

---

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
جامعة عين تموشنت  
Institut de Technologie  
Département de Génie Civil



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : TECHNOLOGIE  
Filière : GENIE CIVIL  
Spécialité : STRUCTURES  
Thème

## **L'Effet de la température sur la carbonatation du béton**

Présenté Par :

- 1) KADDOUR AHMED Mohamed
- 2) GHORZI Sara

Devant les jurys composés de :

- Mme Bendouina Khadidja
- Mme Marouf Hafida
- Mme Derbal Ahlem

Présidente  
Examinatrice  
Encadreur

---

Année universitaire 2019/2020

---

## Remerciement

\* Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-puissant, qui nous a donné la force et la volonté pour terminer notre carrière universitaire.

\* Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Madame DERBAL pour ses conseils et pour la qualité de son encadrement exceptionnel, et pour sa patience.

\* Nous remercions beaucoup notre cher professeur MANAA Ghali pour tous ces efforts et pour nous avoir donné un coup de main au niveau de notre stage.

\* Nous remercions tous nos amis qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

\* Ainsi nous attribuons notre reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les remarques nécessaires à la mise en forme de notre recherche.

\* Nous voudrions aussi exprimer notre reconnaissance à Monsieur KEDDOU Adel Professeur de laboratoire de notre université de nous avoir accueilli et permis de réaliser une partie de notre travail, sans oublier madame OUMARI Kawthar qui nous a beaucoup aidé.

# *Dédicace*

*A toute ma famille pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible.*

*A mes amis Amine Ghorzi, Khadori, Lotfi, Yazid, Hamza, Amine et Badie.*

*A mon binôme Sarah, A tous mes collègues qui m'ont aidé à travers les années Abdoulay, Manel, Ikram... Merci d'être toujours là pour moi.*

**Mohamed**

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail a ceux qui m'ont beaucoup soutenu ; mes très chers parents qui m'ont aidé durant toutes ces longues années d'étude.*

*Mon deuxième merci à l'esprit qui est parti pour le ciel, qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.*

*A mon frère et mes sœurs Saïd, Nadia, Fatima et toute la famille Ghorzi.*

*A mon très cher binôme Kaddour Ahmed Mohamed et sa famille.*

*A mes chères amis Fadila, Ikram, Amine et Yousef.*

**Sarah**

## Résumé

Le béton armé est le matériau de construction le plus répandu dans le monde.

Dès le début de l'emploi du « béton moderne » au siècle passé, on a été confronté plusieurs problèmes de durabilité tels que la carbonatation.

À cause de la carbonatation, la durée de vie d'une structure était considérablement plus courte que celle prévue initialement. De plus, les structures en béton sont devenues de plus en plus minces et sont souvent exposées à des conditions climatiques sévères et aux environnements pollués des zones industrielles.

La carbonatation du béton est une réaction qui est pratiquement sans conséquence pour le béton lui-même. Par contre, quand il contient des armatures il n'en est plus de même. L'acier, qui est protégé dans le béton non carbonaté, peut subir la corrosion lorsque le béton carbonate.

La carbonatation est une pathologie qui affecte les matériaux à base de ciment tels que les bétons et les mortiers. Les zones carbonatées du matériau deviennent fragiles et perdent ainsi leur pouvoir de protection des aciers contre la corrosion. Les produits de corrosion engendrent alors une dégradation du béton pouvant aboutir à la ruine de la structure. La carbonatation du béton est un facteur important vis-à-vis de la durabilité des ouvrages. Son action, par abaissement du pH de la phase liquide interstitielle, peut en effet entraîner une corrosion des aciers dans le béton armé.

Ce mémoire a pour objectifs de regrouper toutes les informations nécessaires à la compréhension des mécanismes de carbonatation du béton et les résultats obtenus dans le laboratoire sur l'influence de la température.

---

**Mots clés : Béton armé, La carbonatation, La corrosion, La température**

## **Abstract**

Reinforced concrete is the most common building material in the world.

From the beginning of the use of "modern concrete" in the last century, we have been confronted with many problems of durability such as carbonation.

Due to carbonation, the life of a structure was considerably shorter than initially expected. In addition, concrete structures have become thinner and thinner and are often exposed to severe climatic conditions and polluted environments of industrial areas.

Carbonation of concrete is a reaction that is practically inconsequential for the concrete itself. On the other hand, when it contains reinforcements, it is no longer the same. Steel, which is protected in non-carbonated concrete, can corrode when concrete carbonates.

Carbonation is a pathology that affects cementitious materials such as concrete and mortars. The carbonated zones of the material become fragile and thus lose their capacity to protect steels against corrosion. Corrosion products then degrade the concrete which can lead to the ruin of the structure. The carbonation of concrete is an important factor in the durability of structures. Its action, by lowering the pH of the interstitial liquid phase, can indeed lead to corrosion of steels in reinforced concrete.

This essay aims to bring together all the information necessary to understand the carbonation mechanisms of concrete and the results obtained in the laboratory on the influence of temperature.

---

**Keywords: Concrete, carbonation, corrosion, temperature**

## ملخص

الخرسانة المسلحة هي أكثر مواد البناء شيوعا في العالم.

منذ بداية إستعمال "الخرسانة الحديثة" في القرن الماضي واجهنا العديد من مشاكل المتانة و الصمود منها تآكل الخرسانة.

بسبب تآكل الخرسانة حياة البنايات أصبحت مهددة و أقصر من ما كانت يجب ان تكون بالإضافة أن بنايات الخرسانة اصبحت أرق و أرق و معرضة لعوامل مناخية حادة و بيئات ملوثة من المناطق الصناعية

كربنة الخرسانة هي تفاعل لا يضر كثيرا الخرسانة بحد ذاتها و لكن في الجهة الاخرى عندما تحتوي الخرسانة على تعزيزات حديدية الوضع يتغير ، الحديد يمكنه ان يتآكل عنما تتكربن الخرسانة

الكربنة هي ظاهرة تؤثر المواد الاسمنتية مثل الخرسانة و الهاون ، المناطق المكربنة للمواد تصبح ضعيفة و تفقد قدرتها على حماية الحديد ضد التآكل ، التآكل يسبب تدهور البناية الخرسانية

هذه المذكرة تهدف لجمع كل المعلومات اللازمة لفهم آلية الكربنة و النتائج المحصل عليها في المخبر عن تأثير عامل الحرارة عليها

---

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ، الكربنة ، التآكل ، درجة الحرارة

# Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	IV
<b>I. Chapitre 1 : Généralités sur le béton .....</b>	<b>1</b>
I.1 Introduction.....	1
I.2 Définition de béton .....	1
I.3 Constituants de béton.....	1
I.3.1 Ciment.....	1
I.3.2 Granulats .....	3
I.3.3 Eau de gâchage.....	4
I.4 Les adjuvants .....	4
I.4.1 Le mode d'action des adjuvants.....	5
I.5 Les additions minérales.....	6
I.5.1 Avantage des additions minérales .....	6
I.5.2 Les types des additions minérales .....	6
I.6 Caractéristiques de béton .....	14
I.6.1 Caractéristiques physiques .....	14
I.6.2 Caractéristiques mécaniques .....	16
I.7 Types de bétons.....	16
I.7.1 Béton auto plaçant.....	16
I.7.2 Béton fibré .....	16
I.7.3 Béton à haute performance .....	17
I.7.4 Béton léger .....	17
I.7.5 Béton de sable .....	19
I.8 Conclusion .....	19
<b>II. Chapitre 2 la carbonatation dans le béton.....</b>	<b>20</b>
II.1 Introduction.....	20
II.2 La carbonatation.....	20
II.2.1 Principe de la carbonatation.....	21
II.3 Généralités sur le dioxyde de carbone .....	22
II.3.1 Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère .....	23
II.3.2 Le dioxyde de carbone phase aqueuse .....	24
II.3.3 Données physico-chimiques pour le dioxyde de carbone .....	25
II.4 Carbonatation des constituants de béton.....	26
II.4.1 Carbonatation de la Portlandite.....	26



II.4.2	Carbonatation des C-S-H .....	27
II.4.3	Carbonatation des autres constituants du ciment .....	28
II.5	Méthodes de caractérisation expérimentale de la carbonatation .....	28
II.5.1	Détection par pulvérisation à la phénolphthaléine .....	29
II.5.2	Analyse thermogravimétrique « ATG » .....	29
II.5.3	Microscopie électronique à balayage « MEB » .....	30
II.5.4	Gammadensimétrie .....	30
II.5.5	Diffraction des rayons X « DRX » .....	30
II.5.6	Résonance magnétique nucléaire « RMN » .....	31
II.5.7	Dosage de CO <sub>2</sub> par volumétrie .....	31
II.6	Les paramètres influençant la carbonatation .....	31
II.6.1	Paramètres intrinsèques aux bétons .....	31
II.6.2	Paramètres extrinsèques aux bétons .....	37
II.7	Les conséquences de la carbonatation .....	40
II.7.1	Diminution du pH et amorçage de la corrosion .....	40
II.7.2	Modification de microstructure et la porosité .....	40
II.7.3	Le retrait de carbonatation .....	41
II.7.4	Evolution de la teneur en eau .....	42
II.7.5	Paramètres mécaniques .....	42
II.7.6	Changement des propriétés du transfert .....	43
II.7.7	Les fissurations .....	43
II.8	La corrosion .....	44
II.8.1	Définition .....	44
II.8.2	Le mécanisme de la corrosion des armatures .....	46
II.8.3	Les phases de corrosion .....	48
II.8.4	Les stades de corrosion .....	49
II.8.5	Les conséquences .....	50
II.9	Conclusion .....	50
<b>III.</b>	<b>Chapitre 3 Effet de la température sur la carbonatation du béton .....</b>	<b>52</b>
III.1	Introduction .....	52
III.2	Les Bétons soumis à haute température .....	52
III.3	Effet de la température sur les paramètres influençant la carbonatation du béton .....	52
III.3.1	Influence sur la microstructure .....	52
III.3.2	Influence sur la porosité .....	54
III.3.3	Influence sur la résistance en compression .....	55
III.3.4	Influence sur la perméabilité .....	58

III.3.5	Effet de la température sur la dissolution du dioxyde de carbone .....	60
III.4	Effet de la température sur la carbonatation : .....	61
III.5	Effet de haute température sur la carbonatation du béton .....	67
III.6	Conclusion .....	68
<b>IV.</b>	<b>Chapitre 4 Matériaux et méthodes expérimentales .....</b>	<b>69</b>
IV.1	Introduction.....	69
IV.2	Identification des matériaux.....	69
IV.2.1	Sable de mer.....	69
IV.2.2	Sable de carrière.....	70
IV.2.3	Ciment.....	71
IV.2.4	Pouzzolane .....	72
IV.2.5	Adjuvant.....	75
IV.2.6	Poudre de marbre .....	75
IV.2.7	L'eau de gâchage .....	77
IV.3	Méthodes d'essais .....	77
IV.3.1	Essai de masse volumique.....	77
IV.3.2	Analyse granulométrique .....	78
IV.3.3	Essai Equivalent de sable .....	82
IV.3.4	Essais de Foisonnement .....	82
IV.4	Mortier étudié.....	84
IV.4.1	Formulation de mortier .....	85
IV.4.2	Préparation de mortier.....	85
IV.4.3	Moulage des éprouvettes.....	87
IV.4.4	Démoulage et conservation des éprouvettes. ....	88
IV.5	Essais à l'état frais du mortier.....	89
IV.5.1	Maniabilité .....	89
IV.5.2	L'air occlus .....	90
IV.6	Essais mécaniques sur les mortiers .....	91
IV.6.1	Traitement au four.....	91
IV.6.2	Essai de flexion .....	92
IV.6.3	Essai de compression .....	93
IV.6.4	Essai de carbonatation naturelle.....	93
IV.6.5	Essai de carbonatation accéléré.....	94
IV.7	Conclusion .....	95
<b>V.</b>	<b>Chapitre 5 Résultats et discussion .....</b>	<b>96</b>
V.1	Introduction.....	96

V.2	Interprétations des résultats :.....	96
V.2.1	Essais à l'état frais de mortier .....	96
V.2.2	Essais à l'état durci de mortier .....	97
V.3	Conclusion : .....	116
<b>VI.</b>	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>117</b>
<b>VII.</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>119</b>

## Liste des figures

<b>Figure I-1</b> granulats.....	4
<b>Figure I-2</b> la réaction pouzzolanique .....	7
<b>Figure II-1</b> la progression de la carbonatation .....	20
<b>Figure II-2</b> Processus général de la carbonatation .....	21
<b>Figure II-3</b> Provenance du CO <sub>2</sub> .....	22
<b>Figure II-4</b> la concentration de CO <sub>2</sub> .....	23
<b>Figure II-5</b> Formes possibles du CO <sub>2</sub> dissous en fonction du pH de la solution .....	25
<b>Figure II-6</b> Mécanisme de la carbonatation .....	27
<b>Figure II-7</b> la mesure expérimentale de la profondeur de la carbonatation .....	29
<b>Figure II-8</b> Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment .....	31
<b>Figure II-9</b> Variation de la carbonatation en fonction du dosage en ciment pour une cure de 3 jours	32
<b>Figure II-10</b> Profondeur carbonatée à un an en fonction du dosage en ciment pour toutes les durées de cure.....	33
<b>Figure II-11</b> l'influence du rapport laitier/ciment sur la profondeur de carbonatation de mortiers en exposition naturelles .....	34
<b>Figure II-12</b> Influence du rapport cendres volantes/ciment sur la profondeur de carbonatation de mortiers en exposition naturelle.....	35
<b>Figure II-13</b> L'influence du remplacement du ciment(a) ou des granulats (b) par des cendres volantes sur la profondeur de carbonatation du béton.....	35
<b>Figure II-14</b> Profondeurs de carbonatation déduites de la relation précédente en fonction du temps d'exposition pour diverses valeurs de la résistance à la compression. Les valeurs qui figurent entre parenthèses sont obtenues avec l'équation : $e = 125 \exp(-0,05fc28)$ .....	36
<b>Figure II-15</b> Influence de la résistance en compression à 28 jours sur la profondeur carbonatée avec différents ciments et différentes expositions .....	36
<b>Figure II-16</b> l'influence de l'humidité relative sur la profondeur de la carbonatation .....	38
<b>Figure II-17</b> Profondeur carbonatée estimée par projection de phénolphtaléine en fonction du temps et de la concentration en CO <sub>2</sub> . Résultats obtenus sur béton à base de CEMI carbonaté à 20°C et 65% d'HR.....	38
<b>Figure II-18</b> Effet de paroi au voisinage d'un coffrage .....	39
<b>Figure II-19</b> Comparaison de la profondeur de carbonatation d'un béton avec superplastifiant et d'un même béton sans superplastifiant .....	40
<b>Figure II-20</b> Exemple de corrosion .....	44
<b>Figure II-21</b> Schéma de dégradation des armatures au cours du temps .....	45
<b>Figure II-22</b> Étapes de la corrosion des armatures dans un béton armé .....	48
<b>Figure II-23</b> Les stades de dégradation par corrosion.....	49
<b>Figure II-24</b> Conséquence de la corrosion.....	50
<b>Figure III-1</b> : Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenu par séchage à 105°C ..	54
<b>Figure III-2</b> Evolution de la porosité du béton avec la température .....	55
<b>Figure III-3</b> Courbes de résistance en compression "à chaud" à différentes températures pour un béton de rapport E/C=0,5, d'après Hager .....	56
<b>Figure III-4</b> Résistance à la compression à chaud .....	56

<b>Figure III-5</b> courbes de résistance à la compression du béton avec température .....	57
<b>Figure III-6</b> Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température .....	59
<b>Figure III-7</b> Evolution de la perméabilité intrinsèque avec la température dans les mortiers et les bétons ordinaires et hautes performances .....	60
<b>Figure III-8</b> Solubilité du CO <sub>2</sub> dans l'eau en fonction de la température et sous la pression atmosphérique (PCO <sub>2</sub> = 105 Pa) .....	61
<b>Figure III-9</b> profils de profondeur de carbonatation du béton avec température.....	62
<b>Figure III-10</b> Courbe de déformation de la surface du béton avec température de carbonatation .....	63
<b>Figure III-11</b> Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite (CO <sub>2</sub> =50 %), en fonction de la température .....	65
<b>Figure III-12</b> Impact de la température sur les profondeur carbonatées de mortier à base d'un ciment portland ordinaire à base de filler calcaire CEMII 42.5 .....	66
<b>Figure III-13</b> Effet de la température sur la profondeur de la carbonatation.....	67
<b>Figure IV-1</b> sable mer de la carrière de Targa .....	69
<b>Figure IV-2</b> Sable de carrière Targa .....	70
<b>Figure IV-3</b> Etuve de séchage.....	71
<b>Figure IV-4</b> Pouzzolane .....	72
<b>Figure IV-5</b> Machine Micro devale .....	73
<b>Figure IV-6</b> Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de la pouzzolane.....	73
<b>Figure IV-7</b> Les pores de la pouzzolane .....	74
<b>Figure IV-8</b> graphe de l'analyse par EDS.....	74
<b>Figure IV-9</b> Poudre de marbre .....	76
<b>Figure IV-10</b> Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de marbre .....	76
<b>Figure IV-11</b> Essai masse volumique absolue .....	77
<b>Figure IV-12</b> Masse volumique apparente.....	78
<b>Figure IV-13</b> série des tamis .....	79
<b>Figure IV-14</b> Courbe granulométrique du sable de mer .....	80
<b>Figure IV-15</b> Courbe granulométrique du sable de carrière. ....	81
<b>Figure IV-16</b> Courbe granulométrique du sable de correction .....	81
<b>Figure IV-17</b> Essai Equivalent de sable.....	82
<b>Figure IV-18</b> résultat de l'essai de foisonnement de sable de mer .....	83
<b>Figure IV-19</b> résultat de l'essai de foisonnement de sable de carrière .....	84
<b>Figure IV-20</b> malaxeur.....	86
<b>Figure IV-21</b> les moules .....	87
<b>Figure IV-22</b> Appareil à choc .....	87
<b>Figure IV-23</b> les éprouvettes.....	89
<b>Figure IV-24</b> Principe de fonctionnement du maniabilimètre .....	89
<b>Figure IV-25</b> Appareil de mesure de la teneur en air occlus .....	90
<b>Figure IV-26</b> four.....	92
<b>Figure IV-27</b> Appareil de l'essai de la flexion.....	92
<b>Figure IV-28</b> Principe de l'essai de la flexion d'une éprouvette.....	93
<b>Figure IV-29</b> Appareil de l'essai de la compression.....	93
<b>Figure V-1</b> résultat d'essai d'air occlus.....	97
<b>Figure V-2</b> Résistance à la flexion.....	98
<b>Figure V-3</b> Résistance à la compression .....	99
<b>Figure V-4</b> Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à 200 °C (carbonatation naturelle). 100	
<b>Figure V-5</b> Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à 400 °C (carbonatation naturelle). 101	

<b>Figure V-6</b> Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à 600 °C (carbonatation naturelle).	102
<b>Figure V-7</b> Evolution de la résistance à la flexion des anciennes éprouvettes (carbonatation naturelle).	103
<b>Figure V-8</b> Evolution de la résistance à la compression des mortiers à 200 °C (carbonatation naturelle)	104
<b>Figure V-9</b> La résistance à la compression à 400 °C (carbonatation naturelle)	105
<b>Figure V-10</b> Evolution de la résistance à la compression des mortiers à 400 °C (carbonatation naturelle)	105
<b>Figure V-11</b> La résistance à la compression à 600 °C (carbonatation naturelle)	106
<b>Figure V-12</b> Evolution de la résistance à la compression des mortiers à 600 °C (carbonatation naturelle)	106
<b>Figure V-13</b> évolution de résistance à la compression en fonction de température (28jours)	107
<b>Figure V-14</b> évolution de résistance à la compression en fonction de température (60jours)	107
<b>Figure V-15</b> évolution de résistance à la compression en fonction de température (90jours)	108
<b>Figure V-16</b> Evolution de la résistance à la compression des anciennes éprouvettes	109
<b>Figure V-17</b> carbonatation des gâchés de l'âge 60 jours	110
<b>Figure V-18</b> carbonatation des gâchés de l'âge 90 jours	110
<b>Figure V-19</b> évolution de la profondeur de la carbonatation (200 °C)	111
<b>Figure V-20</b> carbonatation des gâchés de l'âge 60 jours	112
<b>Figure V-21</b> carbonatation des gâchés de l'âge 90 jours	112
<b>Figure V-22</b> évolution de la profondeur de la carbonatation(400 °C)	112
<b>Figure V-23</b> carbonatation des gâchés de l'âge 60 jours	113
<b>Figure V-24</b> carbonatation des gâchés de l'âge 90 jours	113
<b>Figure V-25</b> évolution de la profondeur de la carbonatation (600°C)	114
<b>Figure V-26</b> évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de température (60jours)	114
<b>Figure V-27</b> évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de température (90jours)	115
<b>Figure V-28</b> carbonatation des anciennes gâchés	116
<b>Figure V-29</b> profondeur de la carbonatation des anciennes éprouvettes	116

## Liste des tableaux

<b>Tableau I-1</b> composition minéralogique du ciment	2
<b>Tableau I-2</b> Les types des adjuvants	6
<b>Tableau I-3</b> Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.	14
<b>Tableau II-1</b> physico-chimiques sur le dioxyde de carbone à l'état gazeux et adsorbé dans une solution aqueuse	25
<b>Tableau II-2</b> Volume molaire de calcite, de vaterite et de l'aragonite et de la portlandite	41
<b>Tableau II-3</b> Porosités obtenues par intrusion au mercure sur des mortiers de E/C=0.5	41
<b>Tableau IV-1</b> Analyse chimique du sable de mer	70
<b>Tableau IV-2</b> Composition chimique	71
<b>Tableau IV-3</b> Analyse chimique du ciment	71
<b>Tableau IV-4</b> Composition minéralogique du ciment de Béni-Saf	72
<b>Tableau IV-5</b> composition chimique de la pouzzolane naturelle	73
<b>Tableau IV-6</b> L'analyse par EDS	74
<b>Tableau IV-7</b> Propriétés chimique et physique	75
<b>Tableau IV-8</b> Composition chimique de la poudre de marbre	76
<b>Tableau IV-9</b> Résultats de l'essai de la masse volumique absolue	78
<b>Tableau IV-10</b> Résultats de l'essai de la masse volumique apparente	78
<b>Tableau IV-11</b> Résultats d'analyse granulométrique du sable de mer	80
<b>Tableau IV-12</b> Résultats d'analyse granulométrique du sable de carrière.	80
<b>Tableau IV-13</b> Résultat de l'essai de l'équivalent de sable	82
<b>Tableau IV-14</b> résultat de l'essai de foisonnement de sable de mer	83
<b>Tableau IV-15</b> résultat de l'essai de foisonnement de sable de carrière	84
<b>Tableau IV-16</b> Les différents types de dosage des mortiers étudiés	85
<b>Tableau IV-17</b> Préparation des mortiers.	86
<b>Tableau IV-18</b> Classe de consistance selon la durée d'écoulement	90
<b>Tableau V-1</b> résultats d'essai de maniabilité	96
<b>Tableau V-2</b> résultat d'essai d'air occlus	96
<b>Tableau V-3</b> Résistance à la flexion	97
<b>Tableau V-4</b> Résistance à la compression	98
<b>Tableau V-5</b> La résistance à la flexion à 200 °C (carbonatation naturelle).	100
<b>Tableau V-6</b> La résistance à la flexion à 400 °C (carbonatation naturelle).	101
<b>Tableau V-7</b> La résistance à la flexion 600 °C (carbonatation naturelle).	102
<b>Tableau V-8</b> résistance à la flexion des anciennes éprouvettes (carbonatation naturelle).	103
<b>Tableau V-9</b> La résistance à la compression à 200 °C (carbonatation naturelle)	104
<b>Tableau V-10</b> La résistance à la compression des anciennes éprouvettes	109
<b>Tableau V-11</b> la profondeur de la carbonatation (200 °C)	110
<b>Tableau V-12</b> la profondeur de la carbonatation(400°C)	111
<b>Tableau V-13</b> profondeur de la carbonatation (600°C)	113
<b>Tableau V-14</b> profondeur de la carbonatation des anciennes éprouvettes	115

## Liste des notations

**$\rho$  apparent** : Masse volumique apparente

**$\rho$  absolue** : Masse volumique absolue

**$\mu\text{m}$**  : Micromètre

**$^{\circ}\text{C}$**  : Celsius

**Mpa** : Méga Pascal

**S** : Second

**$\text{CO}_2$**  : dioxyde de Carbone

**$\text{Ca}(\text{OH})_2$**  : Hydroxyde de calcium

**$\text{CaCO}_3$**  : Carbonate de calcium

**$\text{H}_2\text{O}$**  : Eau

**$\text{OH}^-$**  : Hydroxyde

**pH** : potentiel hydrogène



# Introduction générale

Le béton armé est aujourd'hui le matériau de construction le plus répandu dans le monde. Cependant, comme tout être vivant, le béton évolue avec le temps et finit par se dégrader. Certains bâtiments ou équipements peuvent être démolis et remplacés s'ils ne répondent plus aux besoins des hommes. Ce n'est pas le cas pour tous les ouvrages, auxquels l'on exige qu'ils soient non seulement stables, mais assurer un confort d'utilisation constant. Ils doivent être durables...l'un des phénomènes influant le béton c'est la carbonatation.

La carbonatation du béton est un phénomène lent. La vitesse dépend de nombreux facteurs tels que : compacité, dosage en ciment, type de ciment, teneur en eau du béton, degré d'hydratation du ciment, concentration en gaz carbonique de l'air, humidité relative de l'air, et ce qui nous concerne le plus, la température. Les facteurs qui influencent la carbonatation et la corrosion de l'acier sont relativement nombreux et complexes.

## Objective :

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, on a entamé une série d'expérience afin de pouvoir identifier le comportement et la profondeur de la carbonatation des mortiers utilisé sous l'effet de la température.

## Organisation du mémoire :

- Dans le premier chapitre on a effectué une synthèse bibliographique et généralités sur le béton.
- Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse à la carbonatation de béton, les paramètres influençant et les conséquences. Et la corrosion de l'acier.
- Le troisième chapitre expose l'effet de la température sur les paramètres influençant la carbonatation et l'effet direct sur la carbonatation.
- Le quatrième et le cinquième chapitre sont consacré à la partie expérimentale, ou on explique largement notre travail dans le laboratoire.et les résultats de nos travaux.

# Chapitre 1

Généralités sur le béton

## I. Chapitre 1 : Généralités sur le béton

### I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons donner des généralités sur le béton, définition de béton et ses différents composants le ciment, les granulats, adjuvants et les ajouts ... de plus les différents types de béton et ses domaine d'application.

### I.2 Définition de béton

Le béton est un composite hétérogène multiphasique constitué d'un mélange intime de granulats, sable et pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume totale du béton. [1]

Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumique (retrait) et source de résistance pour les granulats. Un béton hydraulique est constitué :

- D'une pâte (ciment + eau)
- D'un mélange granulaire.
- De produits additionnels (adjuvants, additions minérales)

On désigne habituellement sous le nom :

- De matrice ou de mortier : le mélange (liant+sable+eau)
- De squelette solide ou de squelette granulaire : mélange de granulats. [2]

Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situé entre

$$20 \text{ MPa} = f_{c28} = 50 \text{ MPa}$$

### I.3 Constituants de béton

#### I.3.1 Ciment

Les ciments sont des poudres fines obtenues par cuisson à haute température (1450°C) et broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, ils forment

## [Chapitre 1 : Généralités sur le béton]

une pâte susceptible de faire prise et de durcir grâce à une réaction d'hydratation en général exothermique. [3]

Une Pâte = Ciment + Eau.

Un mortier = Ciment + Eau + Sable.

Un Béton = Ciment + Eau + Sable + Graviers. [4]

Composés	Composition	Appellation abrégée	Taux
Silicate tricalcique	3 CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	45 à 65%
Silicate bicalcique	2 CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	15 à 35%
Aluminate tricalcique	3 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	4 à 14%
Alumioferrite tétracalcique	4 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	10 à 18%

**Tableau I-1** composition minéralogique du ciment [5]

### I.3.1.1 Les différents types du ciment

La composition du ciment peut varier en fonction des différents types de besoins, ce qui le divise en plusieurs catégories :

➤ **Le CEMI (ciment portland)** : (contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires), c'est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevée et recherchée.

➤ **Le ciment CEMII A ou B (ciment portland composé)** : (contient au moins 65% de clinker et au plus 35% d'autres constituants), ont pour particularité d'être très maniables ils sont donc utilisés dans les travaux d'usages courants tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.

➤ **Les CEM III A, B ou C (ciment de haute fourneau)** : (contient entre 36 et 80% de laitier de hauts fourneaux et 20 à 64% de clinker), sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables ;

➤ **Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique)** : sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques.

➤ **Les CEM V A ou B (ciment composé)** : (contient de 20 à 64% de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier de hautes fourneaux), ont les mêmes propriétés physiques que CEM III mais pas les mêmes constituants. [6]

### I.3.2 Granulats

Un granulats est constitué d'un ensemble de grains minéraux, qui selon sa dimension, se situe dans l'une des 6 familles suivantes :

- Fillers
- Sablons
- Sables
- Graves
- Gravillon
- Ballast

Les granulats sont utilisés pour la réalisation d'ouvrages de Génie Civil, de travaux routiers et de bâtiments. Ils sont obtenus :

- En exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire, terrestre ou marine.
- En concassant des roches massives.
- Ou encore par recyclage de produits tels que les bétons de démolition.

Leurs natures, leurs formes et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques intrinsèques spécifiques en termes de résistance mécanique et de tenue au gel, ainsi que des propriétés physico-chimiques et des propriétés chimiques.

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Un granulats est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple  $d/D$  ou  $0/D$  avec :

d : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieure du granulat.

Les granulats sont utilisés :

- Directement sans liant : ballast de voies ferrées, remblais, couches de forme des structures routières.
- Solidarisés avec un liant : le ciment pour le béton et les mortiers, le bitume pour les enrobés.

Il est possible aussi de réaliser des mélanges de granulats pour obtenir des distributions granulaires adaptées à chaque utilisation. [7]



**Figure I-1** granulats[8]

### **I.3.3 Eau de gâchage**

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours, le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé.

### **I.4 Les adjuvants**

Par définition, les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans les bétons : moins de 5 % de la masse de ciment. Ce sont souvent des composés organiques, spécialement formulés pour les applications béton, et disponibles commercialement sous forme de solutions aqueuses.

## [Chapitre 1 : Généralités sur le béton]

Ils ont pour but d'améliorer certaines propriétés du matériau. C'est surtout la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement que l'on peut espérer modifier directement.

### I.4.1 Le mode d'action des adjuvants

- Soit mécanique : en modifiant la consistance du mélange.
- Soit physique : en agissant sur la tension superficielle des composants.
- Soit chimique : en modifiant la vitesse de prise du ciment [9]

Nature	Effets
<b>Prise et durcissement</b>	<b>Accélérateur de prise</b> : diminuer le temp de prise du béton <b>Accélérateur de durcissement</b> : accélère le temps de durcissement du béton. <b>Retardateur de prise</b> : ralentit le temp de prise du béton sans l'altérer
<b>Ouvrabilité du béton</b>	<b>Plastifiant</b> : améliorer la maniabilité du bétonsans l'altérer <b>Plastifiant réducteur d'eau</b> : réduit la teneur en eau dans le but d'augmenter la résistance du mélange, tout en ayant une bonne maniabilité. <b>Super plastifiant</b> : <b>Fonction fluidifiant</b> : ( dosage en eau normal) Améliorer la maniabilité mais diminuer la résistance <b>Fonction réducteur</b> : (très faible dosage en eau) entraîne une forte réduction en eau dans le mélange tout en conservant une bonne maniabilité.
<b>Modification de certaines propriétés</b>	<b>Entraîneur d'air</b> : permet la formation de petites bulles d'air réparties de manière homogène. Ce qui augmente la maniabilité

	et la résistance au gel du béton à l'état solide. <b>Hydrofuge</b> : améliorer l'imperméabilité du béton en obturant les pores. <b>Les pigments</b> : offrent la possibilité de modifier la couleur du béton.
<b>Les produits de cure</b>	Produit appliqué à la surface du béton frais, ils ont pour rôle de protéger le béton contre d'éventuels risque de dessiccation.

**Tableau I-2** Les types des adjuvants [10]

### I.5 Les additions minérales

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers et les bétons permettent de jouer sur les caractéristiques mécaniques, à savoir la résistance, les délais de mise en œuvre, la plasticité

Ces ajouts permettent de rendre le mortier/béton très performant. Cependant ils en augmentent le coût.

#### I.5.1 Avantage des additions minérales

L'incorporation des additions minérales comporte plusieurs avantages :

- Un avantage technique, car l'incorporation de particules très fines permet d'améliorer la maniabilité du béton frais, d'augmenter la résistance mécanique et chimique du béton durci, et parfois de limiter la fissuration à chaud.
- Un avantage économique, car les ajouts sont en général des déchets ou des sous-produits industriels nettement moins coûteux que le ciment lui-même.
- Un avantage écologique. La production du ciment Portland nécessite un apport énergétique élevé et engendre des dégagements de gaz à effet de serre. Le remplacement d'une partie du ciment par des ajouts réduit donc l'impact environnemental.

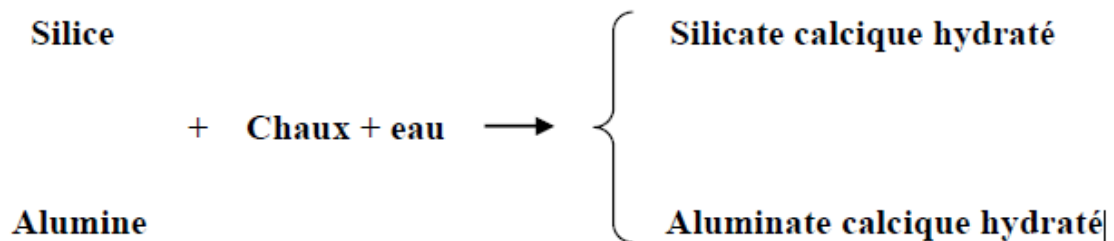
#### I.5.2 Les types des additions minérales



## I.5.2.1 Pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. [11]

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de silice ( $\text{SiO}_2$ ) réactive, d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et en quantité moins importante d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ainsi que d'autres oxydes.



**Figure I-2** la réaction pouzzolanique [12]

Les pouzzolanes ne durcissent pas par elles même lorsqu'elles sont mélangées avec l'eau mais finement broyées elles réagissent à température ambiante et en présence d'eau avec l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dissous pour donner naissance à des composés de silicate de calcium et d'aluminates de calcium stables, peu solubles dans l'eau et comparables à ceux issus du processus d'hydratation des matériaux hydrauliques. [13]

Deux sortes de pouzzolanes sont à répertorier comme constituant principal des ciments courants à savoir :

### I.5.2.1.1 Pouzzolane naturelle

#### I.5.2.1.1.1 Verre volcanique

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.

### *1.5.2.1.1.2 Tufs volcaniques compacts*

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydro thermiques se traduit par la formation des minéraux zéolithiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte

### **1.5.2.1.2 Pouzzolane artificielle**

#### *1.5.2.1.2.1 Cendres volantes*

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux Etats-Unis en 1937

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO) les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8 %, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90%. [14]

#### *1.5.2.1.2.2 Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF)*

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment. Les analyses minéralogiques du LGHF indiquent que la teneur en verre varie de 80 % à 100%. [14]

#### *1.5.2.1.2.3 Argiles calcinées*

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment. L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique. Un autre type d'argile crue peut être traité de la même manière d'origine sédimentaire contenant de l'argile et riche en silice. [14]

### *1.5.2.1.2.4 Fumée de silice*

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ  $0,1\mu\text{m}$ ) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique. [14]

### **1.5.2.1.3 Historique de la pouzzolane**

Pour la construction d'aqueducs, des ponts, d'édifices et de murs de soutènement de quai, les Romains se servaient beaucoup d'un tuf zéolithique, qui est le résultat d'une transformation dans des conditions hydro thermiques des cendres volantes (produit de L'éruption volcanique) qu'ils trouvaient au pied du mont VESUVE, à Pouzzoles, d'où le nom de « pouzzolane » sous lequel était alors connu ce matériau.

Lorsque des matériaux semblables furent découverts en Allemagne en France, en Espagne et dans d'autres parties du monde, le terme « pouzzolane » fut employé pour désigner : tout matériau, quel que soit son origine géologique, qui formait par mélange avec de la chaux un produit liant

Les grecs et les romains avaient remarqué que les matériaux de dépôts volcaniques ,lorsqu'ils sont moulus et mélangés avec de la chaux, donnent un mortier avec une bonne tenue à l'action de l'eau et une résistance mécanique très élevée. Les grecs employaient le tuf volcanique de l'île de Santorin, par contre les romains se servaient d'un tuf volcanique rouge de la région de Naples. Les romains ont beaucoup plus préféré un type de roche qui se trouve aux environs de la ville de Pozzuoli, d'où le nom de pouzzolane sous lequel étaient alors connu tout matériau ayant des propriétés comparables.

Aujourd'hui cette dénomination s'étendue et s'applique à un grand nombre de matériaux. La poudre de tuile ou brique mélangé avec de la chaux en présence d'eau produit le même effet, les poudres de la terre cuite fabriquées spécialement pour cet usage, sont appelées aujourd'hui pouzzolane artificielles. [15]

### **1.5.2.1.4 Effets de pouzzolane**

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

**-A l'état frais :**

## [Chapitre 1 : Généralités sur le béton]

---

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

### **-A l'état durci :**

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

-Accroissement de la résistance finale.

-Légère diminution du retrait et du fluage.

-Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.

-Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.

-Protection des armatures contre la corrosion.

-Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.

-Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.

-Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. **[10]**

### **I.5.2.1.5 Utilisation**

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants :

#### *I.5.2.1.5.1 L'agriculture*

##### *I.5.2.1.5.1.1 La culture en plein champ*

La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols. Elle est riche en silice, en alcalino-terreux, offre pour certaines cultures l'avantage d'un milieu bien aéré, ainsi qu'un meilleur enracinement, un meilleur arrachage, la facilité de reprise des plantes, la réduction du risque de carences et de maladies.

##### *I.5.2.1.5.1.2 Horticulture*

L'herbe pousse mal sur la pouzzolane, son caractère minéral met les toiles plastiques à l'abri des rayons ultraviolets pour la culture horticole en serre.

##### *I.5.2.1.5.2 Applications routières*

Elle sert pour le sablage des routes verglacées. Utilisée comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel). Dans les travaux publics, elle est utilisée comme matériaux de remblais légers, pour la réalisation de terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnée

##### *I.5.2.1.5.3 Dans l'industrie*

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques, sert aussi, comme éléments de décoration (actuellement) les exploitants mettent l'accent sur cet aspect en mettant en avant la touche de couleur qu'apporte la pouzzolane. [4]

### **I.5.2.2 Fillers calcaires**

Ils sont constitués de calcaire broyé. Leur principale fonction est un rôle de remplissage. Une partie du clinker peut être remplacée sans grand impact sur les propriétés finales par un matériau

pratiquement inerte comme le carbonate de calcium qui a une bonne affinité pour les hydrates du ciment. En fait, les fillers calcaires ne sont pas complètement inertes, ils conduisent à la formation de carbo-aluminates de calcium.

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes). Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- Leur dureté, leur porosité. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. [4]

### **1.5.2.3 Poudre de brique**

La poudre de brique est obtenue par le broyage des déchets de briques. Les briques sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000 C°. Par combinaison chimique à partir de 700 C°, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite qui se présente sous forme de tesson céramique et se présente sous forme de blocs de différentes dimensions, utilisé pour la construction et les revêtements.

Les déchets de briques se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes où cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions. Le tesson céramique est une formation de silicates, composé essentiellement de silice, d'alumine, de chaux et d'autres oxydes dans des proportions très variables. [16]

### **1.5.2.4 Poudre de marbre**

La poudre de marbre ou farine de marbre est une charge minérale issue du broyage des blocs de marbre. La poudre de marbre est obtenue du calcaire ou carbonate de calcium très dur. Sa couleur est d'un blanc pur avec des brillances. Elle est utilisée comme charge dans les peintures

et les enduits traditionnels, suivant sa granulométrie, dans les enduits fins et les stucs ainsi que le tadélakt. [16]

### **1.5.2.5 Poudre de verre**

Le verre est un matériau recyclable à 100% ; il peut être recyclé indéfiniment sans perte de qualité. Cependant, le taux de recyclage des déchets de verre reste faible comparé aux autres déchets solides en raison des coûts de nettoyage et de tri des couleurs, du mélange des morceaux brisés, des propriétés incohérentes du verre, du mélange avec les impuretés et de la hausse des coûts d'expédition. L'utilisation de déchets de verre en remplacement partiel dans l'industrie de la construction ouvre de nouvelles perspectives pour l'utilisation de déchets de verre recyclés. Des travaux récents ont montré que le verre recyclé broyé avait des propriétés pouzzolaniques qui permettaient de l'utiliser comme remplacement partiel du ciment dans le béton et le mortier.

#### **Le verre dans les bétons et les mortiers :**

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement.

Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons. Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonflés et ce sont fissurés. Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis presque une vingtaine d'années que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études. [17]

### **1.5.2.6 L'utilisation des ajouts en Algérie**

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Béni – Saf.

## [Chapitre 1 : Généralités sur le béton]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
	Ain Touta	Laitier +calcaire
	Ain El Kebira	Laitier+pouzzolane
	Hamma Bouziane	Laitier+calcaire
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tébessa	Laitier
	Meftah	Tuf/Calcaire
	Raiss Hamidou	Poussière
	Sour El Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
	Béni saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

**Tableau I-3** Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes. [18]

### I.6 Caractéristiques de béton

#### I.6.1 Caractéristiques physiques

##### I.6.1.1 L'ouvrabilité

C'est l'aptitude d'un béton à une bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ces caractéristiques. Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

##### I.6.1.2 La compacité et la porosité

Sont des caractéristiques physiques essentielles du béton, conditionnent plusieurs propriétés de ce dernier telles que sa perméabilité, ses résistances mécaniques, son module d'élasticité et surtout sa durabilité

On distingue les pores contenus dans les granulats leur taille et leur volume n'évoluent pas, par contre ceux se trouvent dans la pâte de ciment, leur dimension diminue avec la progression d'hydratation on distingue :



## [Chapitre 1 : Généralités sur le béton]

---

- Les pores capillaires ( $0,01\mu\text{m} \leq \varnothing \leq 0,5\mu\text{m}$ ) occupent les espaces entre les grains de ciment en suspension dans l'eau, leur taille et leur volume dépendent du rapport E/C. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante de ces pores.

- Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels ( $\varnothing < 40$  angströms) sont présents dans le gel de C-S-H. Le volume de ces pores n'est pas affecté par le rapport E/C.

Ces pores sont divisés en pores inter-cristallites qui se situent entre les gels et les pores intra-cristallites présents à l'intérieur du gel lui-même.

Les bulles d'airs occlus ( $\varnothing > 1\text{mm}$ ) piégées non intentionnellement à l'intérieur du béton lors du malaxage du béton frais. [3]

### **I.6.1.3 La masse volumique**

La masse volumique, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume, et est exprimée en  $\text{t/m}^3$ , en  $\text{kg/dm}^3$ , ou en  $\text{g/cm}^3$ .

Elle est généralement notée par les lettres grecques  $\rho$  (rhô) ou  $\mu$  (mu). On distingue :

#### **I.6.1.3.1 La masse volumique apparente**

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. Il faut donc préciser : masse volumique apparente à l'état compacté ou masse volumique apparente à l'état non compacté.

#### **I.6.1.3.2 La masse volumique absolue**

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains. [19]

### **I.6.2 Caractéristiques mécaniques**

#### **I.6.2.1 La Résistance à la compression**

C'est la propriété, qui en général, est considérée comme la plus importante des propriétés du béton. Cette résistance, projette une image globale de la qualité d'un béton. Elle définit la force maximale de compression à laquelle le béton peut résister. La résistance d'un béton courant est en grande partie, liée à l'homogénéité de son squelette granulaire.

#### **I.6.2.2 La résistance à la flexion**

La flexion est une déformation au cours de laquelle l'axe des barres rectilignes fléchit ou alors la courbure des barres curvilignes change après déformation. Dans le cas présent, la flexion c'est l'état du béton qui est fléchi, sous l'effet de la force normale à sa section. Lorsque le béton fléchi, il oppose une résistance à la force de flexion. Cette résistance qu'il oppose est sa résistance à la flexion.

#### **I.6.2.3 La résistance à la traction**

La résistance à la traction désigne la résistance d'une surface contre une force de traction qui s'exerce verticalement à la surface. C'est une force qu'il oppose le béton contre une sollicitation de type allongement. [7]

### **I.7 Types de bétons**

#### **I.7.1 Béton auto plaçant**

Le béton auto plaçant (BAP) est un béton de ciment capable, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec résultat un produit très homogène. Ce type de béton doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec, cependant, une vitesse dépendant de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un super plastifiant. [20]

#### **I.7.2 Béton fibré**

Le béton fibré est un matériau dans lequel sont intégrées des fibres synthétiques ou métalliques de dimensions diverses et réparties de manière homogène dans la masse du béton. Il existe

différents types de fibres, ayant des impacts variables sur le béton. Elles ont par exemple pour fonction d'améliorer certaines caractéristiques du béton telles que la résistance en flexion ou la limitation de la fissuration.

Il existe différentes catégories de fibres :

- Les fibres métalliques.
- Les fibres organiques.
- Les fibres minérales. [21]

### **I.7.3 Béton à haute performance**

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre ;
- un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.

Ils présentent une micro-texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs. [22]

### **I.7.4 Béton léger**

Les bétons légers sont des bétons à haute porosité dont la masse volumique apparente Varie dans les limites de 500 à 1800 Kg/m<sup>3</sup>. Les bétons, dont la masse volumique est Inférieure à 500 Kg/m<sup>3</sup> sont classés comme bétons extra-légers. On distingue 3 types de bétons légers :

- Béton caverneux (sans sable).
- Béton à agrégats légers poreux.
- Béton cellulaire.

#### **I.7.4.1 Le béton caverneux :**

Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et

de l'air reste contenu entre les granulats. En fait, il s'agit de bétons dont on a supprimé tout ou partie de l'élément fin et du liant correspondant servant à son enrobage. Ces bétons ont donc une porosité élevée ; ils sont drainants. Buts recherchés : béton économiques, gains de poids, bonne isolation thermique.

### **1.7.4.2 Le béton cellulaire :**

Les bétons cellulaires sont des matériaux légers d'aspect très poreux et de couleur généralement blanchâtre ou grise. Leur dénomination provient de leur structure alvéolaire.

Ils contiennent en effet une multitude de petites cavités sphériques ne communiquant pas entre elles dont la taille est de l'ordre du millimètre. On peut classer les bétons cellulaires en deux catégories selon leur mode de fabrication :

**Le béton gaz (obtenue par réaction chimique) :** où les alvéoles sont obtenues par l'adjonction d'un produit chimique générateur de gaz jouant le rôle d'une levure (poudre d'aluminium ou de zinc, eau oxygénée, ou carbures de calcium par exemple).

**Le béton mousse (obtenue par réaction physique) :** où les cavités résultent de l'adjonction de substances qui moussent sous l'action d'un malaxage (détergents, savons, résines spéciales). Le béton cellulaire peut être obtenu avec des densités variant de 0,200 à 1,800 et des conductivités thermiques de 0,116 à 0,700 W/(mK) en fonction des domaines d'utilisation.

### **1.7.4.3 Béton à agrégats légers :**

La masse volumique du béton peut varier d'un peu plus de 300 à environ 1850 kg/m<sup>3</sup> et la résistance correspondante de 0,3 à 70 MPa, atteignant parfois même 90 MPa. La grande diversité de composition se retrouve dans la grande variété des propriétés des bétons de granulats légers qui sont des matériaux poreux pulvérulents, naturels ou artificiels. Les bétons légers de structure, utilisés pour la fabrication d'éléments porteurs, sont généralement fabriqués avec des granulats légers manufacturés (argile, schistes et laitiers expansés ou cendres volantes frittées). La résistance à la compression minimale recommandée par l'ACI est alors de 17 MPa à 28 jours. Les bétons légers de faible densité ont été fabriqués avec des granulats ultra légers et très poreux (vermiculite exfoliée, perlite expansée) ou avec une matrice cellulaire. Dans ce dernier cas, l'incorporation de bulles d'air peut être faite par génération de gaz dans le matériau à l'état plastique ou par entraînement d'air au cours du malaxage.

## [Chapitre 1 : Généralités sur le béton]

---

Ces bétons sont de très bons isolants Thermiques, mais ils doivent bien souvent être traités à l'autoclave pour atteindre une Résistance suffisante. D'autres granulats non absorbants et plus résistants sont aussi Disponibles (verre et polystyrène expansés). Les bétons de résistance modérée sont dotés de propriétés intermédiaires. Ils peuvent être fabriqués avec des granulats concassés naturels, comme la pierre ponce, les tufs et autres roches d'origine volcanique, ou avec un mortier aéré. La pierre ponce fut par ailleurs le premier granulats léger à être utilisé, notamment pour la construction du dôme du Panthéon et du Colisée à Rome. [23]

### I.7.5 Béton de sable

Le béton de sable est un béton fin constitué par mélange de sables, de ciment, d'additions et d'eau, D'autres additions peuvent être incorporées adjuvants, fibres, gravillons. Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton où le gros granulats est les sables ( $D_{max} = 5\text{mm}$ ), il ne consomme que (250 à 400)  $\text{Kg}/\text{m}^3$  de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimale étant atteinte par un ajout complémentaire de fines (Fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400 à 600)  $\text{Kg}/\text{m}^3$ . L'incorporation de gravillons est possible tant que le rapport massique gravillons/sable reste inférieur à 0,7. La norme précise qu'on parle alors de béton de sable chargé. On peut également admettre l'emploi d'un granulats de granulométrie continue de 0 mm à 8 mm maximum tant que le rapport massique entre les éléments supérieurs à 4 mm et les éléments inférieurs à 4 mm reste inférieur à 0.7 mm. [24]

### I.8 Conclusion

- Le béton est un matériau très en demande et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable.
- L'emploi du béton, en grande quantité, nous permet d'affirmer que ce matériau est toujours en évolution. Ainsi, aujourd'hui, on dispose d'une large gamme de bétons et l'on choisit donc, pour chaque type d'ouvrage le béton adéquat. Nous citerons comme exemple les bétons légers, les bétons lourds,.....etc.

# Chapitre 2

La carbonatation dans le béton

## II. Chapitre 2 la carbonatation dans le béton

### II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les phénomènes physico-chimiques de carbonatation du béton, la détermination de la résistance d'un béton à la carbonatation par la mesure de profondeur de la zone carbonatée, à une ou plusieurs méthodes d'essais. Ensuite un résumé sur les paramètres influençant la carbonatation est présenté. De plus une étude théorique sur les conséquences de la carbonatation des matériaux cimentaires, ainsi qu'une description de mécanisme de transport du gaz  $\text{CO}_2$  à travers un matériau poreux et la corrosion dans le béton.

### II.2 La carbonatation

La carbonatation des bétons et mortiers est un phénomène qui n'altère pas le matériau. En effet, les résistances mécaniques et les modules d'élasticité augmentent, tandis que la perméabilité et la porosité diminuent grâce à la formation des carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ).

Par ailleurs, lorsque le béton est armé, la carbonatation du matériau qui enveloppe l'acier supprime l'immunité dont bénéficie ce dernier. En effet, la carbonatation des composés hydratés du ciment par dioxyde de carbone de l'air ( $\text{CO}_2$ ) diminue le pH de la solution interstitielle d'une valeur de l'ordre de 12.6 à une valeur inférieure à 9 de telle sorte que la pellicule d'oxyde passive protégeant l'acier n'est plus stable. Le film de passivation se détruit et la corrosion peut alors se développer en milieu aéré et humide.

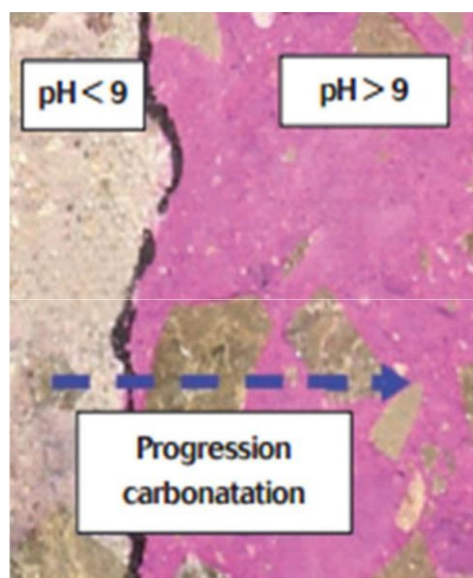
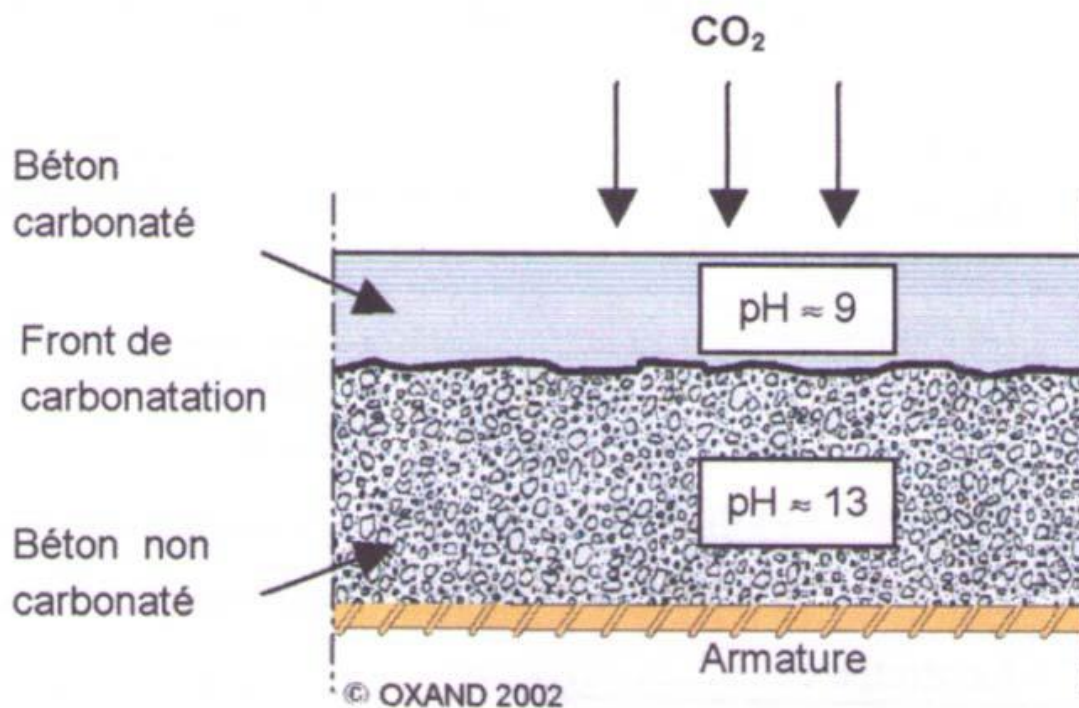


Figure II-1 la progression de la carbonatation [25]

### II.2.1 Principe de la carbonatation

L'atmosphère de notre planète contient en moyenne 0,03 à 0,04 % de CO<sub>2</sub>. Cette concentration en dioxyde de carbone varie localement avec la température, la pression atmosphérique et la proximité éventuelle d'une agglomération.

Dans les zones fortement industrialisées, dans les parkings et aux abords des grands axes routiers, la quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique peut être multipliée par un facteur trois ou quatre pour atteindre 0,1 %. [26]



**Figure II-2** Processus général de la carbonatation

La carbonatation des bétons est la réaction de neutralisation des bases présentes dans le ciment hydraté, essentiellement la Portlandite et les CSH, par le dioxyde de carbone naturellement présent dans l'air à raison d'environ 0,035 % en volume. Le processus de carbonatation peut être succinctement décrit comme suit : le dioxyde de carbone atmosphérique diffuse dans le béton sous forme gazeuse, se dissout dans la solution interstitielle et réagit avec les hydrates de la pâte de ciment, notamment la Portlandite, pour former des carbonates de calcium CaCO<sub>3</sub> qui existent à l'état solide sous trois formes cristallines différentes : la calcite, l'aragonite et la vaterite. Cette réaction s'accompagne d'une diminution du pH de la solution interstitielle à une valeur inférieure



## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

à 9 dépassant ainsi les aciers dans le cas du béton armé ou précontraint et favorisant, par conséquent, leur corrosion. [27]

Le processus de carbonatation, qui correspond à la réaction du  $\text{CO}_2$  avec tous les hydrates du ciment et plus particulièrement avec la chaux hydratée, est généralement schématisé de la manière suivante :



### II.3 Généralités sur le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est produit par différents processus : la combustion du charbon et des hydrocarbures, la fermentation des liquides et la respiration des êtres vivants. On le trouve en faible proportion dans l'atmosphère, il est assimilé par les plantes qui, à leur tour, produisent de l'oxygène par photosynthèse.

Le  $\text{CO}_2$  gazeux a une odeur légèrement irritante, il est incolore et plus lourd que l'air. Il gèle à  $-78,5^\circ\text{C}$  pour former de la neige carbonique. En solution aqueuse, il forme de l'acide carbonique, qui est trop instable pour pouvoir être isolé facilement.

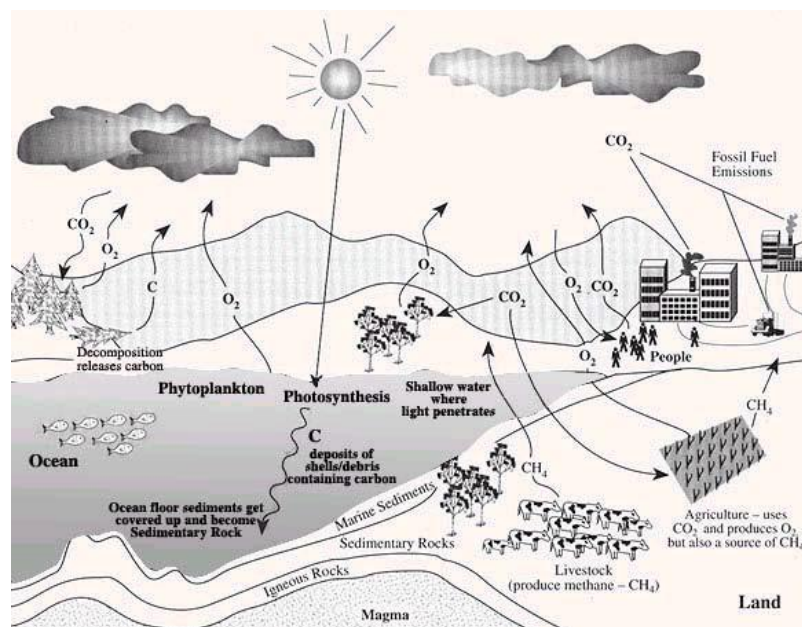


Figure II-3 Provenance du  $\text{CO}_2$  [27]

## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) présent dans l'air pénètre sous forme gazeuse dans le béton par le réseau poreux ou fissural. En présence d'eau (qui existe au moins dans les pores les plus petits), il provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée, c'est la carbonatation. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, notamment la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et les C-S-H en carbonates de calcium  $\text{CaCO}_3$ . Ce processus, engendre la réduction du pH de la solution interstitielle du matériau d'une valeur avoisinant 13 à environ 9. Non protégées par le milieu initialement très basique, les armatures s'exposent à la corrosion qui provoque des désordres dans la construction par gonflement et fissuration. Cette carbonatation a pour conséquence une modification lente de la structure du matériau et un changement de son comportement. [28]

### II.3.1 Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère

La concentration du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère est un facteur principal qui agit sur la vitesse de carbonatation du béton. Elle favorise la carbonatation et par suite la corrosion des armatures dans le béton.

En milieu rural, la fraction volumique en  $\text{CO}_2$  est d'environ 0,03%. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 1% ; dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1%. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de  $\text{CO}_2$ .

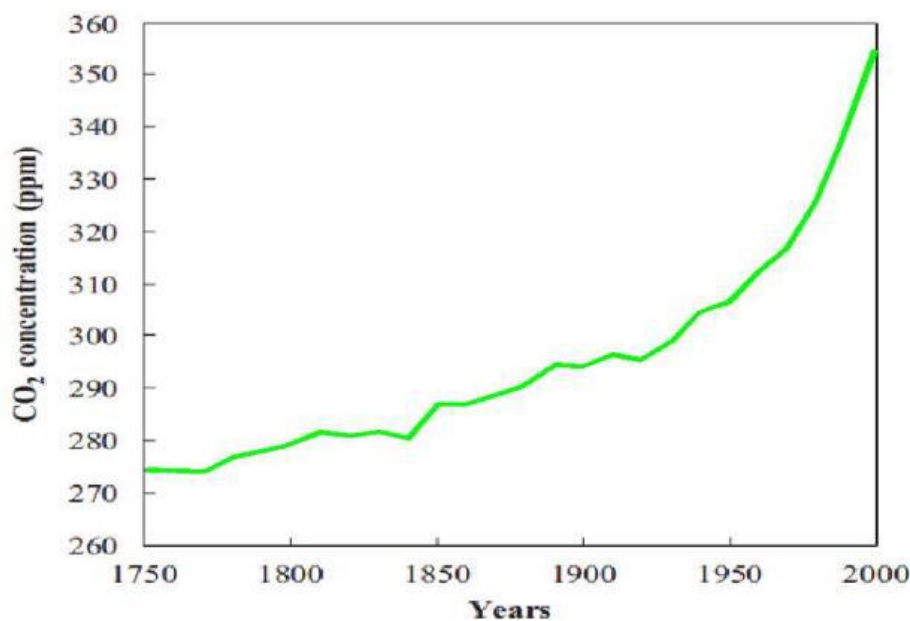


Figure II-4 la concentration de  $\text{CO}_2$  [29]

## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

---

Le réchauffement de la planète est dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, tel que le CO<sub>2</sub> : il s'agit d'un des problèmes environnementaux les plus critiques pour le 21<sup>ème</sup> siècle. La concentration de CO<sub>2</sub> dans la couche atmosphérique a augmenté constamment depuis la révolution industrielle. Depuis 1950 elle augmente de 0,5 % par année sur une échelle globale, et particulièrement dans les zones urbaines. Il est probable que le changement climatique ait ainsi dans le futur une incidence sur la carbonatation des structures en béton. [29]

### II.3.2 Le dioxyde de carbone phase aqueuse

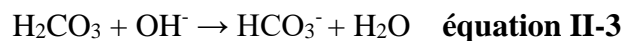
#### II.3.2.1 Dissolution du CO<sub>2</sub> dans la phase liquide des pores

Le dioxyde de carbone gazeux soumis aux gradients de concentration diffuse dans l'espace poreux pour finalement se trouver en contact avec l'eau interstitielle. La solution interstitielle est l'interface entre la phase gazeuse contenant le CO<sub>2</sub> et la phase solide renfermant la portlandite carbonatable. La dissolution du CO<sub>2</sub> dans la solution interstitielle est une étape fondamentale dans le processus chimique de carbonatation. Le CO<sub>2</sub> en solution peut prendre différentes formes en fonction du pH de la solution considérée.

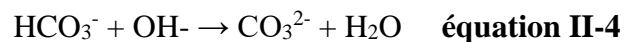
- Si le pH de la solution des pores est inférieur à 4, il se forme de l'acide carbonique.



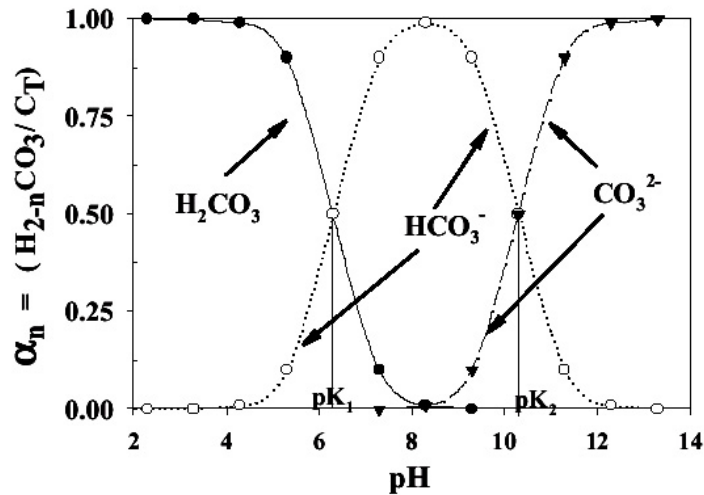
- Si le pH est compris entre 6 et 10,5, la forme principale obtenue par dissociation est l'ion bicarbonate.



Si le pH de la solution est supérieur à 10,5, l'espèce majoritaire en solution est l'ion carbonate.



Cette dernière configuration correspond au cas des solutions interstitielles des matériaux cimentaires fortement basiques tout au moins avant tout processus d'attaque chimique, y compris la carbonatation. Par contre, au cours de la carbonatation, le pH de la solution interstitielle du béton passe d'une valeur très basique, proche de 13, à une valeur inférieure à 9. Les domaines de prédominance disjoints sont illustrés en Figure II-5



**Figure II-5** Formes possibles du CO<sub>2</sub> dissous en fonction du pH de la solution [28]

### II.3.3 Données physico-chimiques pour le dioxyde de carbone

Le tableau rassemble quelques données physico-chimiques sur le dioxyde de carbone à l'état gazeux et adsorbé dans une solution aqueuse. [28]

Diamètre moléculaire du CO <sub>2</sub> gazeux (mm)	0,426
Libre parcours moyen de CO <sub>2</sub> gazeux à 0°C et 10 <sup>5</sup> Pa (mm)	63
Viscosité dynamique du CO <sub>2</sub> gazeux à 0°C (Pa.s)	1,39
Viscosité dynamique du CO <sub>2</sub> gazeux a 20°C (Pa.s)	1,48
Coefficient de diffusion de CO <sub>2</sub> gazeux dans l'air à 0°C et 10 <sup>5</sup> Pa (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	1,39.10 <sup>-5</sup>
Coefficient de diffusion de CO <sub>2</sub> gazeux dans l'air à 20°C et 10 <sup>5</sup> Pa (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	1,60.10 <sup>-5</sup>
Coefficient de diffusion de H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	7,2.10 <sup>-10</sup>
Coefficient de diffusion de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	11,8.10 <sup>-10</sup>
Coefficient de diffusion de CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	9,6.10 <sup>-10</sup>

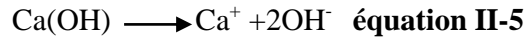
**Tableau II-1** physico-chimiques sur le dioxyde de carbone à l'état gazeux et adsorbé dans une solution aqueuse [28]

### II.4 Carbonatation des constituants de béton

La carbonatation est un processus physico-chimique complexe qui met en jeu des réactants et réactifs à l'état gazeux ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), dissous ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{OH}^-$ , etc....) et solides (les composés anhydres et hydratés du béton).

#### II.4.1 Carbonatation de la Portlandite

Le passage en solution du  $\text{CO}_2$  suivant les réactions suivantes entraîne une baisse de la concentration en ion  $\text{OH}^-$  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 (**équation II-6**) pour former du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ .



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



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

Trois isomorphes du carbonate de calcium existent : l'aragonite, la vaterite et la calcite. Cette dernière est la forme la plus stable dans les conditions usuelles de température et de pression lors des essais de carbonatation accélérée. **La Figure II-7** illustre l'intervention combinée des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus de carbonatation de la portlandite. [29]

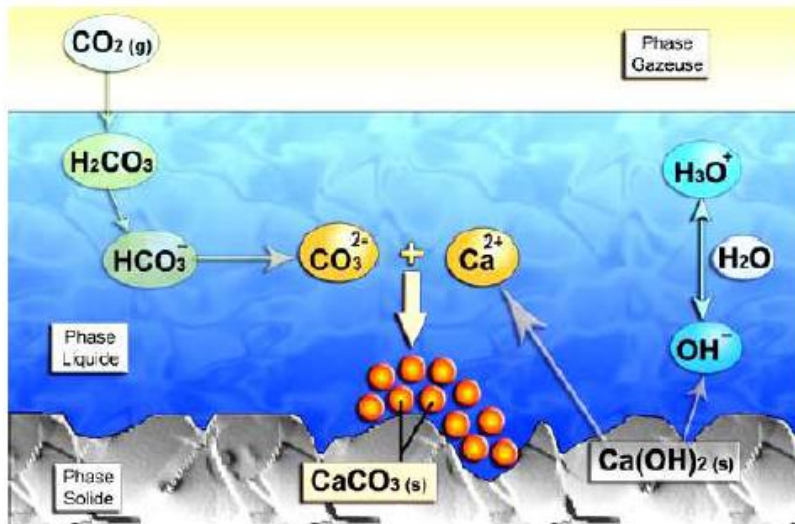
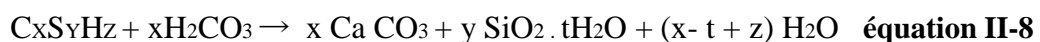


Figure II-6 Mécanisme de la carbonatation [29]

#### II.4.2 Carbonatation des C-S-H

Les C-S-H, qui représentent la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment, confèrent au matériau béton l'essentiel de sa résistance mécanique. En revanche, leur pouvoir tampon sur le pH de la solution est plus faible que celui de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , donc leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation n'est pas primordial. Néanmoins, la carbonatation des C-S-H induit des modifications importantes de la microstructure, en donnant naissance à des carbonates de calcium, au gel de silice amorphe, et éventuellement à de l'eau libre.



D'autres auteurs [30] proposent la même réaction mais sans production d'eau. Groves et al. [31], qui ont étudié le mécanisme de carbonatation accélérée des C-S-H présents dans des pâtes hydratées de  $\text{C}_3\text{S}$  en utilisant plusieurs techniques tels que la DRX, l'ATG et le MET, montrent que :

- le C-S-H externe carbonaté garde une structure fibreuse, mais ces fibres sont constituées de silice micro-poreuse noyée dans des microcristaux de carbonate de calcium.
- le C-S-H interne devient non homogène et se transforme en un gel micro-poreux très riche en silice.

## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

---

- en utilisant la RMN, ils constatent que les C-S-H évoluent progressivement au cours de leur carbonatation avec un retrait de calcium et une polymérisation des silicates, jusqu'à donner naissance à un gel de C-S-H pauvre en calcium qui se transforme au dernier stade en un gel de silice.

Par contre, Groves et al [32]. Observent qu'après 2 mois de carbonatation naturelle, les C-S-H continuent à se polymériser à un degré élevé mais sans formation de gel de silice. La structure des C-S-H est conservée malgré leur décalcification, ce qui pourrait être à l'origine de la conservation des propriétés mécaniques des pâtes carbonatées. [33]

### **II.4.3 Carbonatation des autres constituants du ciment**

Le trisulfoaluminate de calcium (ettringite) AFt et le monosulfoaluminate de calcium AFm ont des structures cristallines complexes, en colonne pour l'ettringite et en feuillet pour le monosulfoaluminate. Pour ces deux structures, les anions sulfate, situés dans les canaux ou entre les feuillets, sont très mobiles et peuvent être substitués par d'autres anions ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ). Les aluminates hydratés sont sensibles à la carbonatation. Des études indiquent qu'ils se carbonatent en produisant des carbonates de calcium, des hydroxydes d'aluminium et de l'eau. [29]

### **II.5 Méthodes de caractérisation expérimentale de la carbonatation**

L'essai de carbonatation des bétons peut être effectué selon deux modes d'exposition :

#### **Carbonatation naturelle :**

Bien qu'il soit très long, cet essai reflète davantage la réalité car il consiste à conserver des échantillons directement à l'air libre, en salle ou in situ.

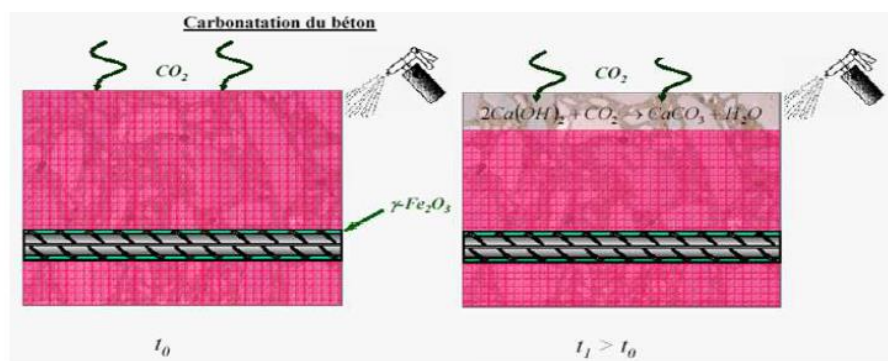
#### **Carbonatation accélérée :**

L'essai consiste à placer des échantillons dans une enceinte hermétique régulée en humidité relative, en température et en concentration de  $\text{CO}_2$ .

Pour les deux types d'essai, le processus de carbonatation est caractérisé par différentes méthodes dont certaines sont citées dans les paragraphes suivants.

### II.5.1 Détection par pulvérisation à la phénolphthaléine

La méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la profondeur de carbonatation est le test à la phénolphthaléine. 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 et ne permet pas de faire de différence entre la carbonatation formée pendant le test et la carbonatation préexistante. La composition de la solution aqua-alcoolique phénolphthaléine : alcool 50%, eau 50%, phénolphthaléine <1 ‰.



**Figure II-7** la mesure expérimentale de la profondeur de la carbonatation [34]

L'avantage de cette technique est qu'elle révèle une ligne d'équi-*pH* (*pH* autour de 9) correspondant à la valeur limite de *pH* en dessous de laquelle il y a risque de corrosion.

En revanche, elle présente un inconvénient majeur qui consiste en le fait que la corrosion des armatures peut démarrer à un *pH* supérieur à 9. En effet, sachant que la dépassivation des armatures peut se produire pour un *pH* égal à 11,4, il est probable que la zone où il y a risque de corrosion soit plus profonde dans le matériau que le front relevé par la phénolphthaléine (*pH* = 9 à  $\pm 1$  unité *pH* près).

### II.5.2 Analyse thermogravimétrique « ATG »

L'analyse thermogravimétrique permet d'enregistrer en continu des variations de masse d'un échantillon lors d'une montée de sa température depuis celle de l'ambiance jusqu'à environ 1200°C. Ces variations de masse correspondent, entre autres, à la déshydroxylation des hydrates et à la décomposition de la calcite. A partir des courbes de suivi de masse en fonction de la température, les hydrates, essentiellement la Portlandite, sont quantifiés dans la plage de



## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

---

température correspondant à leur déshydroxylation. De la même manière, la calcite et notamment celle formée par carbonatation, est quantifiée dans sa plage de température de décomposition. En revanche, la difficulté de l'ATG reste la détermination de ces intervalles de température qui varient selon les auteurs. De surcroît, dans le cas de bétons comportant des granulats calcaires, il est difficile de différencier le carbonate de calcium formé par carbonatation de celui apporté par les granulats.

L'ATG peut être couplée à une analyse chimique dans le but de doser la fraction de ciment réellement présente dans l'échantillon, et pouvoir ainsi quantifier les différents éléments notamment les hydrates pour un volume élémentaire représentatif de matériau et ce, indépendamment de la ségrégation de la phase cimentaire, ainsi que de l'état hydrique et de carbonatation.

### **II.5.3 Microscopie électronique à balayage « MEB »**

La microscopie électronique à balayage permet de visualiser la carbonatation des hydrates où le changement de microstructure est mis en évidence. Le carbonate de calcium apparaît sous forme grenue sur les hydrates superficiellement carbonatés et sous forme de floccules sur les régions complètement carbonatées. [35]

### **II.5.4 Gammadensimétrie**

La gammadensimétrie est une méthode non destructive fondée sur l'absorption par la matière des rayons  $\gamma$  émis par une source radioactive de  $^{137}\text{Cs}$ . Lorsque la carbonatation progresse dans un béton, elle induit localement une augmentation significative de masse volumique reliée à la quantité de  $\text{CO}_2$  fixée sur la matrice cimentaire.

### **II.5.5 Diffraction des rayons X « DRX »**

La diffraction des rayons X permet, en plus de la mesure des proportions des hydrates et des carbonates de calcium formés par carbonatation, la caractérisation des variétés cristallographiques d'un même minéral, telles les trois formes de carbonate de calcium (calcite, vaterite et aragonite) où chaque type a une intensité de réflexion propre à sa structure cristalline. Toutefois, cette technique ne permet pas d'identifier les composés semicristallins ou amorphes.

### II.5.6 Résonance magnétique nucléaire « RMN »

La résonance magnétique nucléaire permet de suivre les modifications structurales des silicates par la résonance magnétique de l'élément chimique  $^{29}\text{Si}$  suite à l'application d'un champ magnétique dans l'échantillon à tester. Comme les CSH contiennent une proportion de silice ( $\text{SiO}_2$ ), leur formation ainsi que leur carbonatation sont suivies grâce à cette technique. [35]

### II.5.7 Dosage de $\text{CO}_2$ par volumétrie

La méthode consiste à prélever à sec et sous atmosphère inerte, des échantillons à différentes profondeurs. Le  $\text{CO}_2$  de l'ensemble des carbonates, séparé par des autres gaz issus de l'attaque, est extrait par l'attaque acide et dosé par volumétrie à l'aide d'une ligne d'extraction spécifique.

## II.6 Les paramètres influençant la carbonatation

### II.6.1 Paramètres intrinsèques aux bétons

#### II.6.1.1 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 bas, plus la vitesse de carbonatation est faible. 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  $\text{CO}_2$ . [34]

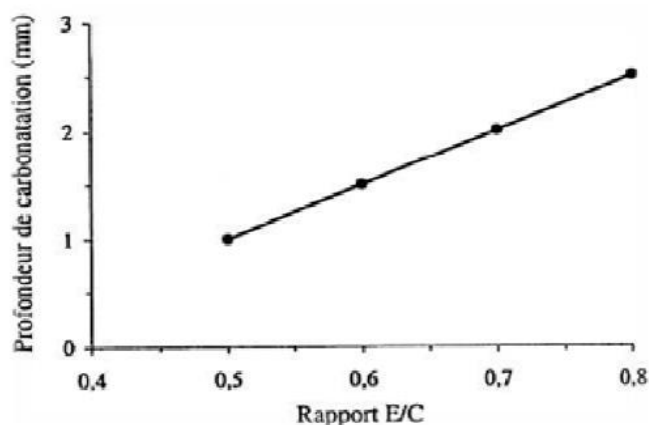
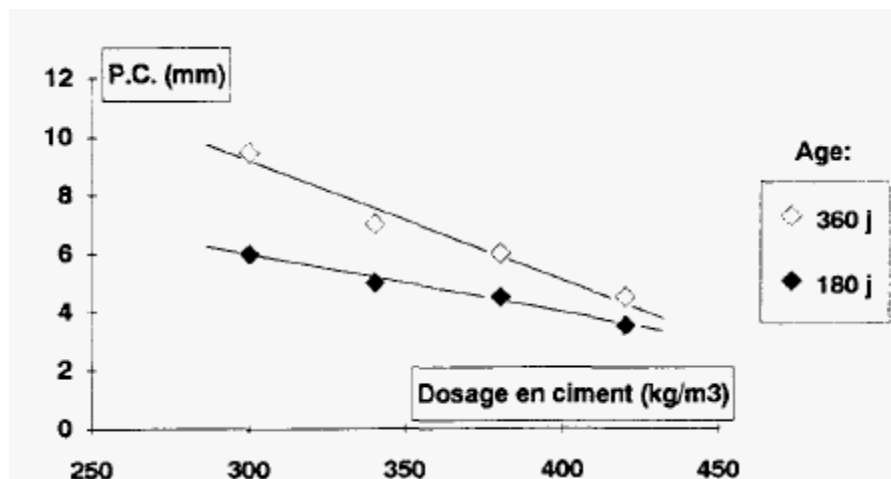


Figure II-8 Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment [36]

### II.6.1.2 Le dosage et la nature du ciment

#### II.6.1.2.1 Le dosage du ciment

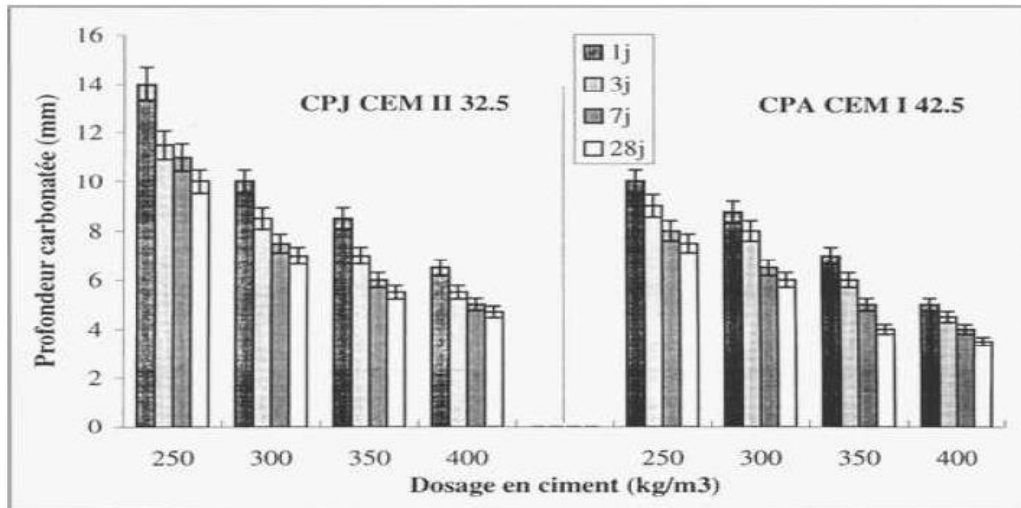
Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation car il réduit la porosité du béton (**Figure II-9** et **Figure II-10**), améliore sa compacité et augmente la quantité de produits carbonatables.



**Figure II-9** Variation de la carbonatation en fonction du dosage en ciment pour une cure de 3 jours [34]

#### II.6.1.2.2 Le 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. Balaýssac et Diafat [37] comparent 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 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/m<sup>3</sup> 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 II-10** Profondeur carbonatée à un an en fonction du dosage en ciment pour toutes les durées de cure [34]

Muller et Sickert [38] comparent la résistance à la carbonatation de bétons préfabriqués à partir de ciment Portland ordinaire ou de ciment à base de laitier de hauts-fourneaux. Il ressort de leur étude que les bétons de ciment à base de laitier de haut fourneau se carbonatent beaucoup plus vite que les bétons de ciment Portland pour un rapport E/C identique. D'après Venuat [39], l'effet du laitier est défavorable à court terme, mais après environ 5 ans, l'ajout de laitier ayant une finesse supérieure à celle du clinker peut diminuer la vitesse de carbonatation. Ounoughi et al [40] constatent un comportement très différent entre un CEM I et le CHF-CEM III/B composé de 68 % de laitier de hauts-fourneaux pour un même rapport E/C de 0,51. La profondeur de carbonatation est de 0,1 mm pour le CEM I et de 11,5 mm pour le CEM III. D'après Venuat et Alexandre [41], Ho et Lewis [42], les bétons de ciment aux cendres volantes se carbonatent plus rapidement que les bétons au ciment Portland. Kobayashi et Uno [43] ont étudié la vitesse de carbonatation de bétons fabriqués avec des ciments à différentes teneurs en alcalins. 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 CO<sub>2</sub> est nécessaire pour consommer toute la portlandite, ainsi le pH chute plus facilement. [34]

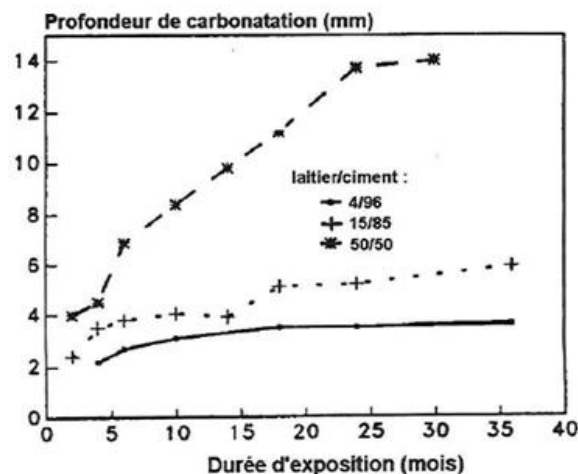
### II.6.1.3 Les additions minérales

#### II.6.1.3.1 Fumé de silice :

Skenderovic [44] montre que le remplacement d'une partie du ciment (10%) par des fumées de silice augmente la vitesse de carbonatation naturelle du béton bien que la porosité soit considérablement diminuée. Cet auteur explique ce fait par la moindre quantité de portlandite dans les bétons avec fumées de silice. L'étude de Richardson et al [32] indique a contrario que l'addition de fumées de silice limite la profondeur de carbonatation du béton. Ces résultats assez contradictoires nécessitent une investigation plus approfondie afin d'évaluer ces additions dans des conditions similaires de rapport E/C et de cure des échantillons de béton.

#### II.6.1.3.2 Laitier de haut fourneau :

En ce qui concerne l'addition de laitier de haut fourneau, Skenderovic [44] et Malami et al [45] n'obtiennent aucune modification significative de la vitesse de carbonatation pour des remplacements du ciment jusqu'à respectivement 30 % et 15% Malami et al [45] observent un accroissement important de la carbonatation uniquement pour le remplacement de 50% du ciment par du laitier.



**Figure II-11** l'influence du rapport laitier/ciment sur la profondeur de carbonatation de mortiers en exposition naturelles

II.6.1.3.3 Cendres volantes :

De la même manière que pour les additions de laitier, Malami et al [45] observent que, jusqu'à un remplacement du ciment par 15% de cendres volantes, aucun effet significatif n'est mis en évidence sur le taux de carbonatation. Pour 30% ce taux est très nettement augmenté.

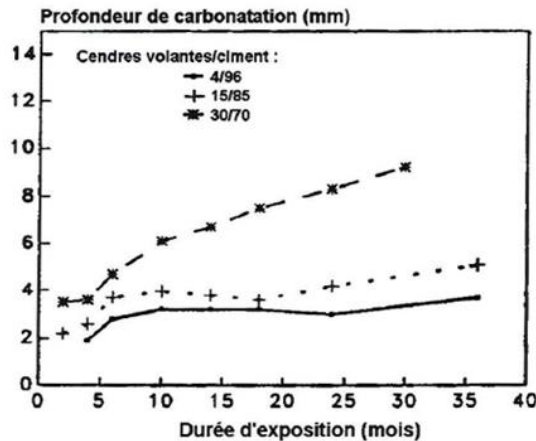


Figure II-12 Influence du rapport cendres volantes/ciment sur la profondeur de carbonatation de mortiers en exposition naturelle

Papadakis et al [46] ont aussi étudié l'influence, sur la profondeur de carbonatation du béton, des cendres volantes en remplacement du ciment ou des granulats. Figure II-14, qui présente les résultats de leur analyse, montre l'influence négative des cendres volantes en remplacement du ciment. Cette influence est très marquée lorsque l'on dépasse 15%. Le remplacement des granulats par des cendres volantes entraîne un effet opposé mais avec une tendance moindre.

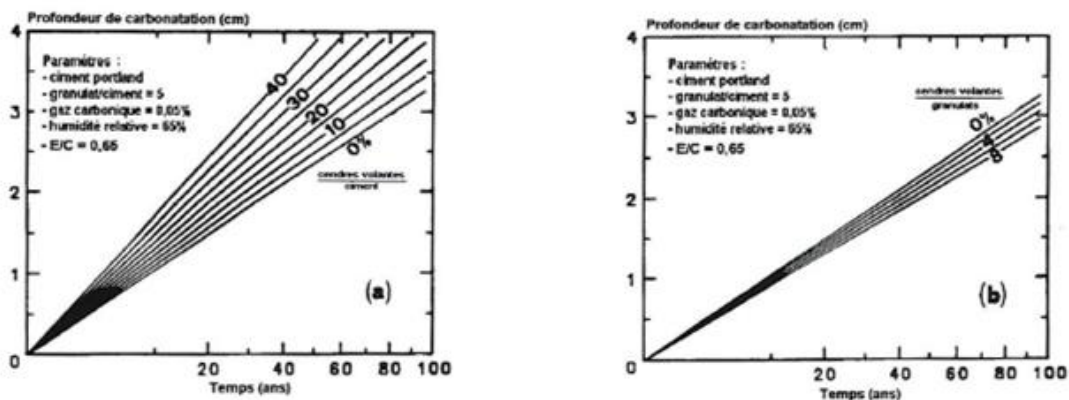


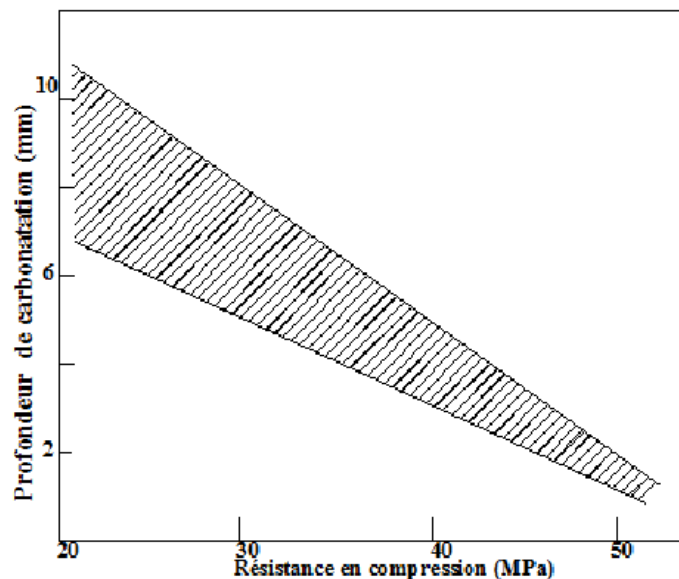
Figure II-13 L'influence du remplacement du ciment(a) ou des granulats (b) par des cendres volantes sur la profondeur de carbonatation du béton [47]

#### II.6.1.4 Résistance à la compression

La profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression à 28 jours s'accroît. 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. [48]

Temps d'exposition (années)	Profondeur de carbonatation (mm)		
	fc28 = 25 MPa	fc28 = 35 MPa	fc28 = 50 MPa
2	9	5	2
5	15	9	3
10	21	12	4
20	29	17	6
30	37 (36)	21 (21)	8 (10)
50	48	28	10

**Figure II-14** Profondeurs de carbonatation déduites de la relation précédente en fonction du temps d'exposition pour diverses valeurs de la résistance à la compression. Les valeurs qui figurent entre parenthèses sont obtenues avec l'équation :  $e = 125 \exp(-0,05fc_{28})$



**Figure II-15** Influence de la résistance en compression à 28 jours sur la profondeur carbonatée avec différents ciments et différentes expositions [49]

#### II.6.1.5 Perméabilité au gaz

La profondeur de carbonatation diminue avec la diminution de la perméabilité. [34]

### II.6.1.6 Degré de saturation des pores en eau liquide.

Si le béton est totalement saturé en eau liquide, la diffusion du CO<sub>2</sub> n'est possible qu'à travers la solution interstitielle, ceci freine considérablement la progression de la carbonatation dans la mesure où les coefficients de diffusion du CO<sub>2</sub> dans l'air et dans l'eau sont respectivement de l'ordre de 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s et 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s. En revanche, si le degré de saturation est trop faible, la dissolution du CO<sub>2</sub> est fortement limitée et la cinétique de carbonatation des hydrates est alors ralentie. [50]

### II.6.2 Paramètres extrinsèques aux bétons

#### II.6.2.1 Cure

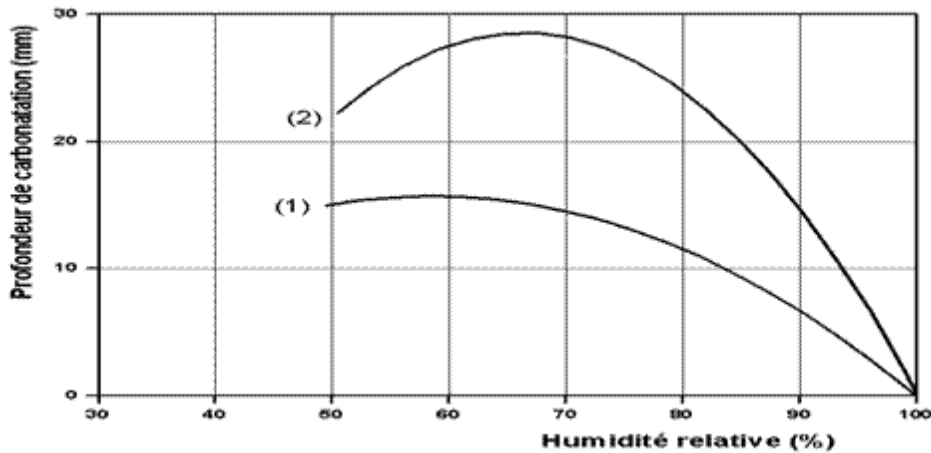
Une bonne cure humide, qui consiste à maintenir le béton dans des conditions de température et d'humidité relative propices à une meilleure hydratation, diminue la vitesse de carbonatation. Contrairement à une conservation à l'air libre, une cure dans l'eau favorise l'hydratation du ciment et réduit 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. [34]

Une cure humide permet en effet une hydratation plus complète du béton d'enrobage, donc la fermeture de la porosité et la diminution du coefficient de diffusion du CO<sub>2</sub>. Cette sensibilité au mode de cure peut être amplifiée par l'augmentation de la proportion d'additions utilisée en substitution du ciment. Pour les additions à caractère pouzzolanique telles que les cendres volantes, on peut craindre en outre la consommation de la portlandite par la réaction pouzzolanique.

#### II.6.2.2 Humidité relative

La vitesse de carbonatation est considérablement influencée par l'humidité relative du milieu environnant. Pour que la carbonatation soit maximale, l'humidité relative doit être suffisamment faible pour qu'une phase gazeuse connectée permette la diffusion du CO<sub>2</sub> 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. En dessous de 50 % et au-dessus de 90 à 95 % la vitesse est très faible ou nulle.

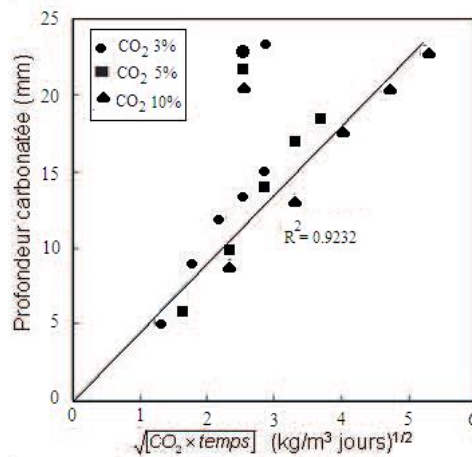




**Figure II-16** l'influence de l'humidité relative sur la profondeur de la carbonatation [34]

### II.6.2.3 Concentration en CO<sub>2</sub>

Des études montrent qu'une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> accroît la vitesse de carbonatation. En fournissant du CO<sub>2</sub> en quantités continuellement suffisantes, les produits carbonatés à une profondeur donnée se carbonatent rapidement et se consomment donc d'autant. Ainsi, le front de carbonatation avance plus vite. [34]

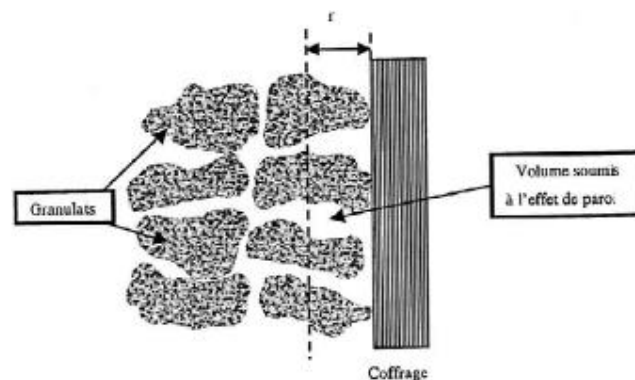


**Figure II-17** Profondeur carbonatée estimée par projection de phénolphthaléine en fonction du temps et de la concentration en CO<sub>2</sub>. Résultats obtenus sur béton à base de CEMI carbonaté à 20°C et 65% d'HR

L'épaisseur carbonatée croît avec la concentration de CO<sub>2</sub>. Cette épaisseur est proportionnelle à la racine carrée de la concentration du CO<sub>2</sub>. [41]

### II.6.2.4 Effets de paroi

Durant la mise en place du béton, une partie des granulats vient s'immobiliser contre les parois de coffrage et, au cours de la vibration, le centre des gros granulats ne peut pas s'approcher plus près des parois de coffrage que de leur rayon. Le volume occupé par le vide entre les gros granulats est donc plus important que dans le béton de masse. Ce phénomène conditionne en partie la microstructure du béton de peau qui est plus riche en particules fines et en pâte de ciment. Cette zone est plus poreuse, ce qui contribue à faciliter la pénétration du dioxyde de carbone mais elle est aussi plus riche en hydrates, ce qui tend à ralentir la progression de la carbonatation et permet de maintenir un pH élevé plus longtemps. Cette deuxième caractéristique chimique est bien sûr à nuancer si la cure hydrique est insuffisante.

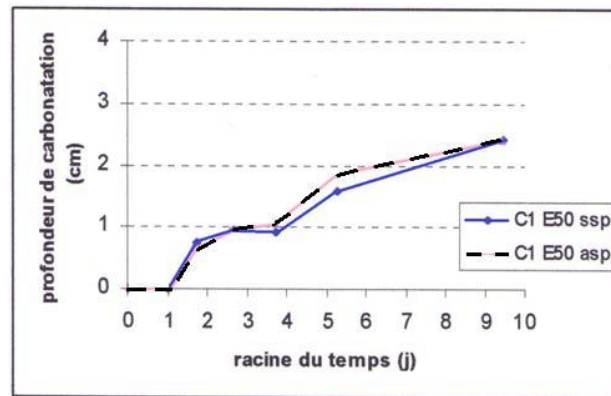


**Figure II-18** Effet de paroi au voisinage d'un coffrage

### II.6.2.5 Influence de l'adjuvant

Aucune influence d'un superplastifiant n'est notée sur la cinétique de la carbonatation.

L'étude réalisée Dakhmouche [28] n'a montré aucune différence significative entre le béton formulé à base d'un CEM I avec et sans adjuvant.



**Figure II-19** Comparaison de la profondeur de carbonatation d'un béton avec superplastifiant et d'un même béton sans superplastifiant [28]

## II.7 Les conséquences de la carbonatation

### II.7.1 Diminution du pH et amorçage de la corrosion

La principale conséquence de la carbonatation est évidemment la baisse du pH due à la dissolution de la Portlandite dans la solution interstitielle. Cette diminution de pH détruit la couche passivante et amorce ainsi la corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le pH chute à une valeur d'environ 9 à leur profondeur d'enrobage. Le modèle conceptuel de corrosion par carbonatation dans le béton armé, les processus liés à la corrosion se développent selon deux périodes. Dans le cas de la carbonatation, il est possible de résumer :

- Période d'incubation, elle correspond à la phase où le  $\text{CO}_2$  transite dans le béton et où des processus physico-chimiques à l'origine de la corrosion des armatures peuvent avoir lieu à l'échelle microscopique, mais où aucune dégradation n'est encore visible à l'échelle macroscopique d'observation. Elle peut donc être définie comme le temps requis pour que les aciers soient dépassivés par la carbonatation ;
- Période de propagation, la phase où la corrosion s'amorce et des dégradations se développent.

### II.7.2 Modification de microstructure et la porosité

La réaction de carbonatation des hydrates entraîne une augmentation du volume de la phase solide. Cette augmentation, de 3 à 19 % selon que le produit de réaction est de l'aragonite ou de la vaterite, se traduit par une notable réduction de porosité modifiant ainsi la distribution des tailles

## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

de pores. Le **Tableau II-2** fournit les valeurs du volume molaire de la portlandite à comparer à celles des trois formes cristallines de carbonate de calcium.

Cristaux	Volume molaire (cm <sup>3</sup> .mol <sup>-1</sup> )
Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandite	33
CaCO <sub>3</sub> Calcite	35
CaCO <sub>3</sub> Valtérite	38
CaCO <sub>3</sub> Aragonite	34

**Tableau II-2** Volume molaire de calcite, de valtérite et de l'aragonite et de la portlandite

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.

Mortier à base de	CEM 1	CEM 2	CEM 3
Mortier non carbonaté	14.4 %	13.9 %	12.3 %
Mortier carbonaté pendant 296 jours sous teneur atmosphérique de CO <sub>2</sub>	12.9 %	12.2 %	11.3 %
Mortier carbonaté pendant 157 jours dans une ambiance à 50 % de CO <sub>2</sub>	8.8 %	10.8 %	8.3 %

**Tableau II-3** Porosités obtenues par intrusion au mercure sur des mortiers de E/C=0.5

### II.7.3 Le retrait de carbonatation

Bien que la carbonatation entraîne une augmentation du volume de la phase solide, celle-ci induit un retrait et non un gonflement Powers [51] émet l'hypothèse selon laquelle ce retrait est dû à la dissolution des cristaux de Portlandite alors que ceux-ci sont soumis à des contraintes de compression, ce qui provoque une contraction dimensionnelle.

Hunt et Tomes [52] indiquent que c'est la diminution de la quantité d'eau chimiquement liée, faisant partie des C-S-H, qui provoque un retrait du matériau. Selon Swenson et Sereda [53], le

## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

---

retrait de carbonatation ne serait pas uniquement dû à la carbonatation de la Portlandite, mais s'expliquerait également par la déshydratation et par la polymérisation du gel de silice formé après carbonatation des C-S-H. [34]

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

Selon Powers [51] le retrait de carbonatation est dû à la dissolution des cristaux d'hydroxyde de calcium alors que ceux-ci sont soumis à une contrainte de compression. Le retrait de carbonatation à humidité constante est proportionnel à l'augmentation temporaire de compressibilité de la pâte de ciment durcie résultant du transfert de l'hydroxyde de calcium des régions sous contrainte et du dépôt de carbonate de calcium dans des régions où celui-ci n'est pas sous contrainte. D'autre part, la carbonatation des particules de C-S-H, le silicate de calcium hydraté, a lieu par une réaction sans dissolution. La carbonatation du C-S-H ne provoque ainsi pas de déformation de l'échantillon.

Par le dépôt du  $\text{CaCO}_3$ , la porosité totale diminue et le mode poreux des capillaires est déplacé vers les plus grands rayons (la porosité capillaire augmente). Les plus gros pores ne semblent pas être affectés, mais le volume des plus petits est réduit d'un facteur 2.

### **II.7.4 Evolution 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. Elle peut aussi augmenter le degré de saturation et ralentir ainsi la progression de la carbonatation.

### **II.7.5 Paramètres mécaniques**

La réduction de porosité liée à la carbonatation entraîne corrélativement une augmentation de résistance mécanique. La calcite qui s'est formée consolide la microstructure. Il est en effet bien connu que le carbonate de calcium est un excellent liant : c'est lui qui d'ailleurs assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers de chaux. La résistance à la compression et à la flexion

de bétons à base de ciment CEM I conservés dans une atmosphère de dioxyde de carbone peut augmenter de 30% par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de CO<sub>2</sub>. L'augmentation de résistance est d'autant plus marquée que le rapport E/C du matériau est bas. [54]

### II.7.6 Changement des propriétés du transfert

La réaction de carbonatation diminue le coefficient de diffusion effectif des gaz, toutefois la carbonatation naturelle ne semble pas affecter la perméabilité au gaz ni la perméabilité à l'eau liquide. [34]

### II.7.7 Les fissurations

L'état de fissuration du béton évolue lui aussi au cours du temps du fait des cycles thermiques ainsi que des sollicitations mécaniques, statiques ou dynamiques, subies par les ouvrages.

L'influence de l'état de fissuration n'est pas simple : lorsqu'une fissure débouche perpendiculairement à la surface d'une armature, le dioxyde de carbone et l'eau peuvent y parvenir, provoquer sa dépassivation et amorcer sa corrosion. Cependant, l'accumulation de carbonate de calcium sur les parois de la fissure, tend à colmater celle-ci et permet une réalcalinisation de l'électrolyte en contact avec l'acier, par diffusion d'espèces alcalines (KOH, NaOH, CH) en provenance du béton. La formation de calcite par dégradation de la portlandite peut avoir un effet bénéfique sur les fissurations du béton d'enrobage. Medgyesi [62] souligne à ce sujet que seules les fissures présentant une ouverture supérieure à 0,2 mm sont nocives pour la stabilité des armatures. Pour des fissures d'ouvertures inférieures, le dépôt de carbonate à leur surface est suffisant pour empêcher le contact eau et oxygène avec les aciers, celui-ci jouant le rôle d'un film protecteur. [28]

### II.8 La corrosion

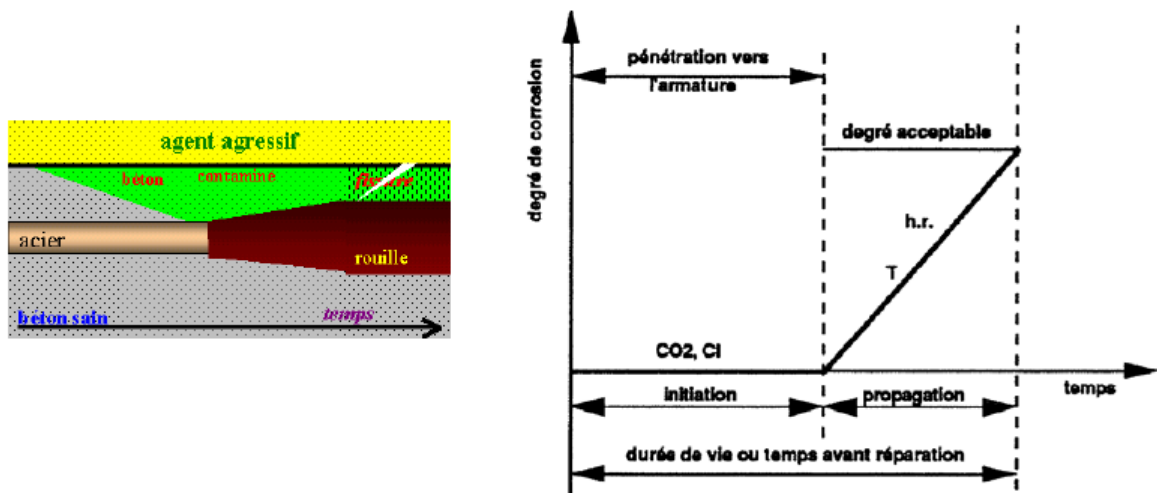
#### II.8.1 Définition



**Figure II-20** Exemple de corrosion [56]

La corrosion des armatures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé. Elle se manifeste généralement par une fracturation voire un éclatement du béton dû à la formation d'oxydes. En plus de la perte du revêtement cimentaire, la corrosion s'accompagne d'une réduction du diamètre des armatures et une perte d'adhérence à l'interface acier/béton, affectant la tenue mécanique de la structure. Pour des questions de sécurité, de frais de maintenance et dans un objectif de durabilité, la compréhension de ces mécanismes de dégradation est d'une importance majeure.

Le béton présente un environnement alcalin ( $\text{pH} \sim 13$ ) qui permet aux aciers de développer une couche d'oxydes passivante, inhibant le processus de corrosion. Cependant, les propriétés physico-chimiques de l'enrobage cimentaire peuvent être détériorées par diverses espèces chimiques présentes dans l'environnement et initier le processus de corrosion. Les deux agents les plus communs sont le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et les ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ). Alors que le premier est présent à des taux compris entre 0,01% et 0,3% dans l'atmosphère, on retrouve le second en milieu marin ou lors de l'utilisation de sels de déverglaçage. La présente revue bibliographique se concentrera sur les aspects corrosion entraînée par la carbonatation et par les chlorures provenant de l'environnement. Dans un premier temps les aspects généraux de la corrosion seront présentés, puis les différentes phases de cette pathologie seront développées. Le rôle de sous-produits dans les matériaux cimentaires sera enfin discuté en considérant la carbonatation et la pénétration des chlorures mais aussi la nature propre des additions.



**Figure II-21** Schéma de dégradation des armatures au cours du temps [57]

Le béton, du fait de sa forte alcalinité, apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions de pH, l'acier est protégé grâce à la formation d'un film extrêmement mince et adhérent appelé film passif pouvant être constitué de divers oxydes.

En présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Le métal est alors dépassivé et la corrosion devient possible avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume au moins deux fois supérieur (jusqu'à six fois supérieur pour certains oxydes) à celui du fer initial entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives. [57]

La corrosion des armatures est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies. En effet pour qu'un acier se corrode, il doit y avoir simultanément :

- un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- la présence d'un agent agressif (comme les ions chlorures).



### II.8.2 Le mécanisme de la corrosion des armatures

Les processus de corrosion des armatures sont les principales causes de dégradation des ouvrages en béton armé et précontraint. Ils touchent tous les domaines de la construction : le Bâtiment (balcons, façades, ...), le Génie Civil (réservoirs d'eau potable, ouvrages d'assainissement, silos, aéro réfrigérants, ouvrages industriels ou nucléaires,), les ouvrages d'art (ponts, viaducs, barrages...), les monuments historiques, les ouvrages portuaires... etc. Le mécanisme général est identique à celui des processus généraux de corrosion des métaux en contact avec un environnement : ce sont des phénomènes électrochimiques, nécessitant la présence simultanée d'eau, oxygène et d'un ou de plusieurs agents corrosifs.

Il y a toutefois des particularités dont les propriétés des armatures d'être protégées à la fois dès la mise en place du béton, par l'alcalinité créée par l'hydratation du ciment (pH entre 12 et 14) ; et tout au long de la vie de la structure, par leur enrobage (distance entre le parement et la surface de l'armature).

Les principaux paramètres susceptibles d'assurer la protection des armatures sont donc : la qualité du béton (béton moins poreux), l'enrobage des armatures. L'environnement joue un rôle néfaste bien sûr, mais la plupart du temps accélérateur.

Deux mécanismes principaux, très différents, conduisent à la dépassivation des armatures : la carbonatation, qui correspond à la neutralisation de l'alcalinité du béton par le gaz carbonique de l'air, et l'action des chlorures (ceux-ci proviennent de très nombreux milieux : marin, sels de déverglaçage, industrie,...). [58]

#### II.8.2.1 La passivation des armatures dans le béton

Certains métaux et alliage ont la propriété de se passiver. En contact avec un milieu agressif, il subissent une première attaque corrosive qui forme des produits de corrosion suffisamment insolubles, adhérents et compacts (oxydes) pour isoler le métal comme par revêtement : c'est la couche de passivation. Le pH de la solution interstitielle dans les pores du béton sain est compris entre 12,5 et 13,4. Avec cette valeur élevée de pH, l'acier se recouvre d'oxyde protecteur, qui forme la couche passive protégeant les aciers de la corrosion. Lorsque les aciers sont dans une solution alcaline, ils sont recouverts d'un film d'oxyde. Dans le béton sain, cette couche passive est de 50-200µm d'épaisseur, elle est homogène et continue ; sa composition dépend du pH, du potentiel de l'acier et de l'existence de l'oxygène.

## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

---

L'interface acier-béton peut être dans un état passif, semi passif ou active (corrosion). Pour l'état passif, le film d'oxyde se fait lentement et est composé de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\gamma$ - $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Pour l'état semi passif, le film d'oxyde est constitué de deux couches, la première est directement sur la surface d'acier et composée de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\gamma$ - $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , la deuxième est formé d'un mélange de  $\alpha$ - $\text{FeOOH}$  et de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\gamma$ - $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Cette couche est inhomogène et poreuse due à sa formation rapide, en conséquence, moins efficace contre la corrosion. [59]

### II.8.2.2 La dépassivation des aciers dans le béton

La dépassivation des aciers est la destruction du film passif qui les entoure. Dans les bétons, la corrosion des armatures est essentiellement initiée par deux facteurs distincts :

- La carbonatation du béton d'enrobage au contact du  $\text{CO}_2$  atmosphérique,
- La pénétration de chlorures depuis le milieu environnant (milieu marin, utilisation de sels de déverglaçage, milieu industriels particuliers.... Etc...).

Si l'un de ces 2 phénomènes se produit, le pH du béton chute et l'acier n'est plus protégé. Une fois que l'acier d'armature est dépassivé et est en contact simultané avec de l'oxygène et de l'eau (humidité), la dissolution du métal a lieu corrosion sous la forme de formation de rouille, puis perte de section. [59]

#### II.8.2.2.1 Les conditions de dépassivation

Avant toute attaque par les chlorures ou la carbonatation, les armatures enrobées de béton sont protégées de la corrosion par un phénomène de passivation. La carbonatation du béton d'enrobage et la présence de chlorures en quantité suffisante au voisinage de l'armature peut conduire à une chute du pH de la solution interstitielle et donc et à la dépassivation des armatures. Ensuite, la corrosion des armatures ne peut s'amorcer qu'en présence simultanée de quatre conditions :

- Une zone anodique, siège des réactions d'oxydation du fer
- Une zone cathodique, siège des réactions de réduction de l'oxygène
- Un milieu conducteur d'électron (l'armature en acier)
- Un milieu électrolytique (la solution interstitielle du béton). [60]

### II.8.3 Les phases de corrosion

Les manifestations visibles de la corrosion d'un ouvrage (tâches de rouilles, fissurations, armatures apparentes corrodées, éclatements de béton) sont les conséquences de réactions chimiques endogènes qui ont commencé bien avant que les désordres ne soient apparents. On distingue schématiquement et successivement deux phases dans le développement de la corrosion.

**Période d'amorçage**, dite aussi période dormante, d'incubation ou d'initiation, durant laquelle la stabilité du système constitué par l'armature métallique noyée dans la matrice cimentaire du béton décroît progressivement et durant laquelle se créent les conditions favorables au développement de la corrosion. L'amorçage de la corrosion peut être provoqué par la carbonatation du béton d'enrobage.

**Période de propagation** : c'est une période durant laquelle on observe, en premier lieu, la formation de produits issus de la corrosion de l'armature. Les phénomènes électrochimiques de corrosion conduisent à la formation d'oxydes et d'hydroxydes de volumes supérieurs à celui de l'acier sain. Ces produits entraînent des contraintes qui peuvent provoquer une fissuration parallèle aux aciers qui diminuent l'adhérence acier/béton, ainsi que l'éclatement du béton d'enrobage (formation d'épaufrures). Les désordres créés nuisent à l'aspect esthétique des ouvrages, mais contribuent aussi à affaiblir les résistances mécaniques. La corrosion conduit aussi à une diminution de la section des armatures, généralement homogène dans le cas de la carbonatation. On considère généralement que la capacité fonctionnelle de l'ouvrage est entamée dès la destruction du béton d'enrobage, même si la réduction de la section des armatures ne contribue pas encore à produire des défauts structurels.

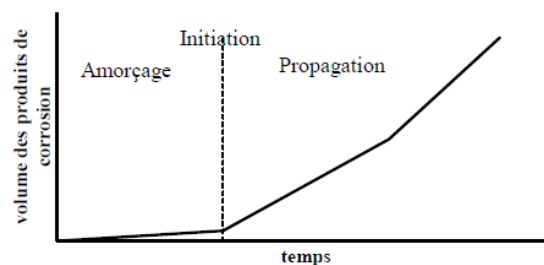


Figure II-22 Etapes de la corrosion des armatures dans un béton armé

### II.8.4 Les stades de corrosion

Le stade d'incubation de la corrosion correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage de béton, sans corroder les armatures. Il s'arrête lorsqu'au niveau des armatures, la teneur en agent agressif atteint un certain seuil.

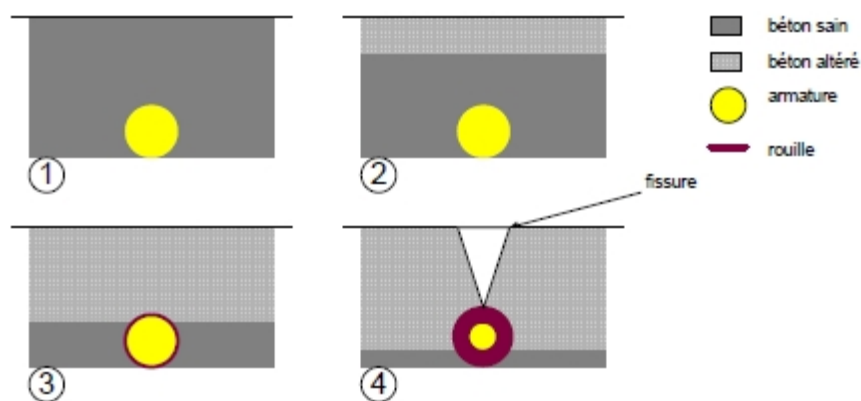
La figure ci-après illustre ces stades de dégradation par corrosion due à des agents agressifs venant du milieu environnant.

Dans le cas de la carbonatation, ce seuil correspond au fait que les armatures se trouvent dans un béton carbonaté et suffisamment humide.

Dans le cas des chlorures, le béton étant alors généralement humide et oxygéné, le seuil correspond très approximativement à un taux de 0,4% par rapport au poids de ciment.

Cette valeur correspond à un rapport de concentrations  $[Cl^-]/[OH^-]$  compris entre 0,6 et 1, suivant les ciments.

Pendant le stade de développement de la rouille, la vitesse de dissolution (corrosion) de l'acier est significative. La rouille formée est le plus souvent gonflante et provoque une désagrégation de l'enrobage, par épaufrure, éclatement ou fissuration.



**Figure II-23** Les stades de dégradation par corrosion

La **Figure II-23** illustre la dégradation procède par étape : dans le béton sain, un agent agressif pénètre progressivement, lorsque sa teneur est assez forte, l'armature commence à se corroder et la rouille peut faire éclater l'enrobage.

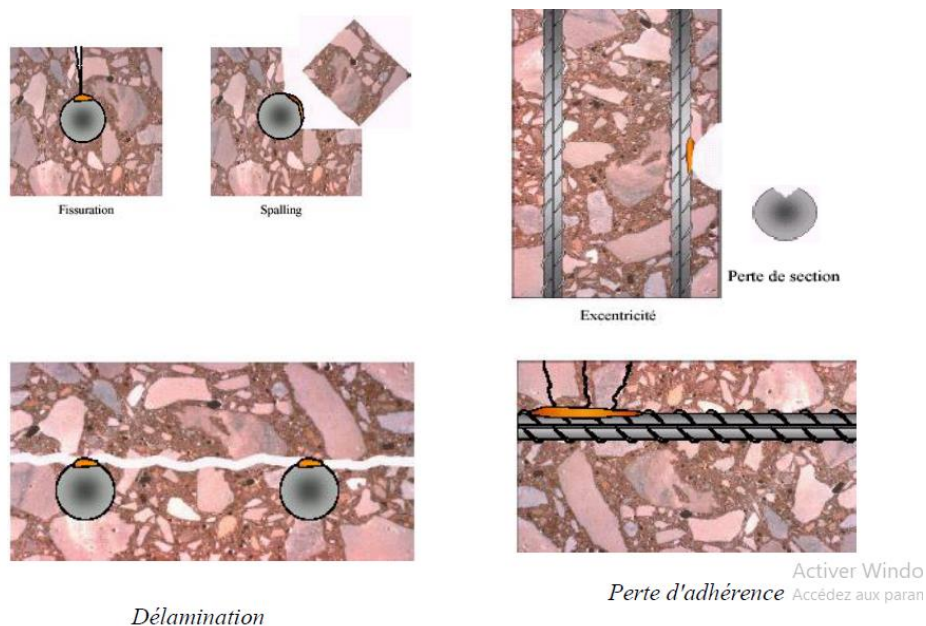
## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

L'apparition des fissures dépend fortement des caractéristiques de l'enrobage : épaisseur, résistance mécanique, etc. Plus précisément, une fois que l'armature a commencé à se corroder, les fissures apparaissent très tôt même dans un béton de bonne résistance mécanique. Les produits de corrosion diffusent facilement dans un béton poreux et tachent le parement.

### II.8.5 Les conséquences

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation précoce des structures en béton armé. Quand les agents agressifs ont atteint les armatures, à cause soit de la carbonatation du béton d'enrobage soit de l'attaque par les chlorures, la sécurité et l'état de service des structures se trouvent fortement altérés, tout d'abord par le comportement de l'acier.

En effet l'armature subit une perte de section ainsi qu'une modification de ses propriétés mécaniques. Ensuite, le comportement du béton d'enrobage évolue, il va se fissurer à cause des produits résultant de la corrosion. Enfin, la diminution de l'adhérence acier béton est observée.



**Figure II-24** Conséquence de la corrosion

### II.9 Conclusion

Ce chapitre dresse un état des lieux sur la carbonatation des matériaux cimentaires.

La carbonatation n'est pas directement nocive pour le béton. Au contraire, la résistance mécanique et le module d'élasticité des bétons augmentent après carbonatation.

## [Chapitre 2 : la carbonatation dans le béton]

---

Le gaz carbonique pénètre dans le béton sous forme gazeuse et réagit avec l'eau présente dans les pores. Il provoque ainsi le phénomène de carbonatation qui peut affecter tous les ouvrages non constamment immergés mais qui n'est pas nocif pour le béton non armé. Dans un premier temps, la carbonatation protège le béton en modifiant la distribution de la taille des pores en colmatant la porosité capillaire de la matrice cimentaire, en diminuant sa perméabilité aux gaz et aux liquides. Dans un second temps, le milieu basique se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 8, n'assurant plus une protection suffisante des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier. Cette dépassivation entraîne le développement de réaction d'oxydation à la surface des armatures.

La migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est augmentée. La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont les paramètres déterminants pour la diffusivité du CO<sub>2</sub>.

L'augmentation de la compacité est obtenue en particulier en réduisant le rapport E/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton, donc l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent, la vitesse ainsi que la possibilité de diffusion des gaz dans le béton. La diminution du rapport E/C permet donc d'accroître la résistance du béton à la carbonatation.

Une cure prolongée permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du CO<sub>2</sub> en améliorant les propriétés de surface du béton.

La cinétique de carbonatation croît en fonction de la concentration en dioxyde de carbone. Elle diminue lorsque les performances mécaniques du béton augmentent et est fortement influencée par l'humidité relative du milieu environnant.

L'utilisation d'un CEM I ralentit la vitesse de carbonatation par rapport aux ciments composés.

La carbonatation ne se produit pratiquement pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau. Elle est maximale pour des humidités relatives de l'ordre de 66 %, valeurs courantes dans les climats tempérés.

# Chapitre 3

Effet de la température sur la carbonatation du béton

### **III. Chapitre 3 Effet de la température sur la carbonatation du béton**

#### **III.1 Introduction**

On note qu'il existe très peu de recherches qui étudient l'influence de la température sur la carbonatation du béton.

Dans ce chapitre nous allons parler de l'effet de la température sur les paramètres influençant la carbonatation et l'influence direct sur la carbonatation.

#### **III.2 Les Bétons soumis à haute température**

Le béton est le matériau formé par le mélange de ciment, de sable, de gravillon et d'eau, et éventuellement d'adjuvants et d'additions, et dont les propriétés se développent par l'hydratation du ciment. Le changement des propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons qui s'opèrent au cours d'un cycle thermique nécessite la connaissance des phases qui constituent la pâte de ciment à température ambiante. Ainsi dans ce chapitre, nous nous attacherons au début à faire une description détaillée de la pâte de ciment. Cette description débutera par une présentation globale des éléments constitutifs de la pâte de ciment, puis se poursuivra par une compréhension du rôle joué par l'eau dans cette structure, et par une analyse de l'interface pâte-granulats. [14]

#### **III.3 Effet de la température sur les paramètres influençant la carbonatation du béton**

##### **III.3.1 Influence sur la microstructure**

L'augmentation de la température au sein du béton va induire une décomposition chimique du gel CSH et une perte de l'eau libre, adsorbée et chimiquement liée. Ces processus vont engendrer des modifications importantes au niveau de la microstructure de la pâte de ciment (liaisons chimiques, forces de cohésion, porosité et distribution de la taille des pores).

L'étude des résultats d'analyses thermiques différentielles (ATD) et d'analyses thermo gravimétriques (ATG) permet de détecter l'apparition de transformations chimiques se produisant au sein du béton porté à des températures élevées, et de suivre leurs progressions. Plusieurs auteurs ont présenté les résultats de ce type d'analyses réalisées sous diverses conditions).



## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

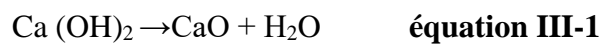
---

Lors d'une augmentation de la température, les essais ATD permettent de mettre en évidence les réactions suivantes :

- Entre 30°C-105°C: l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton.

L'eau non liée serait complètement éliminée à 120°C. Par convention, on définit l'eau libre comme la quantité d'eau quittant le matériau à 105°C.

- Entre 450-550°C: la portlandite se décompose en eau et en chaux libre selon la réaction suivante:



- Autour de 570°C se produit la transformation du quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$  dans les agrégats quartziques et basaltiques. Cette réaction s'accompagne d'un gonflement.

- Entre 600°C-700°C: se produit la deuxième étape de la déshydratation des CSH qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques. De plus, autres études montrent que les CSH commencent à fissurer à 600°C-700°C avec la formation de  $\beta$ -C<sub>2</sub>S. On a alors une nouvelle phase d'évacuation de l'eau chimiquement liée.

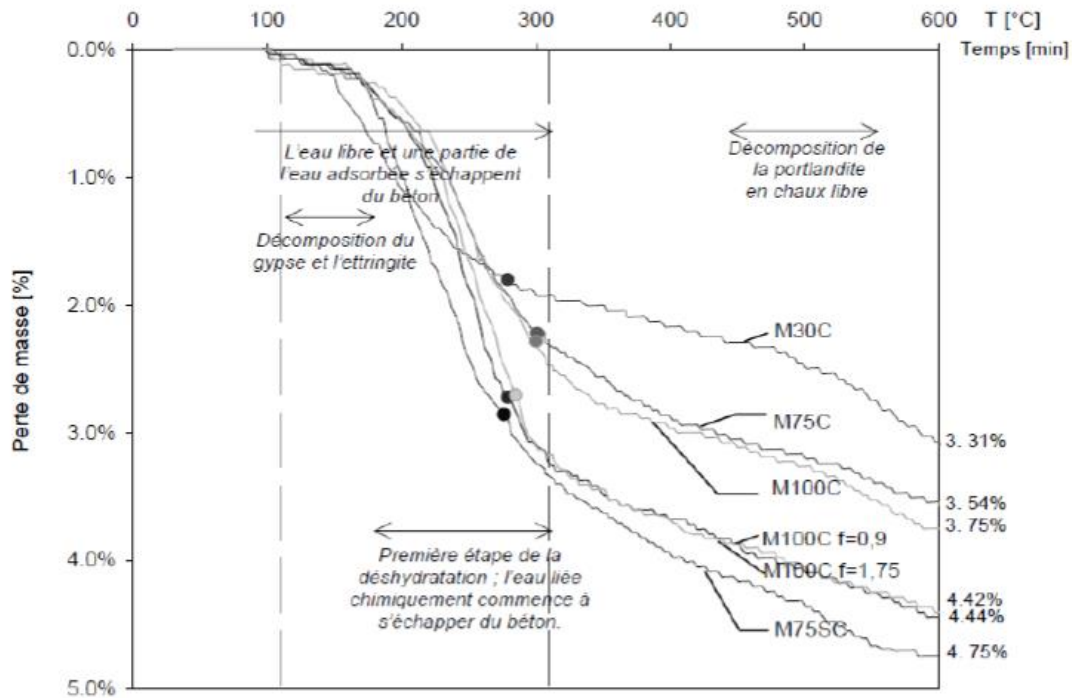
- Entre 700°C-900°C: Le carbonates de calcium composant principal des granulats calcaires se décompose suivant la réaction:



- A partir de 1300°C s'amorce la fusion des agrégats et de la pâte de ciment. [61]

### III.3.1.1 Perte de masse et l'eau :

Lors du chauffage, le béton perd de la masse essentiellement à cause du départ de l'eau libre et liée contenue dans les pores et les hydrates et à la décarbonatation. La **Figure III-1** présente l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de béton avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage. Il est important de noter que les limites de température varient suivant les auteurs. [62]



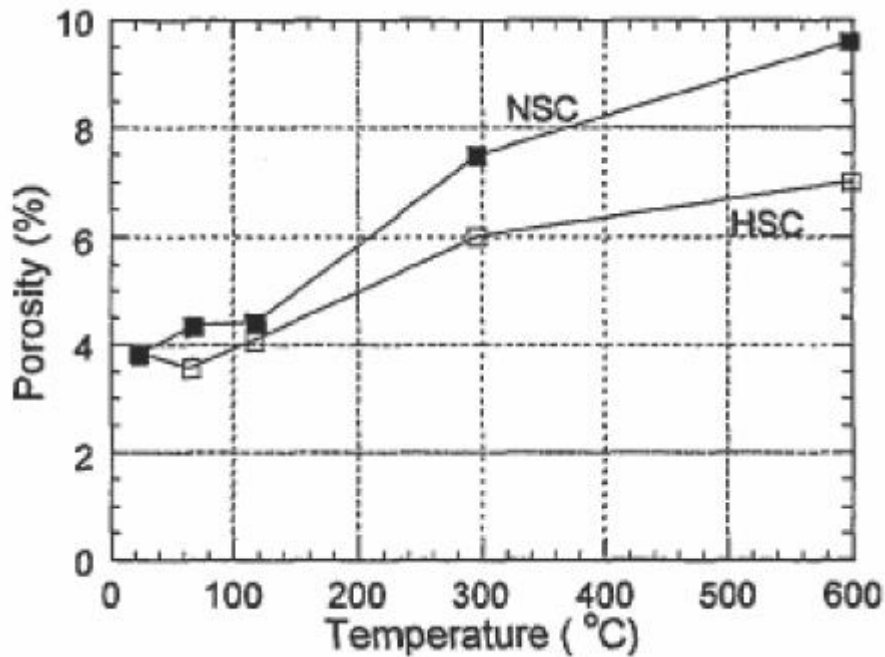
**Figure III-1** : Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenu par séchage à 105°C

### III.3.2 Influence sur la porosité

La porosité d'une pâte de ciment est fortement modifiée avec la température. Elle passe de 22% pour un échantillon non chauffé à 40% pour un échantillon chauffé à 600°C. La synthèse des résultats obtenus par différentes auteurs, indique que la porosité totale du béton augmente avec la température.

La **Figure III-2** montre la variation de la porosité totale en fonction de la température mesurée par Noumowé (71) sur un béton ordinaire ( $R_c = 38,10$  MPa) et un béton de haute performance ( $R_c = 61,10$  MPa).

Nous pouvons observer que la porosité totale augmente très peu entre la température ambiante et des températures de l'ordre de 120°C. Ceci confirme le fait qu'à ces températures l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée. A partir de 120°C, l'augmentation de la porosité est plus nette du fait de l'apparition de microfissures. Ces microfissures peuvent avoir pour origine la déshydratation de la pâte de ciment et l'incompatibilité de déformation des granulats et la pâte de ciment. [61]



**Figure III-2** Evolution de la porosité du béton avec la température

Pour décrire l'évolution de la porosité  $p$  avec la température  $T$ , Dal Pont [72] utilise une relation

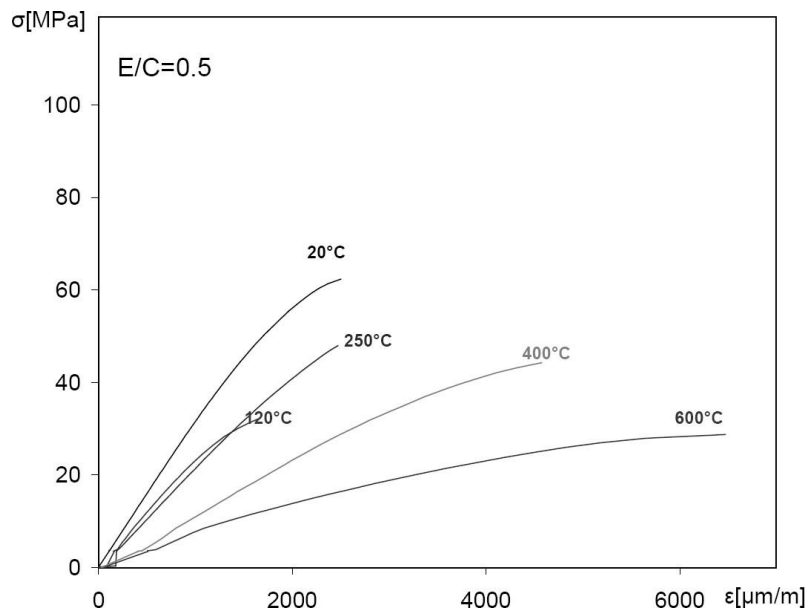
$$p = p_0 + A_n(T - T_0) \quad \text{équation III-3}$$

Où :  $p_0$  : porosité initiale déterminée à la température  $T_0$ .

$A_n$  : coefficient dépendant du type de béton. [65]

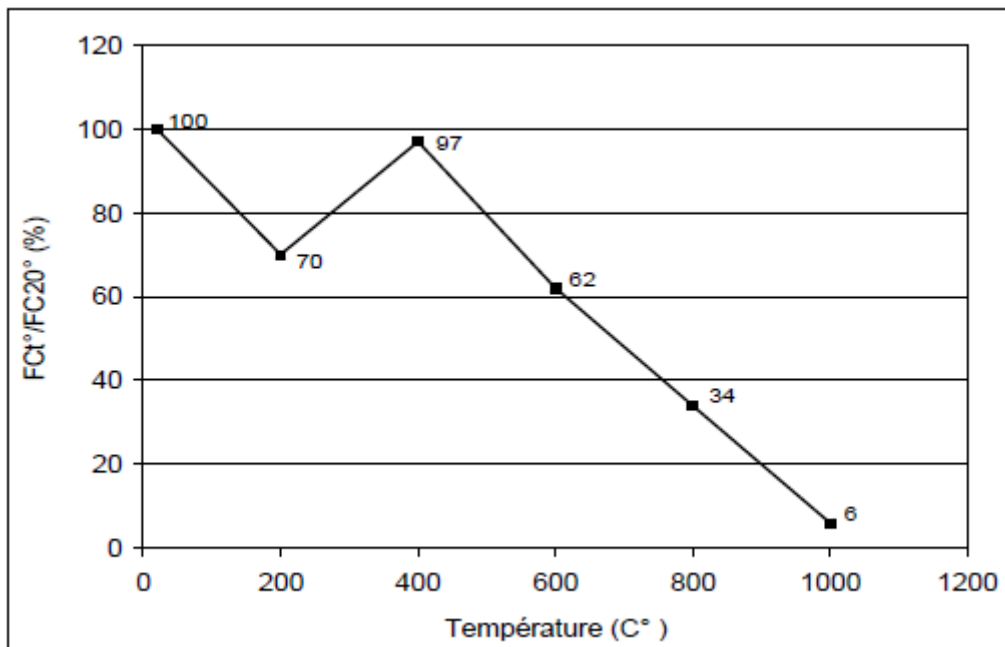
### III.3.3 Influence sur la résistance en compression

L'essai de résistance à la compression résiduelle, est l'un des essais les plus couramment utilisés pour décrire l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec la température. Il a l'avantage de se pratiquer sur un matériel simple (une presse hydraulique) et ne nécessite pas un personnel qualifié, à la différence de l'essai de compression à chaud. Ce dernier se pratique à la fin du palier de stabilisation de température au cours du cycle thermique. Il est considéré comme étant plus représentatif du comportement du matériau à haute température.



**Figure III-3** Courbes de résistance en compression "à chaud" à différentes températures pour un béton de rapport  $E/C=0.5$ , d'après Hager [66]

D'après une étude faite par Kamech [67] sur un béton exposé à des hautes températures variant de 200°C à 1000°C



**Figure III-4** Résistance à la compression à chaud

D'après la **Figure III-4** [67] ont constaté que c'est l'eau non évaporable (notamment chimiquement liée dans les hydrates), qui participe à l'établissement des pressions internes qui

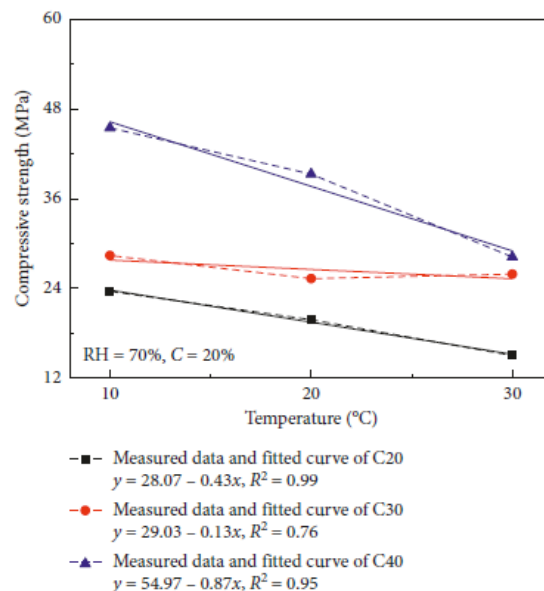
## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

jouent un rôle de précontrainte et par ceci à une augmentation de la résistance à la compression aux alentours de 400°C. Au-delà de 400°C, le rapport de la résistance à chaud diminue quasi linéairement jusqu'à une résistance nulle lorsque la température de chauffage dépasse 1000°C. Les éprouvettes chauffées à 600°C ont perdu 40% de leurs résistances initiales. Ainsi, que le béton chauffé à 800°C à perdu environ 75% de sa résistance.

La figure aussi montre qu'il y a une grande dégradation de la résistance en fonction de la température et des pics environ de 400C indiquant que le béton chauffé a attrapé de la résistance après avoir perdu un pourcentage de cette dernière. Ceci est dû à l'augmentation de la pression interne dans le béton qui peut jouer un rôle de précontrainte.

Ce pic est attribué à la présence de pressions de vapeur d'eau libérée par les différents hydrates qui jouent le rôle de force de précontrainte. Le pic est moins accentué pour le béton ayant subi un choc thermique à l'air ceci est dû à l'évacuation des pressions de vapeur d'eau du béton devenu plus poreux et donc la diminution de la force de précontrainte. [68]

D'après une étude faite par Ying Chen [69] sur 3 échantillons de béton ordinaire sous différents températures et 20% de concentration de dioxyde de carbone et 70% humidité relative



**Figure III-5** courbes de résistance à la compression du béton avec température

## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

---

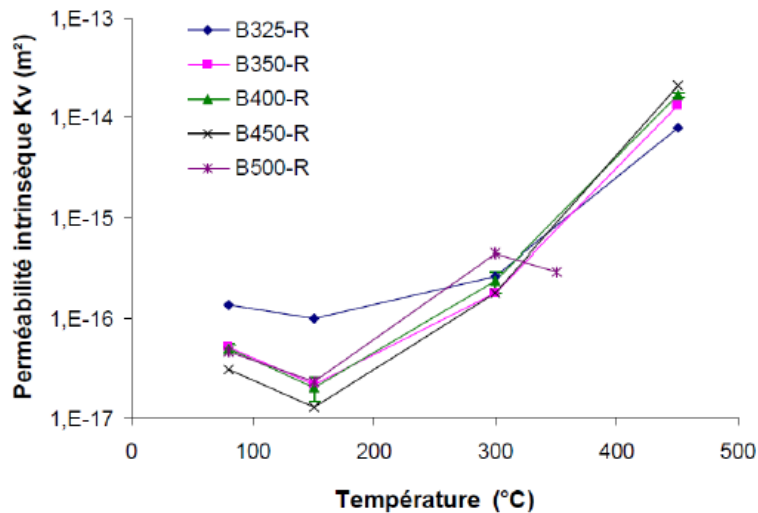
La **Figure III-5** indique qu'il y avait une relation significative entre la température de carbonatation et la résistance à la compression du béton après carbonatation, qui pourrait être décrite par une fonction linéaire. La résistance à la compression du béton après carbonatation diminue avec l'augmentation de la température, ce qui peut être le résultat de la réaction de carbonatation du CO<sub>2</sub> avec des produits d'hydratation, tels que l'hydroxyde de calcium (CH), l'hydrate de silicate de calcium (CSH), l'ettringite (AFt) et l'hydrate d'aluminate de calcium (CAH) dans les bétons.

Avec la carbonatation, les produits d'hydratation du béton se décomposent progressivement et de nouvelles substances sans propriété cimentaire sont générées. Le changement de composition du béton a induit la détérioration de la microstructure, qui se manifeste par la dégradation des propriétés mécaniques en macro perspective. En bref, la carbonatation du béton était le changement des produits d'hydratation et la destruction de l'équilibre de l'état chimique du système cimentaire.

De plus, le taux de réduction de la résistance à la compression du béton après carbonatation a également été affecté par le degré de résistance du béton et peut être causé par la compacité de la microstructure, ce qui pourrait affecter le coefficient de transmission du CO<sub>2</sub> dans le béton. La macro performance du béton carbonisé peut également être représentée par la profondeur de carbonatation. Par conséquent, l'influence sur la profondeur de carbonatation du béton a été mesurée.

### III.3.4 Influence sur la perméabilité

La **Figure III-6** présente la variation de la perméabilité intrinsèque résiduelle du béton en fonction de la température obtenue par Kanema [70]. Ils constatent que la perméabilité des bétons diminue à 150°C pour augmenter de manière exponentielle pour des températures supérieures. Ils attribuent la baisse de la perméabilité intrinsèque résiduelle à 150°C à la présence d'eau sous forme liquide dans les pores. L'augmentation de la perméabilité constatée entre 150 et 300°C est attribuée à un élargissement des pores capillaires tandis que celle observée entre 300 et 450°C est due à une détérioration de la matrice cimentaire.



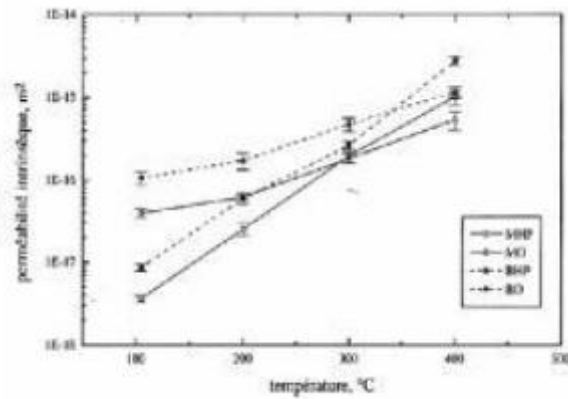
**Figure III-6** Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température

#### III.3.4.1 Perméabilité à l'eau :

Concernant l'évolution de la perméabilité à l'eau sous température élevée, les essais conduits par Joos et Reinhardt [71] ont montré une augmentation de la conductivité hydraulique de 13 à 62 % sous la température de 50  $^{\circ}C$  par rapport à la conductivité hydraulique mesurée à 20  $^{\circ}C$  et de 3 à 55 % sous la température de 80  $^{\circ}C$  par rapport à la conductivité hydraulique mesurée à 50  $^{\circ}C$ . Ces auteurs expliquent ces effets par la diminution de la viscosité de l'eau avec la température, ce qui provoque une augmentation de la conductivité hydraulique. L'eau utilisée pour mesurer la perméabilité peut provoquer le colmatage des pores par des particules fines et éventuellement la cicatrification du béton. De plus, ce phénomène est favorisé par la température élevée. Par conséquent, un biais risque d'être introduit lorsque la perméabilité est mesurée à l'eau.

#### III.3.4.2 Perméabilité au gaz :

Tsibrovskaja [72] a réalisé des mesures de la perméabilité au gaz (azote) sur des mortiers et des bétons soumis préalablement à un traitement thermique jusqu'à l'obtention de la masse constante à des températures comprises entre 105  $^{\circ}C$  (état de référence) et 400  $^{\circ}C$ . La même vitesse de montée en température, 0,2  $^{\circ}C/min$ , a été appliquée à toutes les éprouvettes en mortier (cylindres de diamètre 54 mm et de hauteur 30 mm) et en béton (cylindres de diamètre 150 mm et de hauteur 50 mm).



**Figure III-7** Evolution de la perméabilité intrinsèque avec la température dans les mortiers et les bétons ordinaires et hautes performances

Les résultats obtenus **Figure III-7** ont mis en évidence que la perméabilité au gaz, mesurée après refroidissement, qu'elle soit intrinsèque ou apparente, augmente avec la température.

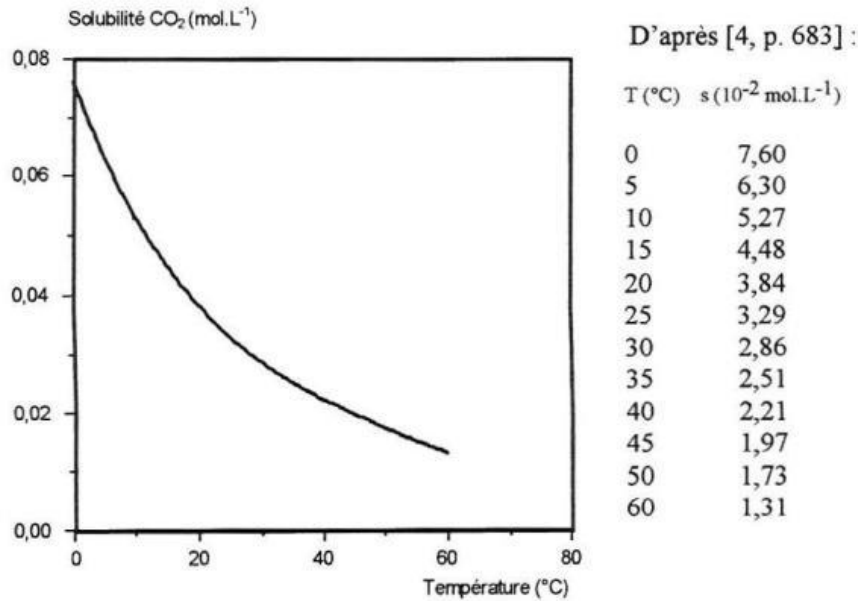
En particulier, la perméabilité d'un mortier ou d'un béton à hautes performances subit une augmentation de deux ordres de grandeur, tandis que la perméabilité d'un mortier ou d'un béton ordinaire subit une augmentation d'un ordre de grandeur à 400 °C par rapport à 105 °C. L'auteur attribue ces augmentations de la perméabilité à l'évolution de la microstructure des mortiers et des bétons avec la température, en particulier à l'augmentation du volume et de la taille des pores capillaires connectés dont une famille est propre à la pâte de ciment et l'autre aux mortiers et bétons (pores aux interfaces pâte-granulat). [21]

### III.3.5 Effet de la température sur la dissolution du dioxyde de carbone

La solubilité du gaz carbonique dans l'eau sous la pression atmosphérique ( $p_{CO_2}=105$ ) décroît rapidement avec la température et peut s'exprimer selon Chaussadent suivant la relation empirique (avec T en degré Kelvin).

$$S \text{ (mol.l}^{-1}\text{)} = 5,283.10^{-6} e^{(2608,2/T)} \quad \text{équation III-4}$$





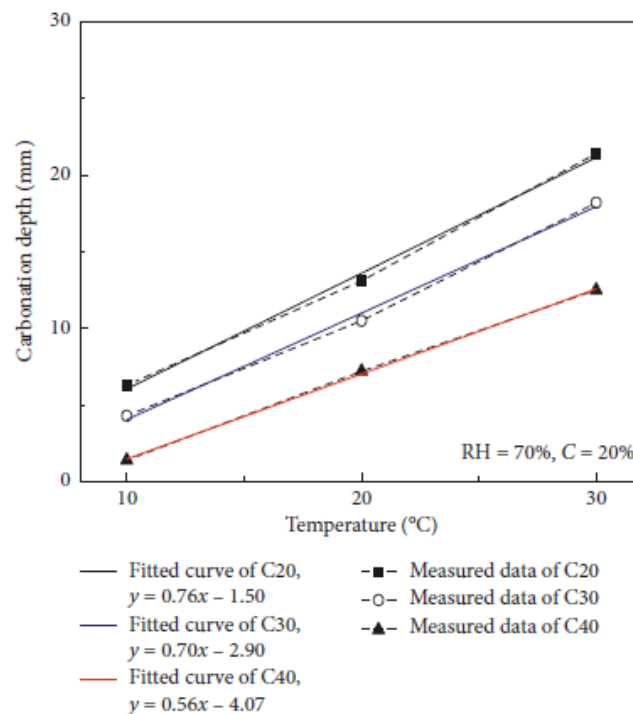
**Figure III-8** Solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau en fonction de la température et sous la pression atmosphérique (PCO<sub>2</sub> = 105 Pa)

### III.4 Effet de la température sur la carbonatation :

La carbonatation du béton est une réaction de neutralisation entre le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pénétrant dans le béton depuis l'atmosphère environnante et les produits d'hydratation alcaline (par exemple, l'hydroxyde de calcium) du béton. La carbonatation du béton peut provoquer une baisse locale de l'alcalinité de la solution des pores en raison de la consommation d'hydroxyde de calcium. La réduction de l'alcalinité du béton peut détruire le film passif initialement formé autour de l'armature en acier et donc entraîner la corrosion de l'acier d'armature lorsque l'humidité et l'oxygène y sont présents. Au cours des dernières décennies, de nombreux résultats ont été obtenus, qui portaient principalement sur le rapport eau/ciment, les fissures et le gel-dégel, les adjuvants, la charge et la période initiale de durcissement. Entre-temps, les effets des facteurs environnementaux, notamment la température, la concentration de dioxyde de carbone, l'humidité relative et la charge sur la carbonatation du béton ont également été étudiés. Compte tenu de l'augmentation de la température dans le monde, l'effet de la détérioration de la température sur la carbonatation du béton devient encore plus grave. La carbonatation du béton devient un problème de durabilité différent, qui accélère la dégradation des structures en béton armé. Par conséquent, il est important d'étudier l'effet sur la carbonatation du béton. La macroperformance (c'est-à-dire la résistance à la compression, la profondeur de carbonatation et la déformation) et les

## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

microcaractéristiques (c'est-à-dire la phase de composition, la microstructure et les produits de carbonatation) du béton carbonisé à différentes températures ont été mesurées.



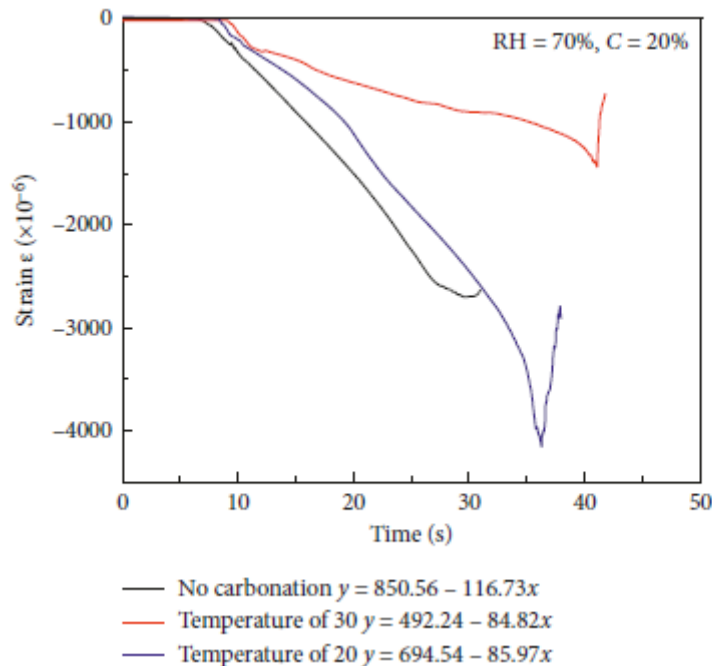
**Figure III-9** profils de profondeur de carbonatation du béton avec température

D'après Ying Chen [69] la **Figure III-9** montre que la relation entre la profondeur de carbonatation du béton et la température pourrait également être caractérisée par une fonction linéaire, qui se manifestait par l'augmentation de la profondeur de carbonatation du béton avec la température. Dans les mêmes conditions de carbonatation, la profondeur de carbonatation du béton diminuait avec l'augmentation de la résistance du béton. Cela est dû à l'augmentation de la température élevée du coefficient de transmission et de la vitesse de réaction du dioxyde de carbone, de sorte que le degré de carbonatation et la profondeur des spécimens de béton étaient plus importants. Avec l'augmentation de la résistance du béton, le béton s'est manifesté par une microstructure plus dense, une porosité plus faible, plus de sinuosité et une plus petite ouverture des pores. Par conséquent, le CO<sub>2</sub> transmis dans le béton avec difficulté. De plus, les produits de carbonatation générés dans les pores du béton pourraient remplir certains pores, ce qui améliorerait les caractéristiques des pores et diminuait la réaction de carbonatation dans le béton.

En raison de la carbonatation qui a réagi de la surface du béton vers l'intérieur, le changement de surface du béton peut être utilisé pour représenter la caractéristique de la carbonatation du

## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

béton. En utilisant le C20 comme exemple, l'influence de la température sur la déformation de la surface du béton a été étudiée. Des échantillons de béton prismatique ont été utilisés pour mesurer la déformation de surface conformément à la section 2.2. La **Figure III-10** montre les courbes de déformation de la surface du béton avec la température.



**Figure III-10** Courbe de déformation de la surface du béton avec température de carbonatation

Comme le montre la **Figure III-10**, l'effet de la température de carbonatation sur la déformation de la surface du béton était évident, ce qui se manifestait par la valeur de déformation et la pente du segment linéaire de la courbe de déformation. Par rapport au béton sans carbonatation, la valeur absolue de la pente de la courbe de déformation du béton après carbonatation diminue notablement avec la température de carbonatation.

La carbonatation pourrait induire la dégénérescence des performances mécaniques, la décomposition du produit d'hydratation et le relâchement de la microstructure, de sorte que le module élastique et la capacité portante du béton après carbonatation ont considérablement diminué. Plus la température de carbonatation était élevée, plus la carbonatation du béton était importante. Par conséquent, la déformation de la surface du béton était plus évidente avec température de carbonatation.

## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

---

D'après les 3 figures on peut dire que l'effet de la température ambiante sur la carbonatation du béton a été étudié. Les résultats expérimentaux ont montré que la profondeur de carbonatation et la résistance à la compression du béton se manifestaient par une relation linéaire avec la température. La profondeur de carbonatation du béton augmentait avec l'augmentation de la température, mais la résistance à la compression du béton après carbonatation diminuait avec le degré de résistance du béton. Cela s'explique par le fait que le coefficient de transmission du CO<sub>2</sub> et le coefficient de réaction chimique peuvent augmenter avec la température.

Les effets de la température sur la déformation de la surface du béton après la carbonatation se sont manifestés par la valeur de la déformation et la pente du segment linéaire de la courbe de déformation. La composition des phases, les produits d'hydratation et la microstructure du béton ont changé de manière significative avant et après la carbonatation. Ces changements se sont principalement manifestés par la disparition et l'affaiblissement du pic de diffraction de certains produits d'hydratation. L'analyse spectrale XRD et ESEM a révélé que le produit de carbonatation était principalement du carbonate de calcium.

La température affectait la forme cristalline des produits de carbonatation. La vaterite sphérique polyédrique était le principal produit de carbonatation à 10°C et 20°C, tandis que l'aragonite était le principal produit de carbonatation à 30°C. [69]

Ainsi, la vitesse de carbonatation semble plus importante en hiver qu'en été. La fréquence de l'exposition au soleil semble sans influence sur les profondeurs de carbonatation. La température la plus favorable pour un taux maximal de carbonatation est entre 20 à 25°C. Contrairement, d'autres recherches montrent que la pénétration du gaz carbonique augmente avec l'augmentation de température jusqu'à 60°C (à la pression atmosphérique). De ce fait l'augmentation de la température favorise la solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau. Au-dessus de 60°C, la solubilité du CO<sub>2</sub> diminue

D'autre part, la réaction de carbonatation est exothermique et la chaleur dégagée favorise la formation du CaCO<sub>3</sub>. Des auteurs montrent que, la réaction de carbonatation est favorisée pour des températures comprises entre 0 et 10°C. [58]

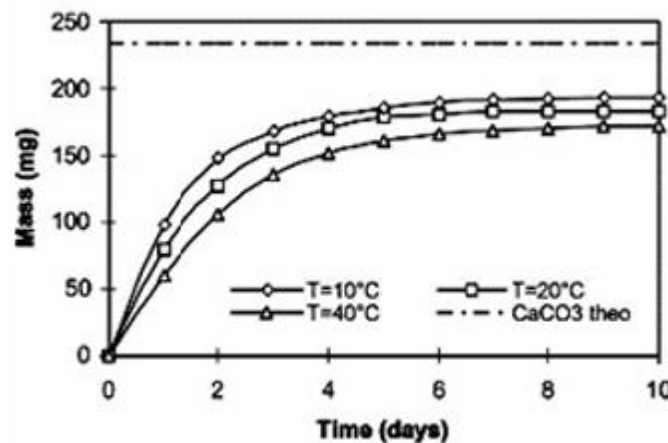
Chaussadent [73] émet l'hypothèse qu'une augmentation de la température diminue la vitesse de carbonatation des bétons. Pour ceci, il s'appuie sur la solubilité du dioxyde de carbone dans

## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

l'eau et sur des expérimentations réalisées par Dheilly et Tudo [74] selon lesquelles la portlandite se dégrade plus rapidement lorsque la température diminue.

A contrario, de nombreux auteurs constatent qu'une élévation de la température accélère le processus de carbonatation.

L'échauffement produit favoriserait le séchage des pores, donc faciliterait l'accès du dioxyde de carbone gazeux dans la matrice cimentaire. Thiery [31] trouve que l'effet de la température sur la vitesse de carbonatation est assez incertain, donc il ne tient pas compte de ce paramètre dans sa modélisation



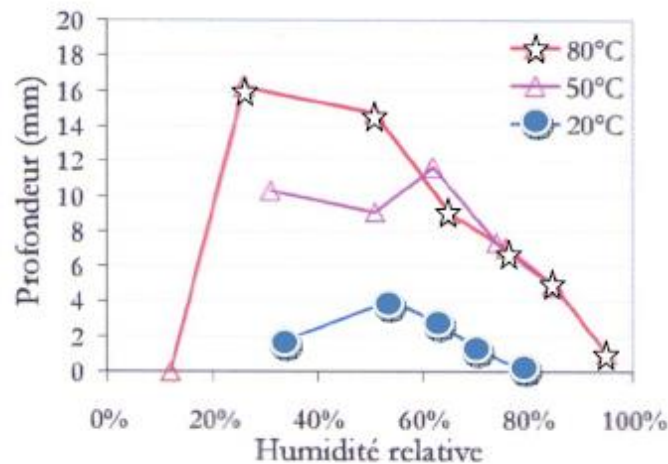
**Figure III-11** Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite (CO<sub>2</sub>=50 %), en fonction de la température

L'effet de la température est toujours incertain. Une étude récente menée par Drouet [2] a montré que la cinétique de carbonatation est accélérée en température du moins jusqu'à une température optimale donnée, caractéristique de la formulation des ciments. En-deçà de cette température « seuil », la cinétique de carbonatation est accélérée en lien avec la thermo-activation du transport.

Drouet [75] a pu conclure que cette température optimale était inférieure pour les ciments avec pouzzolanes. Il est probable qu'au-delà de cette température, la diminution de la solubilité des hydrates est telle que la solubilité rétrograde devient le facteur limitant. La température optimale étant inférieure pour les formulations dont la solubilité des hydrates est plus faible, appuis cette

## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

hypothèse. En somme, le résultat peut être généralisé sous le constat que quelles que soit les formulations, les profondeurs carbonatées sont supérieures à 50 et 80°C par rapport à 20°C.



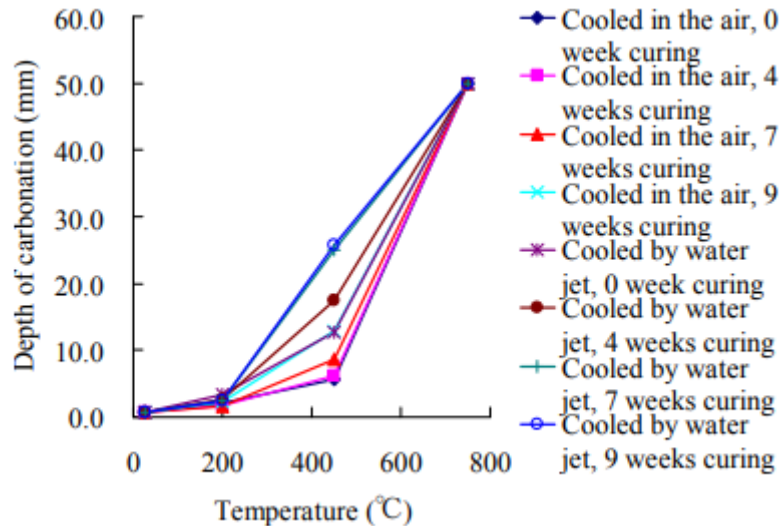
**Figure III-12** Impact de la température sur les profondeurs carbonatées de mortier à base d'un ciment Portland ordinaire à base de filler calcaire CEMII 42.5

- La température, la concentration en  $\text{CO}_2$  et l'humidité relative influencent considérablement la profondeur de carbonatation et la résistance à la compression du béton. La température a une relation linéaire avec la profondeur de carbonatation et la résistance à la compression du béton. La concentration en  $\text{CO}_2$  et l'humidité relative présentent respectivement des fonctions de puissance et de polynôme avec la profondeur de carbonatation du béton.

- La profondeur de carbonatation du béton est positivement corrélée à la température et à la concentration en  $\text{CO}_2$ , mais la résistance à la compression du béton est négativement corrélée à la résistance du béton. La profondeur de carbonatation du béton augmente avec l'augmentation de l'humidité relative et atteint son maximum lorsque l'humidité relative est de 70 %. Ceci est dû au fait que le coefficient de transmission du  $\text{CO}_2$  et le coefficient de réaction chimique peuvent augmenter avec la température. En outre, l'augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  peut entraîner l'augmentation du gradient de concentration et de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans le béton, ainsi que l'intensification de la carbonatation. La densité du béton est positivement liée au degré de résistance du béton. Le coefficient de transmission du  $\text{CO}_2$  dans le béton est faible, ce qui peut diminuer la profondeur de carbonatation du béton. [76]

### III.5 Effet de haute température sur la carbonatation du béton

Les résultats du test de la profondeur de carbonatation pour les éprouvettes de béton exposées à différentes températures sont représentés sur **La Figure III-13**. On observe sur cette figure que la profondeur de carbonatation augmentait avec l'augmentation de la température de chauffage



**Figure III-13** Effet de la température sur la profondeur de la carbonatation

L'augmentation de la profondeur de carbonatation des spécimens chauffés jusqu'à 200 °C était inférieure à 450 °C et 750 °C. La réduction de la résistance à la carbonatation est principalement attribuée à une diminution de la perméabilité avec l'augmentation de la température. Plus la température de chauffage est élevée, plus la profondeur de carbonatation est grande. Bien que l'incrément de profondeur de carbonatation de l'échantillon soumis à une température élevée de 200 °C était plutôt faible, mais une augmentation remarquable de la profondeur de carbonatation a pu être observée par rapport à celle de l'échantillon n'a pas subi la température élevée. Ceci peut être interprété par l'évaporation de l'eau libre, qui conduit à de nombreux canaux de gaz dans le béton, mais ils ne sont pas suffisants pour réduire notablement la perméabilité. Une température élevée de 450 °C entraîne une forte augmentation de la profondeur de carbonatation. On peut considérer qu'avec l'augmentation de la température, la décomposition des hydrates et la destruction de la structure du gel se produisent, et conduisent à des modifications de la structure microporeuse du béton. Le chauffage à la température élevée de 750 °C a entraîné une augmentation supplémentaire de la profondeur de carbonatation. La profondeur de carbonatation pouvait atteindre 50 mm, c'est-à-dire que le béton était complètement neutralisé. Par rapport à la

## [Chapitre 3 : l'effet de la température sur la carbonatation]

---

profondeur de carbonatation à 450, il y avait une augmentation extrêmement importante. C'est probablement parce qu'une forte augmentation de la perméabilité aurait lieu au-dessus de 750°C. Ceci est attribué à la formation et connexion des pores et des canaux de gaz en grand quantités.  
[77]

### III.6 Conclusion

L'influence de la température sur la carbonatation des bétons est incertaine du fait que plusieurs processus antagonistes sont susceptibles d'opérer simultanément.

La profondeur de la carbonatation augment avec le rapport E/C

La profondeur de la carbonatation diminue quand la résistance à la compression s'accroît.

La porosité augmente en fonction de la température.

La perméabilité augmente en fonction de la température.

La résistance à la compression diminue en augmentant la température avec des pics environ (120 °C-400 °C).

La solubilité du gaz carbonique décroît rapidement avec la température.



# Chapitre 4

Matériaux et méthodes expérimentales

## **IV. Chapitre 4 Matériaux et méthodes expérimentales**

### **IV.1 Introduction**

La suite de l'étude bibliographique, une série d'essais physiques et mécaniques au laboratoire était l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux : masses volumiques absolue et apparente, analyse granulométrique, équivalent de sable et foisonnement

Le propos de ce document est de présenter les techniques expérimentales utilisées dans le laboratoire, et aussi donner les différents principes et les modes opératoires propres à chacune des techniques abordées, sans entrer dans trop de détails. Plus les essais de carbonatation naturelle et accélérée et la mesure de la profondeur et la résistance de notre mortier.

Ces essais étaient effectués dans le laboratoire de génie civil du centre universitaire D'Ain témouchent, et laboratoire travaux publics ouest Ain témouchent.

### **IV.2 Identification des matériaux**

#### **IV.2.1 Sable de mer**

Dans ce travail de recherche, le sable utilisé pour la fabrication de nos mortiers est un sable de mer (sable fin roulé (0-1 mm)) qui provient de la sablière de Targa (Wilaya de Ain-Temouchent).



**Figure IV-1** sable mer de la carrière de Targa

## [Chapitre 4 : Matériaux et méthodes expérimentales]

Composition chimique.	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
Teneur en %	55.43	25.56	0.61	0.07	0.00	42.05	18.50

**Tableau IV-1** Analyse chimique du sable de mer

D'après ces résultats, on remarque un pourcentage important de la silice (55,43 %), ce qui nous permet de dire que ce sable est de nature siliceuse.

### IV.2.2 Sable de carrière

C'est un sable de nature calcaire concassé obtenu de la carrière de Targa (Ain Temouchent).

Nous avons nettoyé le sable et le tamisé dans un tamis de 80µm. Pour éliminer toutes les fines, et séchée à l'étuve.



**Figure IV-2** Sable de carrière Targa



**Figure IV-3** Etuve de séchage

<b>Composition chimique.</b>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
<b>Teneur en %</b>	15.07	24.90	0.61	0.15	NUL	79.43	34.95

**Tableau IV-2** Composition chimique

### IV.2.3 Ciment

Le ciment, utilisé dans la confection de nos éprouvettes des mortiers ordinaires, provient de la cimenterie de Beni-Saf appartenant à la wilaya d’Ain-Temouchent. Ce ciment composé (cpj CEMCII/A 42.7) est le plus utilisé dans le domaine de la construction dans toute la région Nord-Ouest Algérien. Les compositions chimiques et minéralogiques (composition de Bogue) de ce ciment sont présentées dans le **Tableau IV-13** et **Tableau IV-14**. Les analyses chimiques et les compositions minéralogiques ont été réalisées dans le Laboratoire des Travaux Publics Ouest (LTPO).

<b>Compositions chimique</b>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Perte au feu	CaO libre	R.I	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
<b>Teneur en %</b>	27.97	56.73	5.43	3.05	0.71	2.53	3.11	0.75	9.11	0.43	0.30

**Tableau IV-3** Analyse chimique du ciment

Composants	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CS
Teneur en %	59.98	2.15	9.87	9.31	2.94

**Tableau IV-4** Composition minéralogie du ciment de Béni-Saf

#### IV.2.4 Pouzzolane



**Figure IV-4** Pouzzolane

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de couleur rouge qui provient de la carrière de Beni-Saf située à l'ouest de l'Algérie. Avant de l'utiliser comme ajout pour la confection de notre mortier, il faut qu'elle soit d'une très grande finesse, pour cela nous l'avons broyé au moyen d'un broyeur à boulets.

Tout d'abord, il faut sécher à l'étuve, puis broyée dans une grande machine. Ensuite, nous avons tamisé la poudre de pouzzolane dans un tamis de 80 $\mu$ m.



Figure IV-5 Machine Micro devale

Compositions chimique	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
Teneur en (%)	78.96	4.98	1.22	3.12	NUL	4.67	2.05

Tableau IV-5 composition chimique de la pouzzolane naturelle

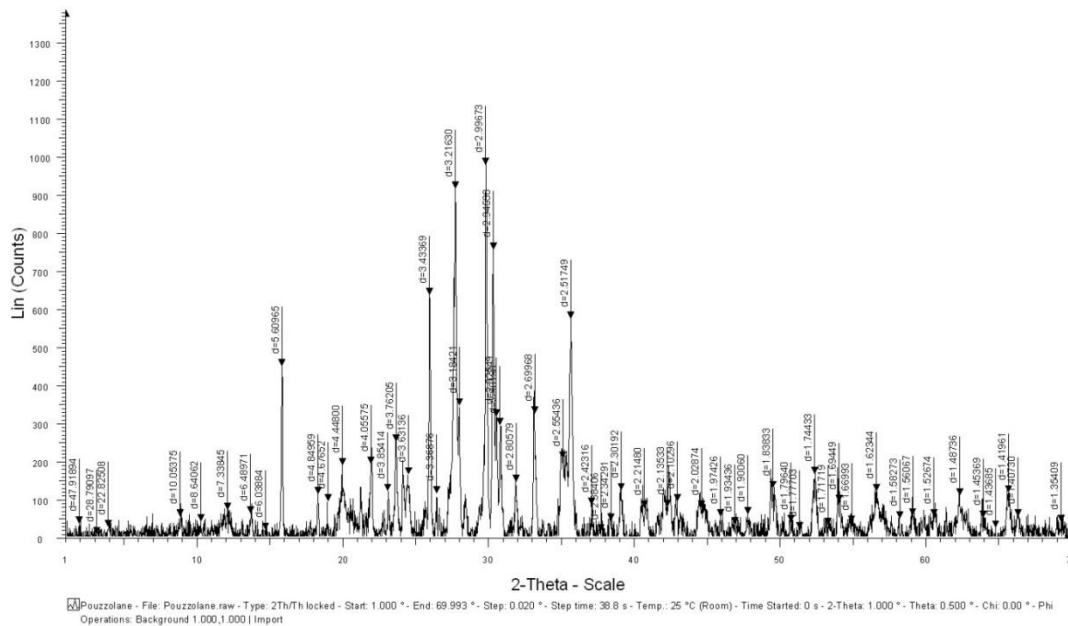


Figure IV-6 Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de la pouzzolane

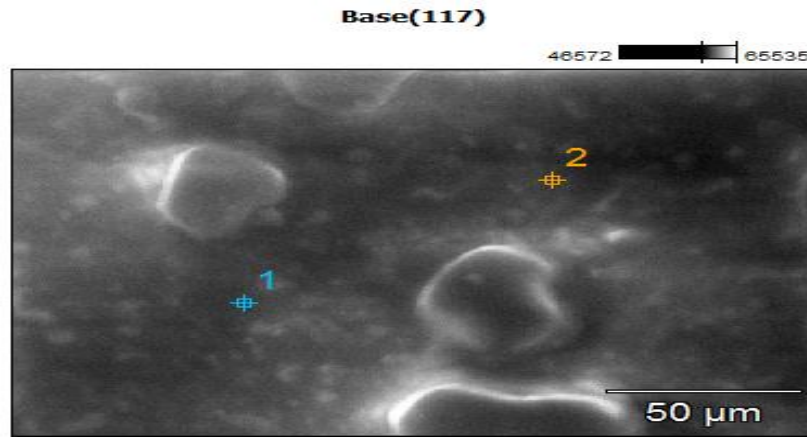


Figure IV-7 Les pores de la pouzzolane

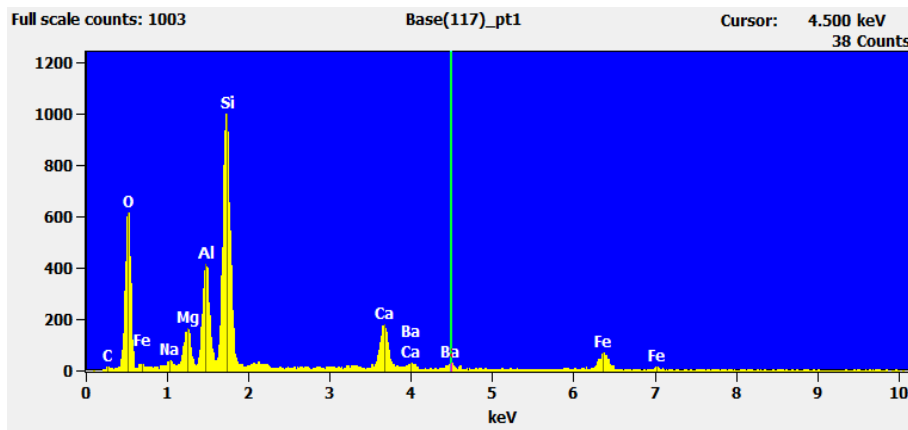


Figure IV-8 graphe de l'analyse par EDS

- EDS :

Élément	Wt(%)	Atom
Al	15.1	15.1
Si	42.5	50.9
Ca	19.5	16.4
Fe	23.0	13.9
Tal	100.0	100.0

Tableau IV-6 L'analyse par EDS

L'analyse par MEB (microscope à balayage électronique) réalisé au laboratoire de chimie nous donne une idée sur la microstructure de la pouzzolane et pour le graphe EDS il nous montre les mêmes résultats obtenus par l'analyse DRX on retrouve les mêmes éléments

## [Chapitre 4 : Matériaux et méthodes expérimentales]

tel la silice qui donne à la pouzzolane sa pozzolanité sachant que la norme indique qu'un matériau doit avoir une proportion min 25% de Si et Al.

### IV.2.5 Adjuvant

L'adjuvant utilisé est le SUPERIOR 9 WG est un adjuvant super plastifiant à base de polycarboxylates de nouvelle génération, qui permet de réaliser des bétons fluides avec des rapports E/C très réduits. Il est compatible tous les types de ciment.

Etat physique	Liquide
Couleur	Brun
Densité (g/cm <sup>3</sup> , 20°C)	1.10 (±0.03)
PH (20°C°)	5.5 (±1)
Extradit sec	33% (± 2%)
Teneur en chlorures	≤0.1%

**Tableau IV-7** Propriétés chimique et physique

#### IV.2.5.1 Caractéristiques :

Le SUPERIOR 9 WG est particulièrement recommandé pour la fabrication de béton exigeant :

Un faible rapport E/C.

Un long maintien d'ouvrabilité.

Des performances mécaniques élevées à court et long terme.

Une diminution du retrait.

Une imperméabilité.

Un meilleur parement.

Une durabilité.

#### IV.2.6 Poudre de marbre



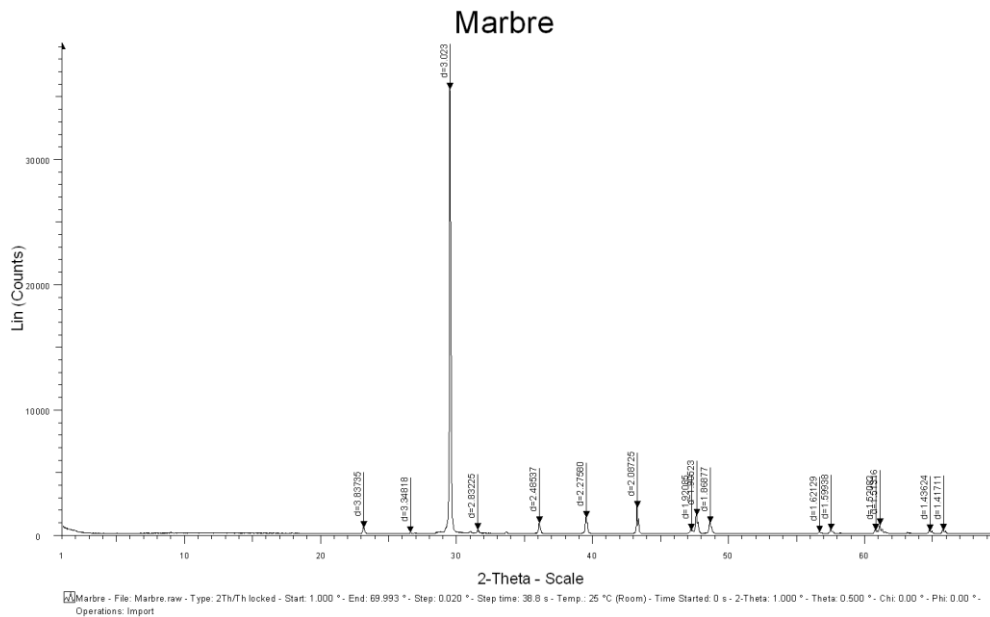


**Figure IV-9** Poudre de marbre

La poudre du marbre est le résultat d'un broyage des pièces en marbre blanc, jusqu'aux particules fines.

Composition chimiques	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	ZnO	SrO	ZrO <sub>2</sub>
Teneurs (%)	39.43	1.24	0.382	0.174	2.55	0.18	0.005	0.096	0.021	0.002	0.005

**Tableau IV-8** Composition chimique de la poudre de marbre



**Figure IV-10** Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de marbre

### IV.2.7 L'eau de gâchage

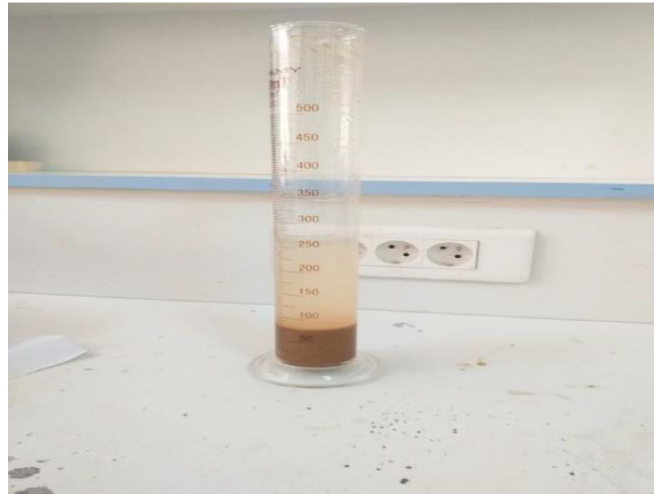
L'eau utilisée est une eau potable du robinet.

### IV.3 Méthodes d'essais

#### IV.3.1 Essai de masse volumique

Détermination de la masse volumique absolue et apparente d'un sable selon la norme **NF P18 -554**.

##### IV.3.1.1 Masse volumique absolue



**Figure IV-11** Essai masse volumique absolue

Cette manipulation a pour but de déterminer la masse volumique des granulats utilisés dans la confection du béton avec la méthode de l'éprouvette graduée. Et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique, nous effectuerons les essais trois fois de suite.

La masse volumique absolue de granulat sera calculé avec cette formule

$$M_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad \text{équation IV-1}$$

Matériaux	Sable de mer	Sable de carrière
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2	2.5

**Tableau IV-9** Résultats de l'essai de la masse volumique absolue

#### IV.3.1.2 Masse volumique apparente



**Figure IV-12** Masse volumique apparente

Cet essai a pour but de déterminer la masse volumique des granulats utilisés dans la confection de béton avec la méthode d'un récipient jaugé. et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique, nous effectuerons les essais trois fois de suite.

La masse volumique apparente de granulat sera calculé avec cette formule :

$$M_{app} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3} \times \frac{1}{V} \quad \text{équation IV-2}$$

Matériaux	Sable de mer	Sable de carrièr
Masse volumique apparente (g / cm <sup>3</sup> ).	2.8	3.15

**Tableau IV-10** Résultats de l'essai de la masse volumique apparente

#### IV.3.2 Analyse granulométrique



**Figure IV-13** série des tamis

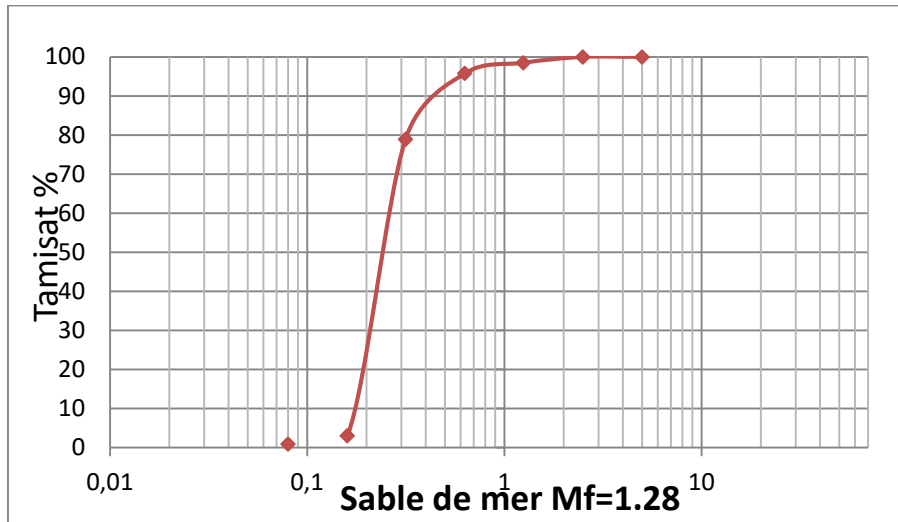
L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. La distribution en poids suivant la dimension des particules est traduite par une forme numérique ou une courbe granulométrique (une forme graphique). L'analyse granulométrique est réalisée conformément à la norme **NF-P18-560**.

**Module de finesse** : Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat,

**Sable de mer** :

	refus partiel(g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât(g)	tamisât(%)	Module de finesse  1.238
5	0	0	0	1000	100	
2,5	0	0	0	1000	100	
1,25	15	15	1,5	985	98,5	
0,63	27,5	42,5	4,25	957,5	95,75	
0,315	168,6	211,1	21,11	788,9	78,89	
0,16	758,3	969,4	96,94	30,6	3,06	
0,08	21,5	990,9	99,09	9,1	0,91	
fond	7,8	998,7	99,87	1,3	0,13	

**Tableau IV-11** Résultats d'analyse granulométrique du sable de mer



**Figure IV-14** Courbe granulométrique du sable de mer

**Sable de carrière**

	refus partiel(g)	refus cumule (g)	refus cumule (%)	tamisât(g)	tamisât(%)	Module de finesse  3.18
5	0	0	0	1000	100	
2,5	175.8	175.8	17.58	824.2	82.42	
1,25	274.1	449.9	44.99	550.1	55.01	
0,63	189.5	639.4	63.94	360.2	36.02	
0,315	118.5	757.9	75.79	242.1	24.21	
0,16	69.5	827.4	82.74	172.6	17.26	
0,08	99.4	926.8	92.68	73.2	7.32	
fond	73.2	1000	100	0	0	

**Tableau IV-12** Résultats d'analyse granulométrique du sable de carrière.

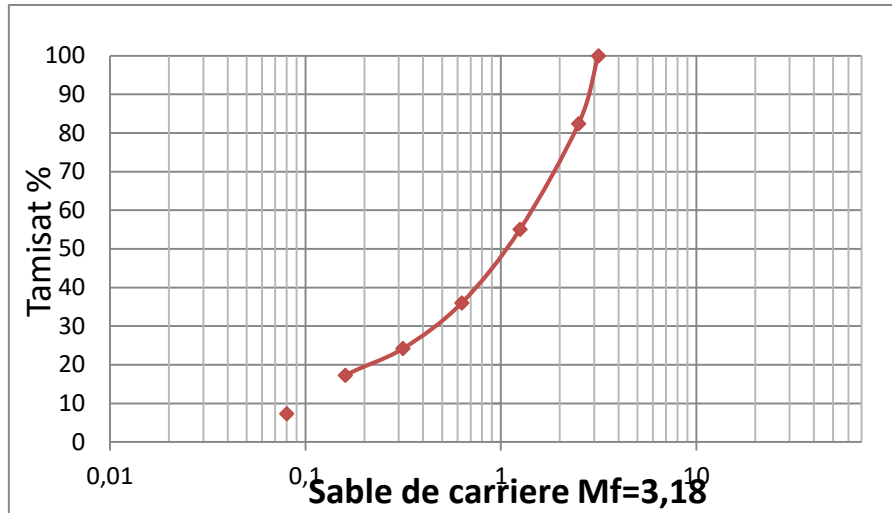


Figure IV-15 Courbe granulométrique du sable de carrière.

D'après l'analyse granulométrique du sable de carrières et sable de mer. Ce sable ne s'inscrit pas dans le fuseau Granulaire. Nous avons fait la correction des deux sables on trouve : Le sable est corrigé : 30% sable de mer et 70% sable de carrière.

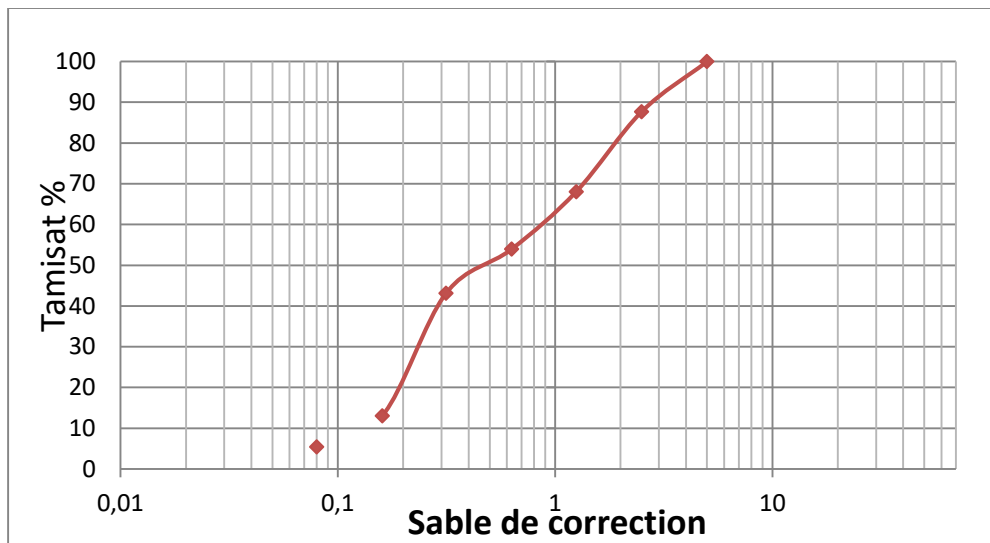


Figure IV-16 Courbe granulométrique du sable de correction

### IV.3.3 Essai Equivalent de sable



Figure IV-17 Essai Equivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière nuisible et d'éléments fins argileux contenus dans le matériau, ainsi de mesurer le taux de propreté des sables. **NF-P18-597**

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \text{ équation IV-3}$$

h1 : hauteur de sable propre et élément fins

h2 : hauteur de sable propre seulement

matériau	Sable de mer	Sable de carrière
ES	84.37	67.60

Tableau IV-13 Résultat de l'essai de l'équivalent de sable

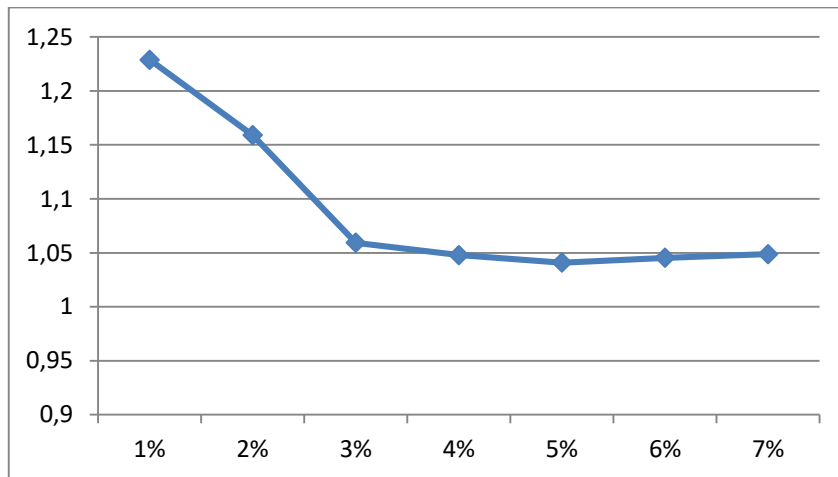
### IV.3.4 Essais de Foisonnement

L'importance du foisonnement dépend du pourcentage d'humidité présent dans le sable et de la finesse de celui-ci. L'augmentation de volume d'un sable humide, par rapport au volume occupé par un sable saturé et sec en surface.

**Sable de mer**

Teneur en eau	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	Coefficient de Foisonnement
Masse	1228.8	1159	1059.3	1047.8	1040.9	1045.4	1048.8	1.0454
Volume	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Masse volumique apparente	1.2288	1.159	1.0593	1.0478	1.0409	1.0454	1.0488	

**Tableau IV-14** résultat de l'essai de foisonnement de sable de mer



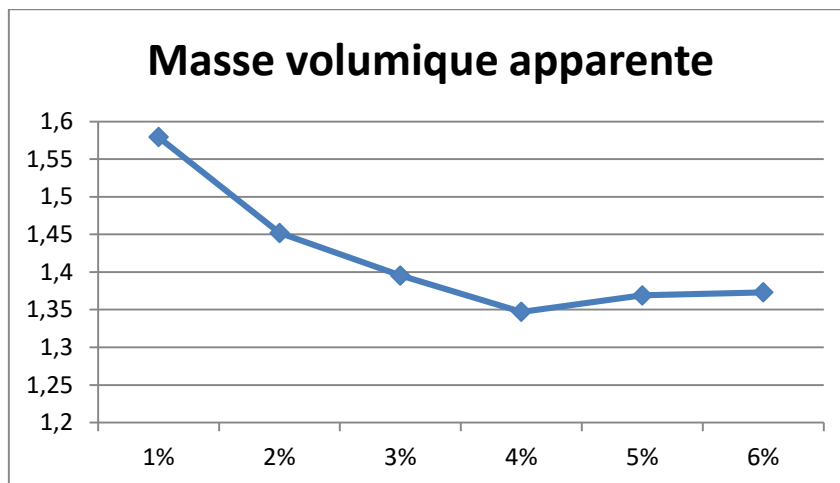
**Figure IV-18** résultat de l'essai de foisonnement de sable de mer



**Sable de carrière**

Teneur en eau	1%	2%	3%	4%	5%	6%	Coefficient de Foisonnement
Masse	1579.4	1451.9	1395.3	1347	1369.1	1373	1.3691
Volume	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Masse volumique apparente	1.5794	1.4519	1.3953	1.347	1.3691	1.373	

**Tableau IV-15** résultat de l'essai de foisonnement de sable de carrière



**Figure IV-19** résultat de l'essai de foisonnement de sable de carrière

**IV.4 Mortier étudié**

Cette étude est réalisée sur cinq types de mortiers de forme prismatique de dimensions 4×4×16 cm<sup>3</sup>. La différence entre chaque type de mortier est le type d'ajout (pouzzolane ou marbre) est le rapport E/C. Le **Tableau IV-16** donne la composition des éprouvettes fabriquée en mortier.

**IV.4.1 Formulation de mortier**

	Sable de carrière (g)	Sable de mère (g)	Ciment (g)	Pouzzolane (g)	Marbre (g)	Eau (ml)	Adjuvant
Gâché G1	550	825	350	0	0	175	2%
Gâché G2	550	825	350	12,50%	0	168	4%
Gâché G3	550	825	350	0	12,50%	168	4%
Gâché G4	550	825	350	6,25%	6,25%	168	4%
Gâché G5	550	825	350	12,50%	0	171,5	2%

**Tableau IV-16** Les différent type de dosage des mortiers étudiés

**IV.4.2 Préparation de mortier**



**Figure IV-20** malaxeur

Pour la préparation de mortier, nous avons procédé de la façon suivante :

-Préparer une série du moule des dimensions  $4 \times 4 \times 16$  cm, avec la quantité du mortier. Le moulage des éprouvettes de fait immédiatement après la préparation du mortier :

-Huiler les moules et vérifier leurs serrages

-Placer les moules sur une table vibrante

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction de sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30s	30 s	30 s	15 s	15 s	60 s
Etats du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

**Tableau IV-17** Préparation des mortiers.

#### IV.4.3 Moulage des éprouvettes



**Figure IV-21** les moules



**Figure IV-22** Appareil à choc

Après la préparation de mélange du mortier .il faut que les éprouvettes soient moulées immédiatement afin de fixer le moule à la table à chocs, les procédures de malaxage comme suit :

- Introduire le mélange de mortier en deux couches avec une cuillère convenable dans chaque compartiment.
- Étaler la couche uniformément en utilisant la plus grande spatule.

## [Chapitre 4 : Matériaux et méthodes expérimentales]

---

- Ensuite, serrer la première couche de mortier par 60 chocs.
- Introduire la seconde couche de mortier et de serre à nouveaux par 60 chocs.
- Retirer avec précaution le moule de la table à chocs et ôter la hausse.
- A l'aide d'une règle métallique on enlever immédiatement l'excès de mortier.
- Lisser la surface des éprouvettes en utilisant la même règle.
- Enlever le résidu du mortier restant sr le périmètre du moule, par suite de l'arasement.
- Étiqueter ou marquer les moules pour identifier les éprouvettes et leur position relative sur la table à chocs.

### **IV.4.4 Démoulage et conservation des éprouvettes.**

Le démoulage est effectué après 24 heures. Compter l'âge des éprouvettes à partir du moment du malaxage du ciment et de l'eau, jusqu'au début de l'essai. Effectuer les essais de résistance à différents âges dans les limites suivantes :

- 28 jours.
- 60 jours.
- 90 jours.



Figure IV-23 les éprouvettes

Nous avons également utilisé des éprouvettes anciennes de l'année dernière pour étudier leur évolution avec le temps.

## IV.5 Essais à l'état frais du mortier

### IV.5.1 Maniabilité

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide d'appareil de maniabilimètre B, il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique à des dimensions connus, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

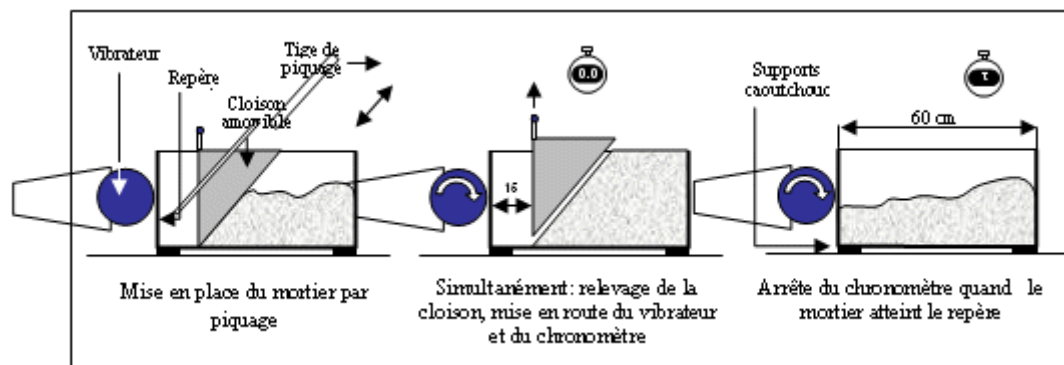


Figure IV-24 Principe de fonctionnement du maniabilimètre

#### But de l'essai :

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, on super plastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à

## [Chapitre 4 : Matériaux et méthodes expérimentales]

consistance égale .il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance.

### Principe de l'essai :

Dans ces essais la consistance est caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

### Matériaux utilisés :

L'appareil utilisé est appelé " maniabilimètre B " et schématisé sur la figure. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (60cm×30cm×30cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

Le temps  $t$  mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil. Comme illustré au

**Tableau IV-18**

Classe de consistance	durée
Ferme	$t > 40$
Plastique	$20 < t < 30$
Très plastique	$10 < t < 20$
fluide	$T < 10$

**Tableau IV-18** Classe de consistance selon la durée d'écoulement

### IV.5.2 L'air occlus



**Figure IV-25** Appareil de mesure de la teneur en air occlus

## [Chapitre 4 : Matériaux et méthodes expérimentales]

---

Cette méthode consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus d'un échantillon de béton compacté de volume connu se trouvant dans une enceinte étanche et à appliquer sur l'eau une pression d'air prédéterminée. On mesure la diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton en observant la valeur de la baisse du niveau d'eau.

### **Conduite de l'essai**

- Placer le béton dans le récipient d'une manière à éliminer autant d'air occlus que possible.
- Introduire le béton en deux couches d'épaisseur approximativement égale qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 10 fois par couche. Afin d'éliminer les bulles d'air occlus mais pas l'air entraîné.
- Nettoyer soigneusement les rebords du récipient et l'ensemble du couvercle.
- Plaquer le couvercle et fixer l'ensemble, s'assurer de la bonne étanchéité sous pression entre le couvercle et le récipient.
- Remplir l'appareillage d'eau et éliminer l'air adhérent aux surfaces intérieures du couvercle. Amener le niveau d'eau à zéro dans le tube vertical en purgeant par le petit robinet.
- A l'aide de la pompe à air, appliquer la pression
- Mesurer la diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton en observant la valeur de la baisse du niveau d'eau.

## **IV.6 Essais mécaniques sur les mortiers**

### **IV.6.1 Traitement au four**

Les éprouvettes sont placées dans un four à 3 températures différentes, 200°, 400° et 600°. Après les avoir sortis du four, nous les laissons refroidir puis ils sont prêts pour les essais mécaniques de la flexion et la compression.





**Figure IV-26** four

Le type de four utilisé pour le traitement thermique des éprouvettes est Nabertherm modèles N 7/H. les propriétés de cette four est :

- Température maximale : 1280°C
- Volume de la chambre : 7, 11, 17, 31, 41 ou 61 litres
- Régulation et programmeur de température
- Porte guillotine à ouverture vers le bas. [21]

#### IV.6.2 Essai de flexion



**Figure IV-27** Appareil de l'essai de la flexion

Pour la détermination de la résistance à la flexion, nous avons utilisé la méthode de la charge concentrée à mi- portée au moyen du dispositif de flexion normalisé (flexion à trois points). II

s'agit dans cet essai d'appliquer une charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et de l'augmenter avec une vitesse constante jusqu'à rupture. Un schéma indiquant le principe de cet essai est donné ci-dessous :

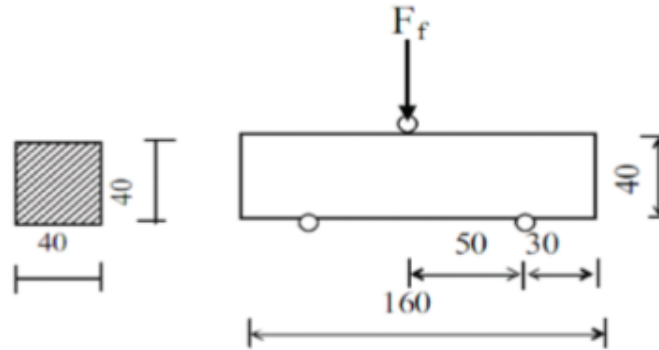


Figure IV-28 Principe de l'essai de la flexion d'une éprouvette

### IV.6.3 Essai de compression

Cet essai consiste à centrer chaque demi-prisme (obtenu suite à l'essai de la flexion) latéralement par rapport aux plateaux de la machine à  $\pm 0.5$  mm près et longitudinalement, de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm. L'application de la charge de compression doit être avec une vitesse constante jusqu'à la rupture.



Figure IV-29 Appareil de l'essai de la compression

### IV.6.4 Essai de carbonatation naturelle

## [Chapitre 4 : Matériaux et méthodes expérimentales]

---

La carbonatation naturelle des éprouvettes est évidemment la méthode la plus proche de la réalité. Cependant, elle est longue et il est difficile de maintenir pendant une telle durée des conditions d'ambiance constantes. Pour évaluer la carbonatation naturelle de nos mortiers, nous avons conservé les échantillons dans la salle de laboratoire.

### **IV.6.5 Essai de carbonatation accéléré**

#### **IV.6.5.1 Principe de l'essai :**

L'essai consiste à introduire du gaz carbonique (1% à 50%) dans une enceinte (20°C) à humidité relative (HR=65%) dans laquelle sont placés les échantillons de béton ou de mortiers.

A certaines échéances, les échantillons sont retirés de l'enceinte et la profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide de phénolphtaléine comme indicateur qui permet de visualiser le changement de pH ( $8 \leq \text{pH} \leq 10$ ) résultant de la carbonatation du béton ou du mortier. [10]

#### **IV.6.5.2 Conduite de l'essai :**

-Les échantillons sont ensuite introduits dans l'enceinte de carbonatation accéléré. L'alimentation en CO<sub>2</sub> est assurée à partir d'une bouteille de CO<sub>2</sub> sous pression dont le débit est réglé à partir d'un manomètre, évitant les surpressions dans l'enceinte pour que le transfert du gaz CO<sub>2</sub> dans les corps d'épreuve se fasse avant tout par diffusion.

-Retirés les échantillons et mesuré la profondeur de carbonatation avec la phénolphtaléine. [10]

#### **IV.6.5.3 Suivre de la progression de carbonatation**

A chaque échéance (28,60 et 90 jours), les corps d'épreuve sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté sont mesurées après les pesés. Un morceau de béton ou de mortier (épaisseur  $2 \pm 1$  cm) est prélevé sur chaque éprouvette.

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphtaléines. [10]

### **IV.7 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre, les différents matériaux employés (ciment, sable, pouzzolane, marbre, adjuvants), ainsi que leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Ensuite, nous avons présenté et calculé les matériaux de construction qui entre dans l'étude de notre mortier.

Pour le matériel utilisé, les différents essais, les équipements de conservation du mortier.

Enfin, nous avons décrit la procédure expérimentale adoptée pour les essais de carbonatation et les techniques de suivi de la progression de la carbonatation ont été sommairement présentées

# Chapitre 5

Résultats et discussions

## V.Chapitre 5 Résultats et discussion

### V.1 Introduction

Dans ce chapitre nous abordons les différents essais effectués sur le mortier à l'état frais (maniabilité et l'air occlus) ainsi que les essais réalisés sur le mortier confectionné pour évaluer ses propriétés à l'état durci (résistance à la flexion et résistance à la compression ainsi que la carbonatation naturelle et accéléré).

Une analyse et des discussions des résultats seront présentées, nous allons comparer les différents résultats des différents mortiers. La profondeur de carbonatation mesurée sur des éprouvettes du mortier de différent âge sera présentée aussi.

### V.2 Interprétations des résultats :

#### V.2.1 Essais à l'état frais de mortier

##### V.2.1.1 Maniabilité

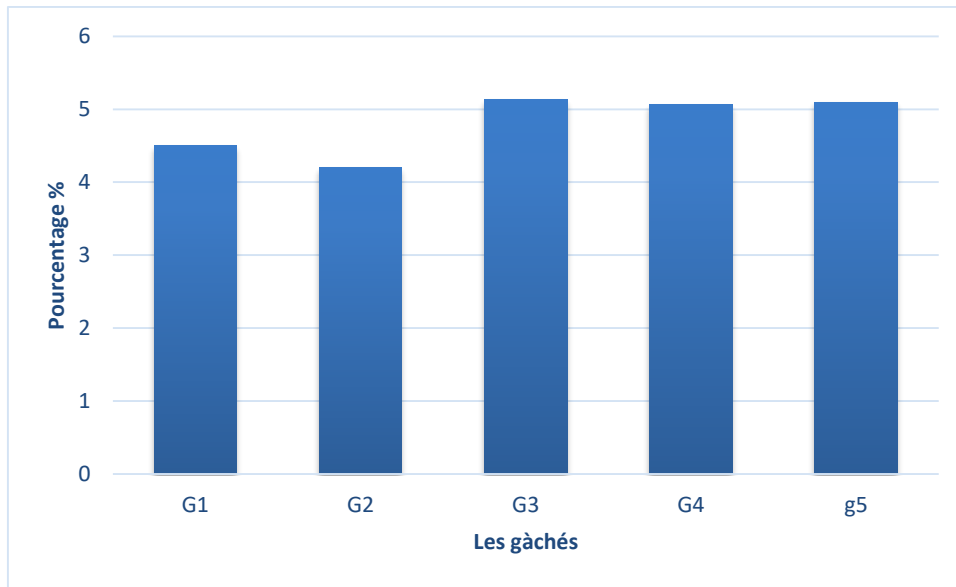
Gâché	Résultat	Classe de consistance
G1	5s	fluide
G2	4.6s	Fluide
G3	6.8s	Fluide
G4	4s	Fluide
G5	15s	Très plastique

**Tableau V-1** résultats d'essai de maniabilité

##### V.2.1.2 Air occlus

Gâché	résultat
G1	4.5%
G2	4.2%
G3	5.13%
G4	5.06%
G5	5.1%

**Tableau V-2** résultat d'essai d'air occlus



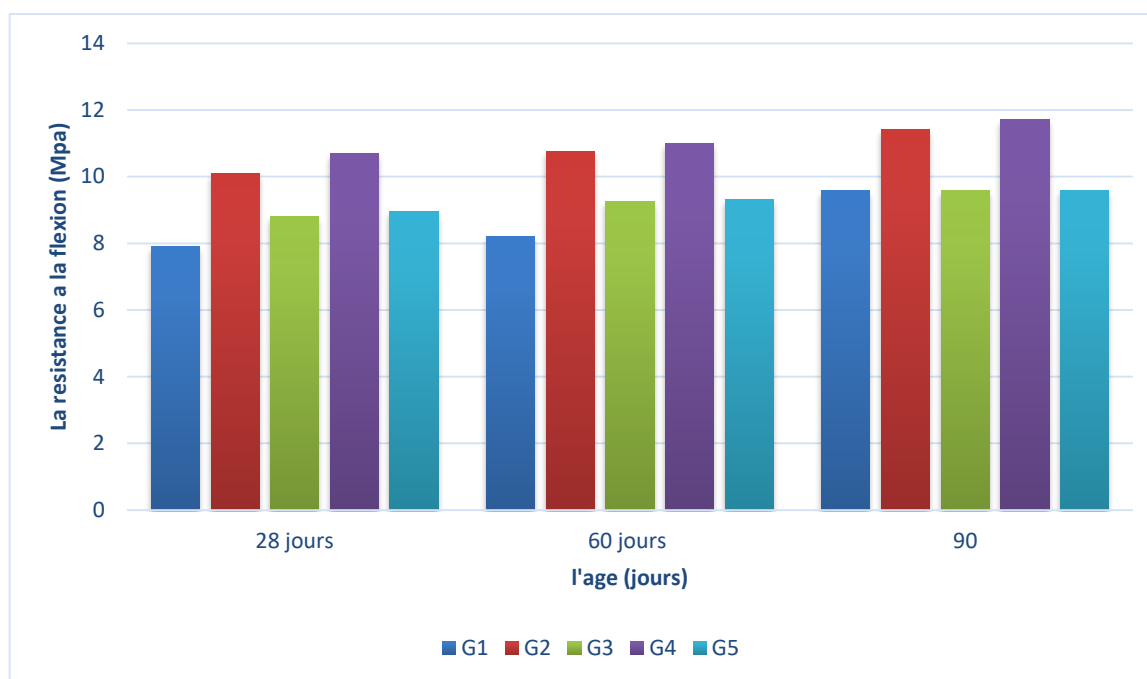
**Figure V-1** résultat d'essai d'air occlus

## V.2.2 Essais à l'état durci de mortier

### V.2.2.1 Résistance à la flexion

Gâché	Résistance à la flexion (Mpa)		
	28 jours	60 jours	90 jours
G1	7.90	8.20	9.57
G2	10.10	10.75	11.40
G3	8.80	9.25	9.58
G4	10.70	11	11.70
G5	8.95	9.30	9.60

**Tableau V-3** Résistance à la flexion



**Figure V-2** Résistance à la flexion

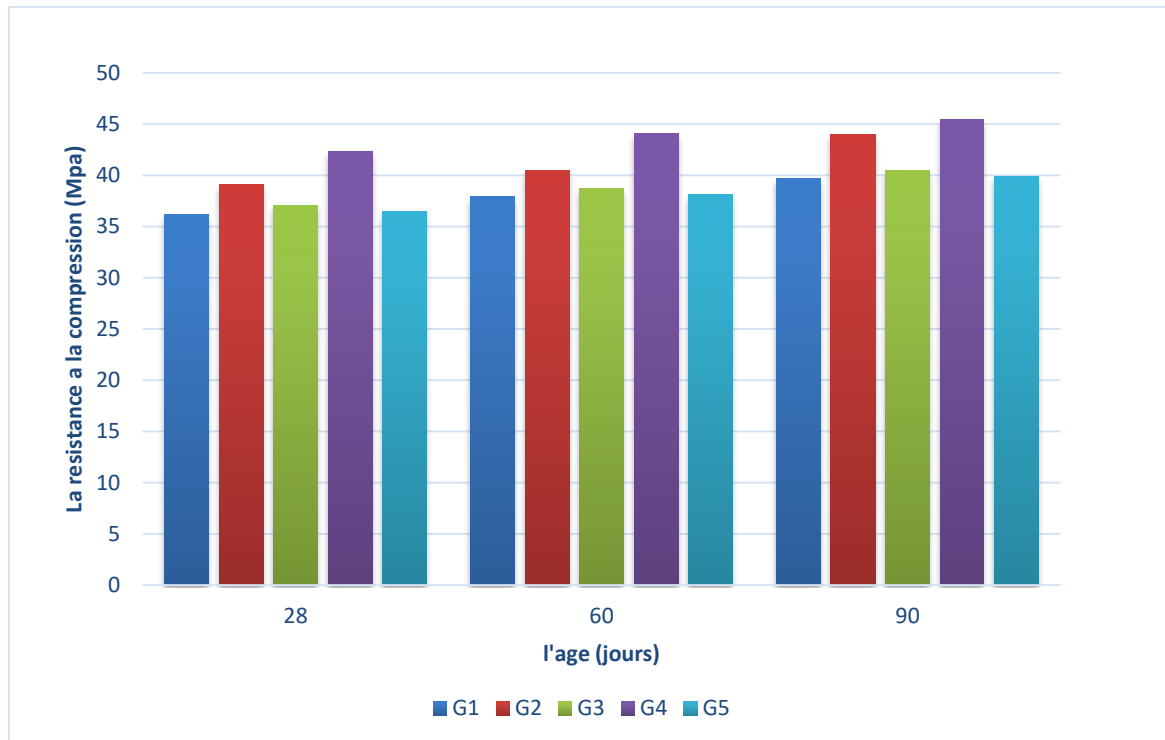
D'après les résultats illustrés sur la **Figure V-2**, on a observé que la résistance à la flexion augmente en fonction de l'âge des éprouvettes à (28, 60 et 90 jours) et pour tous les mortiers testés.

#### V.2.2.2 Résistance à la compression

gâché	Résistance à la compression (Mpa)		
	28 jours	60 jours	90 jours
G1	36.20	37.90	39.66
G2	39.09	40.48	43.98
G3	37.09	38.68	40.42
G4	42.29	44.10	45.45
G5	36.43	38.12	39.90

**Tableau V-4** Résistance à la compression





**Figure V-3** Résistance à la compression

La **Figure V-3** montre que la résistance en compression augmente en fonction de l'âge du matériau (28,60 et 90 jours).

L'ajout de la pouzzolane et de la poudre de marbre engendre des modifications significatives sur les propriétés des mortiers à l'état frais et durci. L'ajout de la poudre de marbre et la pouzzolane avec l'adjuvant G4 a donné une amélioration de la résistance à la compression et à la flexion par rapport aux autres mortiers.

### V.2.2.3 Relation entre les résistances à la flexion et à la compression du matériau :

Dans le but de comparer les résistances à la compression et à la traction par flexion des mortiers étudiés, et de vérifier les évolutions des deux résistances.

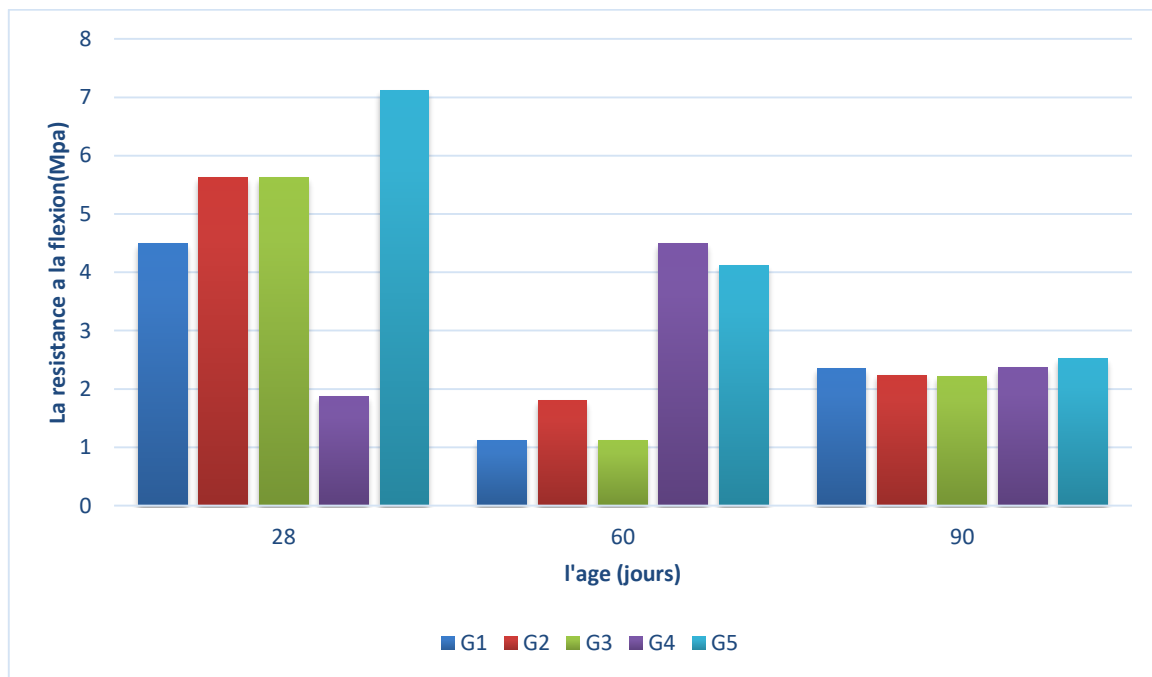
Nous pouvons constater, à partir de ces résultats obtenus que la résistance à la compression augmente avec la résistance à la traction par flexion au cours du temps en fonction de l'âge du matériau pour tous types de mortiers étudiés.

V.2.2.4 Pour la carbonatation naturelle

V.2.2.4.1 Essai de résistance à la flexion

Les gâchés	Essai de résistance à la flexion(Mpa)		
	28jours	60jours	90jours
G1	4.49	1.12	2.35
G2	5.62	1.8	2.24
G3	5.62	1.12	2.22
G4	1.87	4.49	2.37
G5	7.12	4.12	2.52

**Tableau V-5** La résistance à la flexion à 200 °C (carbonatation naturelle).



**Figure V-4** Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à 200 °C (carbonatation naturelle).

Nous remarquons que la résistance à la flexion des gâches (G1, G2, G3) a diminué après 60 jours et a augmenté plus tard à 90 jours

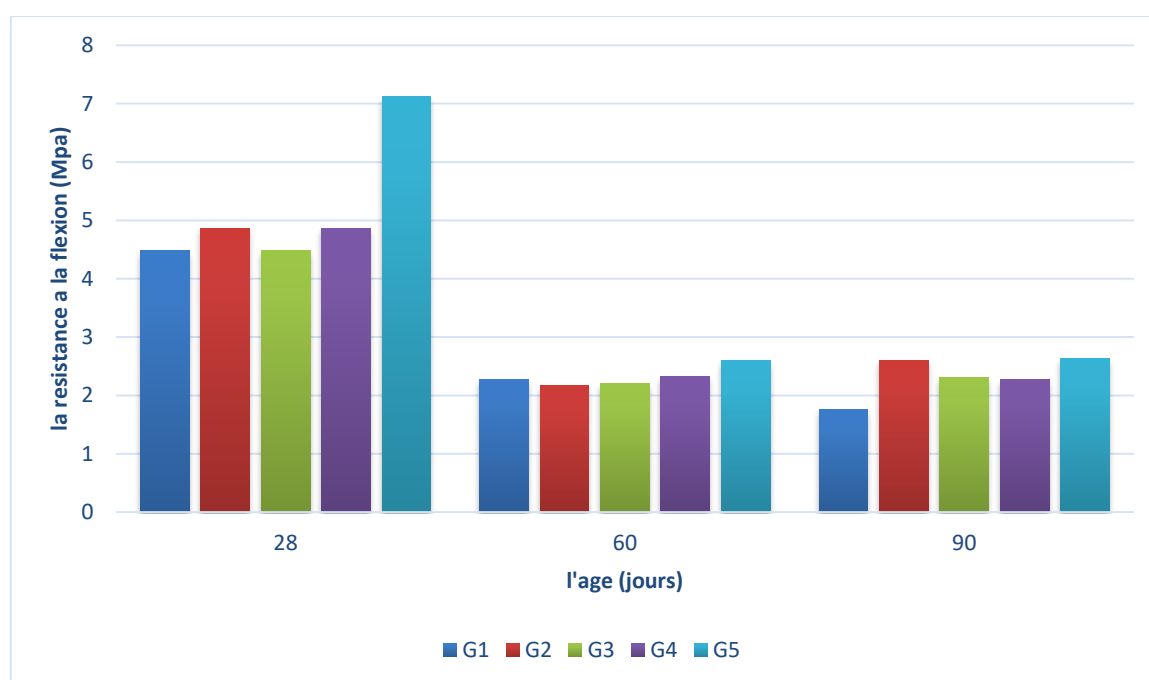
Pour le gâché G4 la résistance a augmenté après 60 jours et a diminué après 90 jours.

Pour le gâché G5 la résistance a diminué linéairement en fonction de temps.

## [Chapitre 5 : Résultats et discussion]

Les gâchés	La résistance à la flexion (Mpa)		
	28jours	60jours	90jours
G1	4.49	2.28	1.75
G2	4.87	2.17	2.60
G3	4.49	2.2	2.30
G4	4.87	2.33	2.28
G5	7.12	2.59	2.63

**Tableau V-6** La résistance à la flexion à 400 °C (carbonatation naturelle).



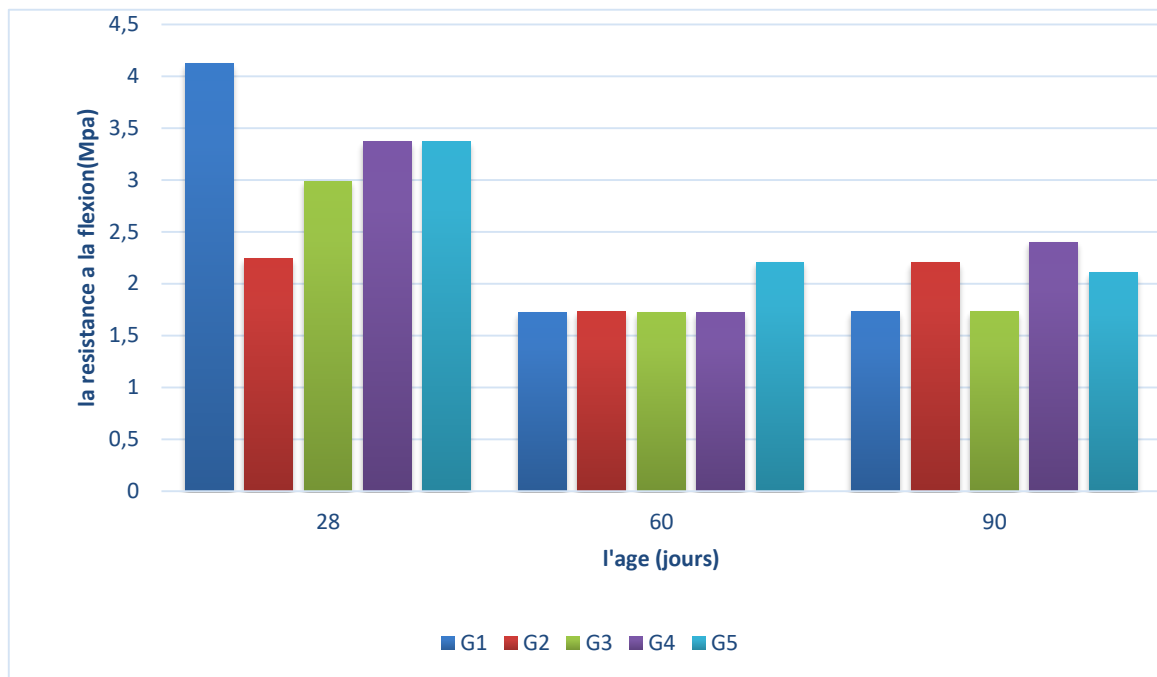
**Figure V-5** Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à 400 °C (carbonatation naturelle).

D'après **La Figure V-5**. Nous remarquons une diminution de 50% pour les valeurs de résistance de (G1, G2, G3, G4) de 28 à 60jours, et une diminution de 66% pour le gâché G5.

## [Chapitre 5 : Résultats et discussion]

Les gâchés	La résistance à la flexion (Mpa)		
	28jours	60jours	90jours
G1	4.12	1.72	1.73
G2	2.24	1.73	2.2
G3	2.99	1.72	1.73
G4	3.37	1.72	2.40
G5	3.37	2.21	2.11

**Tableau V-7** La résistance à la flexion 600 °C (carbonatation naturelle).



**Figure V-6** Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à 600 °C (carbonatation naturelle).

Nous remarquons une diminution de la résistance pour les gâchés (G1, G3 et G5) de 28 à 60 jours, et elles ont gardé la même valeur après 90 jours

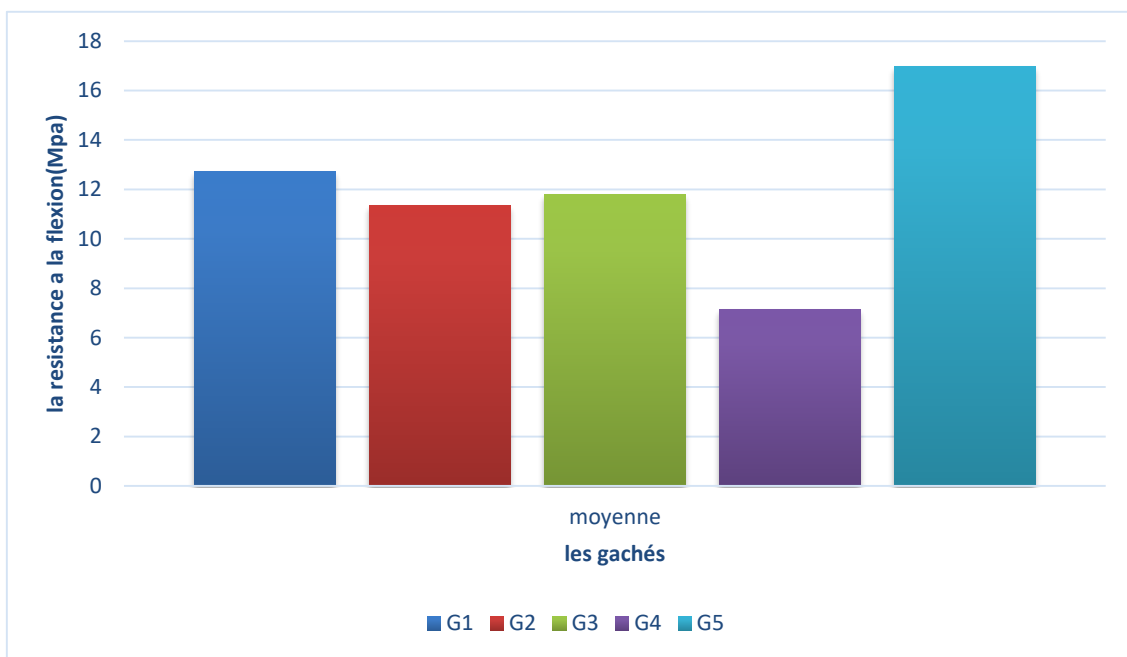
Pour les gâchés (G2 et G4) nous remarquons une diminution de la résistance à 60 jours et une augmentation à 90 jours

Comparant les trois figures (**Figure V-4**, **Figure V-5**, **Figure V-6**) avec la **Figure V-2** Nous ont permis de constater que le mortier chauffé au four a perdu sa résistance initiale à la flexion et que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de la température.

- Les anciennes éprouvettes

Les gâchés	Résistance à la flexion (Mpa)
G1	12.74
G2	11.35
G3	11.80
G4	7.12
G5	16.97

**Tableau V-8** résistance à la flexion des anciennes éprouvettes (carbonatation naturelle).



**Figure V-7** Evolution de la résistance à la flexion des anciennes éprouvettes (carbonatation naturelle).

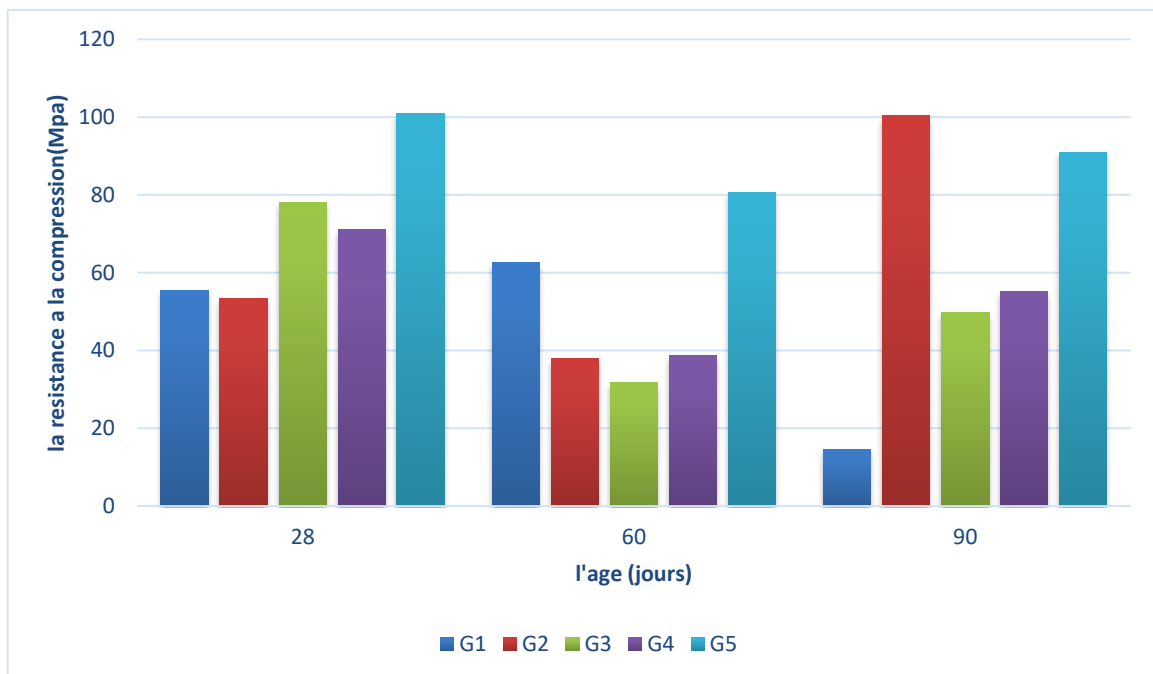
La **Figure V-7** montre que la résistance à la flexion a augmenté en fonction de l'âge du matériau (12mois).

D'après les figures précédentes. Nous remarquons que le gâché G5 donne la meilleure résistance à la flexion.

V.2.2.4.2 Essai de résistance à la Compression

Les gâchés	La résistance à la compression (Mpa)		
	28jours	60jours	90jours
G1	55.47	62.59	14.61
G2	53.22	37.85	100.44
G3	77.95	31.85	49.74
G4	71.21	38.60	55.09
G5	100.82	80.58	91.07

**Tableau V-9** La résistance à la compression à 200 °C (carbonatation naturelle)



**Figure V-8** Evolution de la résistance à la compression des mortiers à 200 °C (carbonatation naturelle)

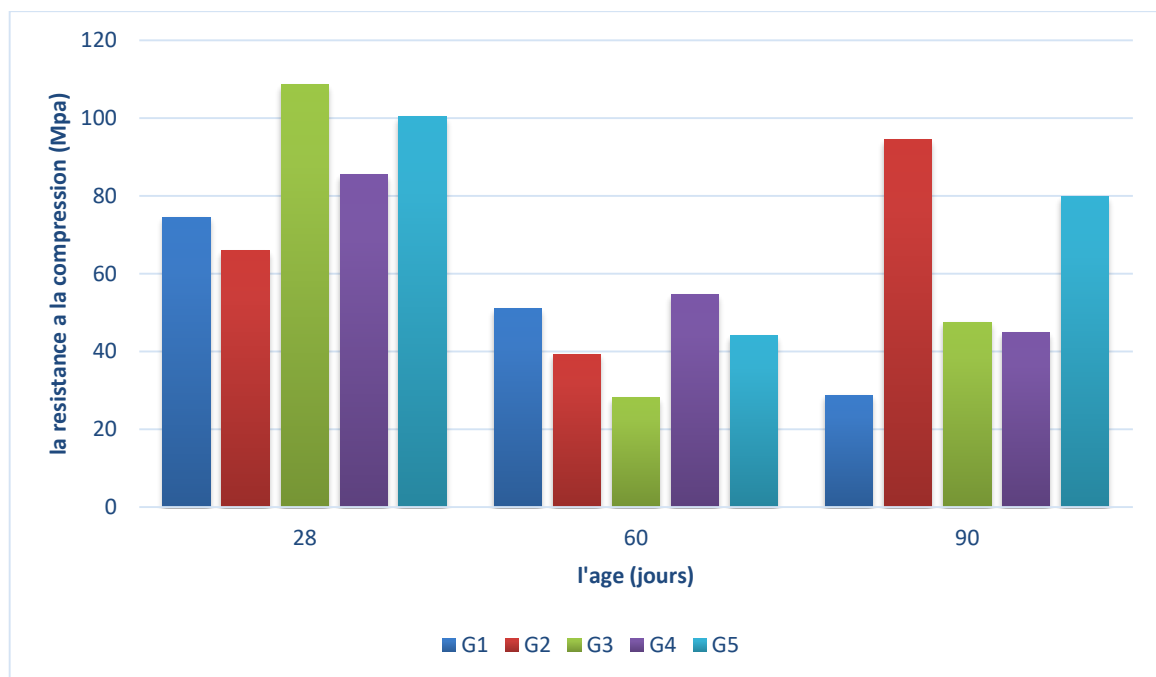
Nous remarquons que les valeurs de résistance à la compression des gâchés (G2, G3, G4, G5) ont diminué après 60 jours, et augmenté après 90 jours.

Pour la gâché G1 la résistance a augmenté après 60 jours et elle diminue de 80% après 90 jours.

## [Chapitre 5 : Résultats et discussion]

Les gâchés	La résistance à la compression (Mpa)		
	28jours	60jours	90jours
G1	74.58	50.97	28.85
G2	65.96	39.35	94.44
G3	108.69	28.11	47.59
G4	85.45	54.72	44.97
G5	100.44	44.22	79.83

**Figure V-9** La résistance à la compression à 400 °C (carbonatation naturelle)



**Figure V-10** Evolution de la résistance à la compression des mortiers à 400 °C (carbonatation naturelle)

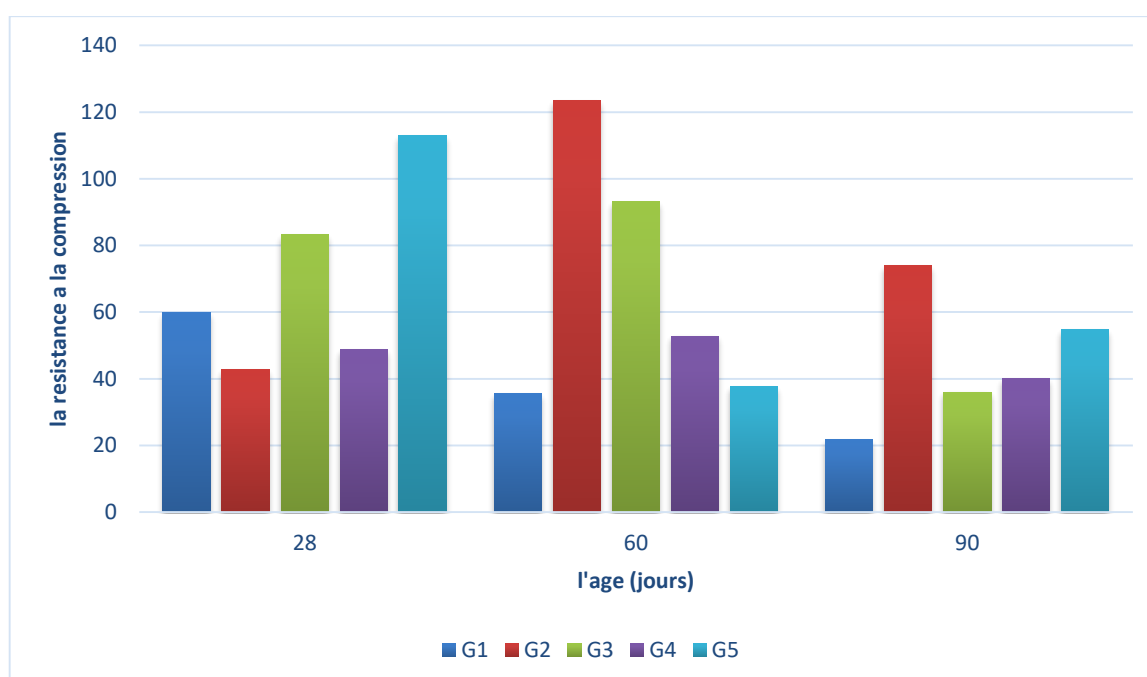
Nous remarquons que les valeurs de résistance à la compression des gâchés (G2, G3, G5) ont diminué après 60 jours, et augmenté après 90 jours.

Pour les gâchés (G1 et G4) une diminution avec le temps.

## [Chapitre 5 : Résultats et discussion]

Les gâchés	La résistance à la compression (Mpa)		
	28jours	60jours	90jours
G1	59.96	35.60	21.73
G2	42.72	123.49	73.82
G3	83.39	93.1	35.98
G4	48.72	52.84	40.1
G5	112.81	37.72	54.72

**Figure V-11** La résistance à la compression à 600 °C (carbonatation naturelle)



**Figure V-12** Evolution de la résistance à la compression des mortiers à 600 °C (carbonatation naturelle)

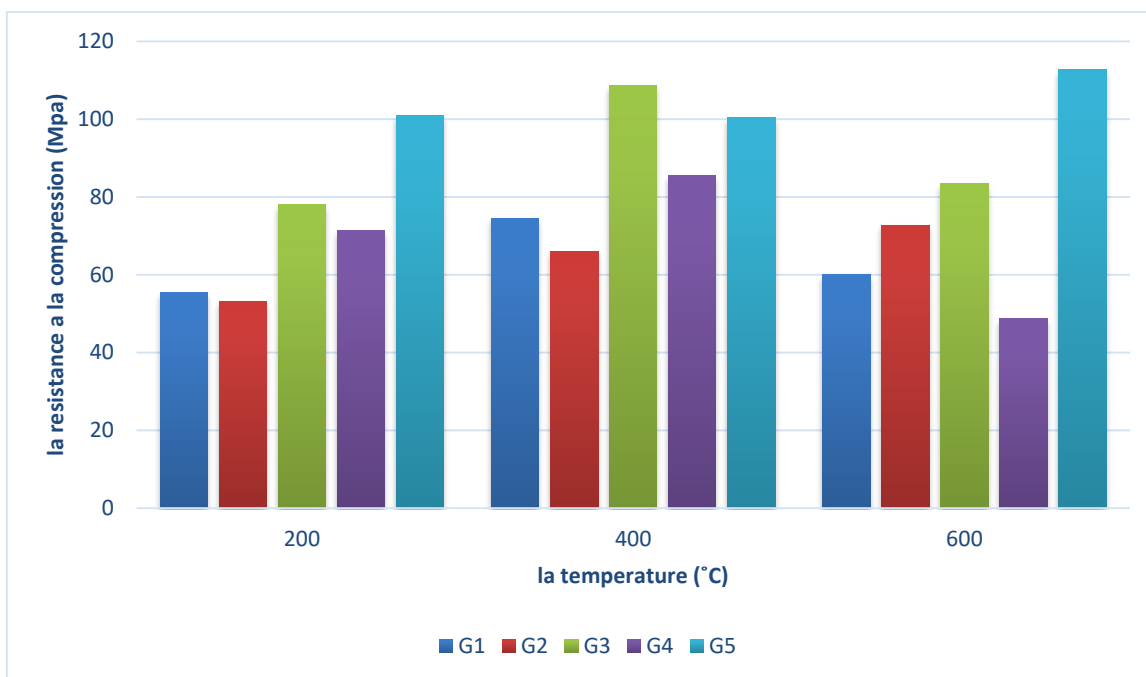
Pour les gâchés (G2, G3 et G4) ils ont atteint une valeur maximale de résistance à 60 jours.

Pour la gâché G1 la résistance a diminué avec le temps.

Pour la gâché G5 la résistance a diminué de 60% après 60jours et augmenté après 90jours.

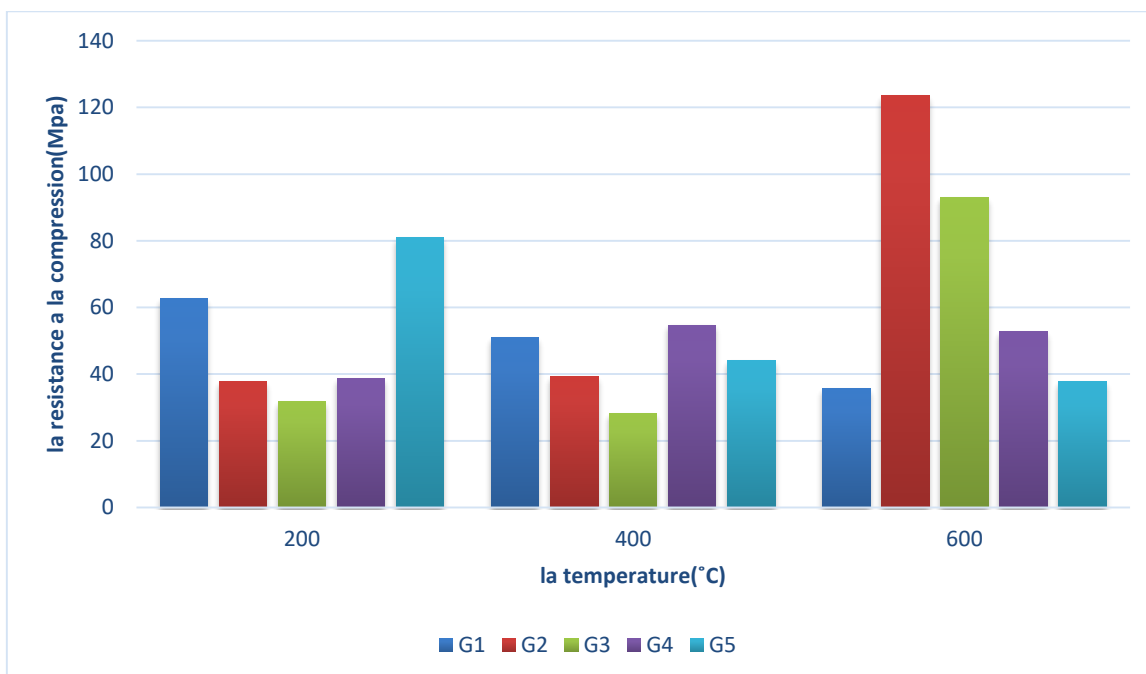
Comparant les trois figures (**Figure V-10**, **Figure V-11**, **Figure V-12**) avec la **Figure V-3** Nous ont permis de constater que la résistance à la compression augmente pour le mortier chauffé.





**Figure V-13** évolution de résistance à la compression en fonction de température (28jours)

Nous avons remarqué des pics de résistance au niveau de 400°C, indiquant que le mortier chauffé a attrapé de la résistance.



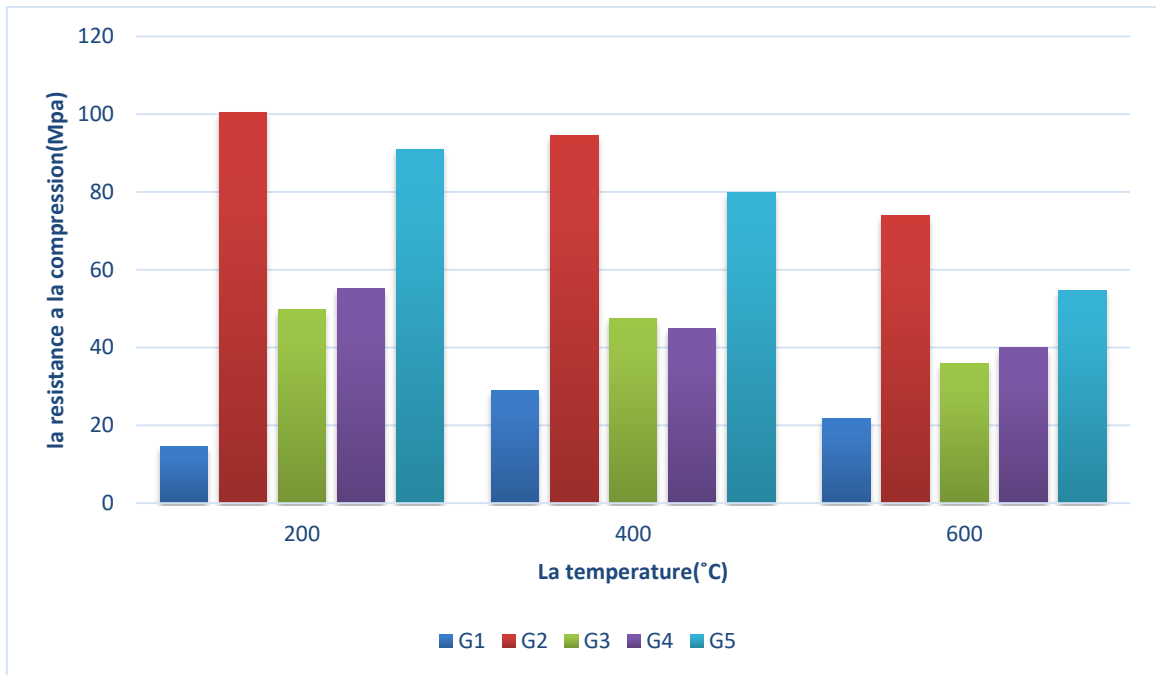
**Figure V-14** évolution de résistance à la compression en fonction de température (60jours)

## [Chapitre 5 : Résultats et discussion]

Nous remarquons une grande augmentation de la résistance à la compression a 600 °C pour les gâchés G2 et G3.

Une diminution de la résistance avec l'augmentation de la température pour les gâchés G5 et G1.

Une augmentation de la résistance pour la gâché G4.



**Figure V-15** évolution de résistance à la compression en fonction de température (90jours)

Nous remarquons un pic de résistance a 400 °C pour G1 et une diminution linéaire pour toutes les autres gâchés.

Suite aux résultats obtenus. Nous avons constaté des pics de la résistance à la compression du mortier a 400 °C. Ceci est dû à l'augmentation de la pression interne dans le béton qui peut jouer un rôle de précontrainte.

Les éprouvettes anciennes

Les gâchés	Résistance la compression (Mpa)
G1	181.02
G2	190.02
G3	210.26
G4	268.73
G5	143.54

Tableau V-10 La résistance à la compression des anciennes éprouvettes

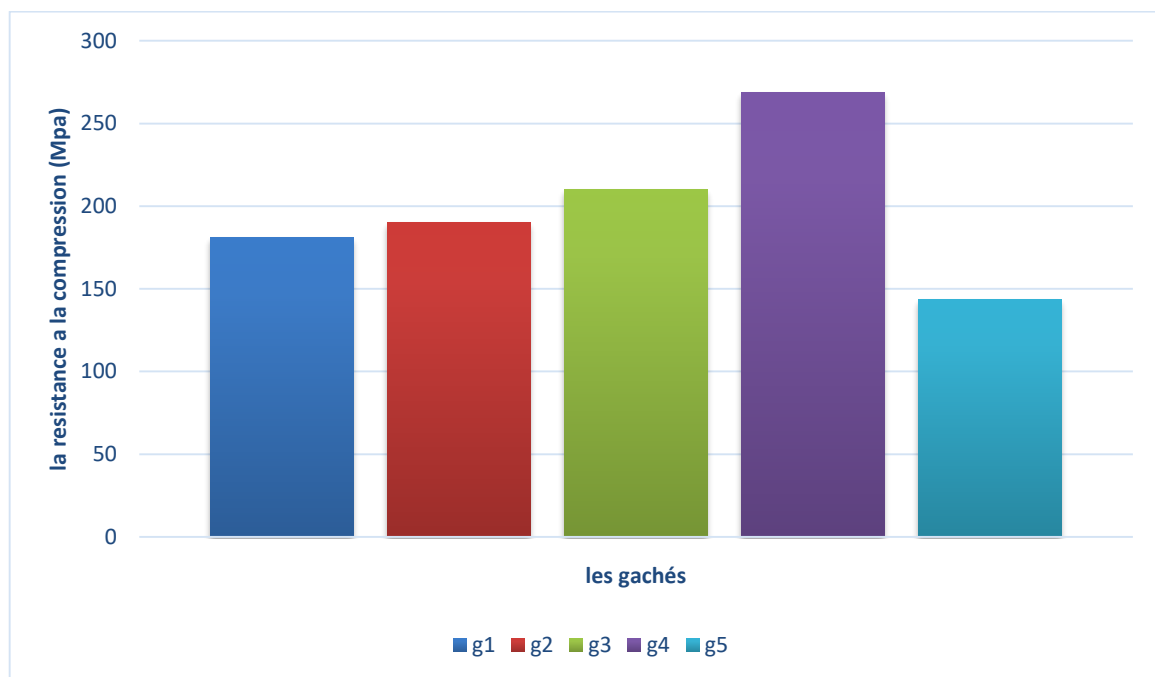


Figure V-16 Evolution de la résistance à la compression des anciennes éprouvettes

Comparant la **Figure V-16** avec la **Figure V-3** , nous remarquons une augmentation de la résistance pour toutes les gâchés.

Nous pouvons dire que la résistance en compression augmente en fonction de l'âge du matériau (12mois).

### V.2.2.5 Résultats d'essai de carbonatation.

Pour l'essai de carbonatation on a utilisé de la phénolphtaléine comme indicateur par projection sur la surface de chaque éprouvette et on a mesuré la profondeur de la carbonatation, en utilisant une règle graduée.

#### V.2.2.5.1 Essai de carbonatation naturelle

En raison de la suspension des travaux sur le laboratoire, nous n'avons pas pu faire l'essai de carbonatation pour les éprouvettes de l'âge 28jours.

1) 200 °C

Les gâchés	La profondeur de la carbonatation(cm)	
	60jours	90jours
G1	0.175	0.425
G2	0.15	0.425
G3	0.075	0.325
G4	0.25	0.675
G5	0.225	0.35

**Tableau V-11** la profondeur de la carbonatation (200 °C)



G1

G2

G3

G4

G5

**Figure V-17** carbonatation des gâchés de l'âge 60 jours



G1

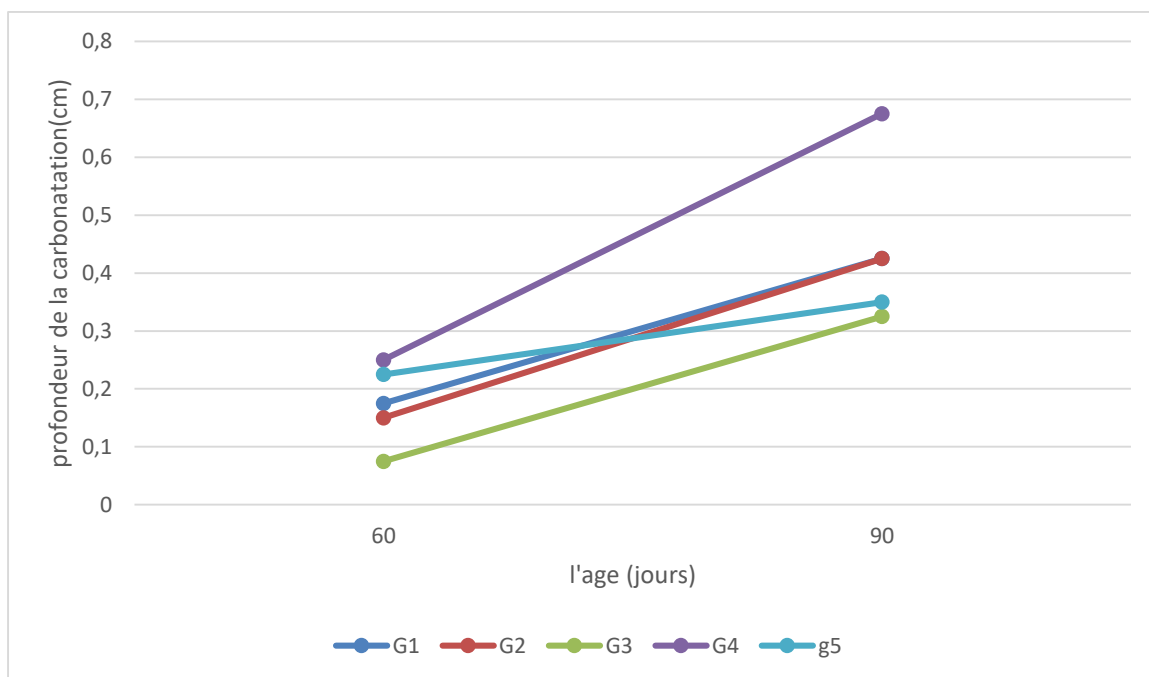
G2

G3

G4

G5

**Figure V-18** carbonatation des gâchés de l'âge 90 jours



**Figure V-19** évolution de la profondeur de la carbonatation (200 °C)

La **Figure V-19** montre une augmentation de la profondeur de la carbonatation en fonction de l'âge de mortier à 200C.

2) 400 °C

Les gâchés	La profondeur de la carbonatation(cm)	
	60jours	90jours
G1	0.6	0.05
G2	0.475	0.375
G3	0.7	0.35
G4	0.35	0.05
G5	0.325	0.075

**Tableau V-12** la profondeur de la carbonatation(400°C)

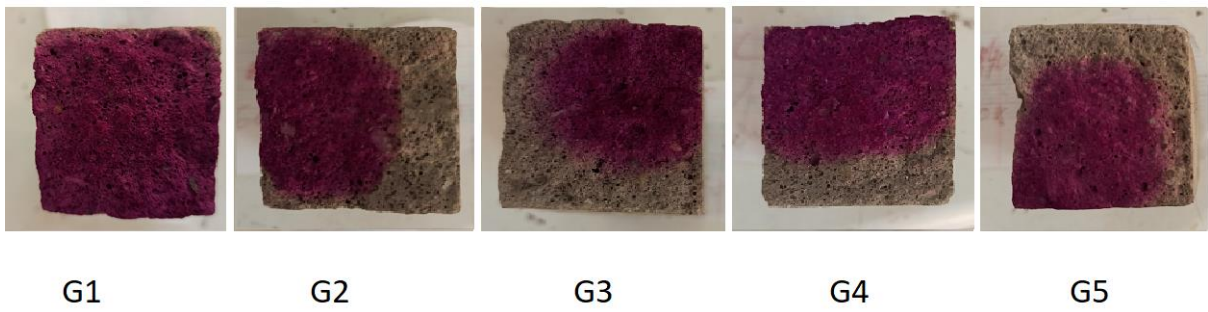


Figure V-20 carbonatation des gâchés de l'âge 60 jours

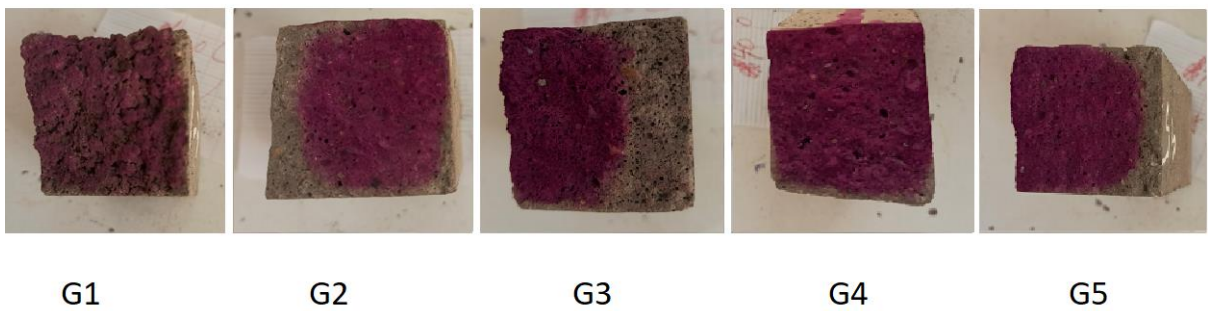


Figure V-21 carbonatation des gâchés de l'âge 90 jours

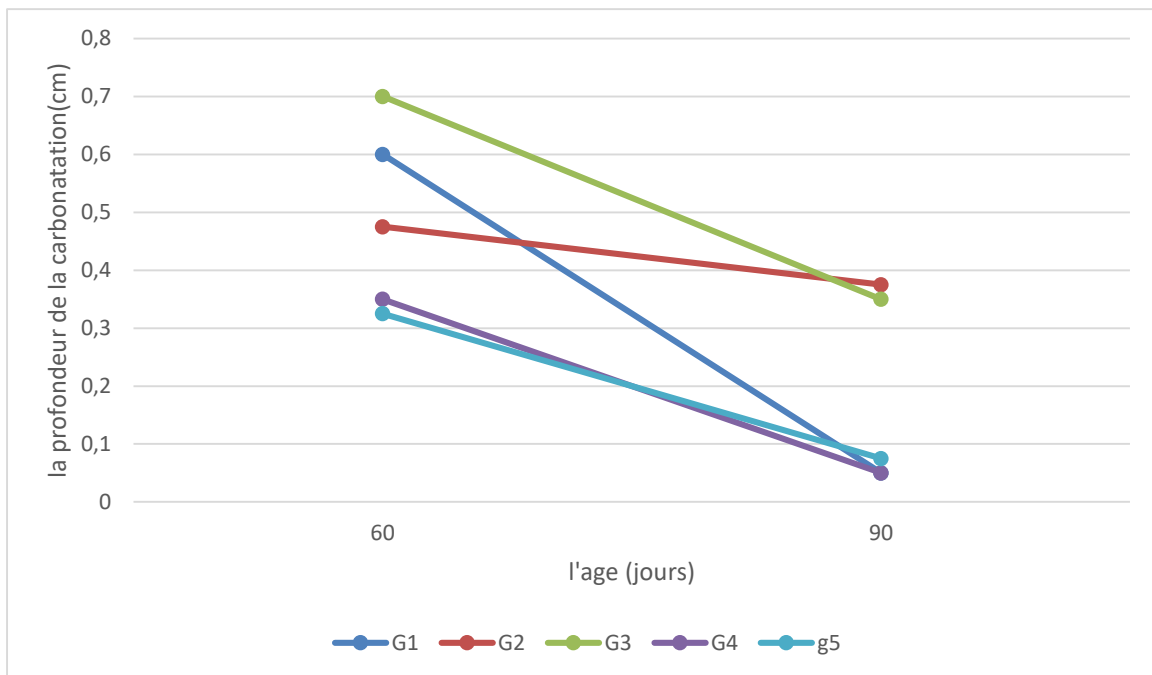


Figure V-22 évolution de la profondeur de la carbonatation(400 °C)

La Figure V-22 montre une diminution de la profondeur de la carbonatation en fonction de l'âge de mortier.

3) 600 °C

Les gâchés	La profondeur de la carbonatation(cm)	
	60jours	90jours
G1	0.7	0.6
G2	0.9	0.575
G3	0.85	0.65
G4	0.625	0.45
G5	0.525	0.35

**Tableau V-13** profondeur de la carbonatation (600°C)



G1

G2

G3

G4

G5

**Figure V-23** carbonatation des gâchés de l'âge 60 jours



G1

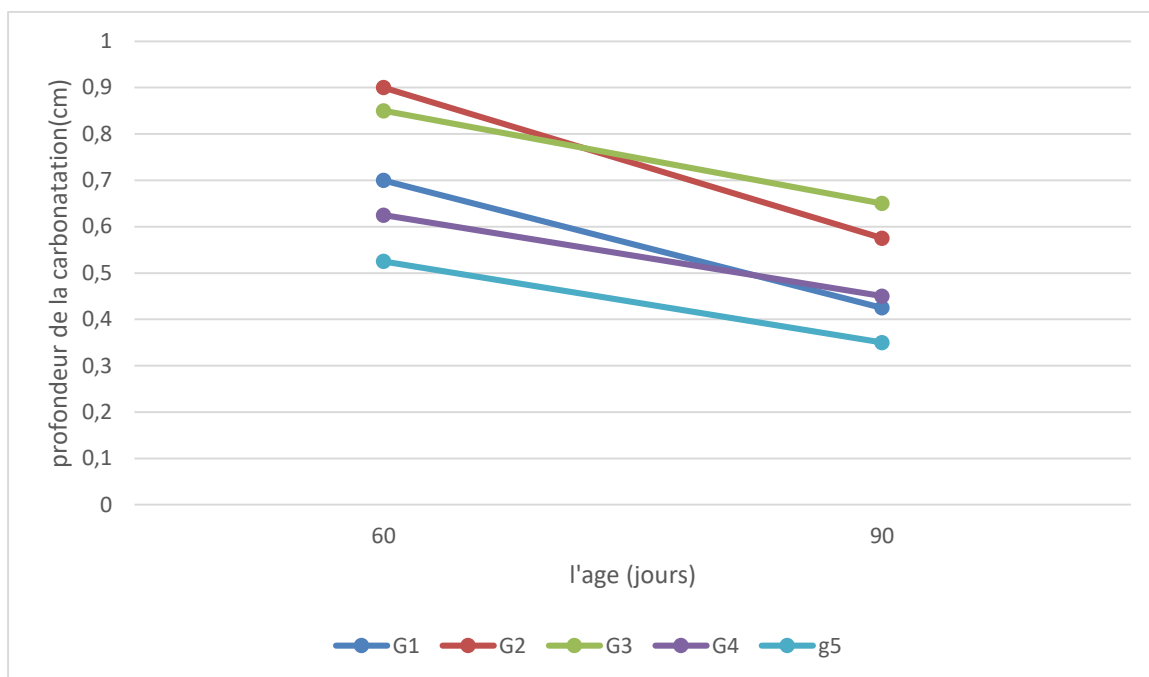
G2

G3

G4

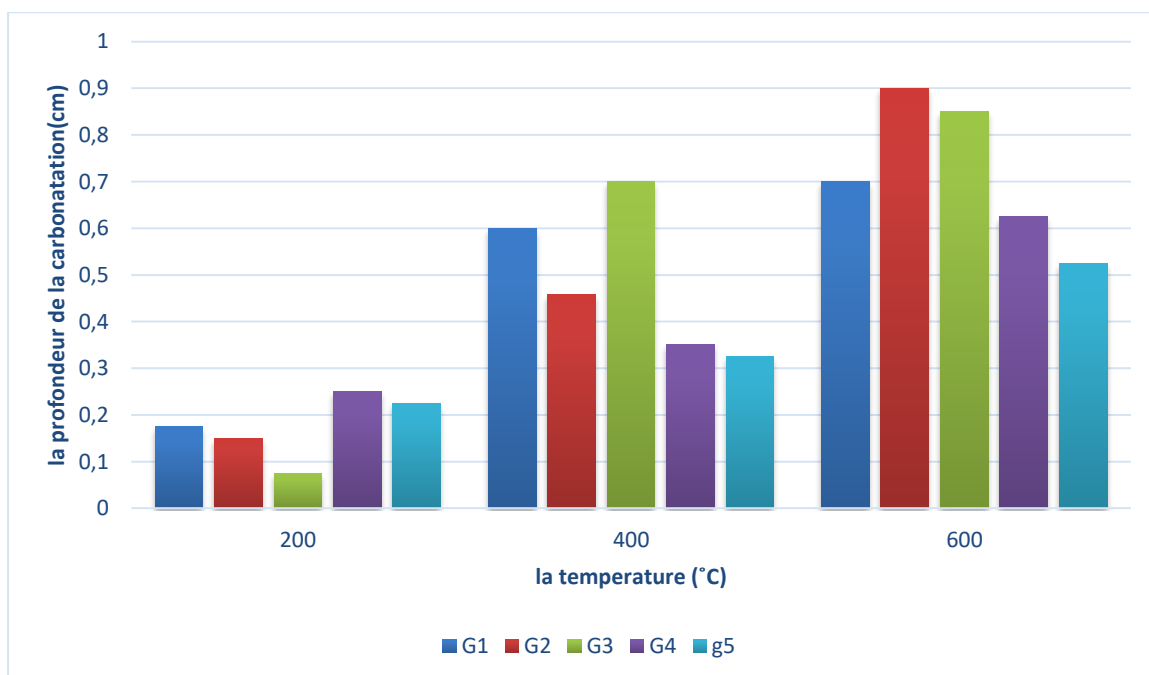
G5

**Figure V-24** carbonatation des gâchés de l'âge 90 jours



**Figure V-25** évolution de la profondeur de la carbonatation (600°C)

La **Figure V-25** montre une diminution de la profondeur de la carbonatation en fonction de l'âge de mortier.



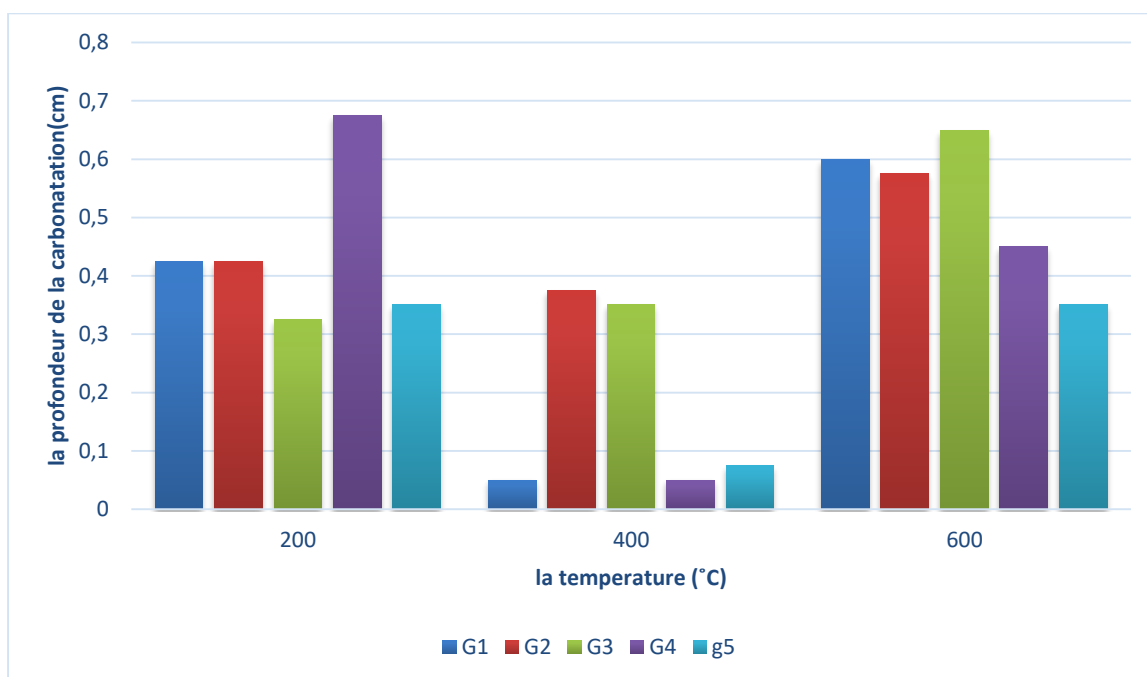
**Figure V-26** évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de température (60 jours)

Nous remarquons une augmentation de profondeur de carbonatation pour toutes les gâchés en valeur de la température.

La profondeur de la carbonatation augmente en fonction de température à l'âge de 60 jours.



La gâché G5 donne la meilleure résistance à la carbonatation.



**Figure V-27** évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de température (90jours)

Nous remarquons une diminution de profondeur de carbonatation a 400 °C pour toutes le gâchés, et une augmentation a 600 °C.

Comparant les figures (**Figure V-26** et **Figure V-27**) avec les figures (**Figure V-14** et **Figure V-15**) nous remarquons que la profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression s'accroît.

- **Carbonatation des éprouvettes anciennes**

Les gâchés	La profondeur de la carbonatation (cm)
G1	0.0375
G2	0,4625
G3	0.3375
G4	0.2
G5	0.1375

**Tableau V-14** profondeur de la carbonatation des anciennes éprouvettes

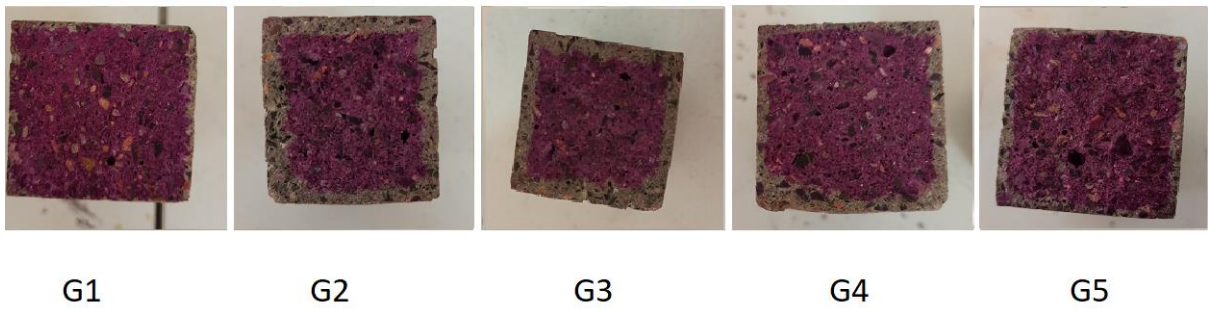


Figure V-28 carbonatation des anciennes gâchés

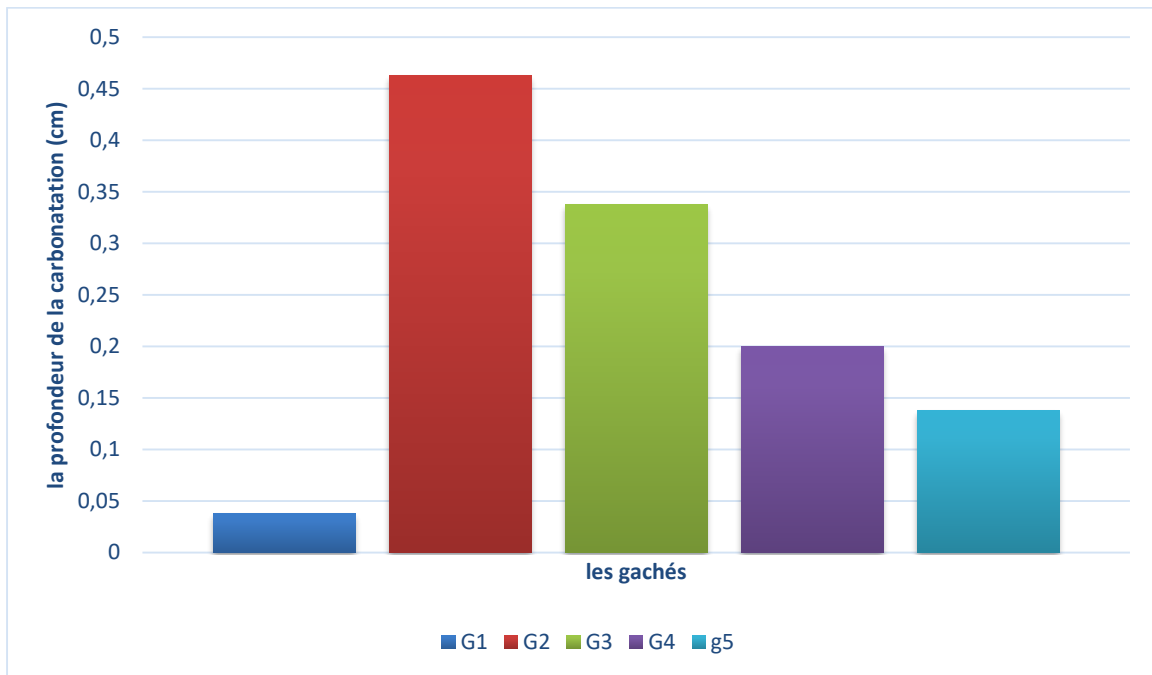


Figure V-29 profondeur de la carbonatation des anciennes éprouvettes

#### V.2.2.5.2 Essai de carbonatation accéléré

En raison du manque de temps et la suspension des travaux sur le laboratoire, nous avons annulé l'essai de carbonatation accélère.

### V.3 Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est de comparer les Cinq types de mortier à base de pouzzolane ou la poudre de marbre, en variant le taux d'ajout de la pouzzolane et de la poudre de marbre et celle de l'adjuvant avec un mortier témoin sans ajout a été réalisée. Les résultats de cette étude nous ont permis de constater que :

- La présence de la pouzzolane avec adjuvant a augmenté la résistance à la compression du mortier.
- La présence de la pouzzolane diminue la profondeur de la carbonatation
- Nous avons constaté aussi que de la poudre de marbre avec adjuvant a fait grimper la résistance à la compression. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir de la combinaison des deux ajouts : la pouzzolane et la poudre de marbre.
- Plus la résistance augmente plus la profondeur de carbonatation est faible.
- Plus la température augmente plus la profondeur de carbonatation est forte.

### **VI.Conclusion générale**

Ce travail est porté essentiellement sur l'étude de l'influence de la température sur la carbonatation des mortiers à base de pouzzolane et de la poudre de marbre qui peuvent être des ajouts additionnés dans les matériaux cimentaires de construction. Alors, dès le début de ce travail de recherche, nous avons étudié l'influence de ces deux ajouts sur les comportements physique et mécanique des mortiers ordinaires. Pour enrichir cette étude et bien comprendre le comportement mécanique et physique des mortiers nous avons fait plusieurs formulations avec différents rapports de E/L et nous les avons exposés à la carbonatation naturelle, et calculer la profondeur de la carbonatation.

La campagne expérimentale consiste à réaliser un essai capable de caractériser le phénomène de la carbonatation. Les essais ont été réalisés sur les éprouvettes en mortier (4x4x16 cm<sup>3</sup>). A partir de cette étude expérimentale, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- La présence de la pouzzolane avec adjuvant a augmenté la résistance à la compression du mortier.
- Nous avons constaté aussi que de la poudre de marbre avec adjuvant a fait grimper la résistance à la compression. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir de la combinaison des deux ajouts : la pouzzolane et la poudre de marbre.
- L'ajout de pouzzolane et poudre de marbre donne des avantages et améliore les caractéristiques mécaniques des mortiers.
- Plus la résistance augmente plus la profondeur de carbonatation est faible.

## [Chapitre 5 : Résultats et discussion]

---

- 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 CO<sub>2</sub> dans le réseau poral.
- Pour limiter l'effet de la carbonatation il faut tout simplement construire un bon béton

Enfin ce travail nous a permis de mieux comprendre ce domaine de construction, accéder aux différents laboratoires manipuler des appareils et des matériaux et de mettre en valeur tout ce que nous avons appris durant notre parcours d'étude.

## VII. Bibliographie

1. Gunning, J.G. *concrete technology*. 1983.
2. Benkali, Sarah. *caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction* Thèse de magistère. université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou : s.n.
3. DREUX, J. FESTA. *Nouveau guide du béton*. s.l. : ÉditionEyrolles, 1997.
4. HAFFAF Ikram, LAMOURI Oum El Kheir. *Etude de la résistance des mortiers*. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen : s.n., 2019.
5. Sadok, Dr Hadj. *Cour Chapitre II ; Le ciment Portland*. 2011.
6. ABDO, Joseph. Ciment. *techniques-ingenieur*. [En ligne] 2008.
7. DAMECHE Ouafa, BEKKOUCHE Zahra. *Caractérisation des bétons ordinaires utilisés dans les chantiers de la ville d'Annaba : influence de la nature des sables utilisés*. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA : s.n., 2019.
8. infociments.fr. [En ligne]
9. Larrard, François de. *Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux*. Paris : Edition Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
10. Boudissa Karim, Hanafi Wissam. *Effet de la carbonatation sur les mortiers à base de la pouzzolane et la poudre de marbre*. s.l. : Centre universitaire Ain Temouchent, 2019.
11. Venuat, M. *Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers*. s.l. : Collection Moniteur, 1989.
12. Adel abderrahmane, Keddou adel. *Etude de la durabilité d'un béton léger renforcé par des fibres*. Centre Universitaire Ain Temouchent : s.n., 2016.
13. CHERIF, BENDADA MOHAMMED. *INFLUENCE DES ACCELERATEURS DE PRISE ET DURCISSEMENT*. UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI : s.n., 2013.
14. Bensaad Ibrahim, Benazzouz Abdessamie. *Etude de la durabilité des bétons léger fibrés à base des granulats pouzzolaniques sous l'effet de la température*. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent : s.n., 2017.
15. ZENAGUI Zahra, BENYOUCEF Hadjer. *Fabrication des agglomérés des bétons légers avec la pouzzolane concassée*. Université de TLEMEN : s.n., 2012.
16. IDDER Abdelkader, LEBKIRI Seif Eddine. *Influence des additions minérales sur le comportement mécanique d'un micro-béton à base de résine polyester*. université Badji Mokhtar Annaba : s.n., 2019.
17. Souleymane, ABDOUL KADER BABAYI BACHIR. *L'influence de la poudre de verre sur le comportement physique et mécanique des mortiers ordinaires*. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent : s.n., 2019.

18. BOUALLA, Nabila. *Etude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico- chimiques des ciments*. Université des sciences et de la technologie d'Oran : s.n., 2011.
19. Oualid, GUIDOUM Abderrahmen et FARHET. *Influence de la nature du sable sur les propriétés physicomécaniques d'un béton ordinaire*. BADJI MOKHTAR UNIVERSITY- ANNABA : s.n., 2019.
20. HAMZA, BOUAZIZ MOHAMED. *Formulation d'un BAP : influence du rapport G/S et de la fibre de palmier dattier de 30 mm de longueur*. Université d'Annaba : s.n., 2019.
21. FATMI Narimane, TOLBA Asmaa. *Recherche bibliographique et étude expérimentale sur la diffusion des ions chlorure dans le béton pouzzolanique sous l'effet de la température*. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent : s.n., 2019.
22. AYACHE Brahim, RAHAL Ilyes, BENMANSOUR Walid. *CARACTERISATION DES DIFFERENTS TYPES DE*. Université Annaba : s.n., 2019.
23. KOUIDI BOUCHRA, ZEKRI SAFA. *Formulation et comportement physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé*. Université Annaba : s.n., 2019.
24. Hamadi Sonia, Chouf Warda, Ahmed Malek Aicha. *Effet De La Nature Des Fillers Recycles Sur Les Propriétés Physicomécaniques*. Université Badji Mokhtar – Annaba : s.n., 2019.
25. Lammari Yacine, Houmeur Mouaadh Et-Tayib. *Pathologie des bétons des stations d'épuration*. l'Université 08 Mai 1945 de Guelma : s.n., 2018.
26. hocine, Boudjehem. *Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives*. l'Université 08 Mai 1945 de Guelma : s.n., 2018.
27. Boubaker OUAREKH. *Recherche bibliographiques sur l'effet de la carbonatation sur la durabilité des bétons*. Université Mohamed khider – Biskra : s.n., 2018.
28. CHABIL, Fatima-Zohra DAKHMOUCHE. *CARBONATATION DE BETONS ADJUVANTES A BASE DE RESSOURCES LOCALES ALGERIENNES*. l'université d'Orléans, l'Université Mentouri de Constantine : s.n., 2009.
29. VU, Ngoc Tru. *Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste*. l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse : s.n., 2011.
30. Ait-Mokhtar. *Durabilité des matériaux, Transfert d'agents agressifs dans les matériaux*. s.l. : Habilitation à diriger des recherches en sciences, 2002.
31. Thierry.M. *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurelles et hydriques*. Paris : s.n., 2005.
32. Richardson I. G, Groves G. W., Brough A. R. and Dobson C. M. *the carbonation of OPC and OPC/silica fume hardened cement pastes in air under conditons of fixed humidity , advances in cement research*. 1993.
33. X, Brunetaud. *Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton*. Ecole Centrale des Arts et Manufactures – Ecole Centrale de Paris : s.n., 2005.

34. Rabehi, Mohamed. *Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire*. Université Mohamed Khider – Biskra : s.n., 2014.
35. M, Delmi. *Etude de l'hydratation et du couplage carbonatation-échanges hydriques dans les mortiers et bétons*. Université de la Rochelle : s.n., 2004.
36. V., Baroghel-Bouny. *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances*. école nationale des ponts et chaussées, France : s.n., 1994.
37. J.-P. BALAYSSAC, CH.-H. DETRICHE, J. GRANDET. *influence de la cure humide sur les caractéristiques du béton de peau*. 1998.
38. Muller A, Siickert G. *Modelisation of the carbonation resistance of concrete on the basis of its capillarity and microstructure*. s.l. : Betonwerk+Fertigteil-technik, n°11, pp.70-88;.
39. M, Venuat. *La commission technique 16-C « Carbonatation »*. s.l. : Mat. Constr ;.
40. Ounoughi V., Baroghel Bouny V., Gawsewitch J., Chaussadent T. et Croquette G. *Influence du rapport eau/ciment, du type de ciment et de la microstructure sur la carbonatation des bétons*. Bordeaux –CETE du sud – ouest : s.n., 2000.
41. M. Venuat, J. Alexandre. *De la carbonatation du béton –Partie II Revue des matériaux de construction*.
42. Ho.D.W.S, Lewis.R.K. *Carbonation of Concrete and prediction*. 1987 : s.n. cem, concr. Res;17,489-504;.
43. Y, Kobayashi K. and Uno. «*Influence of alkali on carbonation of concrete*». *Part I, preliminary tests with mortar specimens*. *Cement and Concrete Research*. 1990.
44. B, Skenderovic. *Effects of some additives on dynamics of carbonation of concrete* . New Delhi : 9th Int COng. Chem. Cement, 1992.
45. Malami C., Kaloidas V., Baris G. and Kouloumbi N. *carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures, cement and concrete research* . 1994.
46. Papadakis V. G., Fardis M. N. and Vayenas C. G. *effect of composition environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation, Materials and Structures*. 1992.
47. CHAUSSADENT, Thierry. *etat des liex et reflexions sur la carbonatation du béton armé* .
48. YOUNSI, Akli. *Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales*. Université de La Rochelle : s.n., 2011.
49. LEKDIM, Fatima. *ETUDE DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS ARMÉS CONFECTIONNÉS À PARTIR DES SABLES DE CONCASSAGE*. Université de Bejaia : s.n., 2011.
50. M., Thiery. *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurelles et hydriques* . Paris : s.n., 2005.
51. Powers, T.C. *A Hypothesis on Carbonation Shrinkage*. s.l. : ournal of the PCA Research and, 1962.

52. *Reaction of blended Portland Cement Paste with Carbon Dioxide*. C.M. Hunt, L.A. Tomes. s.l. : Journal of research of the National Bureau of Standards.
53. *Some ageing characteristics of lime*. E.G. Swenson, P.J. Sereda. s.l. : Journal of Applied Chemistry, 1967.
54. VU, Ngoc Tru. *Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste*. Université de Toulouse : s.n., 2011.
55. I, Medgyesi. *Nouveaux résultats dans la protection contre la corrosion*. s.l. : 10th Triennial Congress of the International Council for Building Research (USA), 1986.
56. <https://www.tuf-bar.com/exploring-alternative-materials-to-reduce-corrosion-of-steel-reinforcement/>. [En ligne]
57. BENSALIR, Soumaya Amina. *Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs*. Université de Mascara : s.n., 2010.
58. MEHENA, OUALIT. *Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien*. Université M'hamed Bougara Boumerdes : s.n., 2009.
59. BENYOUB Akila, BENZAIYOU Abir. *Etude de la durabilité et réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*. l'Université de Guelma : s.n., 2016.
60. MAI-NHU, Jonathan. *Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques*. l'Université Toulouse III - Paul Sabatier : s.n., 2013.
61. HASSEN, SABEUR. *ETUDE DU COMPORTEMENT DU BETON A HAUTES TEMPERATURES UNE NOUVELLE APPROCHE THERMO-HYGRO-MECANIQUE COUPLEE POUR LA MODELISATION DU FLUAGE THERMIQUE TRANSITOIRE*. UNIVERSITE DE MARNE LA VALLEE : s.n., 2006.
62. GUERBAS NABIL, ATTALLAH OQBA. *Etude de l'effet des températures élevées sur les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant renforcé par des fibres métalliques*. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA : s.n., 2017.
63. A, Noumowe. *Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton - Cas particulier du*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ. Lyon I : s.n., 1995.
64. Pont, Stefano Dal. *Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température*. Ecole nationale des ponts et chaussées (LAMI), France : s.n., 2004.
65. Abdelghani, Belarouci. *INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE TRANSFERT DES IONS CHLORES DANS LES BÉTONS*. UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID - TLEMEN : s.n., 2011.
66. Hager, I. Gaweska. *Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris : s.n., 2004.
67. Kameche Zine El Abidine, Semcha Abdelaziz, Fatiha Kazi Aoual, M. Belhadji. *EFFETS DES HAUTES TEMPÉRATURES SUR LE COMPORTEMENT DU BÉTON: APPLICATION AU REVÊTEMENT DES TUNNELS*. Abou Bakr Belkaid University of Tlemcen : s.n., 2009.



68. Fatiha Benslafa-Kazi Aoual, Abdelaziz Semcha, Zine El Adine Kameche. *EFFETS DE L'ELEVATION DE LA TEMPERATURE SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU BETON*. Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET Oran) : s.n.
69. Peng Liu, Ying Chen, Zhiwu Yu, Rongling Zhang. Effect of Temperature on Concrete Carbonation Performance. 2019.
70. TSHIMANGA, KANEMA. *Influence des paramètres de formulation sur le*. l'université de Cergy-Pontoise : s.n., 2007.
71. Martin Jooss, Hans W. Reinhardt. Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature. *Cement and Concrete Research*. 2002.
72. M., Tsimbrovska. *Dégradation des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées. Evolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure*. Université Grenoble : s.n., 1998.
73. T, Chaussadent. *Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé*. 1999.
74. Dheilly R M., Tudo J., Sebai Y. and Queneudec M. *Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca (OH)<sub>2</sub>*. s.l. : Construction and Building Materials, 2002.
75. Emeline, Drouet. *impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires prise en compte des transferts hydriques*. l'école normale supérieur de cachan : s.n., 2010.
76. Ying Chen, Peng Liu, Zhiwu Yu. *Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength*. School of Civil Engineering, Central South University China : s.n., 2018.
77. Qingtao LI, Zhuguo LI. *INVESTIGATION ON THE CARBONATION RESISTANCE AND RECOVERY OF THE CONCRETE EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE*. 2009.
78. J. Baron, J.P. ollivier et J.C. Weiss. *Les bétons, bases et données pour leur formulation*. s.l. : Edition Eyrolles, Troisième tirage, 1999.
79. Mounsif, Drissi. *Comportement des bétons : expérimentation et modélisation des paramètres technologiques influant les propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques des bétons frais et durcis these de Doctorat*. Université Mohamed Khider – Biskra : s.n., 2018.
80. DUPAIN. R, LANCHON. R, SAINT-ARROMAN. J-C. *Granulat, sols, ciment et béton*. Paris : Edition CASTEILLA, 2004.
81. Mounsif, Drissi. *Comportement des bétons : expérimentation et modélisation des paramètres technologiques influant les propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques des bétons frais et durcis*. Université Mohamed Khider – Biskra : s.n., 2018.
82. ZAKARYA, BOUKLI HACENE. *ETUDE DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS A BASE D'ADDITIONS MINERALES ET ORGANIQUES*. UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEM : s.n., 2017.

83. Tarek, Abassi. *INFLUENCE DES ADDITIONS LOCALES POUR L'AMELIORATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES BETONS A JEUNES AGES*. UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL-BOUAGHI : s.n., 2013.