour les deux graviers, le pourcentage de la quantité perdu au cours de l'essai est de $0,45\% < 2\%$ et de $0,01\% < 2\%$, respectivement, de ce fait, les résultats de ces analyses sont acceptés.

Les graviers concassés adhèrent bien à la pâte de ciment et offrent au béton de bonnes caractéristiques mécaniques.

II.2.1.3 Eau de gâchage

Une eau de mauvaise qualité peut avoir des divers effets sur le béton tels que la diminution de la résistance mécanique, la corrosion des armatures, l'accélération ou le ralentissement du temps de prise et l'apparition des tâches nuisibles sur la surface du béton ou d'efflorescences.

L'eau utilisée pour la confection du béton est de l'eau de robinet de laboratoire de département de Génie civil de Laghouat ayant la composition chimique données dans le (Tableau II.9).

Tableau II. 9: Composition chimique de l'eau de gâchage [31]

Nature du point d'eau		Robinet		
Ca ⁺² en mg/l	104	Balance		5.20
Mg ⁺² en mg/l	97	Cations		8
Na ⁺ en mg/l	102.30	M ;éq /l		4.45
K ⁺ en mg/l	6.64	17.81		0.14
Cl ⁻ en mg/l	148			4.17
SO ₄ ⁻² en mg/l	520<1000			10.82
HCO ₃ ⁻ en mg/l	94			2.52
NO ₃ ⁻ en mg/l	12.40			0.20
Résidu sec à 110°C 1172 mg/l	PH 7.77	Conductivité en 1/10 mm à 25°C 16.77		Dureté totale 43.25
Test chlore (ml d'eau de javel à 15°/m ³) 0.30 ml /l		T.A.C 7.80	S.A.F 75	I.S 62.3
Minéralisation 1010.60	M.O milieu Acide en O ² 8.53		SiO ₂ 4.45 mg/l	Somme des ions 1057.40
Cations	Ca ⁺² = 15%	Mg ⁺² = 23.2%	Na ⁺ +K ⁺ = 13.40%	
Anions	HCO ₃ ⁻ = 4.5%	SO ₄ ⁻² = 53.8%	Cl ⁻ +NO ₃ ⁻ = 12.6%	

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 [32], 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 acceptable avec une bonne résistance mécanique.

Il s'agit de formuler deux types de béton, le premier avec un ciment portland **CEM I 42.5 HRS1 (CPA)**, le second avec un ciment portland composé **CEM II/B 42.5 N(CPJ)**.

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 [33] .

Pour notre étude, la formulation du béton est élaborée selon la méthode de Dreux-Gorisse, et optimiser en utilisant la méthode de Baron Lesage [34].

II.3.1.1 Formulation de béton par 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 donné satisfaction. La formulation par cette méthode est résumée sur l'organigramme suivant (**Figure II.5**).

Caractéristiques des granulats	Sable	Gravillon	Gravier	Caractéristiques du ciment
Forme (roulé-concassé)				Dénomination
Qualité (Excellente-Bonne-Passable)				Classe vraie (σ'_c)
Dénomination				Masse volumique absolue (ρ_s)
Module de finesse M_f				Caractéristiques des adjuvants
Masse volumique absolue (ρ_s)				Dénomination

Caractéristiques du béton :	
Environnement (Non exposé-Exposé-Agressif)	
Classe d'environnement (NFP 18-305)	
Type (NA-BA-BP)	

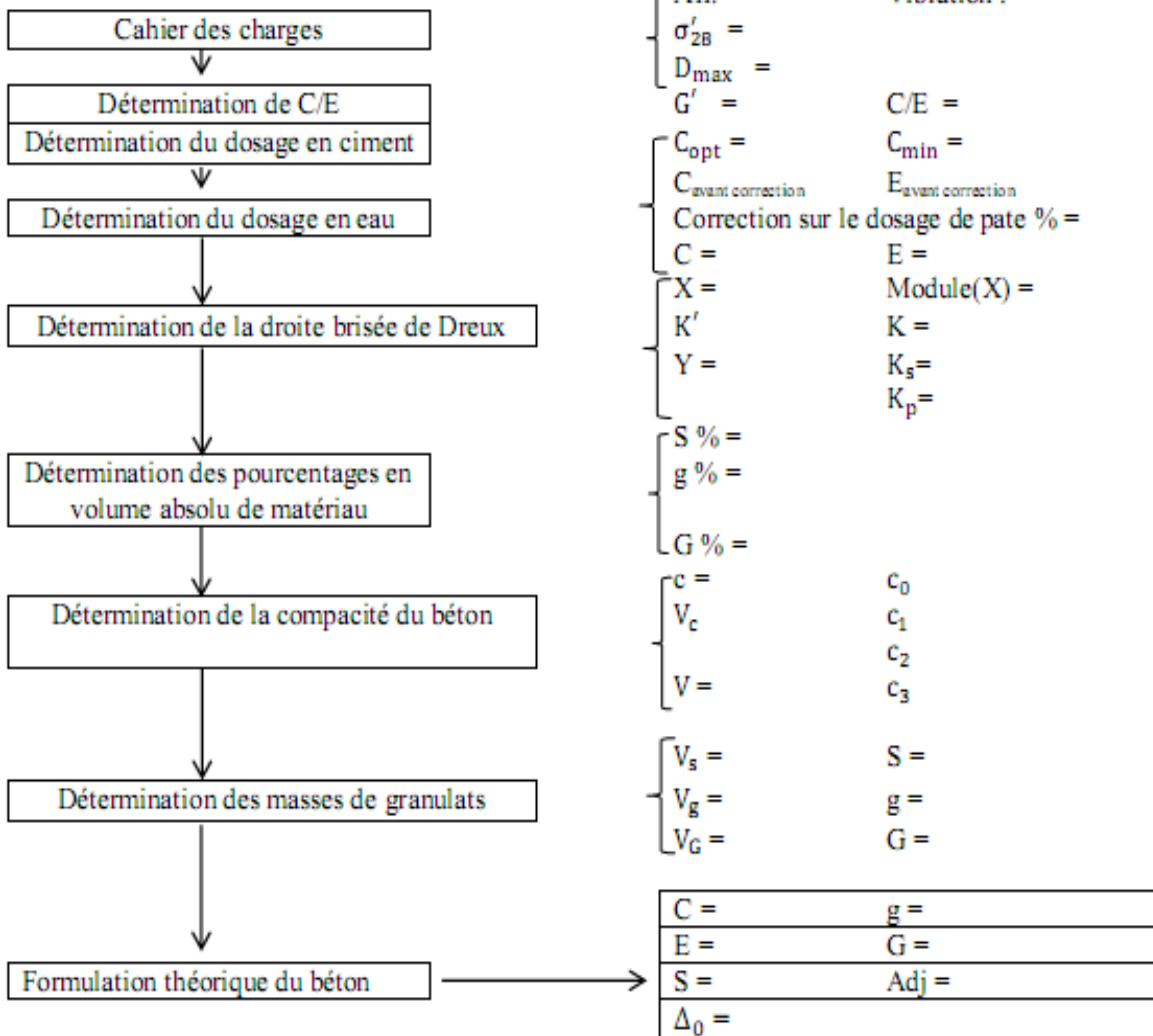


Figure II. 5 : Organigramme de la méthode de Dreux-Gorisse

II.3.1.2 Essai d'affaissement

Pour déterminer la maniabilité de notre béton (des deux compositions), on a procédé à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Selon la norme NFP 18-451 [36], 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.

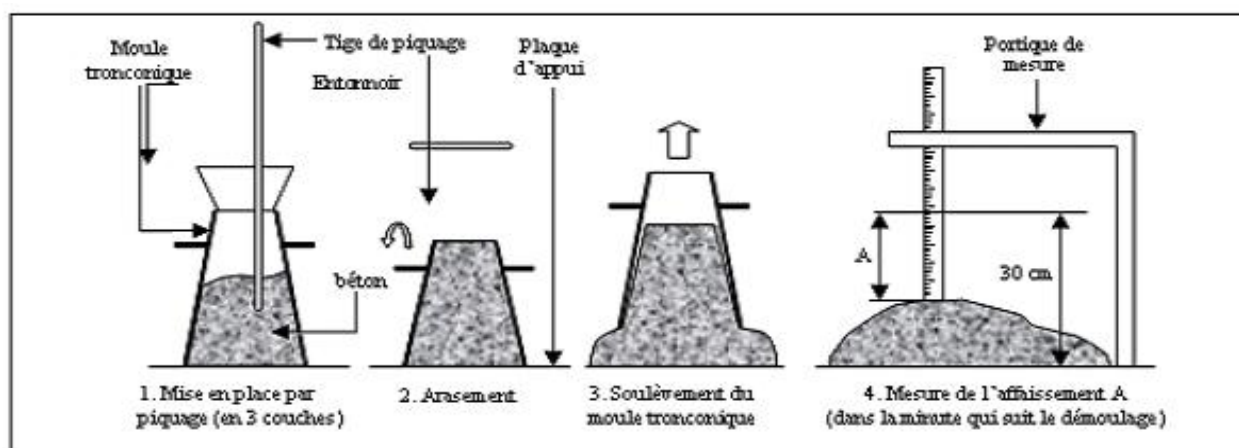


Figure II. 6 : Mesure de l'affaissement à l'aide du cône d'Abrams

La valeur maximale de la maniabilité permet de déterminer le rapport S/G optimal. 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**) nous permettant de calculer les différentes proportions des constituants de la formulation.

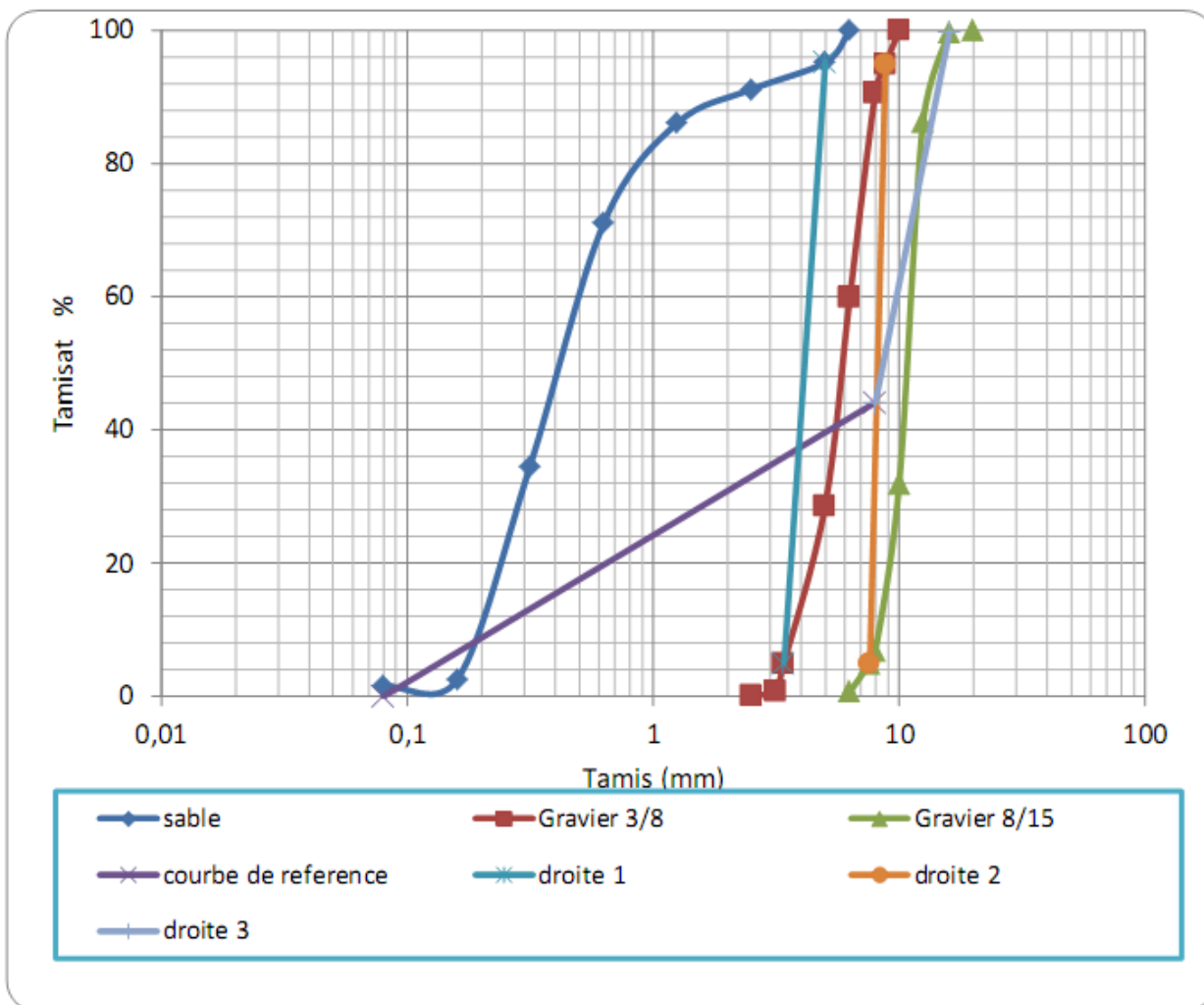


Figure II. 7 : Courbe granulométriques et droite de référence pour les agrégats de la composition

❖ **Résultat de la formulation de béton de la 1^{ère} composition**

Après la correction et vérification, on a abouti à la formulation suivante (**Tableau II.10**).

Tableau II. 10 : Formulation du béton de la 1^{ère} composition (CEM I)

S/G	E/C	Sable (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Ciment (CEM I) (kg)	Eau (L)	Affaissement (cm)
0.67	0.52	707	115	933	408	210	9

❖ Résultat de la formulation du béton de la 2^{ème} composition

De la même manière pour la deuxième composition ; le (Tableau II.11) regroupe les résultats de la formulation.

Après la correction et la vérification, on a abouti à la formulation suivante

Tableau II. 11 : Formulation du béton de la 2^{ème} composition (CEM II)

S/G	E/C	Sable (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Ciment (CEM II/B) (kg)	Eau (L)	Affaissement (cm)
0.675	0.55	707	115	933	408	225	9

II.4 Confection et conservation des échantillons

Pour le gâchage des bétons, les constituants (granulats et sable), préalablement lavés et séchés dans l'étuve à $110 \pm 5^\circ \text{C}$ pendant 24h 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).



Figure II. 8 : Eprouvettes cubiques et prismatiques pour les essais.

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

- ✓ Des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm³ (norme NF P 18-400 [37]). Ces éprouvettes sont confectionnées pour la détermination de la résistance à la compression ainsi que pour les essais de durabilité vis-à-vis de la carbonatation.

- ✓ Des éprouvettes prismatiques (10×10×40) cm³ (norme NF P 18-400): Ces éprouvettes sont confectionnées pour la détermination de la résistance à la flexion ainsi que pour les essais de durabilité vis-à-vis de la carbonatation.

Le ferrailage des échantillons poutres (10×10×40) cm³ est calculé selon les recommandations du RPA 99/version 2003 [38]. Les résultats sont regroupés dans le (**Tableau II.12**).

Tableau II. 12 : Résultats de Ferrailages des poutres.

A(CNF) [cm ²]	A(RPA) [cm ²]	A _{totale} Choisie [cm ²]	A _t	S _t [cm]	Enrobage [cm]
0.1	0.7	4T8 As = 2	3cadre T6	10	2



Figure II. 9 : Ferrailage des poutres.

Tous les échantillons sont conservés dans leurs moules pendant 24 heures sous un film plastique. Après démoulage, ils sont immergés dans l'eau à $T = 20 \pm 0,5^\circ \text{C}$ conformément à la norme NA 426[39] pendant 28 jours selon les recommandations de L'AFPC AFREM [40], jusqu'aux échéances prévues pour le lancement des essais [29] (**Figure II.10**).



Figure II. 10 : conservation les échantillons

II.5 Compagne expérimentale

Les éprouvettes des différents bétons élaborés ont été soumises à trois compagnes d'essais.

- ✓ Essais de résistances mécaniques :

Il s'agit de la détermination de la résistance à la compression des Cubes de béton armé à l'âge 7, 14 et 28 jours pour des échantillons témoins et carbonatés

- ✓ L'essai de carbonatation accélérée des bétons :

Il s'agit de la détermination de la profondeur de la zone du béton de peau carbonatée pour les différents bétons à l'âge 7, 14,28 jours.

- ✓ Essais de ductilité de béton :

Il s'agit de la détermination la flèche des poutres de béton armé à l'âge 7, 14 et 28 jours pour des échantillons témoins et carbonatés

Chaque essai est réalisé sur trois éprouvettes de la même composition, et la valeur moyenne des trois essais a été prise comme valeur caractéristique.

II.5.1 La résistance à la compression

La résistance à la compression est étroitement liée à la porosité, par suite à la structure de la pâte de ciment. Il est donc intéressant de la mettre en relation avec la carbonatation.

Les essais de résistance à la compression sont effectués sur des échantillons cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ conformément à la norme NFP 18-406 [41].

L'écrasement des échantillons est fait sur une presse hydraulique de vitesse de chargement $2.4 \pm 0.5 \text{ KN/Sec}$.

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

$$\sigma_c = \frac{F}{S}$$

σ_c : Contrainte de compression (en MPa).

F : Charge de rupture (en kN).

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

Pratiquement, l'effort est appliqué par une presse hydraulique de 3000 kN (**Figure II.11**),

La contrainte de rupture est donnée directement par la machine d'essai avec une précision de 0.5 MPa.



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

On aboutit aux résultats regroupés dans le (**Tableau II.13**).

Tableau II.13 : Valeurs de la résistance à la compression du béton des deux compositions

Age (jours)	Valeurs de la résistance à la compression (f_c moyenne (MPa))	
	1 ^{ère} composition (CEM I)	2 ^{ème} composition (CEM II)
7	24.04±4	17.75±2
14	24.90±3	24.61±1
28	32.92±2	30.37±4

II.5.2 Essai de carbonatation accélérée

Après 28 jours de conservation, les échantillons de béton sont placés dans une enceinte hermétique (**Figure II.12**).

II.5.2.1 Principe d'essai

Le principe de l'essai de carbonatation accélérée consiste à introduire du dioxyde de carbone dans une enceinte pouvant maintenir une humidité relative de 65 % et un système d'alimentation en mélange gazeux (50 % de CO₂ et 50 % d'air) [40]. Dans l'enceinte, les échantillons de béton sont disposés espacés de 2 cm l'un de l'autre. Les échantillons à tester sont retirés de l'enceinte après (7,14, 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 [42]. Il colore le béton non carbonaté en rose tandis que le béton carbonaté ne change pas de couleur.

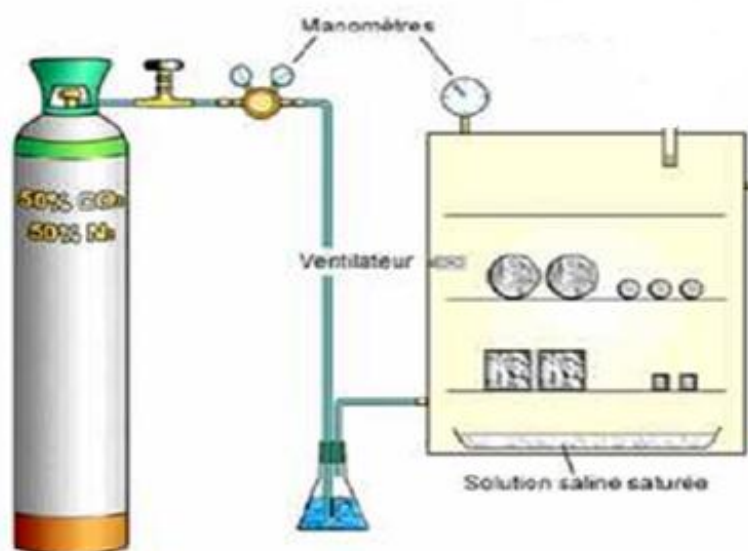


Figure II. 12 : Schéma du système de carbonatation [13]

II.5.2.2 Protocole d'essai

Pour l'essai de carbonatation accélérée, on a utilisé des échantillons de béton de dimensions cubes $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ et des poutres $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ pour chaque composition.

Selon les recommandations AFREM [40], et avant le démarrage de l'essai de carbonatation accélérée, les échantillons qui ont subi une cure en ambiance humide (humidité relative supérieure à 95% ou dans l'eau) pendant 28 jours seront soumis à une phase de pré-conditionnement. Cette phase se compose d'une phase où 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 où elles sont placées dans une étuve réglée à une température de 40 ± 2 °C pendant deux jours. Les deux faces carrées de chaque échantillon 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

L'enceinte de carbonatation accélérée qui se trouve au laboratoire du 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.14**).



Figure II. 14 : L'enceinte de la carbonatation accélérée

Juste après le pré conditionnement, les échantillons sont 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 $65 \pm 5 \%$, avec une température de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Les mesures ont été prises après 7, 14 et 28 jours.

A chaque échéance, les échantillons sont retirés de l'enceinte, pesés coupés en deux. Les faces sont humidifiées avec de l'eau puis pulvérisées de solution de phénolphtaléine à 0,1 g/100 ml d'éthanol. La solution de phénolphtaléine révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée (**Figure II.15**).



Figure II. 15 : Mise en évidence de l'épaisseur carbonatée par la solution de phénolphtaléine

L'épaisseur carbonatée se caractérise par le changement de couleur de l'indicateur qui vire au rose foncé dans la zone non carbonatée et incolore dans la zone carbonatée.

Après quelques minutes 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.

Les mesures correspondent aux distances en millimètres entre la surface externe du béton et le front de coloration, en dehors des coins et lorsque le front de carbonatation passe par une interface granulats-matrice, sont concernés les granulats dont le $D > 3 \text{ mm}$ (**Figure II.16**).

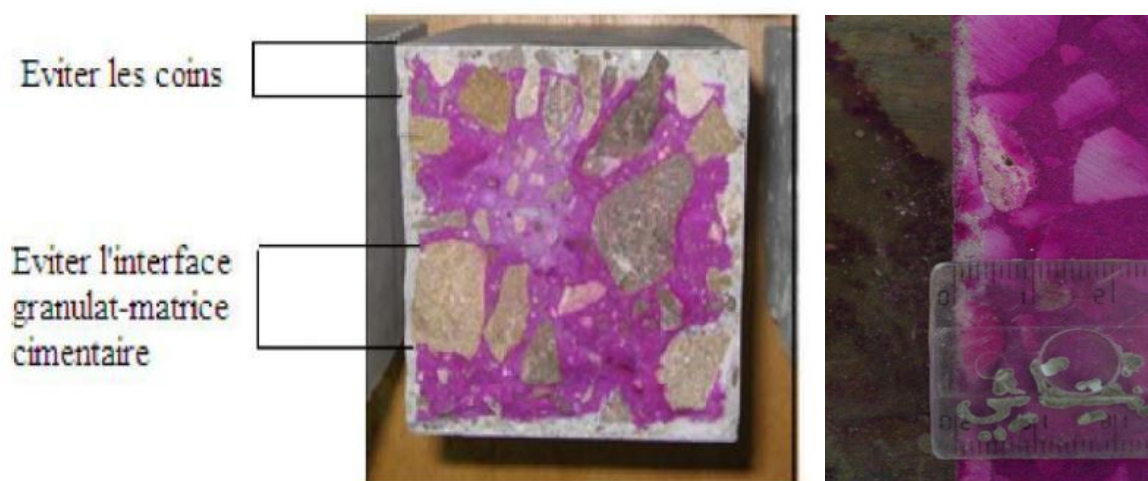


Figure II. 16: Principe de mesure de l'épaisseur carbonatée sur échantillon

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.

II.6 L'effet de la carbonatation sur la ductilité

Afin de quantifier la ductilité en déplacement, nous procédons dans ce qui suit, à l'essai de flexion quatre points sur des poutres en béton armé (témoins et carbonatés) $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$

II.6.1 Essai de flexion à quatre points des poutres

La résistance à la flexion des poutres est mesurée sur des éprouvettes $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ et déterminée par des essais de flexion à quatre points (**Figure II.17**), par la machine de Marque CONTROLS assistée par ordinateur, ayant une vitesse égale à 0.2 KN/s . La résistance est calculée selon la relation suivante:

$$\sigma_f = \frac{(F \times L)}{b^3}$$

Avec:

σ_f : résistance à la flexion [Mpa].

L: distance entre les deux appuis (=300mm).

F: charge maximale enregistrée à la rupture [N].

b = h: côté de l'éprouvette (= 100 mm).



Figure II. 17 : Dispositif de flexion quatre points

II.6.2 Description du dispositif expérimental

L'essai de flexion choisi pour assurer une distribution uniforme de la contrainte.

Le dispositif de flexion quatre points est réalisé comme suit :

- La poutre reposant sur deux appuis constitués par deux rouleaux identiques distants de 30cm, est soumise à une charge transmise par une plaque en fer reposant elle-même sur deux appuis distants de 10 cm de façon à assurer une bonne distribution de la charge et une stabilité.
- Un capteur LVDT de flèche est fixé au milieu de la facette supérieure de l'éprouvette par l'intermédiaire d'un support.

Nous signalons que nous avons utilisé un bâti de flexion 300 KN avec un système d'acquisition DATA LOGGER

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la (Figure II.18)

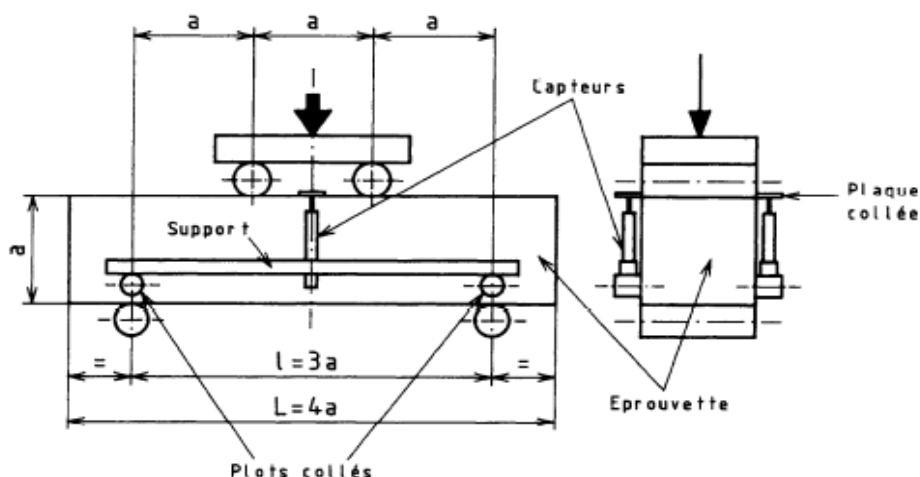


Figure II. 18 : Dispositif d'essai flexion quatre points

La flèche est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacements linéaires à transformateur différentiel (extensomètre LVDT) en appui ponctuel sur une base métallique collée sur la surface du béton au centre de la poutre. (**Figure II.19**), Le support des LVDT était indépendant du bâti et est fixé à un profilé, La course du capteur est 50mm avec une précision de $\pm 10^{-3}$ mm.

Éalablement à la mise en place de la poutre sur les appuis, les poutres ont été peintes en blanc à l'aide d'une peinture, afin de favoriser la visualisation des microfissures lors de l'essai.

Les poutres ont été installées de façon progressive à l'aide d'un appareil. La vérification de la planéité, du centrage et de la position de la poutre était alors primordiale pour éviter l'apparition de phénomène de torsion lors de l'essai.

Lors de ces essais de flexion, la flèche au centre, la charge appliquée et la contrainte ont été enregistrées.

De plus, une surveillance visuelle, nous permet de noter la charge et la flèche qui correspondent à l'apparition de la première fissure.

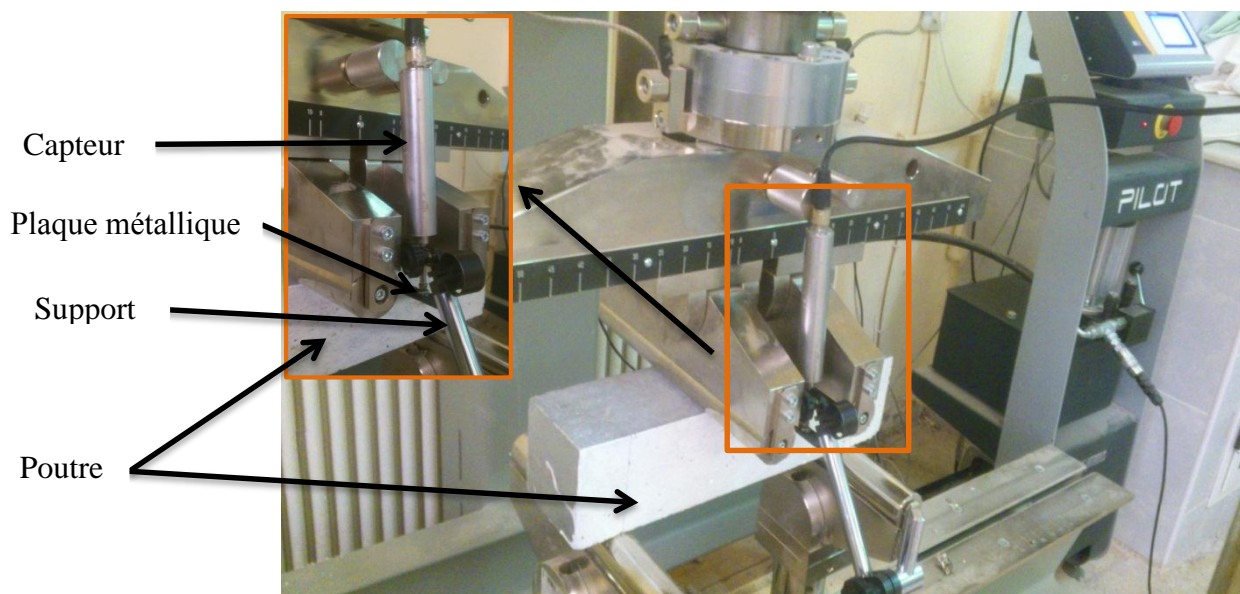


Figure II. 19 : mesure de La flèche

Afin de pouvoir suivre l'évolution du comportement mécanique des poutres carbonatées, des Diagrammes Force-Déplacement ont été tracé.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a caractérisé les différents matériaux utilisés pour la formulation des deux compositions de béton, d'après les résultats obtenus par la méthode de Dreux Gorisse, il s'agit d'un béton qui a une bonne ouvrabilité.

A partir des résultats des différentes formulations de béton, on a confectionné des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) pour l'essai de résistance à la compression et des poutres ($10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$) pour l'essai de flexion quatre points afin de procéder à l'évaluation de la ductilité.

Ce chapitre comprend aussi une présentation de l'essai de carbonatation accélérée avec ces différentes étapes, de la phase de pré-conditionnement jusqu'au commencement de l'essai ainsi que la méthode de mise en évidence de la profondeur de carbonatation sur les échantillons carbonatés.

Chapitre III

Résultats expérimentaux et interprétation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats obtenus, à savoir les masses volumiques et les teneurs en eau des différentes formulations de bétons, ces grandeurs physiques sont nécessaires pour entamer l'essai de carbonatation accélérée.

Afin de quantifier l'effet de la carbonatation sur la résistance à la compression, des échantillons (cubique $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$) ont été soumis à l'essai de carbonatation accélérée selon les recommandations d'AFPC AFREM 1997, D'autres échantillons sont maintenus comme témoins.

A des échéances, 7, 14 et 28 jours, Ces mêmes échantillons ont été soumis à l'essai de compression et des courbes montrant l'évolution de la résistance à la compression ont été interprétées ainsi que d'autres courbes montrant l'évolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps.

Par ailleurs, et afin de quantifier l'effet de la ductilité sur la carbonatation, des poutres $10 \times 10 \times 40 \text{cm}^3$ sont aussi soumis à l'essai de carbonatation accélérée, d'autres sont conservés comme témoins au laboratoire. Ces poutres ont été soumis à l'essai de flexion quatre points, les courbes montrant l'évolution de la flèche en fonction de la charge ont été discutés.

III.2 Masses volumiques et teneurs en eau des échantillons

Les valeurs de l'affaissement du béton formulé des deux compositions (9 cm) reflètent clairement sa bonne maniabilité. Selon la norme NF EN 206-1 [32], la résistance à la compression calculée précédemment montre qu'il s'agit d'un béton de bonne qualité.

Selon les recommandations d'AFPC AFREM, dans la première phase de pré-conditionnement, il faut déterminer les masses volumiques apparentes et la teneur en eau des échantillons avant l'essai de carbonatation accélérée.

Les **Tableaux (III.1 a III.4)** donnent les résultats des masses volumiques et les teneurs en eau des différentes compositions du béton, pour les échantillons (Cubiques et poutres)

Tableau III. 1: Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons (Cubes 10× 10×10) de la 1^{ère} composition (CEM II/B)

Désignation des Échantillons	Masse volumique (KN/m ³)	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Teneur en eau (%)
01	22.96	2316.5	2261.7	2.42
02	23.12	2330.5	2277.7	2.32
03	23.12	2320.8	2271.4	2.17
04	22.95	2317.6	2266.4	2.26
05	22.89	2318.1	2261.2	2.52
06	23.00	2322.8	2271.0	2.28
07	22.95	2312.8	2258.1	2.42
08	22.50	2264.1	2209.5	2.47
09	22.88	2304.8	2249.2	2.47
10	22.68	2286.7	2238.0	2.18
11	23.25	2307.6	2255.0	2.33
12	22.74	2289.2	2236.8	2.34
13	23.10	2324.5	2267.7	2.50
14	23.20	2345.0	2286.5	2.56
15	23.11	2331.7	2276.4	2.43
16	23.20	2344.5	2285.4	2.59
17	23.13	2330.9	2273.4	2.53
18	23.17	2335.0	2278.5	2.48

Tableau III. 2 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons (Poutre 10× 10×40) de la 1^{ère} composition (CEM II/B)

Désignation des Échantillons	Masse volumique (KN/m ³)	Masse humide (Kg)	Masse sèche (Kg)	Teneur en eau (%)
01	24.81	9.816	9.612	2.12
02	24.70	9.978	9.748	2.36
03	24.81	10.03	9.814	2.20
04	24.74	9.932	9.715	2.23
05	25.00	10.134	9.916	2.20
06	24.92	9.888	9.678	2.17

Tableau III. 3 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des (Cubes 10× 10×10) échantillons de la 2^{ème} composition (CEM I)

Désignation des Échantillons	Masse volumique (KN/m ³)	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Teneur en eau (%)
01	22.98	2310.1	2270.2	1.75
02	23.06	2313.8	2272.0	1.83
03	23.16	2336.9	2297.4	1.72
04	22.96	2306.2	2263.1	1.90
05	23.19	2338.2	2296.2	1.82
06	23.33	2364.9	2320.0	1.93
07	23.32	2359.2	2315.7	1.88
08	23.18	2334.3	2287.4	2.05
09	23.28	2349.8	2306.3	1.89
10	23.42	2384.3	2340.1	1.89
11	23.36	2359.0	2318.1	1.76
12	23.25	2334.9	2293.8	1.79
13	23.29	2338.4	2296.2	1.84
14	23.36	2346.3	2298.6	2.07
15	23.44	2366.6	2318.3	2.08
16	23.40	2357.8	2312.8	1.94
17	23.36	2351.0	2307.1	1.90
18	23.42	2364.6	2319.4	1.95

Tableau III. 4 : Valeurs de la masse volumique et de la teneur en eau des échantillons (poutre 10× 10×40) de la 2^{ème} composition (CEM I)

Désignation des Échantillons	Masse volumique (KN/m ³)	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Teneur en eau (%)
01	24.17	10.182	10.042	1.39
02	25.00	10.082	9.930	1.53
03	24.88	10.042	9.893	1.51
04	25.19	10.188	10.037	1.50
05	25.22	10.210	10.066	1.43
06	25.05	10.124	9.978	1.46

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

III.3 Effet de la carbonatation sur la résistance à la compression

Le (Tableau III. 5) suivant montre les résultats de la résistance à la compression des échantillons témoins et carbonatés.

Tableau III. 5 : résistance à la compression des échantillons témoins et carbonatés

Résistance à la compression (MPa)				
Age (jours)	1 ^{ère} Composition (CEM I 42.5)		2 ^{ème} Composition (CEM II/B42.5)	
	Témoin	Carbonaté	Témoin	Carbonaté
7	42.29 ± 1.06	45.20 ± 1.24	38.34 ± 0.59	40.81 ± 0.55
14	43.47 ± 1.99	45.57 ± 1.17	41.08 ± 0.54	42.90 ± 3.29
28	49.67 ± 2.43	52.14 ± 4.20	42.78 ± 2.63	46 ± 1.36

D'après ce tableau, on trace les courbes de variation de la résistance à la compression des échantillons témoins et carbonatés en fonction de la durée d'exposition au CO₂ et ceci pour les deux types de ciment.

Les courbe (**Figure III.1**) montrent l'évolution de la résistance à la compression de béton avec CEM I et CEM II (témoin et carbonaté) en fonction du temps.

B/CEM I 42.5 : (Béton à base de ciment CEM I 42.5)

B/CEM II/B 42.5 : (Béton à base de ciment CEM II/B 42.5)

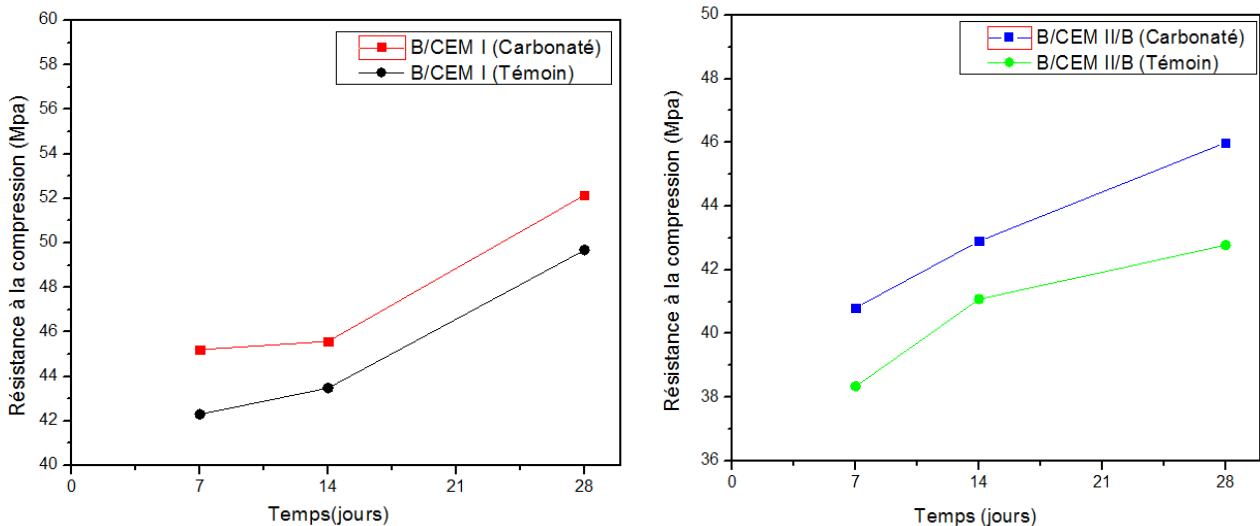


Figure III. 1 : Evolution de la résistance à la compression de béton avec CEM I et CEM II (témoin et carbonaté) en fonction du temps

D'après ces deux courbes, on remarque que la résistance à la compression augmente avec l'évolution de l'âge de béton (témoin et carbonaté) et ceci pour les deux ciments CEM I et CEM II. Ceci est dû (pour les échantillons carbonaté) à ce que le phénomène de carbonatation colmate les pores et augmente la compacité du béton.

La (Figure III. 2) suivante montre une comparaison entre l'évolution de la résistance à la compression (échantillons carbonatés) pour les deux types de ciments (CEM I et CEM II)

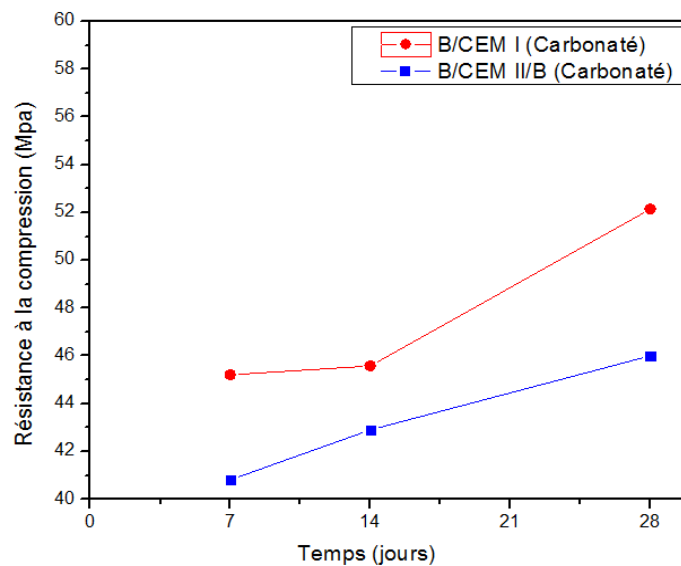


Figure III.2 : Evolution de la résistance à la compression (échantillons carbonatés) pour les deux types de ciments (CEM I et CEM II)

D'après cette courbe on remarque que la résistance à la compression des ciments CEM I est plus importante par rapport au ciment CEM II, ceci est dû à notre avis à ce que le ciment CEM I contiennent un % élevé de clinker qui génère une grande quantité de portlandite comparé au ciment CEM II.

III.4 Evolution de la profondeur de carbonatation pour les deux compositions

Le résultat de l'essai de carbonatation accéléré le plus couramment utilisé est la profondeur carbonatée. Elle est déterminée, selon le mode opératoire AFPC-AFREM, par une méthode colorimétrique, sur une section des éprouvettes $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, à l'échéance de 7,14 et 28 jours.

Les Tableaux (III.6 et III.7) regroupent les résultats de mesure de l'épaisseur de la zone carbonatée des différents types de béton en fonction de la durée d'exposition au gaz carbonique.

Tableau III. 6 : Résultats de mesure de l'épaisseur de la zone carbonatée en fonction de la durée d'exposition au gaz carbonique, béton avec (CEM I).

Age (jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy (mm)	Pr MOY (mm)
7j	1	1	0.5 – 0 – 0	0.5	0	0.25	0.21
		2	0 – 0 – 0	0	0	0	
	2	1	0.5 – 0.5 – 0	0.5	0	0.25	
		2	0 – 0 – 0	0.5	0	0	
	3	1	0.5 – 0.5 – 0.5	0.5	0.5	0.5	
		2	0 – 0.5 – 0.5	0.5	0	0.25	
14j	1	1	0.5 – 0.5 – 0.5	0.5	0.5	0.5	0.42
		2	1 – 0.5 – 0.5	1	0.5	0.75	
	2	1	0.5 – 0.5 – 0	0.5	0	0.25	
		2	1 – 0.5 – 0	1	0	0.5	
	3	1	0.5 – 0 – 0.5	0.5	0	0.25	
		2	0 – 0 – 0.5	0.5	0	0.25	
28j	1	1	1 – 0.5 – 0.5	1	0.5	0.75	0.75
		2	1.5 – 1 – 0.5	1.5	0.5	1	
	2	1	1 – 0 – 0.5	1	0	0.5	
		2	1 – 0.5 – 0	1	0	0.5	
	3	1	1 – 0.5 – 1.5	1.5	0.5	1	
		2	1 – 0.5 – 0.5	1	0.5	0.75	

Tableau III. 7 : Résultats de mesure de l'épaisseur de la zone carbonatée en fonction de la durée d'exposition au gaz carbonique, béton avec (CEM II/B).

Age (jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr _{max} (mm)	Pr _{min} (mm)	Pr _{moy} (mm)	Pr MOY (mm)
7j	1	1	1.5 – 2 – 1	2	1	1.5	1.375
		2	1 – 1 – 1	1	1	1	
	2	1	1.5 – 1.5 – 1	1.5	1	1.25	
		2	2 – 2 – 1	2	1	1.5	
	3	1	1.5 – 1 – 1	1.5	1	1.25	
		2	1.5 – 2 – 1.5	2	1.5	1.75	
14j	1	1	2 – 2.5 – 1	2.5	1	1.75	1.792
		2	2.5 – 2.5 – 1.5	2.5	1.5	2	
	2	1	2 – 2 – 2.5	2.5	2	2.25	
		2	1.5 – 1.5 – 1	1.5	1	1.25	
	3	1	2 – 2.5 – 1	2.5	1	1.75	
		2	1.5 – 2.5 – 1	2.5	1	1.75	
28j	1	1	2 – 1 – 3	3	1	2	2.292
		2	1 – 1.5 – 1.5	1.5	1	1.25	
	2	1	3.5 – 3 – 2.5	3.5	2.5	3	
		2	3 – 2.5 – 2	3	2	2.50	
	3	1	2 – 3.5 – 3	3.5	2	2.75	
		2	2 – 2.5 – 2	2.5	2	2.25	

A partir de ces résultats, on trace les courbes (**Figure III. 3**) représentant l'évolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour les deux compositions.

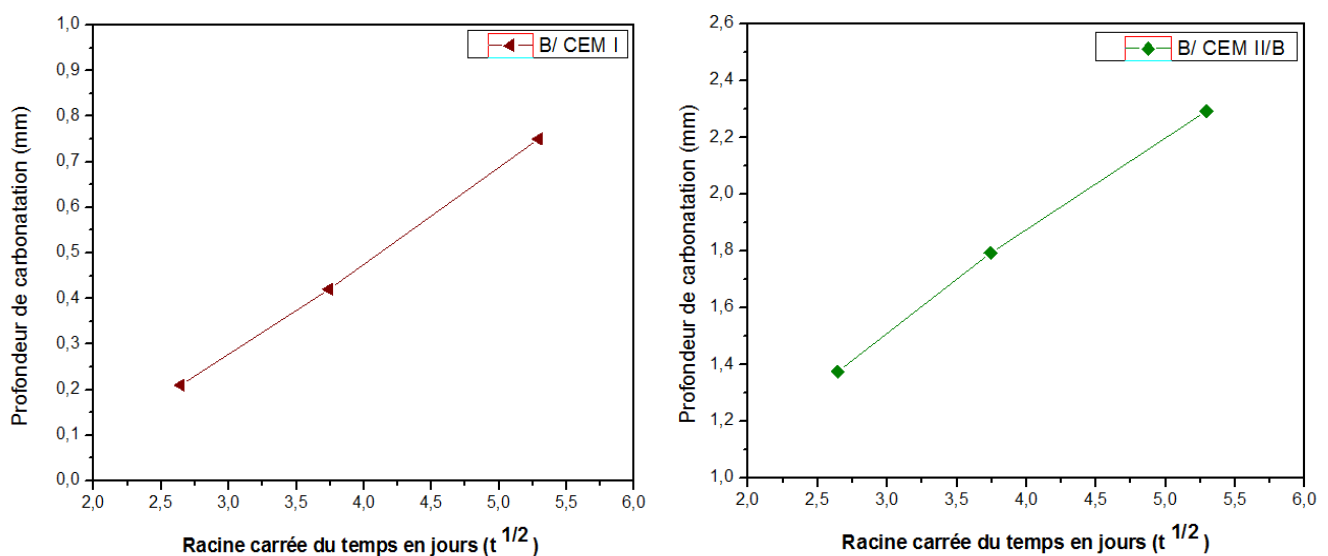


Figure III. 3 : Profondeur de carbonatation de béton avec CEM I et CEM II en fonction de la racine carrée du temps

D'après ces deux courbes, on remarque que la profondeur de carbonatation augmente proportionnellement avec de la racine carrée du temps, et ceci pour les deux ciments CEM I et CEM II, ce qui est en accord avec la littérature.

Par ailleurs, on remarque aussi d'après ces courbes, que l'évolution de la profondeur de carbonatation peut être assimilée à une droite.

La (Figure III.4) suivante montre une comparaison entre l'évolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour les deux types de ciments (CEM I et CEM II).

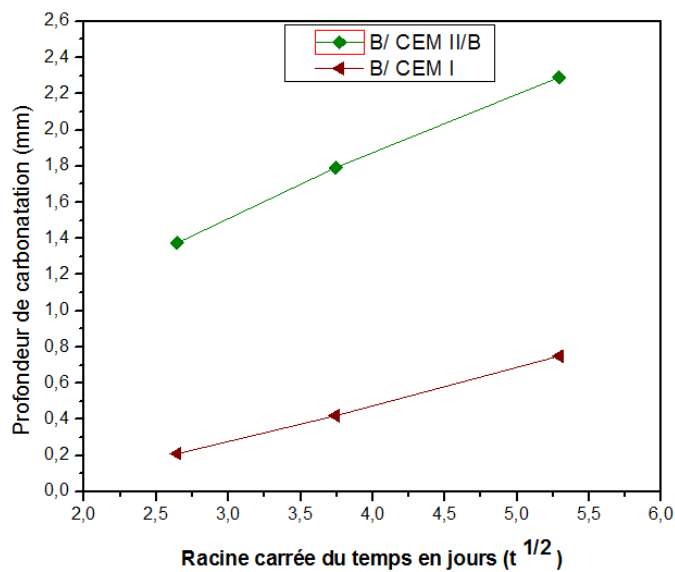


Figure III. 4 : Profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour béton avec CEM I et CEM II

D'après cette courbe, on constate que la profondeur de carbonatation évolue rapidement pour le ciment CEM II comparé au ciment CEM I, cette évolution peut être estimée à presque 80% ce qui est en accord avec les études de [43]. Ceci est dû probablement à ce que la quantité de portlandite dans les ciments CEM II hydratés est moins importante que dans les ciments CEM I.

De plus, des études menées par [43] montrent que la cinétique de carbonatation des bétons à base de CEM II est environ deux fois plus rapide que celle des bétons à base de CEM I.

III.5 Effet de la carbonatation sur la ductilité

Le (Tableau III.8) suivants montrent les résultats charge -flèches pour les différents échantillons (témoins et carbonatés) et pour les différentes formulations (CEM I et CEM II)

Tableau III. 8 : les résultats charge - flèches pour béton avec (CEM I et CEM II)

Charge –Fleche						
Composition	Échantillon	Age (jours)	A la première fissure (mm)		A la rupture (mm)	
			Charge	flèche	Charge	Flèche
CEM I 42.5 (CPA)	Témoin		35	0.401	93.05	2.099
	Carbonaté	7	29.40	0.419	87.77	1.848
		14	25	0.631	82.92	2.479
		28	25	0.706	66	1.692
CEM II/B 42.5 (CPJ)	Témoin		24	0.540	64.14	2.153
	Carbonaté	7	37	0.401	85.47	1.553
		14	35	0.543	85.61	1.826
		28	23	0.456	83.41	1.875

A partir de ces résultats donnés, on trace les courbes (Figure III. 5) représentant (charge - flèches) des poutres carbonatées pour les deux compositions (CEMI et CEM II).

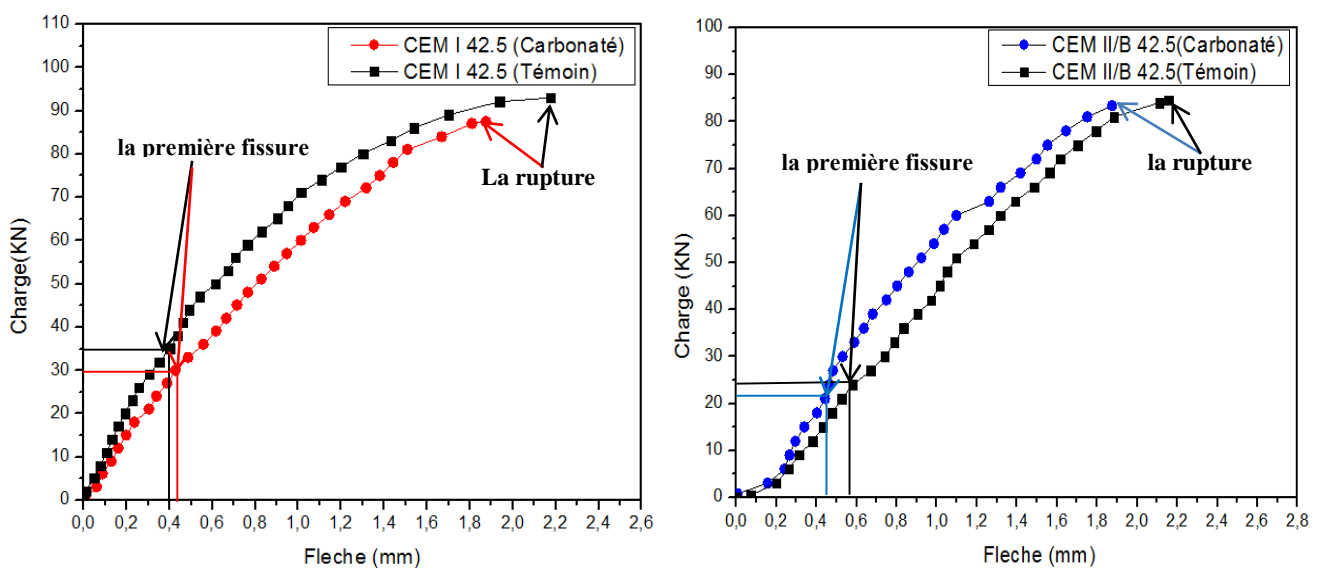


Figure III. 5 : Courbes de Charge –Fleche des poutres carbonatées avec CEM I et CEM II

D'après les courbes précédentes on remarque ce qui suit :

- ✓ La rupture des échantillons carbonatés se produit avant les échantillons témoins pour les deux ciments
- ✓ Les courbes ont pratiquement la même allure, elles sont représentées par une partie linéaire (domaine élastique) et une partie courbe (domaine plastique)
- ✓ On remarque aussi que pour la deuxième courbe (CEM II), la charge de rupture des échantillons carbonatés est légèrement supérieure à la charge de rupture des échantillons témoins

La (**Figure II.6**) suivante montre une comparaison entre Force-flèche des poutres carbonatées pour les deux types de ciments (CEM I et CEM II)

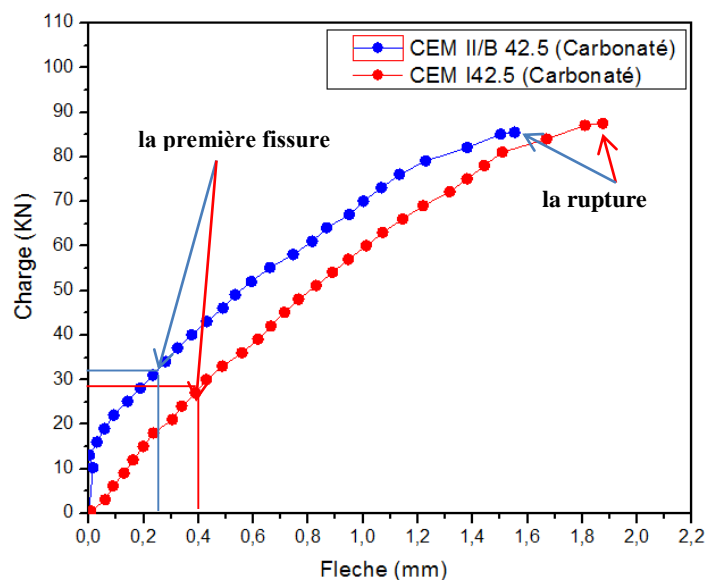


Figure III. 6 : Courbes de Force-flèche pour béton avec CEM I et CEM II

A partir de cette courbe, on voit que la rupture des échantillons CEM II survient avant la rupture des échantillons CEM I, ceci est dû probablement à ce que la carbonatation des ciments CEM II est plus rapide que les ciments CEM I, comme il a été démontré précédemment.

Courbes ductilité

Les (**Tableaux III.9 et III.10**) suivants montrent l'évolution de la ductilité en déplacement des différents échantillons (témoins et carbonatés) et pour les deux compositions de béton (CEM I et CEM II).

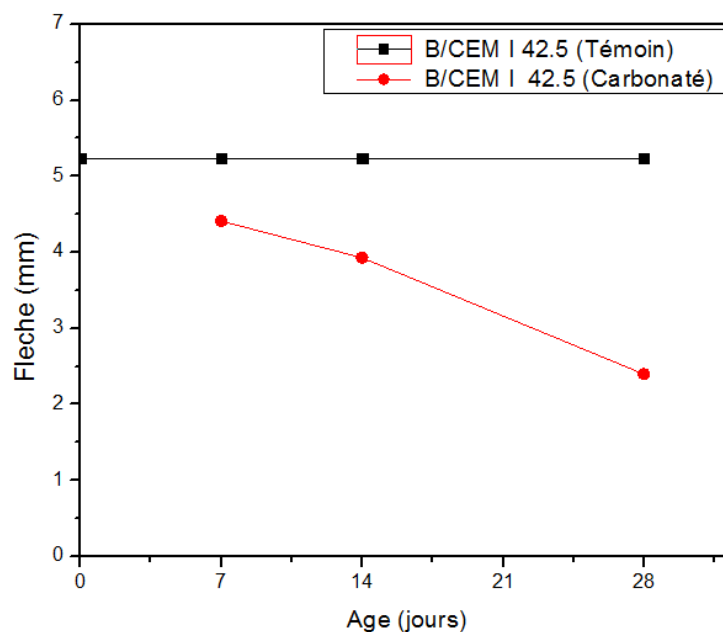
Tableau III. 9 : Ductilité en déplacement pour béton avec (CEM I 42.5)

Ductilité en déplacement (CEM I)					
Composition	Échantillon	Age (jours)	A la première fissure (mm)	A la rupture (mm)	Ductilité
CEM I 42.5 (CPA)	Témoin	0	0.401	2.099	5.234
	Carbonaté	7	0.419	1.848	4.410
		14	0.631	2.479	3.928
		28	0.706	1.692	2.397

Tableau III.10 : Ductilité en déplacement pour béton avec (CEM II/B 42.5)

Ductilité en déplacement (CEM II)					
Composition	Échantillon	Age (jours)	A la première fissure (mm)	A la rupture (mm)	Ductilité
CEM II/B 42.5 (CPJ)	Témoin		0.540	2.153	3.987
	Carbonaté	7	0.401	1.553	3.872
		14	0.543	1.826	3.362
		28	0.456	1.875	4.11

La courbe suivante (**Figure III. 7**) montre l'évolution de la ductilité en fonction de la durée d'exposition au CO₂ des échantillons du ciment CEM I

**Figure III. 7:** facteur de ductilité en fonction de l'âge du béton (témoin et carbonaté CEM I)

D'après la (Figure III.7), on remarque que la ductilité est réduite par la carbonatation, et elle diminue en fonction de la durée d'exposition au CO₂ et cela pour les ciments CEM I. Ce qui est en accord avec les résultats de [21].

La courbe suivante (Figure III.8) montre l'évolution de la ductilité en fonction de la durée d'exposition au CO₂ des échantillons du ciment CEM II

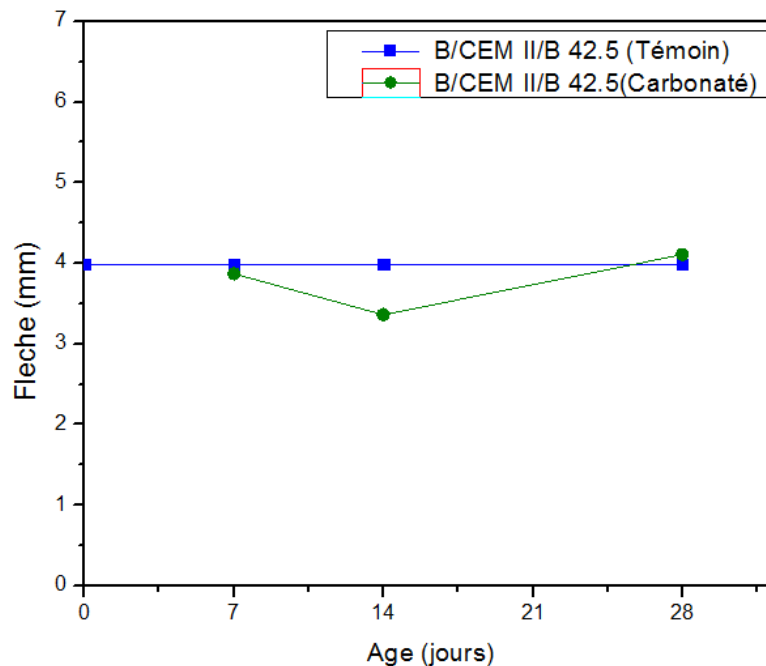


Figure III. 8 : Facteur de ductilité en fonction de l'âge du béton (témoin et carbonaté CEM II)

D'après la courbe ci-dessus, on remarque que la carbonatation influe d'une manière non significative sur la ductilité des bétons en CEM II, vu que ces valeurs sont presque identiques pour toutes les échéances, ceci est du probablement à notre avis à ce que les ajouts cimentaire joue un rôle dans la préservation de la ductilité.

La (Figure II.9) suivante montre une comparaison l'évolution de la ductilité en déplacement en fonction de l'âge des différents échantillons (témoins et carbonatés) et pour les deux compositions de béton (CEM I et CEM II)

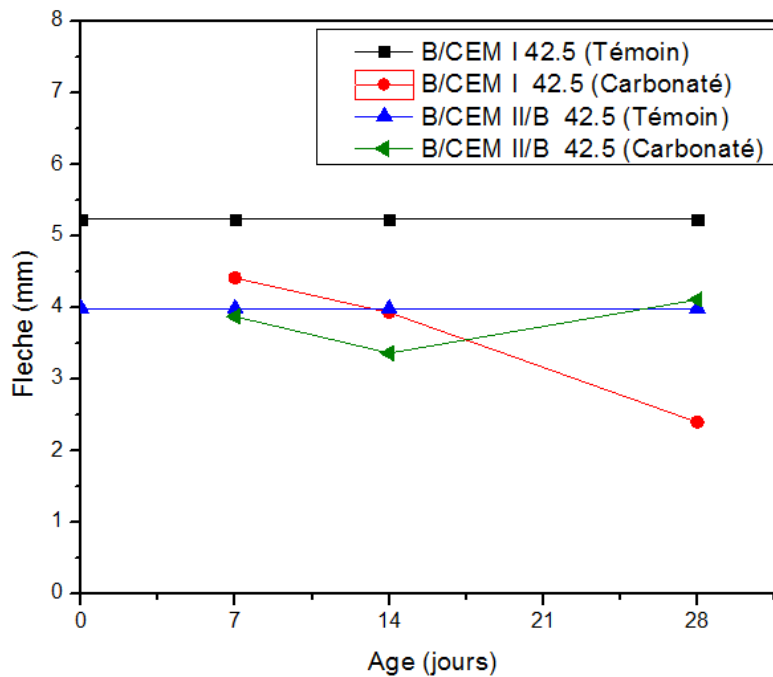


Figure III. 9 : Courbes de ductilité en déplacement pour béton avec CEM I et CEM II

A partir de cette courbe, de comparaison entre les deux ciments on remarque que la carbonatation influe sur la ductilité des bétons deux ciments (CEM I et CEM II), et on voit que la ductilité est réduite par la carbonatation pour les deux types de ciments, et qu'elle réduite don le cas des ciments CEM I, et qu'elle presque constante pour les ciments CEM II.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié l'influence de la carbonatation sur deux caractéristiques importantes des structures en béton armé à savoir la résistance à la compression et la ductilité.

Ce chapitre comprend aussi des résultats concernant, l'évolution de la profondeur de carbonatation pour les deux formulations (CEM I et CEM II)

Ces résultats peuvent être résumés dans ce qui suit :

- ✓ La carbonatation fait augmentée la résistance à la compression des deux bétons
- ✓ La ductilité est réduite pour les bétons CEM I
- ✓ La ductilité n'a pas subi une variation importante pour les bétons CEM II.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif, la contribution à l'étude de l'influence de la carbonatation accélérée sur la résistance à la compression et sur la ductilité des poutres en béton armé, vu que la carbonatation affecte directement les propriétés mécaniques et par voie de conséquences la durabilité des bétons.

Ce travail est subdivisé en trois parties, dans le premier partie, on a traité le phénomène de carbonatation avec tous ses aspects, à savoir les facteurs influençant ce phénomène et ces conséquences sur la durabilité du béton, une attention particulière a été donnée son influence sur la résistance à la compression ainsi que sur la ductilité

A travers la deuxième partie, on a pu mettre le point sur les techniques expérimentales utilisé dans ce travail, en commençant par la caractérisation des matériaux, formulation de béton (méthode de formulation), dans cette partie on a donné une importance au protocole d'essai de carbonatation accélérée ainsi qu'à l'enceinte de carbonatation accélérée disponible au laboratoire de l'université de Laghouat.

Par ailleurs, la méthode de mise en évidence de la profondeur de carbonatation basée sur la variation du PH (méthode de pulvérisation de phénolphtaléine) est aussi décrite.

De plus, la méthode ainsi que l'appareil d'évaluation de la ductilité en déplacement est montrée à travers l'adoption de l'essai de flexion quatre points sur une machine aussi disponible au laboratoire de l'université.

Dans la dernière partie de ce travail on donne les résultats des différents essais, réalisés et leurs éventuelles explications, ces essais visent à évaluer l'effet de la carbonatation sur les deux caractéristiques cités précédemment (résistance à la compression et la ductilité)

Ces résultats peuvent être résumés comme suit :

- ✓ La profondeur de la carbonatation augmente avec la durée d'exposition pour les deux ciments.
- ✓ Celle-ci elle plus importante pour le béton avec ciment CEM II
- ✓ La résistance à la compression augmente avec la carbonatation pour les deux bétons.
- ✓ La ductilité des structures en béton armé est affectée par la carbonatation selon le type de ciment

Conclusion générale

- On remarque que la ductilité est réduite par la carbonatation, et elle diminue en fonction de la durée d'exposition au CO_2 et cela pour les bétons avec ciments CEM I.
- Pour le béton avec ciment CEM II/B, on remarque que la carbonatation influe d'une manière non significative sur la ductilité, vu que ces valeurs sont presque identiques pour toutes les échéances, ceci est du probablement à notre avis à ce que les ajouts cimentaire joue un rôle dans la préservation de la ductilité.

Perspectives

Les perspectives peuvent être résumées dans ce qui suit :

- Elargissement de l'étude de la ductilité sur d'autres types de ciment.
- Etude de l'effet de la durée d'exposition au CO₂ sur la carbonatation.
- La variation de la teneur en CO₂ sur la ductilité.

Enfin, on espère avoir atteint notre objectif et que cette étude a ouvert d'autres perspectives de recherche dans le domaine de la durabilité de béton en vue d'un développement durable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] 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 ;
- [2] Nicolas BUR. «Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux béton éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable». Thèse de doctorat, Ecole doctorale Mathématiques, Sciences de l'information et de l'ingénieur, INSA, 2012;
- [3] Norme EN-197-1, 2000, « Ciments – Partie 1 : Composition, spécifications et critères et conformité des ciments courants »
- [4] M^{elle} AMARNI Lynda, Durabilité des éléments en béton armé en milieu agressif corrosion des armateurs, mémoire de magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012 ;
- [5] Regourd.M et Hornain.H. Applications de la microscopie électronique à balayage. Revue des matériaux de construction. 1975, 693, pp. 73-87.
- [6] Damidot.D et Glasser.F.P. Investigation of the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system at 25 °C by thermodynamic calculations. Cement and concrete Research. 1995, Vol. 25, 1, pp. 22-28.
- [7] Brunetaud.X. Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton. Thèse de doctorat. Paris : Ecole centrale de Paris, 2005.
- [8] Falih, Moro Rafie. Approche de performance pour la durabilité des bétons exposés à la carbonatation. Mémoire de magister .Université de Tlémcen.2012.
- [9] Michaël Dierkenscete. Principales agressions et attaques du béton. LYON – DLL.2011
- [10] THIERY M., Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons – Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées 2005.
- [11] YOON I.K., LU O.C. et PARK K.Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete” Atmospheric Environment Journal, 2007, 41: 7274 – 7285.
-

Références bibliographiques

- [12] Dakhmouche, Fatima-Zohra. Carbonatation de bétons adjuvantés à base de ressources locales Algériennes. Thèse de Doctorat. Université Mentouri Constantine. 2009.
- [13] Ngoc Tru VU ; Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : Approch expérimentale et probabilité ; Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse ; 2011.
- [14] NGALA, V.T., PAGE, C. L.«Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement paste». Cement and Concrete Research,1997, vol. 27. N°7, p 995 1007.
- [15] HYVERT N. “Application de l’approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton”, Thèse de l’Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2009.
- [16] A. Younsi. «Carbonatation de béton à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales». Thèse de Doctorat d’Université de la Rochelle, 2011;
- [17] Sébastien Gieu ; Ductilité des structures en béton armée, diplôme d’ingénieur CNAM, paris 2012.
- [18] Park R., Evaluation of ductility structures and structural assemblages from labortory testing. Bulletin of the New Zeland National Society for Earthquake Engineering, Vol. 22, No 3, 155-165, 1989.
- [19] Gioncu V., Framed structures - Ductility and seismic response General Report, Journal of Construction Steel Research, N°55, 125–154, 2000.
- [20] Catherine. Doneux, ‘Etude du Mécanisme de Transfert des Flexions à la Jonction Poteau Poutre dans les Structures en Portiques Mixtes Soumises à Une Action Sismique’, Thèse de Doctorat, Université de Liège, 2001-2002.
- [21] Jiyanzhuang Xiao,Jie Li,Bolong Zhu,Ziyan Fan,Experimental study on strength and ductility of carbonated concrete elements, construction and Building Materials 16.2002.
- [22] J.–P.BALAYSSAC, CH.-H. DETRICHE, J. GRANDET. «Intérêt de l’essai d’absorption d’eau pour la caractérisation du béton d’enrobage». Materials and Structures, 1993, Vol. 26, pp 226-230;
- [23] J.–P.BALAYSSAC, CH.-H. DETRICHE, J. GRANDET. «influence de la cure humide sur les caractéristiques du béton de peau». Materials and Structures, 1998, Vol. 31.
-

Références bibliographiques

- [24] la norme NFP 18-555, Essai de détermination de la masse volumique absolue, Version Décembre 1990)
- [25] 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, Octobre 1997.
- [26] AFNOR P 18-598,Granulats – Equivalent de sable ,Paris 1990.
- [27] DREUX. G, FESTA. J, «Nouveau guide du béton et ses constituants» Edition Eyrolles, Huitième Edition, 1998.
- [28] la norme EN 933-1 [29] EN 933-2, Mai 1996 – Partie 2: détermination de la granularité – Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures. Indice de classement P 18-622-2.
- [30] NF P18-540, Granulats, Granulats pour bétons hydrauliquespécification,Aout.1994
- [31] Chenafi Mustapha Habib, Etude bibliographique sur la durabilité des structures soumises à la carbonatation, Thèse de master. Université de Laghouat ,2011.
- [32] Normes, européennes. 206-1, NF EN, les bétons de structures prêts à l'emploi ou des bétons réalisés sur chantier. 2005.
- [33] Fouad, G. Cours de TP sur les matériaux de construction. Université de Tlémcen 2014.
- [34] Laid, Guermiti. Contribution à l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de strctures à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques. Ouargla 2013.
- [35] Méthode de Dreux-Gorisse, www.estigc.fr/labo/beton/dreuxgranulats.htm. 2011.
- [36] Normes, françaises. P18-451, Essai d'affaissement. 1981.
- [37] norme NF P 18-400 les éprouvettes doivent obtenues dans des modules conformes à la norme ou prélevées par carottage du béton durci de l'ouvrage,1981.
- [38] RPA/VERSION 2003, «Les règles parasismiques Algériennes», 2003. [39] Normes, Algériennes. NA, 426 Bétons - Essais de béton - document sur internet. 1989.
- [40] 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;
- [41] Normes, françaises. NF P 18-406 Essai de compression. 1981.
-

Références bibliographiques

[42] Normes, françaises. XP P 18-458, Essai de carbonatation accélérée, Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté. 1981.

[43] Dakhmouche Chabil F.Z., «Carbonatation des bétons adjuvantés à base de ressources locales algériennes», Thèse en cotutelle pour l'obtention du grade de docteur de l'université d'Orléans et de l'Université Mentouri de Constantine, décembre, 2009.

[44] H. Wierig. «Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure». RILEM Seminar, Hannover, 1984;



Annexe

Tableau Les 27 produits de la famille des ciments courants Selon EN 197-1:2000

Types principaux	Désignation	Type de ciment	Composition (Proportions pondérales en %) ¹											
			Composants principaux										Composants secondaires	
			Clinker	Laitier de hautfourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						naturelle	naturelle calcinée	siliceuse	calcaïque		L ⁴	LL ⁵		
K	S	D ²	P	Q	V	W	T	L ⁴	LL ⁵					
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95–100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80–94	6–20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-S	65–79	21–35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90–94	-	6–10	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80–94	-	-	6–20	-	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-P	65–79	-	-	21–35	-	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/A-Q	80–94	-	-	-	6–20	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-Q	65–79	-	-	-	21–35	-	-	-	-	-	-	0–5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80–94	-	-	-	-	6–20	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-V	65–79	-	-	-	-	21–35	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/A-W	80–94	-	-	-	-	-	6–20	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-W	65–79	-	-	-	-	-	21–35	-	-	-	-	0–5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80–94	-	-	-	-	-	-	6–20	-	-	-	0–5
		CEM II/B-T	65–79	-	-	-	-	-	-	21–35	-	-	-	0–5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80–94	-	-	-	-	-	-	-	-	6–20	-	0–5
		CEM II/B-L	65–79	-	-	-	-	-	-	-	-	21–35	-	0–5
		CEM II/A-LL	80–94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6–20	0–5
		CEM II/B-LL	65–79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21–35	0–5
	Ciment Portland-composite ³	CEM II/A-M	80–94	6–20									0–5	
CEM II/B-M		65–79	21–35									0–5		
CEM III	Ciment de haut-fourneau	CEM III/A	35–64	36–65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM III/B	20–34	66–80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM III/C	5–19	81–95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
CEM IV	Ciment de pouzzolanique	CEM IV/A	65–89	-	11–35					-	-	-	0–5	
		CEM IV/B	45–64	-	36–55					-	-	-	0–5	
CEM V	Ciment composé ³	CEM V/A	40–64	18–30	-	18–30			-	-	-	-	0–5	
		CEM V/B	20–39	31–50	-	31–50			-	-	-	-	0–5	

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO²) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al²O³) et le fer (Fe²O³). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement,. .etc.) ;
- Secteur industriel.



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98

LAFARGE
لافارج



FICHE TECHNIQUE

ESSANAUBER CI 42.5 HRS 1

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES		CARACTERISTIQUES PHYSIQUES		CARACTERISTIQUES MECANIQUES	
code	% en masse	code		code	en MPa
C14	PF 975°C : ≤ 3.0 ± 0.14	C4	Consistance normale : 23.0 – 25.0 ± 0.04 %	C13	Résistance à la compression : 2j : ≥ 10 ± 1.0 7j : ≥ 23 ± 1.6 28j : ≥ 43 ± 1.8
C20	CaO : 62.0 – 65.0 ± 0.32	C5-A	Début de prise : 110 - 220 ± 16 min		
C20	SiO2 : 20.0 - 23.0 ± 0.22	-	Fin de prise : 157 - 312 ± 17 min		
C20	Al2O3 : 4.07 - 4.80 ± 0.14	C11	Expansion à chaud : 0.0 - 1.0 ± 0.46 mm	**C12	Résistance à la flexion : 2j : ≥ 2.2 ± 0.2 7j : ≥ 5.1 ± 0.3 28j : ≥ 7.2 ± 0.3
C20	Fe2O3 : 4.70 - 5.40 ± 0.04	C2	Aire massique : 2500 - 3263 ± 80 cm ² /g		
C20	MgO : 0.71 - 1.22 ± 0.04	C1	Masse volumique : 3.07 - 3.23 ± 0.02 g/cm ³		
C20	K2O : 0.35 - 0.50 ± 0.04	C8	Refus au tamis 40 µ : 17.13 – 35.56 ± 0.48 %		
**C24	Na2O : 0.07 – 0.18 ± 0.02	C8	Refus au tamis 80 µ : 3.0 – 5.0 ± 0.26 %		
C20	SO3 : 1.00 – 1.4 5 ± 0.12	COMPOSITION POTENTIELLE EN % (selon Bogue)		% DES CONSTITUANTS (Hors gypse)	
C15	RI : ≤ 0.75 ± 0.08	C3S	54.0 – 65.0	Clinker	95 - 100
C18	CaOL : 0.50 - 1.65 ± 0.08	C2S	10.0 – 35.0	Gypse	0 - 5
C23	Cl ⁻ : 0.0 - 0.01 ± 0.01	C3A	≤ 3.00		
C26	CO2 : 0.18 - 2.00 ± 0.14	C4AF	13.45 - 15.80		
		2C3A+C4AF	≤ 20.0		

NORMES OU METHODES APPLIQUEES				Vérifiée par : le Chef Service Assurance Qualité : Approuvée par : Le Directeur Qualité :
Normes	Code des caractéristiques	Méthodes	Codes des caractéristiques	
NT 47. 30/ EN 196-1 NT 47. 15/ EN 196-2 NT 47.31/ EN 196-3 NT 47. 17/ EN 196-6 NT 47.33/ EN 196-21 NF P15 467 fluo.X X 11 640	C13- C12 C14-C15-C16-C17 C4-C5A-C11 C2-C1 C24 C20 C8	Potentiométrie Calcimétrie Dosage à l'éthylène glycol	C23 C26 C18	

*La reproduction de cette fiche n'est autorisée que sous forme intégrale .

*Le produit décrit sur cette fiche est certifié, par l'INNORPI, conforme à la norme NT47.01 équivalente à la norme européenne EN 197.

*Les caractéristiques du produits ci-dessus indiquées sont mesurées au laboratoire de la CIOK qui est accrédité par le COFRAC et le CNA pour tous les essais sauf la détermination des caractéristiques C24 et C12 .

*Les incertitudes indiquées sont propres au laboratoire CIOK et conformes aux normes appliquées .